

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

RAFAEL GARBELINI LORENA

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO  
HÍBRIDO COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL ATRAVÉS DE UM MODELO  
NUMÉRICO UTILIZANDO ADVISOR**

CURITIBA  
2021

RAFAEL GARBELINI LORENA

**ESTUDO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO  
HÍBRIDO COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL ATRAVÉS DE UM MODELO  
NUMÉRICO UTILIZANDO ADVISOR**

Projeto de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Geração e Transferência de Tecnologia, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Kazumi Yamakawa

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

L868e Lorena, Rafael Garbelini  
Estudo e avaliação do desempenho de um veículo elétrico híbrido com células a combustível através de um modelo numérico utilizando advisor [recurso eletrônico] / Rafael Garbelini Lorena. – Curitiba, 2021.

Dissertação - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, 2021.

Orientador: Eduardo Kazumi Yamakawa.

1. Veículos elétricos. 2. Veículos elétricos híbridos. 3. Células de combustível. I. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. II. Instituto de Engenharia do Paraná. III. Yamakawa, Eduardo Kazumi. IV. Título.

CDD: 629.2293

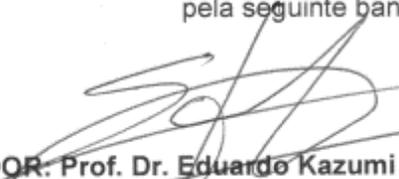
Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928

## TERMO DE APROVAÇÃO

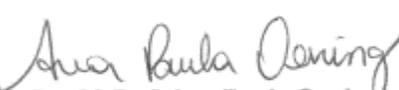
**RAFAEL GARBELINI LORENA**

### **ESTUDO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO COM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL ATRAVÉS DE UM MODELO NUMÉRICO HIPOTÉTICO UTILIZANDO ADVISOR**

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:



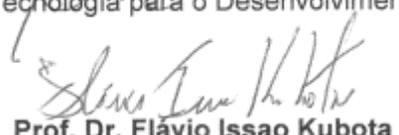
**ORIENTADOR: Prof. Dr. Eduardo Kazumi Yamakawa**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



**Prof.ª Dr.ª Ana Paula Oening**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



**Prof. Dr. Henry Leonardo Lopez Salamanca**  
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



**Prof. Dr. Flávio Issao Kubota**  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 05 de março de 2021.

À minha família, minha noiva e meus amigos.



## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente à Deus.

Ao meu pai Olavo, minha mãe Marcia e meu irmão Diego, pelo amor e incentivo diário. Em especial à minha noiva Rafaela, por todo o suporte, paciência e dedicação ao longo desta jornada.

Ao meu orientador Prof. Eduardo Kazumi Yamakawa, que acreditou e aceitou o desafio desde as primeiras conversas, auxiliando no desenvolvimento do trabalho.

A todo o corpo docente do mestrado profissional LACTEC, que contribuíram em minha formação e capacitação.

Aos amigos que o mestrado me deu, em especial à “turma do fundão”, Bruno, Igor, Davi, Matheus, Oscar, André e Leandro.

## RESUMO

A pesquisa por soluções alternativas que auxiliem na propulsão, conversão e armazenamento de energia em aplicações veiculares, vem se tornando o foco de muitas instituições e principalmente da indústria automotiva, na busca por reduzir os impactos causados pela emissão de gases na linha de escape e melhorar a eficiência energética veicular. Os veículos elétricos já são realidade nos dias atuais e vem ao encontro com a necessidade de construir uma sociedade menos poluente. As células a combustível têm importante papel neste cenário de médio e longo prazo, como fonte de energia para alimentar o sistema de armazenamento de carga, bem como o sistema propulsor veicular. Neste trabalho foi proposto construir um modelo numérico com o auxílio do software ADVISOR em ambiente Matlab, representando o veículo Hyundai Nexu, um SUV de porte médio, equipado com sistema propulsor elétrico e alimentado por um conjunto de célula a combustível. Como resultados principais pode-se agrupar os conhecimentos sobre veículos elétricos híbridos, quanto aos principais componentes que compõem sua arquitetura, características construtivas e operacionais, bem como avaliar o modelo numérico proposto, comparando os resultados simulados, em termos de desempenho veicular e eficiência energética com os valores oficiais declarados pela Hyundai para os ciclos de condução urbano UDDS e em autoestrada HWFET. Ao final do trabalho um estudo paramétrico é proposto, afim de se compreender os impactos da variação das características veiculares associadas à massa operacional, coeficiente de arrasto aerodinâmico e carga elétrica no sistema auxiliar, nos resultados finais do modelo proposto.

**Palavras-chave:** Veículos elétricos. Veículos elétricos híbridos. Células a combustível  
numérica. ADVISOR Simulação

## ABSTRACT

The research for alternative solutions to assist the propulsion, fuel converters and energy storage systems (ESS) in vehicular applications, has become the focus of many institutions and mainly in the automotive industry, aiming to reduce the impacts caused by the emission of gases in the exhaust pipe and to improve energy efficiency in the worldwide vehicle fleet. Electric vehicles are already a reality now a days and meet this requirement to build a greener and less polluting society. Fuel cells play an important role in this medium- and long-term scenario, as a primary load source to power the ESS, as well as the powertrain system. In this work was proposed to build a numerical model aided by ADVISOR software in Matlab environment, based on current production model Hyundai Nexo, a medium-sized SUV, with an electric powertrain system powered by fuel cell stack. As main results, it is possible to group the knowledge about hybrid electric vehicles, its main components and systems concerning the constructive characteristics as well operational principles. Also, the proposed numerical model has been evaluated, comparing the simulation results in terms of vehicle performance and energy efficiency with the official values declared by Hyundai for urban driving cycle UDDS and highway driving cycle HWFET. At the end, a parametric study was conducted aiming to understand the impacts of the variation to main vehicle characteristics regarding with operational mass, aerodynamic drag coefficient and electric power in the auxiliary system.

**Keywords:** Electric vehicles. Hybrid electric vehicles. Fuel cells. Numerical simulations. ADVISOR

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Tipos de veículos e classificação dos sistemas propulsores.....	18
Figura 2	Curva de penetração de veículos híbridos e elétricos na frota nacional.....	19
Figura 3	Conceito de um propulsor híbrido.....	23
Figura 4	Arquitetura Veículo Híbrido Elétrico: a) Série, b) Paralelo e c) Série-Paralelo.....	25
Figura 5	Classificação dos veículos quanto ao tipo de propulsão.....	26
Figura 6	Níveis de hibridização ao longo do tempo.....	27
Figura 7	Conceito geral de um veículo elétrico.....	28
Figura 8	Configuração simplificada de um VEB.....	30
Figura 9	Configuração simplificada de um VECC.....	31
Figura 10	Configuração simplificada de um VEHCC.....	32
Figura 11	Estratégia de propulsão e diversidade energética.....	33
Figura 12	Tipos de motores elétricos.....	35
Figura 13	Motor CC de ímã permanente sem escova, esquema construtivo.....	36
Figura 14	Motor CC de ímã permanente sem escovas.....	37
Figura 15	Característica de torque e potência de um ME e MCI.....	38
Figura 16	Unidade de controle veicular Bosch.....	39
Figura 17	Características das baterias recarregáveis e célula a combustível à hidrogênio.....	43
Figura 18	Curvas de sensibilidade do custo e autonomia dos veículos de médio porte.....	43
Figura 19	Potência e energia específica de ultra capacitores e baterias.....	45
Figura 20	Princípio básico de operação de uma célula unitária.....	47
Figura 21	Conjunto de célula a combustível planar.....	48
Figura 22	Conjunto de célula a combustível tubular.....	48
Figura 23	Conjunto de célula a combustível hidrogênio-ar e componentes auxiliares.....	49

Figura 24	Representação esquemática de uma PEMFCs.....	51
Figura 25	(a) Dependência da tensão da célula com a temperatura e (b) eficiência reversível.....	60
Figura 26	Perdas irreversíveis presentes no desempenho real de uma célula..	61
Figura 27	ADVISOR GUI dados de entrada.....	68
Figura 28	ADVISOR GUI parâmetros de simulação.....	68
Figura 29	ADVISOR GUI Resultados.....	69
Figura 30	Configuração simplificada do modelo veicular.....	71
Figura 31	Fluxograma da simulação numérica.....	73
Figura 32	Fluxograma simulação inversa no ADVISOR.....	74
Figura 33	Diagrama de blocos geral do modelo no ADVISOR.....	75
Figura 34	Diagrama de equilíbrio de forças num veículo em rampa.....	76
Figura 35	Diagrama de blocos do veículo.....	78
Figura 36	Diagrama de blocos do motor elétrico.....	78
Figura 37	Diagrama de blocos do conversor de combustível.....	79
Figura 38	Diagrama de blocos do sistema de armazenamento de energia.....	79
Figura 39	M-Files que compõem o modelo numérico.....	83
Figura 40	Alteração dos parâmetros de entrada na interface GUI.....	84
Figura 41	Ciclo UDDS.....	86
Figura 42	Ciclo HWFET.....	86
Figura 43	Escolha das variáveis para o estudo paramétrico.....	90
Figura 44	Demanda máxima de energia dos sistemas auxiliares em W.....	90
Figura 45	Resultado da simulação para o ciclo UDDS.....	92
Figura 46	Resultado da simulação para o ciclo HWFET.....	93
Figura 47	Resultados do teste de aceleração, velocidade máxima e aclave.....	94
Figura 48	Resultado de consumo e emissões ciclo HWFET.....	95

Figura 49	Pontos de operação do motor elétrico para o ciclo HWFET.....	96
Figura 50	Eficiência operacional do motor elétrico no ciclo HWFET.....	97
Figura 51	Pontos de operação da célula a combustível no ciclo HWFET.....	97
Figura 52	Histórico do SOC durante o ciclo HWFET.....	98
Figura 53	Eficiência operacional do ESS durante carregamento e descarregamento, ciclo HWFET.....	99
Figura 54	Balço energético dos componentes no ciclo HWFET.....	100
Figura 55	Energia consumida pelo ciclo HWFET no modo de potência.....	101
Figura 56	Energia consumida pelo ciclo HWFET no modo de regeneração.....	101
Figura 57	Resultado de consumo e emissões ciclo UDDS.....	102
Figura 58	Pontos de operação do motor elétrico para o ciclo UDDS.....	103
Figura 59	Eficiência operacional do motor elétrico no ciclo UDDS.....	103
Figura 60	Pontos de operação da célula a combustível no ciclo UDDS.....	104
Figura 61	Histórico do SOC durante o ciclo UDDS.....	105
Figura 62	Eficiência operacional do ESS durante carregamento e descarregamento, ciclo UDDS.....	106
Figura 63	Balço energético dos componentes no ciclo UDDS.....	107
Figura 64	Energia consumida pelo ciclo UDDS no modo de potência.....	108
Figura 65	Energia consumida pelo ciclo UDDS no modo de regeneração.....	108
Figura 66	Energia consumida pelos ciclos UDDS e HWFET no modo de potência.....	110
Figura 67	Energia consumida pelos ciclos UDDS e HWFET no modo regenerativo.....	110
Figura 68	Aceleração 0 a 60 mph (segundos).....	112
Figura 69	Distância máxima percorrida durante 5 segundos (pés).....	113
Figura 70	Desempenho em active percentual a 55 mph (%).....	114
Figura 71	Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe ciclo HWFET.....	115
Figura 72	Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe, plano cartesiano veh_mass vs veh_CD, ciclo HWFET.....	116

Figura 73	Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe, plano cartesiano acc_elec_pwr vs veh_CD, ciclo HWFET.....	117
Figura 74	Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe ciclo UDDS.....	118
Figura 75	Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe, plano cartesiano veh_mass vs veh_CD, ciclo UDDS.....	119
Figura 76	Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe, plano cartesiano acc_elec_pwr vs veh_CD, ciclo UDDS.....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Eficiência energética veículos automotores leves INMETRO.....	22
Tabela 2	Tipos de baterias e suas características.....	41
Tabela 3	Dados operacionais dos sistemas de célula a combustível.....	50
Tabela 4	Dados termodinâmicos para diferentes reações a 25 °C e 1 atm. de pressão.....	58
Tabela 5	Especificação técnica Hyundai Nexu 2019.....	70
Tabela 6	Fatores que impactam a eficiência energética e emissões veicular.....	88
Tabela 7	Resultados iniciais de consumo de combustível em MPGe e velocidade máxima.....	91
Tabela 8	Energia consumida (kJ) pelo ciclo HWFET e UDDS no modo de potência.....	109
Tabela 9	Energia consumida (kJ) pelo ciclo HWFET e UDDS no modo regenerativo.....	109
Tabela 10	Variação dos parâmetros de simulação.....	111

## LISTA DE SIGLAS

AFCs – *Alkaline Fuel Cells*  
DCE – Dupla Camada Elétrica  
DMFCs – *Direct Methanol Fuel Cells*  
EPA – *Environmental Protection Agency*  
ESS – *Energy Storage System*  
GUI – *Graphical user interfaces*  
HWFET – *Highway Fuel Economy Test*  
JRC – *Joint Research Centre*  
MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell*  
MCI – Motor de Combustão Interna  
ME – Máquinas Elétricas ou Motor Elétrico  
OBD – *On-Board Diagnostic*  
PAFCs – *Phosphoric Acid Fuel Cells*  
PEM – *Proton Exchange Membrane*  
PEMFCs – *Polymer Exchange Membrane Fuel Cells*  
SOC – *State of Charge*  
SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell*  
UDDS – *Urban Dynamometer Driving Schedule*  
VCU – *Vehicle Control Unit*  
VE – Veículo Elétrico  
VEB – Veículo Elétrico à Bateria  
VECC – Veículo Elétrico à Célula a Combustível  
VEHCC – Veículo Elétrico Híbrido à Célula a Combustível  
VHE – Veículo Híbrido Elétrico  
VHE-Full – Veículo Híbrido Elétrico Completo  
VHE-Mild – Veículo Híbrido Elétrico Parcial  
VHE-Plug In – Veículo Híbrido Elétrico Plug In  
VMCI – Veículo com Motor de Combustão Interna  
VMH – Veículo Micro Híbrido.

## SUMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1	CONTEXTO.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	OBJETIVOS.....	19
1.3.1	Objetivo geral.....	19
1.3.2	Objetivos específicos.....	19
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>21</b>
2.1	CONCEITOS DE VEÍCULOS HÍBRIDOS ELÉTRICOS.....	21
2.2	CONCEITOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	28
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>34</b>
3.1	SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA.....	34
3.1.1	Motor elétrico.....	34
3.1.2	Conversor de potência.....	38
3.1.3	Unidade de controle veicular.....	38
3.2	SISTEMA DE FONTE DE ENERGIA.....	39
3.2.1	Armazenadores de energia.....	40
3.2.1.1	<i>Baterias eletroquímicas.....</i>	40
3.2.1.2	<i>Ultra capacitores.....</i>	44
3.3	CONVERSORES DE ENERGIA CÉLULA A COMBUSTÍVEL.....	45
3.3.1	Princípio básico de operação.....	46
3.3.2	Detalhe construtivo do sistema.....	47
3.3.3	Tecnologias de células a combustível.....	50
3.3.3.1	<i>PEMFCs Célula com membrana trocadora de prótons.....</i>	50
3.3.3.2	<i>AFCs Célula a combustível alcalina.....</i>	53
3.3.3.3	<i>PAFCs Célula a combustível ácido.....</i>	54

	<i>fosfóricas.....</i>	
3.3.3.4	<i>MCFCs Célula a combustível de carbonato fundido.....</i>	55
3.3.3.5	<i>SOFC Célula a combustível de óxido sólido.....</i>	56
3.3.3.6	<i>DMFCs Célula a combustível de metanol diretos.....</i>	56
3.3.4	<i>Desempenho operacional de uma célula a combustível.....</i>	57
3.3.4.1	<i>Desempenho ideal da célula a combustível.....</i>	58
3.3.4.2	<i>Desempenho real da célula a combustível.....</i>	61
3.3.4.2.1	<i>Perda por ativação (Região ①).....</i>	61
3.3.4.2.2	<i>Perdas ôhmicas (Região ②).....</i>	62
3.3.4.2.3	<i>Perda por transporte de massa (Região ③).....</i>	63
3.3.4.2.4	<i>Resultado cumulativo das perdas.....</i>	64
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>66</b>
4.1	<i>SOFTWARE DE SIMULAÇÃO ADVISOR.....</i>	66
4.2	<i>MODELO VEICULAR.....</i>	69
4.3	<i>MODELO NUMÉRICO.....</i>	72
4.3.1	<i>Parâmetros de entrada no ADVISOR.....</i>	80
4.3.1.1	<i>Veículo médio.....</i>	SUV 80
4.3.1.2	<i>Conversor de combustível.....</i>	80
4.3.1.3	<i>Motor elétrico.....</i>	81
4.3.1.4	<i>Sistema de armazenamento de energia.....</i>	81
4.3.1.5	<i>Sistema de escape e pós tratamento.....</i>	82
4.3.1.6	<i>Sistema de transmissão.....</i>	82
4.3.1.7	<i>Rodas e eixos.....</i>	82
4.3.1.8	<i>Sistema auxiliar.....</i>	83
4.3.1.9	<i>Controle do sistema propulsor.....</i>	83
4.3.2	<i>Ajuste GUI.....</i>	interface 84
4.3.3	<i>Avaliação do modelo.....</i>	do 85
4.3.3.1	<i>Ciclos.....</i>	de 85

	<i>condução</i> .....	
4.4	ESTUDO PARAMÉTRICO.....	87
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>91</b>
5.1	RESULTADOS INICIAIS.....	91
5.1.1	Avaliando resultados..... os	91
5.1.2	Teste de aceleração, velocidade máxima e aclave.....	94
5.1.3	Ciclo estrada HWFET.....	95
5.1.4	Ciclo urbano UDDS.....	101
5.1.5	Comparando os ciclos.....	108
5.2	RESULTADOS DO ESTUDO PARAMÉTRICO.....	111
5.2.1	Teste de aceleração e desempenho aclave.....	111
5.2.2	Ciclo estrada HWFET.....	114
5.2.3	Ciclo urbano UDDS.....	117
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS</b> .....	<b>121</b>
6.1	CONCLUSÕES.....	121
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	122
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>123</b>
	<b>ANEXO 1</b> .....	<b>130</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO

A crescente preocupação mundial com os efeitos causados pelos gases nocivos ao meio ambiente por meio da queima de combustíveis fósseis, vem impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias, capazes de reduzir os níveis de emissões em diversos setores industriais. Segundo o quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, o setor de transportes é responsável por 14% das emissões diretas de gases causadores do efeito estufa no mundo (IPCC, 2014).

A gestão energética do setor de transporte é de considerável importância para uma contribuição global, que caminha na direção do desenvolvimento e sustentação de economias de baixo carbono ao longo dos próximos anos. O desenvolvimento de sistemas propulsores alternativos, ditos não convencionais, vão ao encontro da demanda atual, sendo eles responsáveis pelo aumento da eficiência energética veicular, conseqüentemente, diminuição do consumo de combustíveis fósseis. Um programa elaborado pelo Governo Federal chamado Rota 2030, tem como objetivo desenvolver o setor automotivo e sua cadeia de suprimentos (BRASIL, 2018), visando aumentar a competitividade dos veículos produzidos no Brasil, uma série de obrigatoriedades deverão ser respeitadas, entre elas o consumo energético e níveis de segurança veicular, contribuindo assim para a diminuição dos níveis de emissões em escala nacional (BRASIL, 2018).

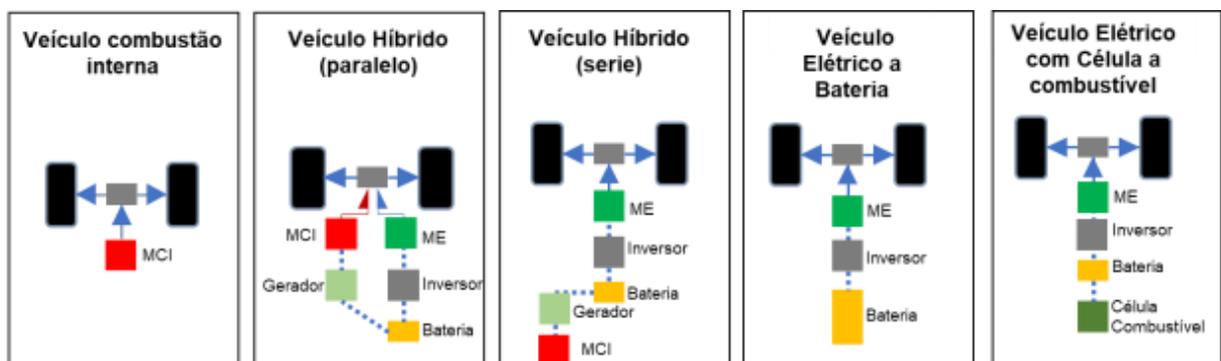
## 1.2 JUSTIFICATIVA

Sistemas propulsores convencionais em veículos automotores, são aqueles cuja geração principal de potência se dá através de um motor de combustão interna. Tais sistemas são basicamente, máquinas térmicas capazes de converter energia térmica, proveniente de reações químicas, em energia mecânica sob a forma de trabalho. O processo de conversão de energia, acontece através de ciclos termodinâmicos que, em sua forma mais básica, compreendem: admissão, compressão, expansão e exaustão (HEYWOOD, 1988). Como resultado deste processo, gases provenientes da combustão são gerados e liberados na atmosfera, contribuindo para importantes alterações nos estoques naturais de carbono no

mundo. Sistemas propulsores não convencionais, são aqueles que utilizam formas alternativas para converter energia em movimento. Dentre as principais aplicações, destacam-se os sistemas híbridos e elétricos, que empregam máquinas elétricas para auxiliar na conversão, geração e armazenamento de energia, podendo atuar ou não em conjunto com o motor de combustão interna.

Os veículos elétricos, se utilizam de motores elétricos para sua propulsão, quanto à forma de alimentação destes motores, pode ser feita principalmente de duas maneiras, a primeira por meio do uso de baterias e conjuntos acumuladores capazes de suprir a demanda de energia do sistema propulsor, a segunda está relacionada ao uso de células a combustível como forma de alimentação. São células eletroquímicas capazes de converter energia química, de um combustível e um agente oxidante, em eletricidade através de um par de reações do tipo redução-oxidação, a Figura 1 a seguir, descreve alguns tipos de veículos e seus sistemas propulsores.

**Figura 1 – Tipos de veículos e classificação dos sistemas propulsores.**



MCI: Motor de combustão interna, ME: Motor elétrico

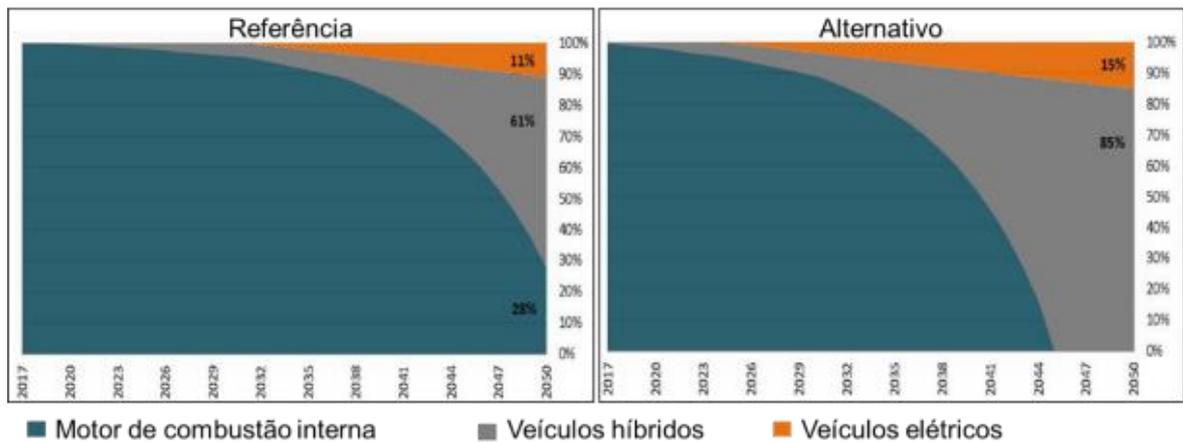
**FONTE: O autor, 2020.**

Segundo um estudo de eletromobilidade realizado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), a perspectiva de penetração de tecnologias veiculares híbridas e elétricas no Brasil terão impactos significativos sobre a forma de propulsão veicular da frota nacional dos próximos anos (EPE, 2018).

Sob a ótica mais positiva, o cenário alternativo mostrado na Figura 2, apresenta a substituição completa dos veículos com motor de combustão interna pelos híbridos e elétricos até 2045 e para que isso aconteça várias barreiras e dificuldades devem ser solucionadas, dentre as mais importantes estão a criação de

uma legislação mais robusta com políticas públicas que incentivem a adoção da eletromobilidade, bem como investimentos do setor público e privado visando o aumento da competitividade frente às soluções convencionais, viabilizando assim a produção em série desses veículos (EPE, 2018), sendo o cenário de referência o mais conservador e o alternativo mais agressivo em termos de adoção de novas tecnologias elétricas e híbridas. O enfoque do presente trabalho está nos sistemas propulsores elétricos que aplicam células a combustível como fonte de alimentação primária.

**Figura 2 – Curva de penetração de veículos híbridos e elétricos na frota nacional.**



**FONTE: EPE, 2018.**

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral construir um modelo numérico em ambiente Matlab, com o auxílio do software ADVISOR, representando o veículo Hyundai Nexso versão *Blue* e avaliar o modelo em termos de seu desempenho global e eficiência energética veicular, comparando os resultados obtidos com os oficiais divulgados pela montadora.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são enumerados a seguir:

1. Propor um modelo veicular SUV baseado no Hyundai Nexu versão *Blue* como base para as simulações.
2. Simular o comportamento global do modelo numérico em termos de desempenho veicular com o auxílio dos softwares ADVISOR em ambiente Matlab.
3. Simular o consumo de combustível equivalente, do modelo numérico para os ciclos de condução regulamentados no mercado norte americano, UDDS e HWFET respectivamente, com o auxílio dos softwares ADVISOR em ambiente Matlab.
4. Analisar e comparar os dados gerados por meio das simulações de desempenho e consumo de combustível equivalente com os dados oficiais declarados pela Hyundai.
5. Realizar um estudo paramétrico variando as características veiculares relacionadas à massa operacional, parâmetro aerodinâmico e carga elétrica no sistema auxiliar, afim de se avaliar os impactos no desempenho final do modelo veicular.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação se divide em 6 capítulos principais, afim de proporcionar ao leitor uma evolução natural do tema por meio de uma sequência lógica, respeitando cada etapa da pesquisa. O capítulo 1, é composto pela introdução do trabalho, tendo com objetivo contextualizar e introduzir o estudo em questão, definindo de maneira clara e objetiva os objetivos gerais e específicos. O capítulo 2, é responsável pela revisão da literatura, ou seja, uma análise das principais publicações, realizando um levantamento bibliográfico necessário para embasar cientificamente o conteúdo do trabalho proposto. Capítulo 3 apresenta uma fundamentação teórica, criando o alicerce científico que fundamenta a pesquisa. Capítulo 4, descreve os materiais e métodos utilizados durante o desenvolvimento das atividades, no capítulo 5 os resultados finais são apresentados. Finalmente no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões pertinentes.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nos últimos dez anos, um grande esforço técnico e científico vem sendo realizado por pesquisadores e profissionais de diversas áreas relacionadas com o desenvolvimento e implementação de sistemas propulsores alternativos para automóveis. De maneira geral, um dos objetivos comuns das publicações mais recentes, é explorar as características técnicas visando o aumento da eficiência energética do conjunto propulsor e conseqüentemente diminuição ou interrupção do uso de combustíveis fósseis, contribuindo assim para a redução em massa dos gases nocivos que são diariamente lançados ao meio ambiente, pelo setor de transporte.

No presente capítulo, é proposto uma revisão da literatura abordando os principais trabalhos e publicações que tangem o desenvolvimento de veículos híbridos e elétricos, afim de se criar um panorama científico sob a ótica de um contexto geral de tais veículos.

### 2.1 CONCEITOS DE VEÍCULOS HÍBRIDOS ELÉTRICOS

Um veículo que tenha duas ou mais fontes capazes de gerar e converter energia é classificado como veículo híbrido, se uma dessas fontes é proveniente de máquinas elétricas, como por exemplo, conjunto de baterias, armazenadores e motores elétricos, o veículo é classificado como híbrido elétrico (VHE). São aqueles que empregam máquinas elétricas (ME) para auxiliar na conversão, geração e armazenamento de energia, atuando em conjunto com o motor de combustão interna (MCI) (LANZAROTTO et al., 2018). Tais veículos podem ser classificados de acordo com a configuração do sistema propulsor, isto é, quanto à sua arquitetura construtiva, os papéis desempenhados pelo conjunto MCI, ME e também quanto ao grau de hibridização, (LANZAROTTO et al., 2018).

Por conta das vantagens da alta densidade energética dos combustíveis como gasolina e etanol, os automóveis convencionais propulsionados com motor de combustão interna oferecem a vantagem de um bom desempenho e autonomia operacional, no entanto possuem as desvantagens relacionadas à baixa eficiência

energética e à emissão de gases poluentes. As principais razões para a baixa eficiência energética, em outras palavras, economia de combustível, são (1) em condições reais, o MCI nem sempre trabalha em seu regime ótimo de operação, (2) dissipação de energia cinética durante frenagem e (3) baixa eficiência relacionada com a transmissão de potência em padrões de direção do tipo *stop-and-go*, quando o condutor para o veículo para e depois retoma sua velocidade. Por outro lado, os veículos elétricos combinam a alta eficiência energética e zero emissões durante seu funcionamento, porém tem como desvantagem sua autonomia operacional quando se comparado aos propulsores com MCI. Os veículos híbridos elétricos por sua vez, por serem munidos de duas fontes de fornecimento de energia (MCI e ME) podem combinar as vantagens e minimizar as desvantagens dos veículos convencionais e elétricos, (EHSANI et al., 2005). A Tabela 1 a seguir apresenta a eficiência energética de três carros, um elétrico, um híbrido elétrico e um convencional, conforme registrado pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem, (INMETRO, 2020).

**Tabela 1 – Eficiência energética veículos automotores leves INMETRO**

Marca/ modelo	Sistema propulsor	Consumo energético (MJ/km)
Nissan/ Leaf	Elétrico	0.58
Toyota/ Prius	Híbrido elétrico	1.15
Volkswagen/ Golf GTi	Motor de combustão interna	2.02

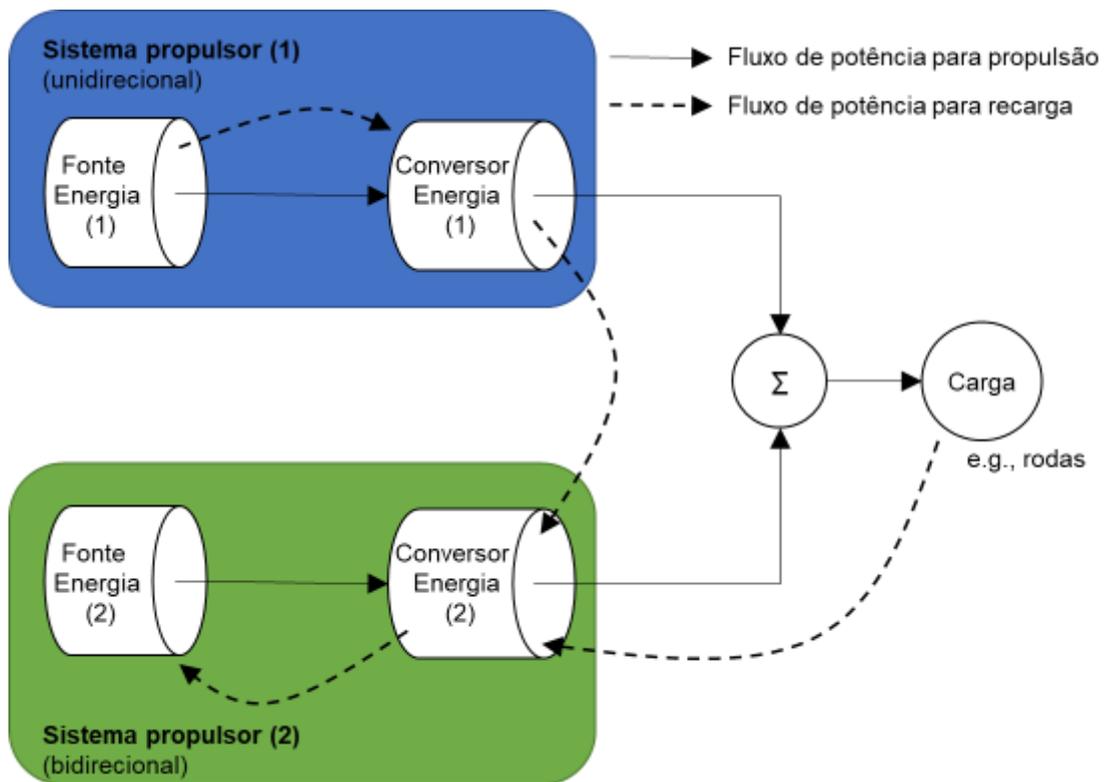
**FONTE: INMETRO, 2020.**

Um dos primeiros veículos híbridos elétricos que se tem registro, foi em 1989, elaborado pelo alemão Dr. Ferdinand Porsche que usava um motor de combustão interna para acionar um gerador que fornecia energia aos motores elétricos localizados nos cubos das rodas, (HYBRIDCARS, 2006), este tipo de arquitetura caracteriza a configuração de um veículo híbrido elétrico em série, onde possui duas fontes de potência (MCI e ME), mas apenas uma é responsável por tracionar as rodas. Já um veículo híbrido elétrico em paralelo, se caracteriza por um ME e MCI que são acoplados de modo que possam propulsionar o veículo individualmente ou em conjunto. Ambas as configurações constituem as arquiteturas mais básicas, podendo variar conforme a estratégia de funcionamento de cada conjunto propulsor.

A Figura 3 a seguir ilustra o conceito de um sistema propulsor híbrido genérico e as possíveis interações entre os fluxos de potência tanto para propulsão

do veículo, quanto para recarga dos sistemas elétricos, através das diversas estratégias de controle tanto do sistema responsável pela propulsão veicular quanto dos sistemas de armazenamento e conversão de energia.

**Figura 3 – Conceito de um propulsor híbrido.**



**FONTE:** Modificado de EHSANI et al., 2005.

Diversos fluxos de potência podem ser obtidos no sistema propulsor híbrido mostrado na Figura 3, tendo como fonte de energia (1) e (2). Alguns padrões são enumerados a seguir com o objetivo final de suprir a demanda de carga:

1. Sistema propulsor (1) sozinho fornece potência para a carga;
2. Sistema propulsor (2) sozinho fornece potência para a carga;
3. Ambos os sistemas propulsores (1) e (2) fornecem simultaneamente potência para a carga;
4. Sistema propulsor (2) recebe potência da carga externa (e.g. freio regenerativo);
5. Sistema propulsor (2) recebe potência do sistema propulsor (1);
6. Sistema propulsor (2) recebe potência do sistema propulsor (1) e da carga externa simultaneamente;

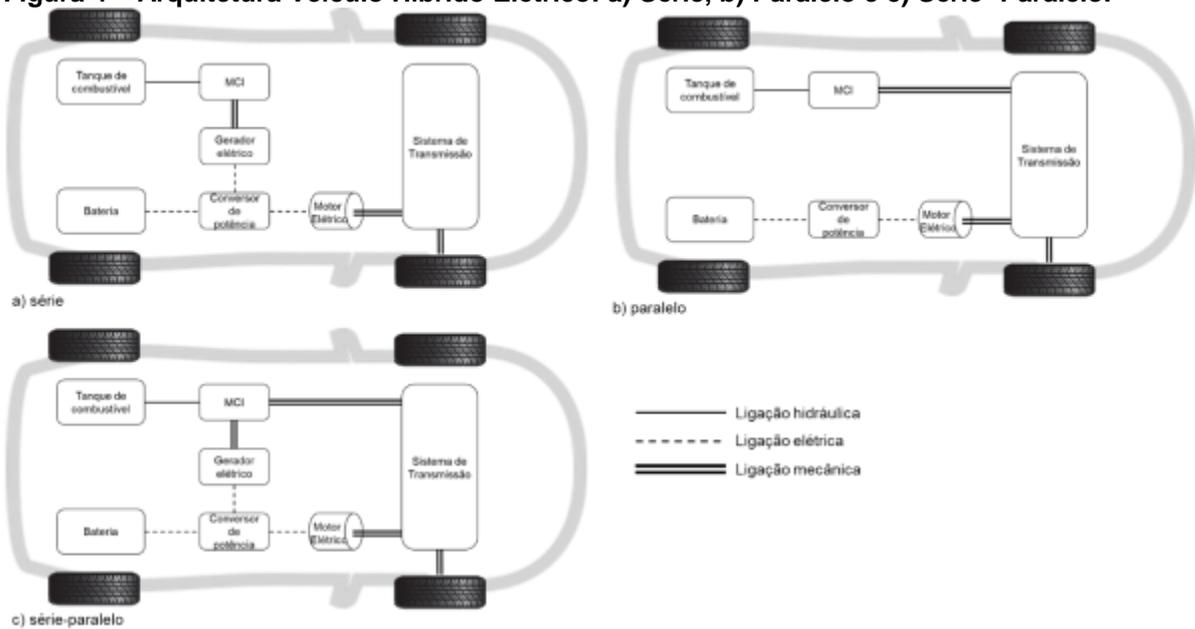
7. Sistema propulsor (1) sozinho fornece potência para carga externa e para o sistema (2) simultaneamente;
8. Sistema propulsor (1) fornece potência para o sistema (2), e o sistema (2) fornece potência para a carga externa;
9. Sistema propulsor (1) fornece potência para a carga externa e a carga fornece potência para o sistema (2).

No caso de veículos híbridos elétricos, pode-se considerar o sistema propulsor (1) sendo com motor de combustão interna e o sistema (2) com motor elétrico alimentado por conjunto de baterias. No padrão 1, mostrado anteriormente, tem-se que a propulsão está a cargo somente do MCI, esta situação pode ocorrer quando o conjunto de baterias do sistema (2) esteja vazio e que o sistema (1) não tenha potência remanescente suficiente para recarregar o sistema (2). O padrão 2, mostra a situação onde a propulsão é exclusivamente elétrica pelo sistema (2), isso pode acontecer em regiões de operação onde a eficiência energética do MCI é baixa, por exemplo em baixas rotações num ciclo urbano. O padrão 3, é o modo onde ambos os sistemas propulsores atuam simultaneamente, este padrão acontece quando existe uma alta demanda de potência, como por exemplo numa ultrapassagem em rodovia. Padrão 4, está relacionado ao modo de frenagem regenerativa, onde a energia cinética do veículo é recuperada pelo motor elétrico atuando como gerador, e direcionando essa energia recuperada para o conjunto de baterias. No padrão 5, é o modo onde o motor de combustão interna recarrega as baterias quando o veículo está parado, ou em situações onde não demanda potência do MCI, como por exemplo em longas descidas. O padrão 6, acontece quando o sistema de bateria é recarregado pelo MCI e pelo sistema de frenagem regenerativo. Padrão 7 acontece quando o MCI é responsável pela propulsão do veículo e por recarregar o sistema de baterias do sistema (2) simultaneamente. O padrão 8 é quando o MCI recarrega as baterias do sistema (2) e o motor elétrico propulsiona o veículo. A variedade de modos operacionais que um sistema propulsor híbrido pode trabalhar cria maior flexibilidade quando comparado com um sistema propulsor único (EHSANI et al., 2005).

As arquiteturas mais básicas de um veículo híbrido elétrico são apresentadas na Figura 4 a seguir. Na configuração em série (a), apenas um sistema é responsável pela propulsão do veículo (no caso do exemplo da Figura 4, o motor elétrico), tendo o outro sistema auxiliando na fonte de alimentação do sistema

propulsor final. Na configuração paralelo (b), ambos os sistemas ME e MCI podem contribuir independente ou simultaneamente para a propulsão veicular através de um acoplamento no sistema de transmissão, já na configuração complexa série-paralelo (c) é uma mistura entre as duas configurações descritas.

**Figura 4 – Arquitetura Veículo Híbrido Elétrico: a) Série, b) Paralelo e c) Série- Paralelo.**



**FONTE: O autor, 2020.**

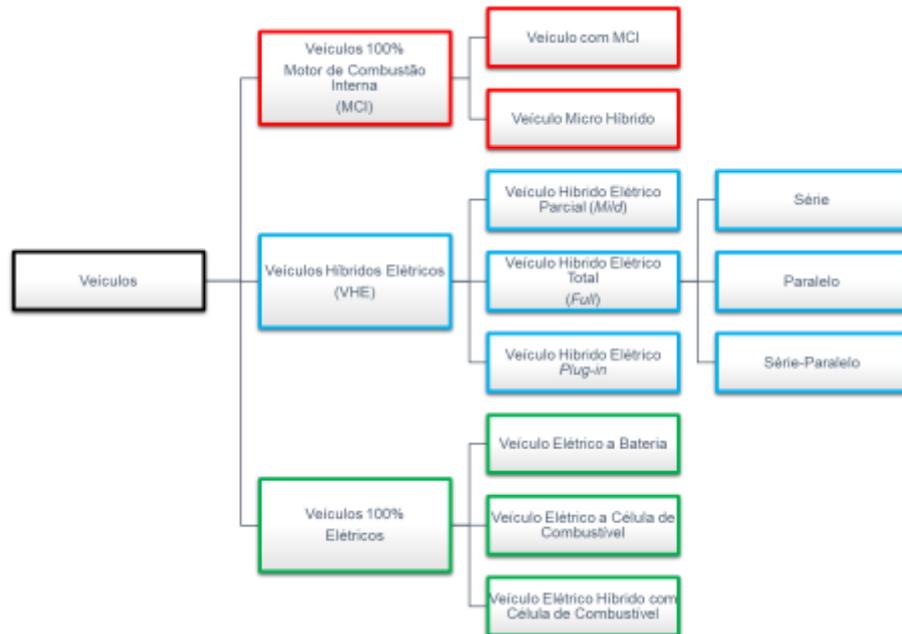
O grau de interação entre as potências requeridas do sistema propulsor (1) e (2) da Figura 3, pode ser expresso através da equação 1 a seguir, também conhecida como grau ou fator de hibridização. Este fator pode ser usado para classificar as diferentes configurações veiculares perante seu sistema propulsor.

$$H_F = \frac{P_{(2)}}{P_{(2)} - P_{(1)}} \quad (1)$$

Sendo  $P_{(1)}$  a potência do sistema propulsor 1 e  $P_{(2)}$  a potência do sistema 2, ambos medidos em W. Considerando o sistema 1 composto pelo motor de combustão interna e o sistema 2 pelo motor elétrico, quando  $H_F = 1$ , tem-se que o veículo é propulsionado apenas pelo sistema 2, ou seja 100% elétrico, caso  $H_F = 0$ , temos o veículo sendo propulsionado pelo sistema 1, assim 100% pelo motor de combustão interna (Wilberforce et al., 2017).

A Figura 5, apresenta uma classificação das principais configurações veiculares em termos de arquitetura construtiva, com base no sistema responsável pela propulsão veicular, características construtivas e modo de operação.

**Figura 5 – Classificação dos veículos quanto ao tipo de propulsão.**



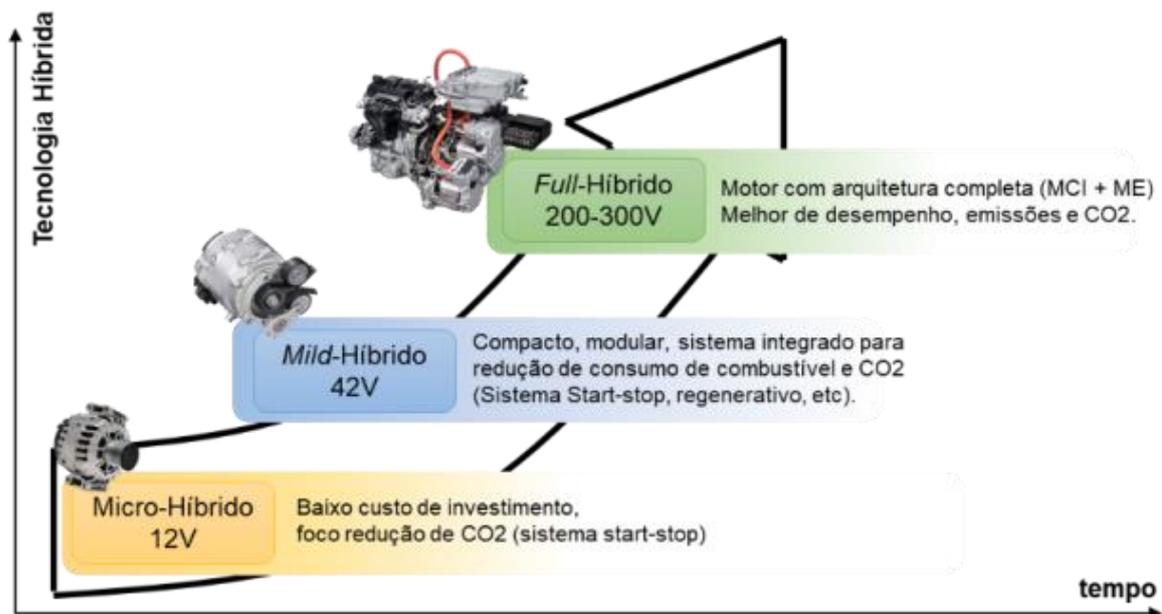
**FONTE: O autor, 2020.**

- (VMCI) – Veículo com Motor de Combustão Interna, propulsionado pelo MCI.
- (VMH) – Veículo Micro Híbrido, propulsão através do MCI, com sistema “*start-stop*”, tecnologia que auxilia no desligamento do motor de combustão quando o veículo para, e acionamento quando o motorista acelera.
- (VHE-*Mild*) – Veículo Híbrido Elétrico Parcial, podem empregar frenagem regenerativa e algum nível de potência auxiliar ao MCI, porém não possui capacidade de propulsão somente no modo elétrico.
- (VHE-*Full*) – Veículo Híbrido Elétrico Total, adicionalmente ao VHE-*Mild*, a configuração *Full* permite propulsão totalmente elétrica, através de diferentes configurações de arquitetura, como por exemplo: série, paralelo e sério-paralelo.
- (VHE-*Plug In*) – Veículo Híbrido Elétrico *Plug In*, veículo com baterias capazes de serem recarregadas conectando um plugue a uma fonte externa de energia.
- (VEB) – Veículo Elétrico à Bateria, veículo propulsionado pelo sistema elétrico, alimentado por um conjunto de baterias.

- (VECC) – Veículo Elétrico à Célula a Combustível, veículo propulsionado pelo sistema elétrico, alimentado por um conjunto de células a combustível.
- (VEHCC) – Veículo Elétrico Híbrido à Célula a Combustível, veículo propulsionado pelo sistema elétrico, alimentado por um conjunto de células a combustível e baterias, sendo este último o enfoque do trabalho.

A introdução das diferentes tecnologias híbridas no mercado automotivo nacional está acontecendo de forma gradativa. Algumas barreiras mercadológicas ainda são impostas para estas tecnologias, uma vez que o preço de venda do veículo é fator decisório na hora da compra pelos consumidores brasileiros (QUEIROZ, 2006). Soluções do tipo micro híbridas (sistema *start-stop*) são as mais encontradas hoje na frota de veículos nacionais, por terem níveis de complexidade e custo de implementação reduzidos quando se comparado às soluções *Mild* e *Full* Híbrido. A Figura 6, apresenta algumas das tecnologias híbridas baseado em seu nível de complexidade e penetração no mercado nacional ao longo do tempo.

Figura 6 – Níveis de hibridização ao longo do tempo.



FONTE: Modificado de QUEIROZ, 2006.

Veículos híbridos e seus diferentes níveis de hibridização, tem papel fundamental na melhoria da eficiência energética da frota nacional, e servem também como ponte para a adoção de soluções cada vez mais limpas, do ponto de vista de emissões e consumo de combustível. Pode-se dizer que a solução de

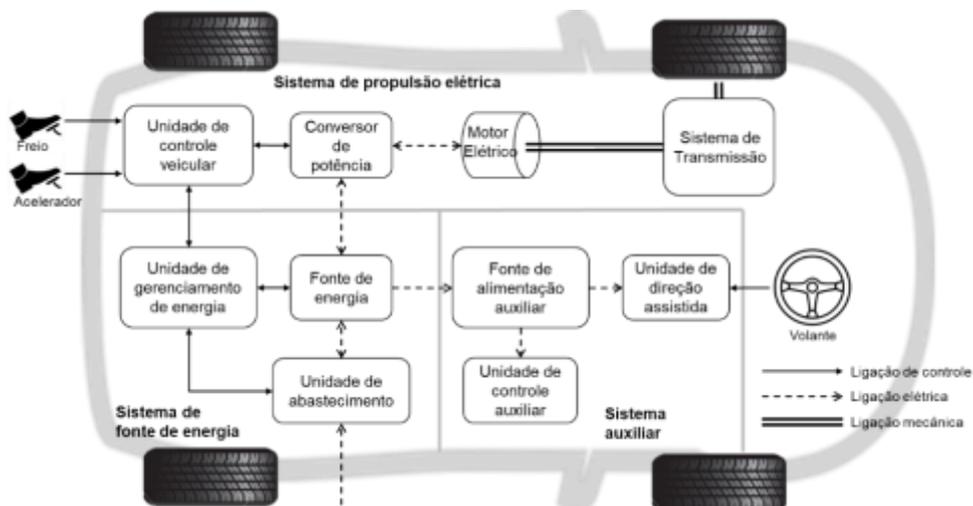
sistema propulsores híbridos é uma fase importante de transição para os veículos elétricos, uma vez que grande parte da infraestrutura nacional precisa ser adequada para esta nova realidade.

## 2.2 CONCEITOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Veículo elétrico (VE), utiliza um ou mais motores/ máquinas elétricas como forma de propulsão, sua classificação varia conforme à fonte de energia que alimenta o sistema elétrico, que pode ser através de um conjunto de baterias, células a combustível, ultra capacitores, volantes de inercia, etc. As principais vantagens de um VE sobre um veículo convencional com motor com combustão interna (VMCI) é a ausência de emissão dos gases resultantes da queima de combustível, o que leva à uma independência de combustível de fontes não renováveis, alta eficiência energética, baixo ruído operacional etc., (EHSANI et al., 2005).

Os primeiros conceitos de veículos elétricos datam da metade do século XIX quando o húngaro Ányos Jedlik construiu o primeiro motor elétrico com estator, rotor e comutador, utilizando-o no ano seguinte para alimentar um carro de pequeno porte, (GUARNIERI, 2012). Alguns anos depois, em meados de 1835, o professor Sibrandus Stratingh, da Universidade de Groningen, na Holanda, construiu um carro elétrico de pequena escala, e entre 1832 e 1839, Robert Anderson, da Escócia, inventou o primeiro carro elétrico para transporte, alimentado por células primárias não recarregáveis (BELLIS, 2010).

**Figura 7 – Conceito geral de um veículo elétrico.**



**FONTE: Modificado de EHSANI et al., 2005.**

De maneira geral um VE, pode ser dividido em três sistemas principais, mostrado na Figura 7, sistema de propulsão elétrica, sistema de fonte de energia e sistema auxiliar.

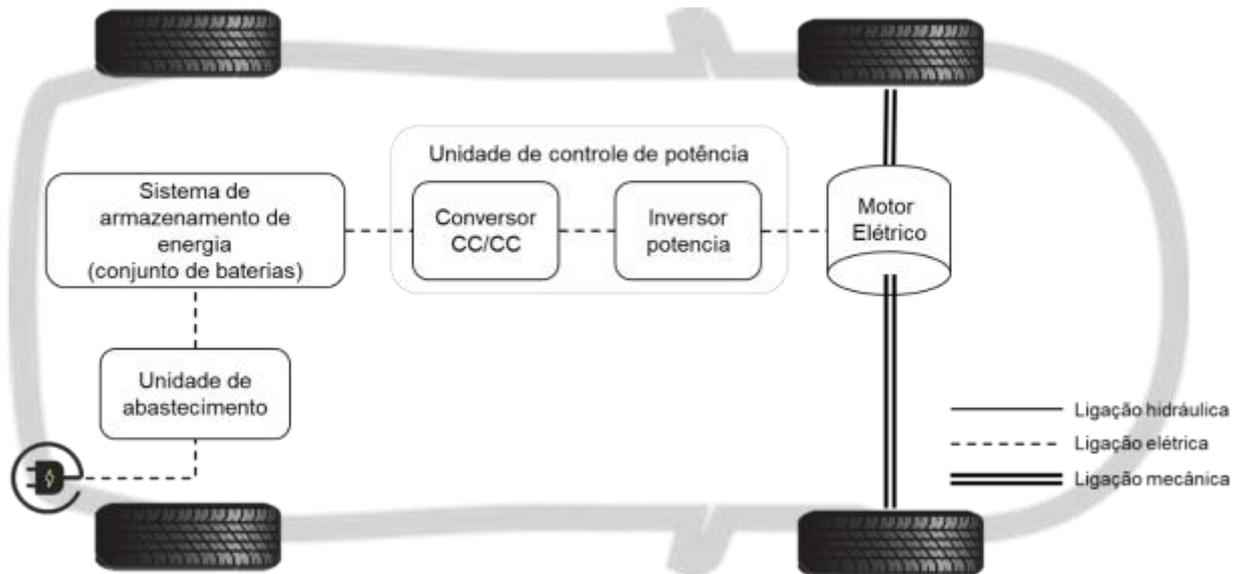
O sistema de propulsão elétrica, como o próprio nome indica, é responsável pela propulsão veicular e é composto por um controlador veicular, conversor eletrônico de potência, motor elétrico e sistema de transmissão. O sistema de fonte de energia é responsável pelo gerenciamento de energia entre a fonte de alimentação e os outros sistemas, possui uma unidade de abastecimento, unidade de gerenciamento de energia e uma fonte de energia. Já o sistema auxiliar é responsável pelos sistemas como ar condicionado, iluminação, painel, direção assistida etc. e é composto por uma unidade de controle, uma fonte de alimentação auxiliar e unidade de direção assistida. Algumas variações podem ocorrer de acordo com as soluções proposta por cada fabricante, a ilustração da Figura 7, representa uma ideia geral dos principais sistemas.

Baseado nos sinais de entrada do pedal de freio e acelerador, a unidade de controle veicular envia sinal de controle para o conversor de potência, que funciona para regular o fluxo de potência entre o motor elétrico e a fonte de energia. O fluxo de potência elétrica para trás, ou seja, das rodas até a fonte de energia, é devido ao sistema de frenagem regenerativo, esta potência pode ser restaurada na fonte de energia, desde que a mesma seja receptiva para este tipo de sistema. A grande maioria das baterias utilizadas em VE, bem como ultra capacitores, possuem esta capacidade de receber e armazenar energia elétrica regenerada. A unidade de gerenciamento de energia trabalha em conjunto com a unidade de controle veicular para gerenciar o sistema de frenagem regenerativa, operando também com a unidade de abastecimento para controlar e monitorar o nível de energia e modo de uso da fonte de energia. A fonte de alimentação auxiliar fornece a energia necessária em diferentes níveis de tensão para todos os sistemas auxiliares do VE, especialmente as unidades de controle climático e de direção assistida (EHSANI et al. 2005).

Os veículos elétricos podem ser classificados de acordo com seu sistema de fonte de energia primária conforme já apresentado anteriormente na Figura 5, VEB – Veículo Elétrico à Bateria, VECC – Veículo Elétrico à Célula de Combustível e

VEHCC – Veículo Elétrico Híbrido à Célula a Combustível, as Figuras 8, 9 e 10 a seguir mostram de maneira simplificada cada uma dessas configurações, em termos de arquitetura veicular.

**Figura 8 – Configuração simplificada de um VEB.**



**FONTE:** Modificado de DAS SH et al., 2017.

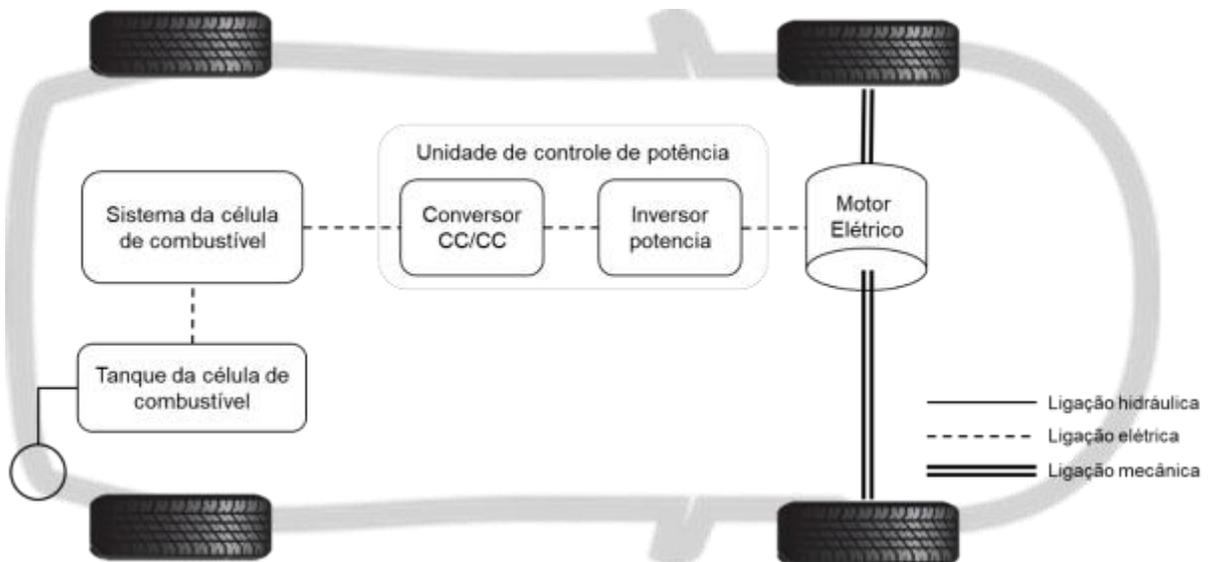
Os VEBs utilizam apenas o conjunto de baterias como fonte de energia, este conjunto é montado no veículo e permite ser recarregado através da unidade de abastecimento. Os veículos elétricos de maneira geral, possuem maior flexibilidade quando comparado com os veículos tradicionais com MCI, em algumas configurações o motor elétrico é capaz de controlar a velocidade e torque, podendo substituir o sistema de transmissão, o menor número de componentes mecânicos, contribui na diminuição das perdas por atrito e da inercia rotacional do sistema, tendo como resultado o aumento da eficiência do conjunto propulsor durante a conversão de energia elétrica em mecânica (DAS SH et al., 2017).

Nesta aplicação o motor elétrico é alimentado por uma fonte CC (conjunto de baterias) o qual tem uma tensão terminal aproximadamente constante, assim, é necessário um inversor de potência CC/CA de frequência e tensão variável para alimentar o motor de indução, o inversor é constituído por interruptores eletrônicos e diodos de potência (EHSANI et al., 2005).

De maneira similar aos VEBs, os VECC também são propulsionados pelo sistema elétrico, podendo ou não ter um sistema de transmissão na transferência de potência para as rodas. Nos VECC a fonte de energia é um conjunto de células a combustível, também chamada de célula eletroquímica, capaz de converter energia potencial de um combustível em eletricidade através de uma reação eletroquímica (WILBERFORCE et al., 2017). O principal combustível utilizado nas células a combustível é o hidrogênio gasoso, porém algumas tecnologias permitem o uso de metanol, etanol entre outros.

Comparado com os veículos elétricos movidos a bateria, o veículo movido com célula a combustível tem as vantagens de uma autonomia maior, sem um longo tempo de carregamento do conjunto de baterias. Quando comparado com os veículos com motores de combustão interna, possui as vantagens de alta eficiência energética e emissões muito mais baixas devido à conversão direta de energia livre do combustível em energia elétrica, sem sofrer combustão (EHSANI et al., 2005), a Figura 9 ilustra de maneira simplificada a configuração de um VECC.

**Figura 9 – Configuração simplificada de um VECC.**

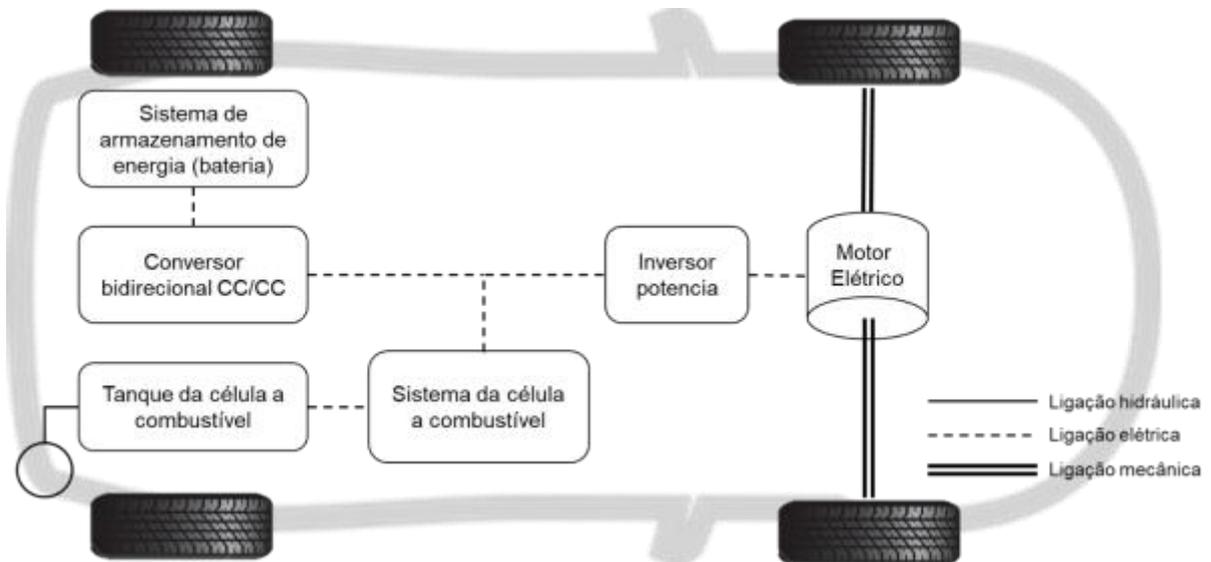


**FONTE:** Modificado de DAS SH et al., 2017.

A última configuração de veículos elétricos abordados nesse trabalho são os VEHCC, que adotam fontes auxiliares de armazenamento de energia de forma híbrida ao sistema de células a combustível. Baterias eletroquímicas são utilizadas como sistema de armazenamento de energia, pois podem ser carregadas e

descarregadas com base na demanda e no fornecimento de carga para o conjunto propulsor, em algumas aplicações específicas, pode-se utilizar ultra capacitores que auxiliem no armazenamento e fornecimento de energia (DAS SH et al., 2017), Figura 10. Diversos tipos de células a combustíveis existem atualmente, que se diferem através do seu modo de operar, características dos materiais construtivos, princípios operacionais e tecnologias empregadas, adiante neste trabalho será discutido mais detalhes sobre as principais soluções encontradas para a indústria automotiva, bem como seus benefícios, limitações e aplicabilidades.

**Figura 10 – Configuração simplificada de um VEHCC.**



**FONTE:** Modificado de DAS SH et al., 2017.

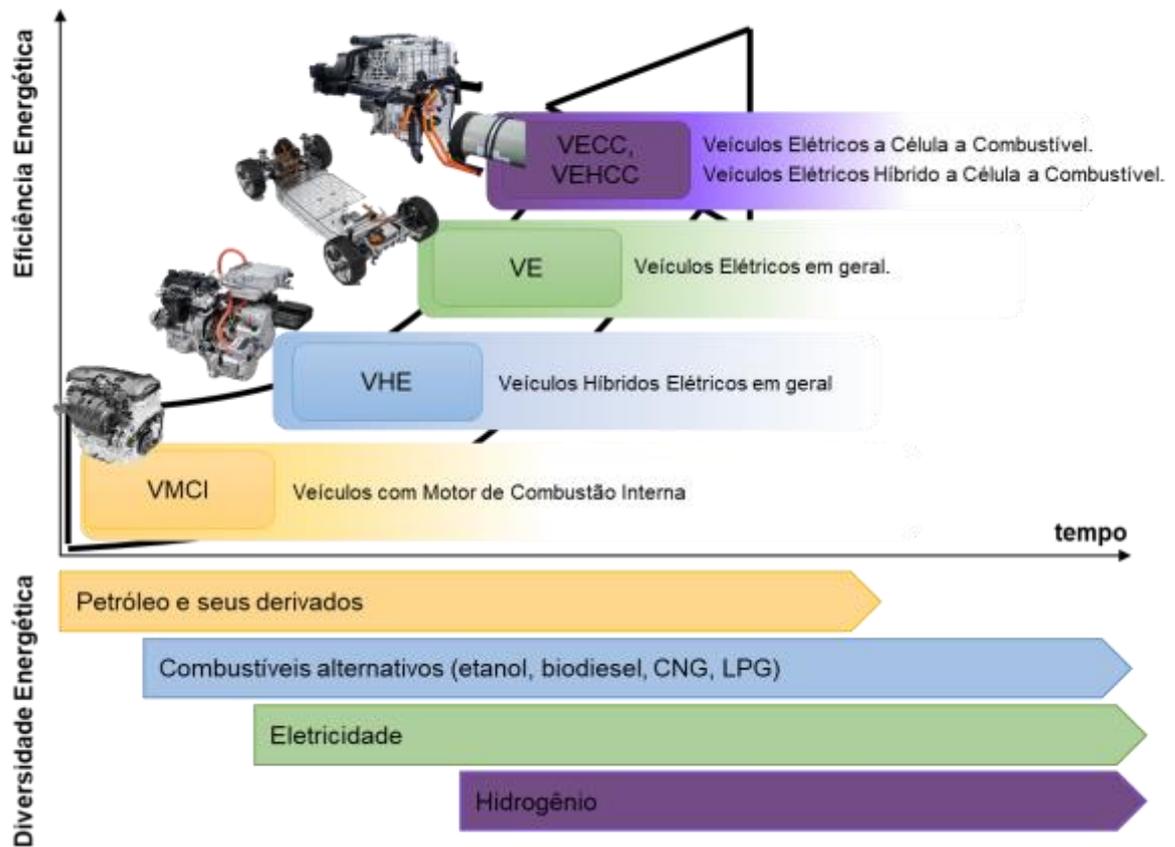
De maneira geral, a Figura 11 mostra as diferentes soluções para propulsão veicular, bem como a diversidade de fontes energéticas ao longo do tempo. O veículo elétrico vem como uma solução definitiva para a redução de emissão de gases nocivos ao meio ambiente, porém ainda enfrenta diversos desafios técnicos relacionados aos limites operacionais do conjunto de baterias bem como os desafios e dificuldades de infraestrutura para uma rede de posto de recarga capaz de cobrir boa parte do extenso território nacional.

O veículo elétrico ainda é visto num cenário de médio prazo para a realidade do mercado nacional, uma fase intermediária que antecede essa solução está relacionada com a eletrificação dos veículos através das tecnologias híbridas. A solução híbrida no cenário brasileiro é tida como a mais promissora no curto prazo,

tanto pela sua autonomia operacional, quanto pelos custos de desenvolvimento e infraestrutura reduzidos.

Como descrito nos objetivos do capítulo anterior, o foco deste trabalho será sobre os veículos elétricos híbridos propulsionados com célula a combustível, mais detalhes no que tange essa solução serão discutidos mais à frente.

Figura 11 – Estratégia de propulsão e diversidade energética.



FONTE: Modificado de WILBERFORCE et al., 2017.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, busca-se aprofundar os conceitos teóricos por trás dos principais componentes e estruturas que compõem o sistema veicular elétrico híbrido com células a combustível.

#### 3.1 SISTEMA DE PROPULSÃO ELÉTRICA

É classificado como o “coração” dos veículos elétricos em geral, por ser responsável por adequar e converter a energia elétrica provinda do sistema de fonte de energia, em energia mecânica para tração das rodas, propulsionando assim o veículo. Consiste de maneira simplificada em motor elétrico, conversor de potência e unidade de controle veicular.

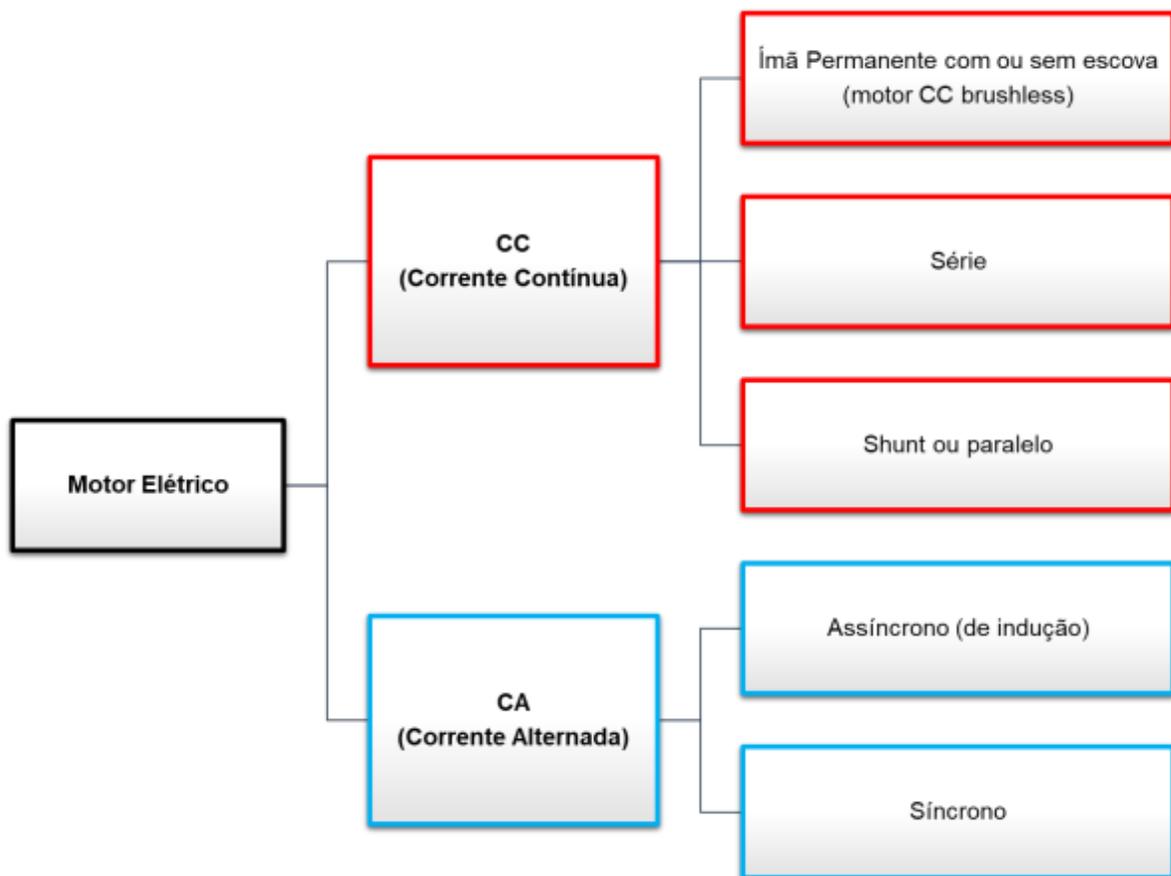
##### 3.1.1 Motor elétrico

Dispositivo capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica. Em sua maioria, o princípio básico de operação consiste na interação entre campos eletromagnéticos, nos quais condutores quando atravessados por corrente elétrica sofrem a ação de uma força mecânica, descrita pela lei da força de Lorentz que é perpendicular ao fio e ao campo magnético, de modo que um torque é desenvolvido na linha central do motor, sendo transmitido pelo seu eixo de saída, (SANTOS, 2020).

Os motores elétricos utilizados nos VEs, exigem paradas e partidas constantes, altas taxas de aceleração e desaceleração, alto torque em subidas acentuadas com baixa velocidade, baixo torque em altas velocidades e uma ampla faixa de rotação para diversas operações, (EHSANI et al., 2005). De maneira geral, os motores elétricos podem ser classificados de acordo com sua fonte de energia,

motores CA (corrente alternada) e motores CC (corrente contínua), na Figura 12 são apresentados alguns dos principais motores CA e CC.

Figura 12 – Tipos de motores elétricos.



FONTE: Modificado de EHSANI et al., 2005.

Um estudo comparativo entre diversos tipos de motores elétricos para VEs, proposto por (BHATT; MEHAR; SAHAJWANI, 2019), levou em consideração alguns critérios como, eficiência, custo, confiabilidade, inovação e controlabilidade. Cinco aspectos fundamentais foram desenhados como resultado desse estudo comparativo:

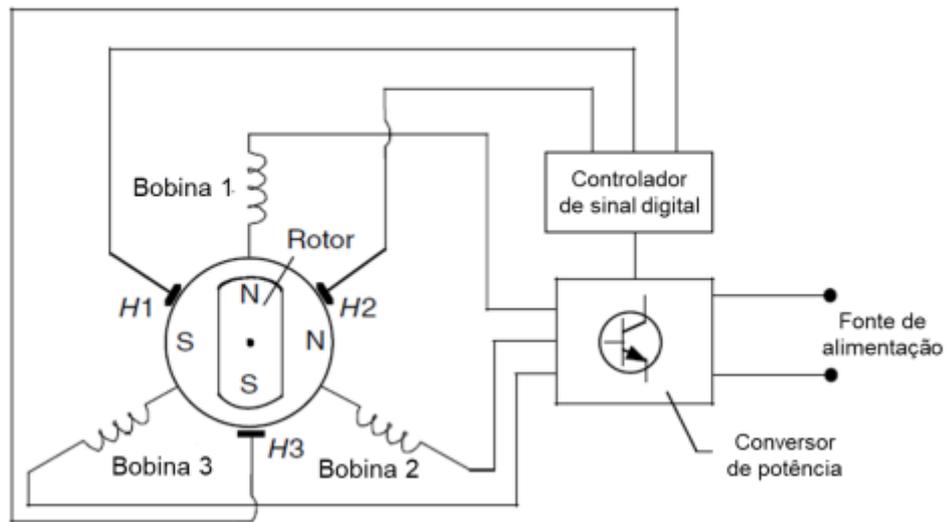
1. Os motores mais utilizados são os motores de indução e os motores de ímã permanentes sem escova.

2. Motores de indução são os mais conhecidos dentre os motores considerados.
3. Motores de ímã permanentes sem escova se mostraram os mais eficazes.
4. Motores CC destacam-se entre as inovações mais desenvolvidas, com um maior número de pesquisas realizadas ao longo dos anos.
5. Motores de indução são os que precisam de medidas mínimas para manutenção.

De maneira similar, (ALIASAND e JOSH, 2020) analisaram e compararam a eficiência, custo, velocidade máxima e confiabilidade dos principais motores elétricos disponíveis para VEs. O motor CC de ímã permanente sem escovas se mostrou a melhor aplicação por seu desempenho de torque-rotação-eficiência ser superior diante dos outros motores.

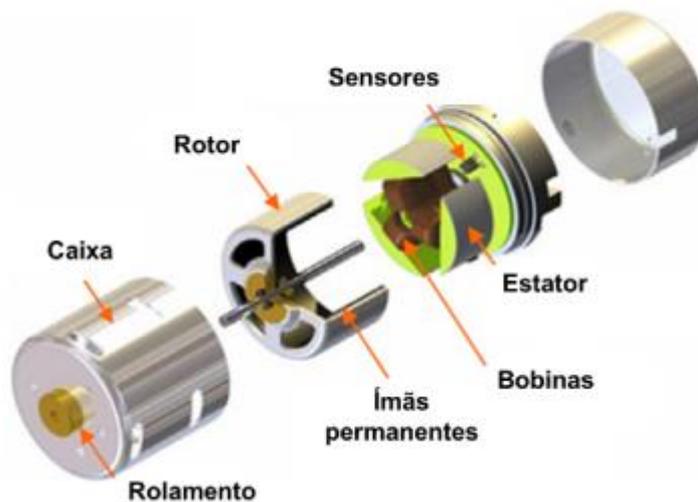
A fim de se representar mais fielmente à solução utilizada pelo Hyundai Nexu, o motor CC de ímãs permanentes sem escovas foi escolhido para compor o modelo numérico. Além das vantagens citadas anteriormente, pode-se diminuir um estágio de conversão de potência por ser alimentado por uma fonte CC, otimizando a eficiência global do sistema elétrico. Alguns exemplos de aplicações incluem, Chevrolet Bolt EV, Ford Focus Electric, Volkswagen Golf-E, Toyota Prius e Hyundai Nexu. Tal motor consiste em um estator com três fases, um rotor com ímãs permanentes, três sensores de posição integrados com um controlador de sinal digital e um conversor de potência, conforme mostra a Figura 13. Os sensores de posição H1, H2 e H3 detectam a posição do rotor da máquina, as informações de posição são fornecidas ao controlador de sinal digital, que, por sua vez, fornece sinais ao conversor de energia ligando e desligando as bobinas apropriadas do estator da máquina, dessa maneira, o torque e a velocidade do motor são controlados. A Figura 14 ilustra o detalhe construtivo do motor escolhido para o modelo.

**Figura 13 – Motor CC de ímã permanente sem escova, esquema construtivo.**



FONTE: Modificado de EHSANI et al., 2005.

Figura 14 – Motor CC de ímã permanente sem escovas.

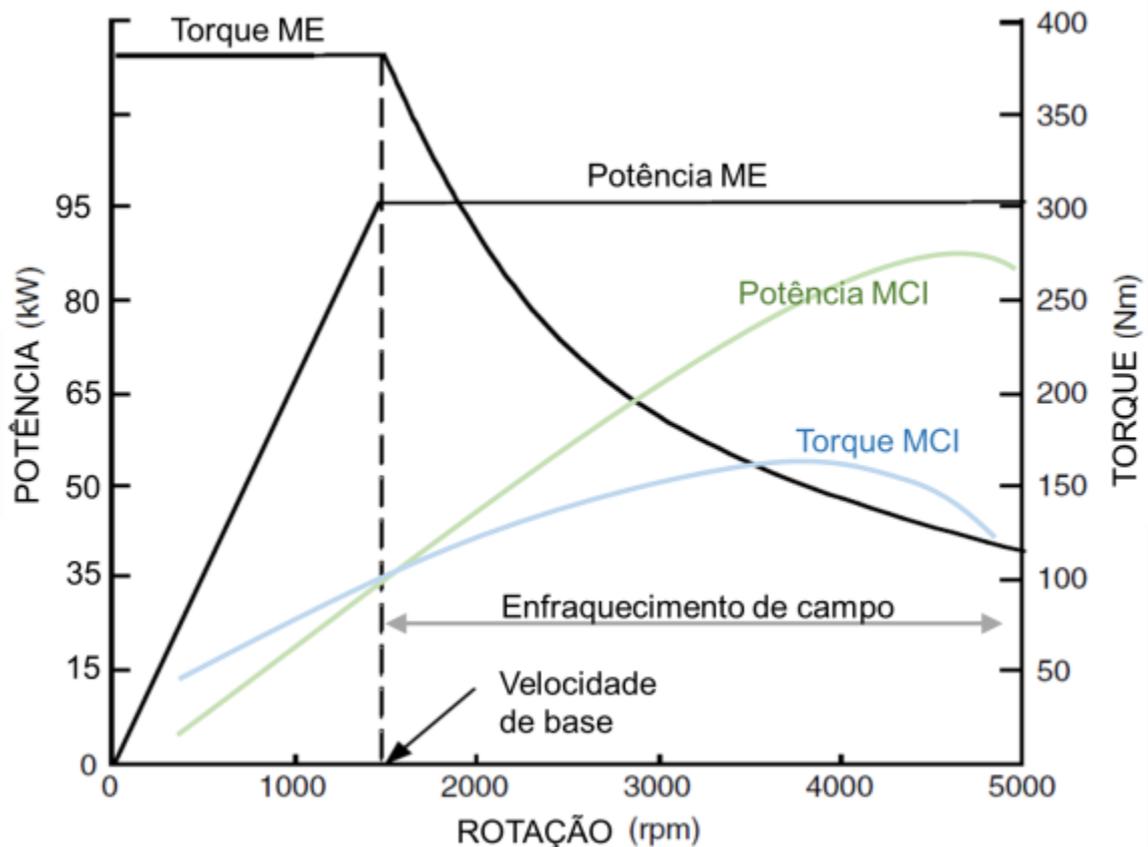


FONTE: <<http://techfuns.blogspot.com/2016/01/speed-control-of-bldc-motor-using.html>>, acesso em 10 de Junho de 2020.

As características de torque e potência de um motor elétrico em comparação à um motor convencional de combustão interna de 1600 cc naturalmente aspirado, são apresentadas na Figura 15. Na região de baixa rotação (abaixo da velocidade de base, também conhecido como velocidade nominal de operação padrão), o motor elétrico entrega torque máximo disponível em regime constante, enquanto que na faixa rotação acima da velocidade de base, ou nominal de operação padrão, o motor é capaz de entregar potência máxima em regime constante (EHSANI et al., 2005).

Em operações de baixa velocidade, a alimentação de tensão ao motor aumenta com o aumento da velocidade por meio do conversor de potência, enquanto o fluxo magnético no entreferro é mantido constante (SIEMENS, 2006) e (EHSANI et al., 2005). No ponto próximo à velocidade de base, ou nominal, a tensão do motor atinge a tensão da fonte. Um ponto logo após a velocidade nominal, o motor elétrico entra na fase dita de enfraquecimento de campo, onde a tensão nominal do motor é mantida constante e o fluxo magnético é enfraquecido, diminuindo hiperbolicamente com o aumento da velocidade, portanto, seu torque também cai hiperbolicamente com o aumento da velocidade (SIEMENS, 2006; EHSANI et al., 2005).

Figura 15 – Característica de torque e potência de um ME e MCI.



FONTE: Modificado de EHSANI et al., 2005.

### 3.1.2 Conversor de potência

Os dispositivos de armazenamento ou fornecimento de energia, variam sua tensão de saída de acordo com sua capacidade ou estado de carga de seus componentes, criando algumas dificuldades na integração com o sistema propulsor. O conversor de potência é o dispositivo capaz de realizar a interface entre sistema de fonte de energia ao sistema de propulsão elétrica, fornecendo para o motor elétrico tensão e corrente em níveis adequados (AL SAKKA et al., 2011).

### 3.1.3 Unidade de controle veicular

A unidade de controle veicular, também conhecido como VCU (*vehicle control unit*), pode ser chamado de o “cérebro” central do veículo, Figura 16. É conectado a diversos sensores e controladores por meio de um chicote elétrico e se comunica com os sistemas de propulsão elétrica, fonte de energia e sistema auxiliar por intermédio de um protocolo de comunicação específico, que pode variar de acordo com a estratégias de cada montadora.

**Figura 16 – Unidade de controle veicular Bosch.**



**FONTE:** <<https://www.bosch-mobility-solutions.com>>, acesso em 16 de junho de 2020.

Uma de suas funções principais é gerenciar e controlar os sinais provenientes do pedal de acelerador e freio, coordenando a estratégia de fornecimento de torque e potência ao motor elétrico por intermédio do conversor de

potência, também é responsável pelo controle de carga do sistema de fonte de energia, gerenciamento de diagnóstico de bordo OBD, monitoramento e gerenciamento térmico do subsistema propulsor, entre outras funções, (ROBERT BOSCH GMBH, 2020).

### 3.2 SISTEMA DE FONTE DE ENERGIA

Consiste de maneira simplificada em uma unidade de gerenciamento de energia, uma unidade de abastecimento e um sistema de fonte de energia. A unidade de gerenciamento de energia interage com a unidade de controle veicular, para gerenciar e coordenar o fluxo de energia que entra e sai do sistema de fonte de energia, seja para alimentação do sistema de propulsão elétrica ou para recarga do próprio sistema. A unidade de abastecimento, como o próprio nome indica, é responsável pelo abastecimento por meio de uma fonte externa, como por exemplo uma tomada para recarga do conjunto de baterias, ou abastecimento de hidrogênio gasoso para os tanques pressurizados, no caso de veículos que utilizam células a combustível movidas à hidrogênio.

A fonte primária de energia de um VEHCC é um conjunto de células a combustível, capaz de converter energia potencial de um combustível em energia elétrica através de uma série de reações eletroquímicas. Duas outras fontes podem ser encontradas nessa configuração veicular, a secundária, por meio de um conjunto de baterias ou ultra capacitores, e a terciária que utiliza a energia regenerativa provinda da frenagem veicular, (EHSANI et al., 2005). Os componentes que compõem a fonte de energia do sistema, podem ser classificados em armazenadores de energia e conversores de energia, conforme descrito a seguir.

#### 3.2.1 Armazenadores de energia

São os dispositivos capazes de armazenar, fornecer (descarga) e receber (recarga) energia de outros sistemas. Alguns requisitos de um armazenador de energia são importantes para a aplicação em um veículo elétrico, como: energia específica, potência específica, eficiência, manutenção, custo operacional, impacto ao meio ambiente, segurança, entre outros (EHSANI et al., 2005). Neste trabalho os

seguintes armazenadores serão detalhados: bateria eletroquímica e ultra capacitores.

### 3.2.1.1 Baterias eletroquímicas

São os aparelhos que, por meio de um processo eletroquímico, convertem energia elétrica em energia potencial química durante seu carregamento, e o inverso durante o descarregamento. Sua construção básica é composta de um conjunto de pilhas ou células, que podem ser organizadas em série ou em paralelo. Cada pilha é uma unidade completa e independente, composta por dois eletrodos (positivo e negativo) imersos em um meio de propagação que permita a migração de íons.

Um importante parâmetro das baterias é seu estado de carga, SOC do inglês *state-of-charge*, que é uma razão entre a capacidade remanescente e a capacidade da bateria totalmente carregada (EHSANI et al., 2005). Ou seja, um SOC de 100% significa bateria totalmente carregada, assim como 0% descarregada, nos VEs e VHEs, o SOC é equivalente ao medidor de combustível de um VMCI. Alguns dos principais requisitos de uma bateria segundo (EHSANI et al., 2005) são resumidos a seguir:

- a) *Energia específica*: A energia específica pode ser definida como a quantidade de energia que uma bateria pode fornecer por unidade de massa em uma dada condição de descarga (Wh/kg).
- b) *Potência específica*: Pode ser definida como a quantidade máxima de potência desenvolvida pela bateria por unidade de massa, em um dado período de tempo (W/kg). Um grande desafio da engenharia automotiva na atualidade, está ligado com a diminuição de massa do conjunto de baterias, afim de se otimizar a relação peso/potência do sistema propulsor.
- c) *Eficiência energética*: Está relacionada com as perdas de tensão elétrica durante o processo de carregamento ou descarga.

A Tabela 2 a seguir, lista as principais baterias disponíveis no mercado automotivo, bem como apresenta uma breve descrição de suas características principais.

**Tabela 2 – Tipos de baterias e suas características.**

<b>Tipo de bateria</b>	<b>Características</b>
Pb-ácido (chumbo-ácido)	São amplamente empregadas como armazenadores de energia no setor automotivo, dentre suas principais vantagens estão o baixo custo produtivo e de manutenção agregado com sua capacidade relativa de alta potência. As principais desvantagens estão relacionadas com a baixa densidade energética devido ao alto peso molecular do chumbo. Também, suas características de energia e potência específica são significativamente deterioradas em baixas temperaturas (<10 °C), o que limita sua aplicação em climas com temperaturas médias mais baixas. A presença de materiais altamente corrosivos, como o ácido sulfúrico é um risco em potencial para os ocupantes e para o meio ambiente (EHSANI et al., 2005). Potência específica máxima de 4000 W/kg e energia específica máxima de 20 Wh/kg (CANO et al., 2018).
Li-íon (Lítio-íon)	Considerada como uma das mais promissoras baterias recarregáveis. Utiliza um material de intercalação de carbono litiado para o eletrodo negativo, um óxido de intercalação de metais de transição litiado para eletrodo positivo e uma solução orgânica líquida ou um polímero sólido como eletrólito. Os íons de lítio oscilam através do eletrólito entre os eletrodos durante o processo de carga e descarga (EHSANI et al., 2005). Possui alta energia específica, densidade energética e ciclo de vida, o que propicia o desenvolvimento de baterias mais compactas (CANO et al., 2018). Potência específica máxima de até 20000 W/kg e energia específica máxima de 315 Wh/kg (CANO et al., 2018).
Li-S (Lítio-enxofre)	Com características similares à bateria Li-íon, porém com a vantagem de custos mais baixos devido ao cátodo de enxofre. Sua desvantagem está a na alta taxa de degradação do cátodo, reduzindo significativamente o alcance operacional dessas baterias, incapacitando o fornecimento de energia em longas distâncias (CANO et al., 2018). Potência específica máxima de até 1000 W/kg e energia específica máxima de 530 Wh/kg (CANO et al., 2018).
Li-ar (Lítio-ar)	Essas baterias oferecem uma melhoria adicional na energia específica e densidade energética superiores das baterias Li-S, devido ao uso de oxigênio atmosférico para produzir energia, porém ainda possui limitações significativas em relação ao seu ciclo de vida, cerca de 100 ciclos no máximo (CANO et al., 2018). Energia específica máxima de 770 Wh/kg, não foi possível encontrar os valores máximos de energia específica na literatura (CANO et al., 2018).

**Continuação Tabela 2.**

<b>Tipo de bateria</b>	<b>Características</b>
Ni-MH (Níquel-hidreto metálico)	Foram introduzidas comercialmente em 1989 e possui desempenho superior à bateria de Pb-ácido em diversos aspectos. Seu eletrodo negativo utiliza hidrogênio absorvido em um hidreto metálico como material de ativação (EHSANI et al., 2005). O alto custo do níquel e dos hidretos metálicos a torna menos competitiva do ponto de vista econômico quando se comparado às baterias de Pb-ácido e até mesmo Li-íon (CANO et al., 2018). Potência específica máxima de até 2000 W/kg e energia específica máxima de 50 Wh/kg (CANO et al., 2018).
Zn-ar (Zinco-ar)	As baterias de zinco-ar, apesar de terem uma energia específica mais baixa que as baterias de lítio-ar, parecem mais propensas a serem usadas em VEs futuros devido ao seu status de tecnologia mais avançada e maior densidade energética. O sucesso dessas aplicações depende de tornar as baterias recarregáveis de Zn-ar mais duráveis, melhorando a estabilidade do ciclo de catalisadores de oxigênio e dos eletrodos de zinco (CANO et al., 2018). Potência específica máxima de até 100 W/kg e energia específica máxima de 500 Wh/kg (CANO et al., 2018).

**FONTE: Modificado de CANO et al., 2018.**

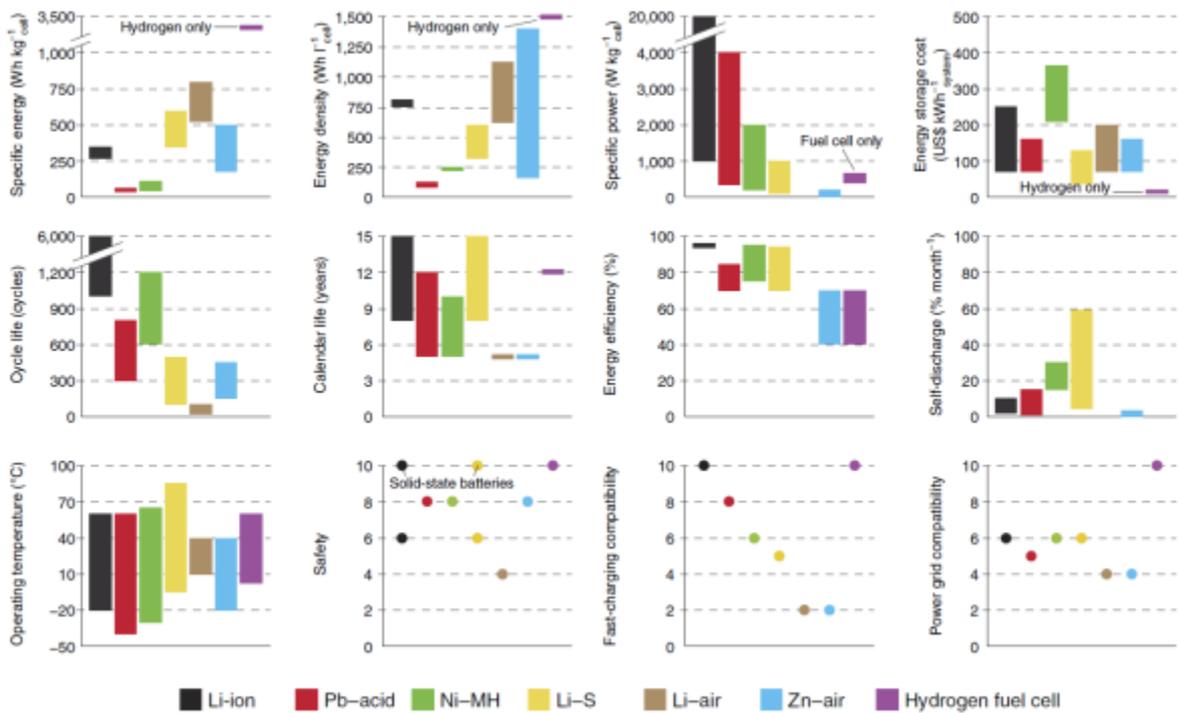
Um estudo proposto por (CANO et al., 2018) revisa as principais propriedades que devem ser melhoradas para um aumento expressivo dos veículos elétricos movidas a bateria, no mercado mundial, o que inclui, custo, energia específica, segurança e compatibilidade com a rede elétrica. Tais propriedades são apresentadas na Figura 17, que também incluiu a célula a combustível, movida com

hidrogênio gasoso em seus comparativos. Por meio da Figura 17, é possível observar que as baterias de Lítio-íon, classificadas na cor preto, possuem uma boa combinação entre as principais características apresentadas, principalmente no que tange às propriedades de potência específica em Watts por quilograma de célula, ciclo de vida em anos, também conhecido como o período de recarga necessário para recarregar as baterias e o custo relativo ao armazenamento de energia medidos em um dólar americano para cada kWh.

De maneira análoga, as curvas da Figura 18, mostram a sensibilidade à energia específica mínima, densidade de energia mínima, custo máximo e despesas gerais máximas do sistema (definidas como as características de pior caso) e energia específica máxima, densidade de energia máxima, custo mínimo e despesas gerais mínimas de sistema (definidas como características de melhores casos) para cada bateria. A área entre as duas curvas mostra a extensão dos possíveis custos de produção e autonomia veicular que podem ser atingidas por cada tipo de bateria, numa aplicação para veículos de médio porte, com massa de até 1500 kg (CANO et al., 2018).

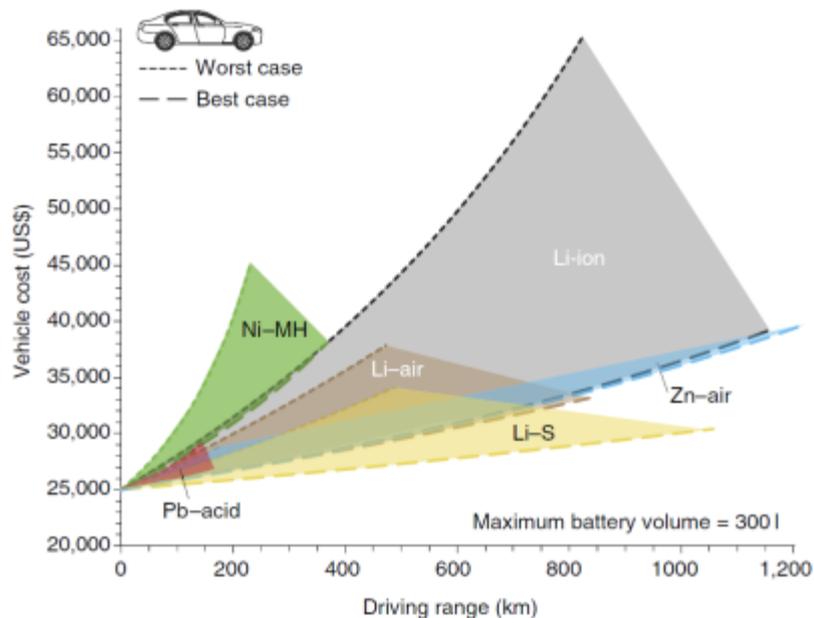
A fim de representar o mais próximo possível da solução utilizada pelo Hyundai Nexo *Blue*, o modelo numérico adota um conjunto de baterias de alta voltagem de Li-íon.

**Figura 17 – Características das baterias recarregáveis e célula a combustível à hidrogênio.**



FONTE: CANO et al., 2018.

Figura 18 – Curvas de sensibilidade do custo e autonomia dos veículos de médio porte.



FONTE: CANO et al., 2018.

### 3.2.1.2 Ultra capacitores

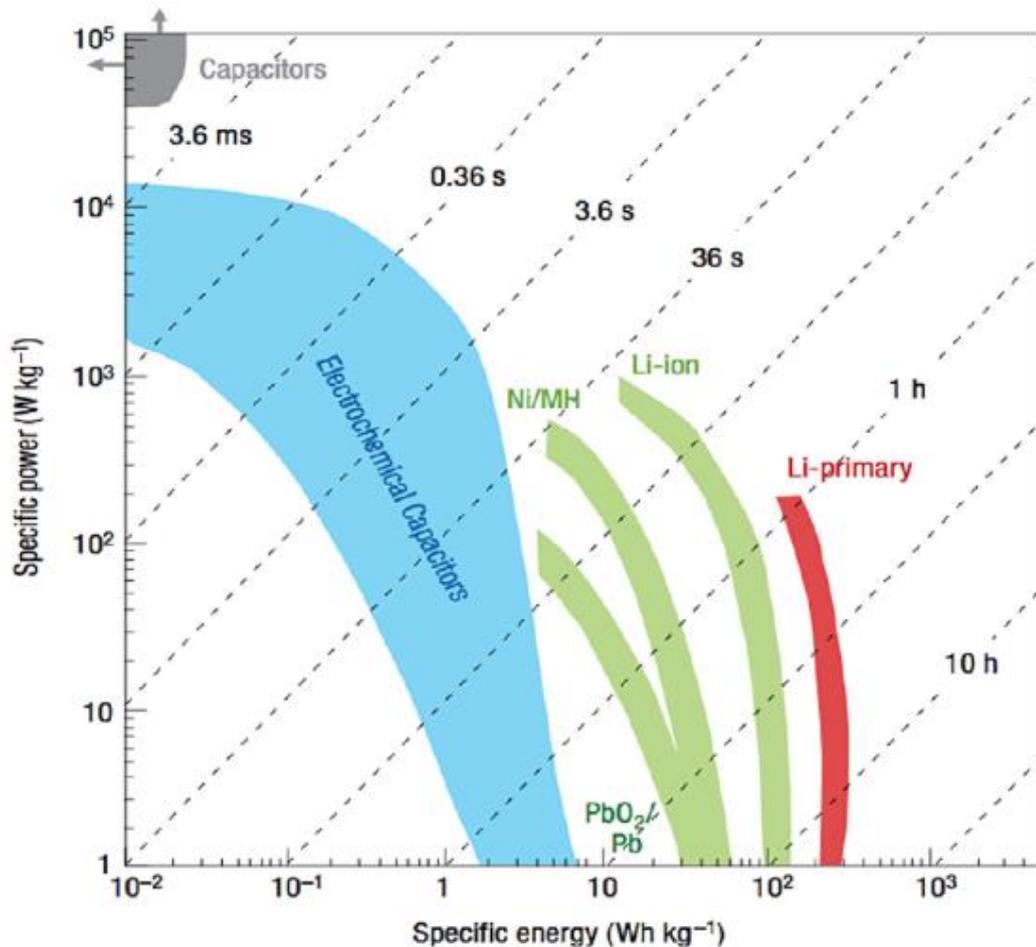
Ultra capacitores, super capacitores ou capacitores eletroquímicos, são dispositivos de armazenamento de energia elétrica que podem ser recarregados muito rapidamente e liberam uma grande quantidade de energia em curtos períodos

de tempo (HORN et al., 2019). No mercado automotivo, eles ainda não podem competir com as baterias de íon de lítio em termos de conteúdo de energia, mas sua capacidade está melhorando a cada ano. Podem ser utilizados como dispositivos auxiliares para armazenar energia através do sistema de frenagem regenerativa, sendo capaz de fornecer picos de potência para o sistema de tração elétrica durante acelerações rápidas (HORN et al., 2019).

Como descrito anteriormente, as baterias empregam reações químicas para converter energia química em energia elétrica, enquanto os ultra capacitores armazenam energia elétrica por um mecanismo chamado efeito de camada dupla elétrica (DCE), (EHSANI et al., 2005). Em seu detalhe construtivo mais básico é possível encontrar dois eletrodos de superfície altamente porosa, com uma membrana separadora entre eles. Essa separação é imersa em um eletrólito, meio pelo qual previne o contato elétrico entre os eletrodos e permite a transferência de carga elétrica (MUZAFFAR et al., 2019).

Uma das características mais marcantes de um ultra capacitor, é a capacidade de possuir alta potência específica, porém com energia específica mais baixa, quando comparado com baterias eletroquímicas. Sua energia específica (definido como a capacidade de energia armazenada por unidade de massa) fica limitada há apenas alguns watts-horas por quilograma, enquanto sua potência específica (potência de pico capaz de ser fornecida por unidade de massa) pode atingir mais de 40 kW/kg, muito acima de qualquer bateria (EHSANI et al., 2005), conforme ilustrado na Figura 19. Apesar dos estudos mais recentes mostrarem grandes avanços nas tecnologias empregadas nos ultra capacitores, no presente trabalho este componente não será incluído, respeitando a configuração do Hyundai Nexó. Sua aplicabilidade num modelo numérico em ambiente Matlab, com o auxílio do software ADVISOR pode ser avaliada como oportunidade para um trabalho a ser desenvolvido no futuro.

**Figura 19 – Potência e energia específica de ultra capacitores e baterias.**



FONTE: HORN et al., 2019.

### 3.3 CONVERSORES DE ENERGIA CÉLULA A COMBUSTÍVEL

A aplicação de células a combustível como forma de conversão de energia, para alimentação do conjunto propulsor em veículos automotores elétricos, tem ganhado destaque na indústria e em pesquisas acadêmicas. Ao contrário de uma bateria eletroquímica, a célula a combustível gera energia elétrica em vez de armazená-la e continua a fazê-lo enquanto o suprimento de combustível for continuamente injetado no sistema (EHSANI et al., 2018). Comparado com os VEBs, um veículo movido a célula a combustível tem as vantagens de autonomia operacional maior e sem a necessidade um longo tempo de espera para o carregamento do conjunto de baterias, uma vez que o combustível utilizado, pode ser abastecido de forma similar aos veículos convencionais movidos com motor de combustão interna, através de um tanque (EHSANI et al., 2018). Já, quando se comparado com os veículos com MCI, possui a vantagem de emissões muito mais

baixas devido à conversão direta de energia livre do combustível em energia elétrica, sem sofrer o processo de combustão (EHSANI et al., 2018).

### 3.3.1 Princípio básico de operação

São dispositivos capazes de converter de maneira direta energia potencial química presente num combustível em energia elétrica, sendo uma fonte promissora de geração de energia com alta eficiência e baixos impactos ambientais (EG & G SERVICES, 2004), não possuem as limitações termodinâmicas presentes nos motores de combustão interna, uma vez que no processo intermediário de conversão de energia, a produção de calor é significativamente reduzida e não há trabalho mecânico envolvido.

De maneira similar à uma pilha galvânica, a conversão de energia na célula a combustível acontece por meio de um processo eletroquímico. A composição simplificada da célula unitária, consiste em dois eletrodos porosos, conectados por um circuito externo e separados por uma solução eletrolítica. Combustível e um agente oxidante são continuamente e separadamente fornecidos para os dois eletrodos da célula, onde acontece a reação. O Hyundai Nexu utiliza hidrogênio gasoso como combustível em seu sistema propulsor, afim de se representar fielmente o veículo real, o modelo numérico é modelado considerando hidrogênio gasoso com combustível. A energia liberada pela reação na célula, é dada pela mudança na energia livre de Gibbs,  $\Delta G$ , geralmente expressa em joules por mol. A mudança na energia livre de Gibbs em uma reação química pode ser expressa na equação 2 (EHSANI et al., 2018).

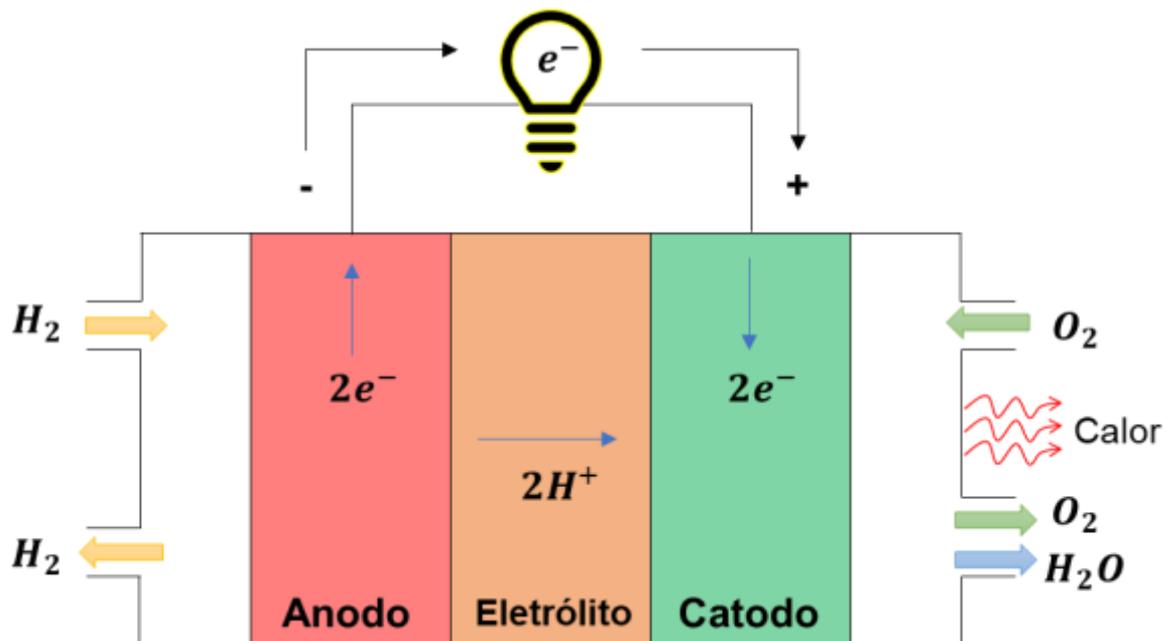
$$\Delta G = \sum_{\text{produtos}} G_i - \sum_{\text{reagentes}} G_j \quad (2)$$

Sendo  $G_i$  e  $G_j$  as energias livres em espécies  $i$  de produtos e espécies  $j$  de reagentes. Em um processo reversível,  $\Delta G$  é totalmente convertido em energia elétrica (EHSANI et al., 2018).

Conforme ilustrado na Figura 20, o combustível (hidrogênio na forma gasosa) penetra através ânodo em sua estrutura porosa, dissolve-se no eletrólito e reage na superfície ativa do eletrodo negativo, liberando elétrons e formando prótons

(H<sup>+</sup>). Os elétrons liberados na reação de oxidação do hidrogênio chegam ao cátodo por meio do circuito externo e ali participam da reação de redução do oxigênio. Os prótons formados no ânodo são transportados através do eletrólito ao cátodo, onde reagem formando o produto da reação global da célula unitária: água e calor (ALVES, 2012).

**Figura 20 – Princípio básico de operação de uma célula unitária.**

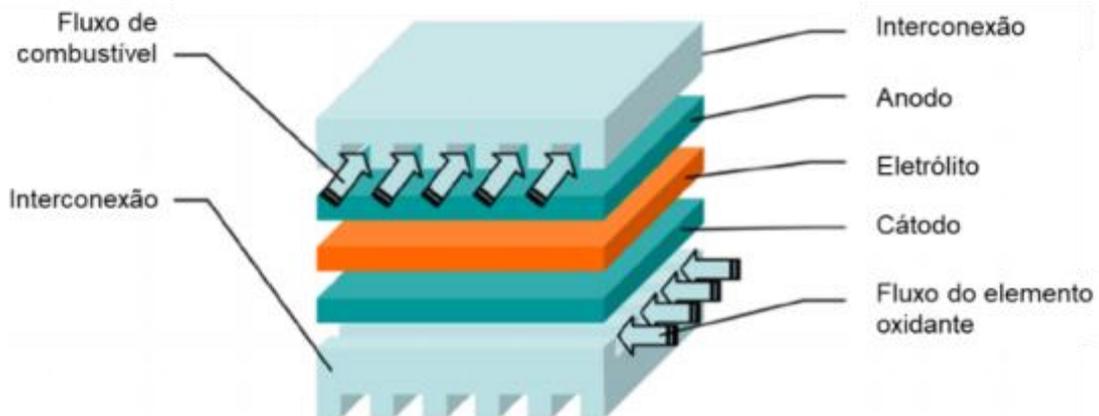


**FONTE: O autor, 2020.**

### 3.3.2 Detalhe construtivo do sistema

O princípio operacional básico descrito anteriormente, leva em consideração apenas uma unidade da célula a combustível. Porém para as aplicações práticas, onde os níveis de tensão e potência de saída requeridas em projeto precisam ser garantidos, as unidades devem ser combinadas de maneira modular em um conjunto de células. Geralmente, tal conjunto (também encontrado na literatura como empilhamento de células), envolve o acoplamento em série de várias unidades por meio de interconexões elétricas (EG & G SERVICES, 2004), afim de se garantir assim que os níveis finais de energia convertida sejam suficientes para alimentar o conjunto de baterias eletroquímicas presentes no sistema de armazenamento de energia, bem como o sistema propulsor.

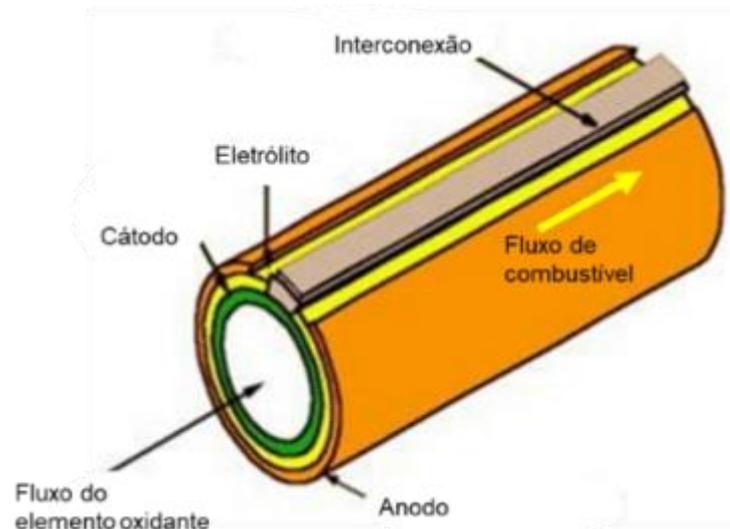
**Figura 21 – Conjunto de célula a combustível planar.**



**FONTE:** Modificado de EG & G SERVICES, 2004.

Embora uma ampla variedade de geometrias de conjuntos de células a combustível possa ser encontrada, a maioria das soluções em desenvolvimento para aplicações veiculares são planares ou tubulares, representados nas Figuras 21 e 22, respectivamente. As principais diferenças entre ambas as configurações, está principalmente na condição em que os fluxos de combustível e elemento oxidante acontecem no sistema, bem como o detalhe construtivo que se adequa em cada uma das restrições impostas por possíveis limitações geométricas.

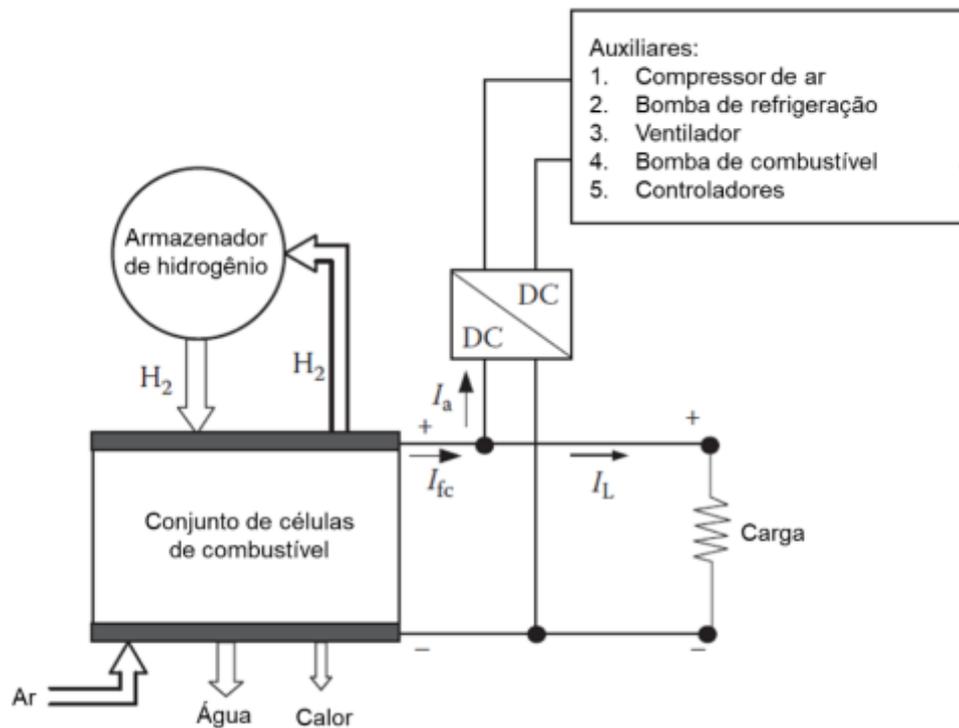
**Figura 22 – Conjunto de célula a combustível tubular.**



**FONTE:** Modificado de EHSANI et al., 2018.

A célula faz parte de um sistema complexo, composto por componentes auxiliares que ajudam na operação e funcionamento do sistema como um todo (EHSANI et al., 2018). Os principais componentes presentes no sistema auxiliar da célula a combustível são: compressor de ar, bomba de refrigeração, ventilador, bomba de combustível e dispositivos de controle elétrico, representados na Figura 23.

**Figura 23 – Conjunto de célula a combustível hidrogênio-ar e componentes auxiliares.**



**FONTE: Modificado de EHSANI et al., 2018.**

Sendo,  $H_2$  hidrogênio gasoso,  $I_a$  a corrente elétrica necessária para alimentar o sistema auxiliar em (A),  $I_{fc}$  a corrente elétrica de saída do conjunto de células a combustível em (A) e  $I_L$  a corrente elétrica limite em (A). Entre os componentes auxiliares, o compressor de ar é o que mais consome energia do sistema, que incluindo seu motor elétrico, está em torno de 10% da potência total produzida pelo conjunto de células (EHSANI et al., 2018).

De maneira a reduzir a queda de tensão na célula, a pressão de ar sobre a superfície do eletrodo,  $p$ , deve ser normalmente maior que a pressão atmosférica  $p_0$ . De acordo com os princípios termodinâmicos, a potência requerida do compressor de ar, de uma baixa pressão  $p_0$  (Pa), até alta pressão  $p$  (Pa), à uma dada vazão

mássica de ar  $\dot{m}_{ar}$  (kg/s), pode ser calculado através da equação 3 a seguir (EHSANI et al., 2018).

$$P_{comp,ar} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \dot{m}_{ar} RT \left[ \frac{p}{p_0}^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right] \quad (3)$$

Sendo,  $P_{comp,ar}$  a potência em (W),  $\gamma$  o coeficiente de expansão adiabática do ar seco ( $\gamma = 1,4$ ),  $R$  a constante universal dos gases perfeitos ( $R = 287,1 J/kgK$ ), e  $T$  a temperatura de entrada do ar no compressor em (K).

### 3.3.3 Tecnologias de células a combustível

Dentre as principais soluções de células disponíveis para aplicação industrial, seis tecnologias se destacam, e sua classificação se dá principalmente, através do tipo de eletrólito empregado. Célula com membrana trocadora de prótons (PEM – *Proton Exchange Membrane* ou PEMFCs – *Polymer Exchange Membrane Fuel Cells*), célula a combustível alcalina (AFCs – *Alkaline Fuel Cells*), célula a combustível ácido fosfóricas (PAFCs – *Phosphoric Acid Fuel Cells*), célula a combustível de carbonato fundido (MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell*), célula a combustível de óxido sólido (SOFC – *Solid Oxide Fuel Cell*) e célula a combustível de metanol direto (DMFCs – *Direct Methanol Fuel Cells*). Tabela 3, lista a temperatura de operação e estado físico dos eletrólitos utilizados em cada um destes sistemas.

**Tabela 3 – Dados operacionais dos sistemas de célula a combustível**

Sistema	Temperatura Operacional (°C)	Estado do eletrólito
PEMFCs	60-100	Sólido
AFCs	100	Líquido
PAFCs	60-200	Líquido
MCFC	500-800	Líquido
SOFC	1000-1200	Sólido
DMFCs	100	Sólido

**FONTE: Modificado de EHSANI et al., 2018.**

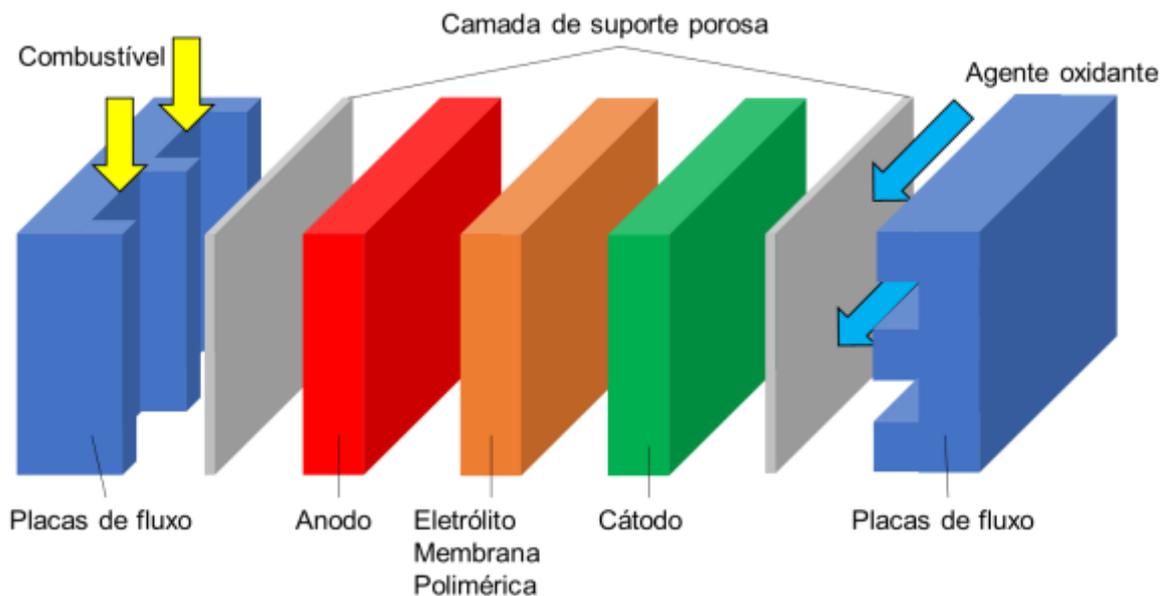
#### 3.3.3.1 PEMFCs Célula com membrana trocadora de prótons

As primeiras PEMFCs foram desenvolvidas na década de 1960, para atender às necessidades do programa aeroespacial do governo norte americano. Nos dias atuais, é a tecnologia de célula a combustível mais investigada para aplicações automotivas (EHSANI et al., 2018).

Os principais componentes do sistema são ilustrados na Figura 24 e listados a seguir (EG & G SERVICES, 2004):

- Membrana polimérica para troca de prótons.
- Camada de suporte porosa eletricamente condutora, para difusão dos gases.
- Eletrodos (catalizadores) na interface entre a camada de suporte e a membrana.
- Interconexões e placas de fluxo, capazes de conduzir combustível (normalmente hidrogênio gasoso) e o elemento oxidante (oxigênio atmosférico) aos locais reativos da célula.

**Figura 24 – Representação esquemática de uma PEMFCs.**



**FONTE: O autor, 2020.**

O catalisador constitui nos eletrodos, que estão ambos em contato direto com a camada de suporte (responsável pela difusão dos gases) e o eletrólito (membrana polimérica) em uma interface de contato máxima da célula. O conjunto do eletrólito, das camadas de eletrodos (catalizador) e das camadas de suporte (difusão de gás) é denominado conjunto membrana-eletrólito. Como resultado global

da reação eletroquímica, água é formada no cátodo, podendo ser removida, através da temperatura operacional e fluxo suficiente do elemento oxidante para sua evaporação (EHSANI et al., 2018).

Operando em temperaturas de 60 a 100°C, a PEMFC pode oferecer uma densidade de potência de 0.35 a 0.6 W/cm<sup>2</sup>. Algumas de suas vantagens vão ao encontro com as aplicações de veículos elétricos e híbridos. Primeiro, sua operação em baixa temperatura e, portanto, sua rápida inicialização e estabilização do sistema, são desejáveis para um VE e VHE. Em segundo lugar, sua densidade de potência permite a redução do tamanho do conjunto de células a serem instaladas para a demanda de potência desejada. Terceiro, seu eletrólito sólido não muda, se move ou vaporiza da célula. Por fim, como o único líquido na célula é a água, a possibilidade de qualquer corrosão pode ser essencialmente delimitada e bem controlada (EHSANI et al., 2018).

Por causa da baixa temperatura operacional da célula, metais nobres, como por exemplo a platina, são necessários para a camada catalizadora nos eletrodos. O cátodo é o eletrodo mais crítico porque a redução catalítica do oxigênio é mais difícil do que a oxidação catalítica do hidrogênio. O gerenciamento e controle de água dentro do sistema são de extrema importância, uma vez que a condução dos íons na membrana polimérica requer umidade para seu funcionamento adequado. Caso a membrana fique muito seca, a condução dos prótons fica comprometida, já se a membrana fica encharcada, os poros da camada de suporte serão bloqueados, impedindo o contato entre os gases e os elementos catalizadores (eletrodos) (EHSANI et al., 2018).

Outro ponto crítico desta tecnologia, está relacionado com a sensibilidade de contaminação do sistema. O catalisador com platina é extremamente ativo e, portanto, oferece ótimo desempenho. A desvantagem dessa grande atividade é uma maior afinidade por monóxido de carbono (CO) e produtos de enxofre, que se aderem na superfície do catalisador, criando uma contaminação e bloqueando a operação de algumas regiões do eletrodo, comprometendo assim o desempenho da célula. Se o hidrogênio for alimentado por um reformador, o fluxo conterá parte do monóxido de carbono. O CO também pode entrar na célula a combustível na corrente de ar, caso o ar seja bombeado de uma atmosfera poluída. Tal contaminação é reversível, mas tem um custo e requer o tratamento individual de cada célula (EHSANI et al., 2018).

Reação no anodo:



Reação cátodo:



### 3.3.3.2 AFCs Célula a combustível alcalina

Uma das primeiras células a combustível desenvolvida, impulsionado principalmente pela corrida aeroespacial da década de 1960, onde foi utilizada para fornecer energia elétrica a bordo do veículo espacial Apollo (EG & G SERVICES, 2004). As células AFCs utilizam-se de uma solução aquosa alcalina de hidróxido de potássio (KOH) como eletrólito para a condução de íons entre os eletrodos. Por conta de seu eletrólito alcalino, o mecanismo de condução dos íons se difere da tecnologia PEMFC, sendo o hidróxido (OH<sup>-</sup>) transportado através do meio, afetando diversos aspectos da célula (EHSANI et al., 2018).

Diferente das PEMFCs, água é formada no anodo, eletrodo que recebe o hidrogênio como combustível. Além disso água é necessária no cátodo para a reação de redução do oxigênio. O gerenciamento de água se torna um problema que às vezes é resolvido tornando os eletrodos à prova d'água e mantendo a água no eletrólito. A reação do cátodo consome água do eletrólito, enquanto a reação do anodo rejeita a água do produto. O excesso de água é evaporado fora do sistema (EHSANI et al., 2018).

Podem operar em uma ampla faixa de temperaturas (80 a 230°C) e pressões (2,2 a 45 atm.). AFCs que operam em altas temperaturas utilizam um eletrólito altamente concentrado, modificando o mecanismo de transporte de íons de solução aquosa para sal fundido. Devido à alta reação cinética permitida no eletrólito de hidróxido de potássio, a células AFCs são altamente eficientes. Em particular, a reação do oxigênio (O<sub>2</sub> → OH<sup>-</sup>) é mais fácil do que a reação de redução nas células PEMFCs, como resultado as perdas de ativação são reduzidas à níveis mais baixos. A cinética rápida nas AFCs permite o uso de prata ou níquel como catalisadores em

vez de platina, sendo o custo do conjunto células significativamente reduzido (EHSANI et al., 2018).

O maior problema das AFCs é a contaminação por dióxido de carbono. O eletrólito alcalino tem grande afinidade com o dióxido de carbono e, juntos, formam íons carbonato  $CO_3^{2-}$ . Esses íons não participam da reação da célula e diminuem seu desempenho, também existe o risco de que o carbonato precipite e obstrua os eletrodos (EHSANI et al., 2018).

Reação no anodo:



Reação cátodo:



### 3.3.3.3 PAFCs Célula a combustível ácido fosfóricas

As reações eletroquímicas nos eletrodos da célula a combustível ácido fosfórica são as mesmas que acontecem nas PEMFCs. Foram as primeiras células comercializadas, com algumas aplicações em hotéis, hospitais e bases militares, para auxiliar o suprimento de eletricidade. Ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) no estado líquido viscoso é utilizado como eletrólito, contido pelo efeito capilaridade na célula em uma matriz porosa de carboneto de silício (EG & G SERVICES, 2004; EHSANI et al., 2018).

A temperatura de operação do eletrólito de ácido fosfórico, deve ser mantida acima de 42 °C, que é sua temperatura de solidificação. Manter as células acima dessa temperatura requer o desenvolvimento de componentes para o gerenciamento térmico do sistema, aumentando a complexidade, custos envolvidos, peso e o volume do conjunto, o que dificulta sua aplicação para a propulsão veicular. Cada vez que a célula de combustível é iniciada, alguma energia (isto é, combustível) deve ser gasta para aquecê-la até a temperatura operacional, e cada vez que a célula de combustível é desligada, calor (isto é, energia) é desperdiçado, diminuindo significativamente a eficiência do conjunto. A perda é significativa para tempos de viagem curtos, o que geralmente ocorre durante ciclos de condução em cidade (EHSANI et al., 2018).

Reação no anodo:



Reação cátodo:



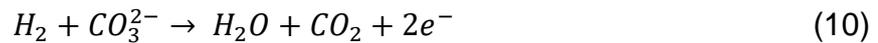
### 3.3.3.4 MCFCs Célula a combustível de carbonato fundido

São células que trabalham em altas temperaturas operacionais (500 – 800 °C) e se utilizam de carbonato fundido, geralmente carbonato de lítio-potássio ou carbonato de lítio-sódio, como eletrólito para conduzir os íons ( $CO_3^{2-}$ ) entre os eletrodos. Seu mecanismo de condução iônica através do eletrólito é muito similar às células de ácido fosfórico PAFCs (EHSANI et al., 2018).

A principal diferença de outras células a combustível é a necessidade de fornecer dióxido de carbono ao cátodo, não é necessário ter uma fonte externa, pois  $CO_2$  pode ser reciclado a partir do ânodo. MCFCs nunca são usadas com hidrogênio puro, mas sim com hidrocarbonetos. Na verdade, a principal vantagem das células a combustível de alta temperatura é sua capacidade de processar combustíveis compostos por hidrocarbonetos quase que diretamente, pois sua alta temperatura operacional permite sua decomposição em hidrogênio nos eletrodos. Tais fatos beneficiam as aplicações veiculares, tendo em vista que a matriz energética global ainda é muito dependente de combustíveis fósseis à hidrocarbonetos. Além disso, as altas temperaturas de trabalho da célula, aumentam a cinética operacional ao ponto de permitir soluções de catalisadores com custos mais reduzidos (EG & G SERVICES, 2004), (EHSANI et al., 2018).

Algumas desvantagens pousam sobre este tipo de célula, principalmente pela natureza corrosiva de seu eletrólito. O consumo de combustível associado ao aquecimento da célula a combustível também é um problema, agravado pela temperatura de operação muito alta e pelo calor latente necessário para derreter o eletrólito. É provável que esses problemas confinem as MCFCs a aplicações de energia estacionárias ou estáveis, como navios ou plantas de potência (EHSANI et al., 2018).

Reação no anodo:



Reação cátodo:



### 3.3.3.5 SOFC Célula a combustível de óxido sólido

Uma membrana cerâmica é utilizada como meio para condução iônica entre os eletrodos. Com alta temperatura operacional (1000 – 1200°C), a SOFC normalmente emprega zircônia estabilizada com ítri (YSZ), para condução dos íons de oxigênio  $O^{2-}$ , porém outros tipos de cerâmicas são capazes de conduzir íons de hidrogênio. Mecanismo de condução é similar ao observado nos semicondutores, daí o nome da célula com óxido sólido (EHSANI et al., 2018).

Sua alta temperatura de operação permite a utilização de hidrocarbonetos como combustível, da mesma maneira como as MCFCs. Também deve ser notado que as SOFCs não sofrem envenenamento por monóxido de carbono, uma vez que CO pode ser processado pela reação no anodo. De maneira similar às células de carbonato fundido, a principal desvantagem da SOFC está principalmente associada à alta temperatura de operação (segurança e economia de combustível). Problemas complementares surgem porque o eletrólito de cerâmica e os eletrodos são extremamente frágeis, esta é uma grande desvantagem para aplicações veiculares onde as vibrações são uma ocorrência comum (EG & G SERVICES, 2004), (EHSANI et al., 2018).

Reação no anodo:



Reação cátodo:

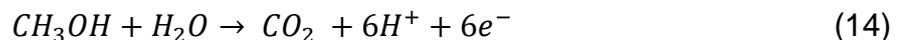


### 3.3.3.6 DMFCs Célula a combustível de metanol diretos

Ao invés de hidrogênio, metanol pode ser utilizado como combustível nessa célula. É uma tecnologia que vem recebendo atenção para aplicação veicular por duas razões em especial. Primeiro, metanol é um combustível líquido que pode ser facilmente armazenado, distribuído e comercializado. Tendo assim, que a infraestrutura atual de suprimento de combustível líquido pode ser usada sem muitos investimentos adicionais. Segundo, é um combustível orgânico simples, que pode ser produzido em larga escala a partir do processamento da cana de açúcar (EHSANI et al., 2018).

Ambos os eletrodos podem adotar platina ou liga de platina como elemento catalisador. O eletrólito é normalmente, ácido trifluorometanossulfônico ou membrana polimérica. Ainda é uma tecnologia em desenvolvimento e pouco empregada, com temperatura operacional entre 50 e 100°C. Quando se comparado às células a combustível de hidrogênio, possui baixa densidade de potência, resposta de potência lenta e baixa eficiência (EHSANI et al., 2018).

Reação no anodo:



Reação cátodo:



### 3.3.4 Desempenho operacional de uma célula a combustível

Nesta sessão, busca-se descrever as reações químicas e termodinâmicas que governam o funcionamento da célula a combustível, bem como as condições operacionais que afetam seu desempenho. Compreender o impacto da variação dos parâmetros como temperatura, pressão e gases constituintes, sobre o desempenho da célula, é fundamental para buscar a operação mais eficiente do sistema e também auxiliar no processo desenvolvimento e maturação da tecnologia para as aplicações veiculares.

Um primeiro passo lógico para entender a operação de uma célula a combustível, é definir seu desempenho ideal. Uma vez que o desempenho ideal é determinado, as perdas decorrentes do comportamento não ideal, podem ser

calculadas e então deduzidas do desempenho ideal para descrever a operação real do sistema (EG & G SERVICES, 2004).

Todo o equacionamento e manipulação matemática sobre o desempenho operacional do sistema proposto na seção 3.3.4, foram baseados em duas referências principais, o livro *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell* (EHSANI et al., 2018) e do manual da célula a combustível do departamento de energia dos Estados Unidos (EG & G SERVICES, 2004).

### 3.3.4.1 Desempenho ideal da célula a combustível

O trabalho elétrico máximo  $W_{el,max}$  (J) obtido em uma célula a combustível, operando a temperatura e pressão constante, é dado na mudança da energia livre de Gibbs,  $\Delta G$  (J) da reação eletroquímica (EG & G SERVICES, 2004).

$$W_{el,max} = \Delta G = -nFE \quad (16)$$

Sendo  $n$  o número de elétrons que participa da reação,  $F$  a constante de Faraday (96487 C/mol), e  $E$  a tensão reversível da célula (V). A mudança de energia livre de Gibbs também é expressa como.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (17)$$

Onde  $\Delta H$  (J) é a variação de entalpia, e  $\Delta S$  (J/K) a variação de entropia, ou seja, a energia livre disponível é igual à variação de entalpia menos a quantidade de calor produzida pela célula numa operação reversível à uma dada temperatura  $T$  (em K) (EG & G SERVICES, 2004; EHSANI et al., 2018). A Tabela 4 a seguir, apresenta valores de algumas reações em uma célula a 25 °C e 1 atm.

**Tabela 4 – Dados termodinâmicos para diferentes reações a 25 °C e 1 atm. de pressão**

Reação	$\Delta H_{298}^0$ (kJ/mol)	$\Delta S_{298}^0$ (kJ/mol K)	$\Delta G_{298}^0$ (kJ/mol)	$n$	$E$ (V)	$\eta_{id}$ (%)
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O (l)$	-286.2	-0.1641	-273.3	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	-395.6	4	1.02	100

$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO (g)$	-279.2	-0087	-253.3	2	1.33	91
--	--------	-------	--------	---	------	----

**FONTE: Modificado de EHSANI et al., 2018.**

A eficiência térmica de um dispositivo de conversão de energia, pode ser definida como a quantidade de energia útil produzida sobre a variação de entalpia entre o produto e seus reagentes.

$$\eta = \frac{(\text{Energia Útil})}{\Delta H} \quad (18)$$

Células a combustível, convertem energia química diretamente em energia elétrica. Em um caso ideal, a variação de energia livre de Gibbs da reação, está disponível como energia elétrica útil na temperatura da conversão. Assim, a eficiência ideal de uma célula galvânica reversível é relacionada com a entalpia e a energia livre de Gibbs.

$$\eta_{id} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - \frac{\Delta S}{\Delta H} T \quad (19)$$

Curiosamente, com a oxidação eletroquímica direta do carbono,  $\Delta G$  é maior que  $\Delta H$ , conseqüentemente para tal definição, a eficiência ideal é ligeiramente maior que 100, como mostra a eficiência ideal da terceira reação da Tabela 4 (EG & G SERVICES, 2004). De maneira análoga à equação (16) a energia livre de Gibbs pode ser expressa como.

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{\prod[\text{fugacidade dos reagentes}]}{\prod[\text{fugacidade dos produtos}]} \quad (20)$$

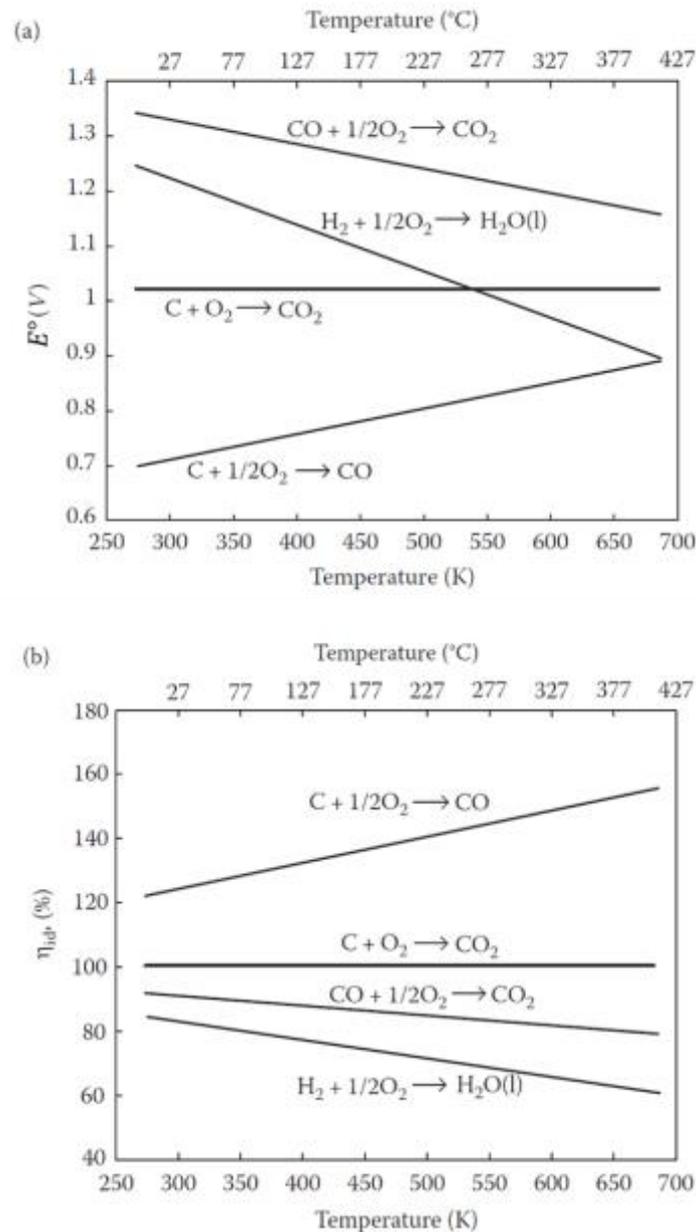
Sendo  $\Delta G^\circ$  a variação de energia livre de Gibbs (J) de reação no estado padrão de pressão (1 atm) e na temperatura  $T$  (K), sendo  $R$  a constante universal dos gases. Substituindo a equação (16) na equação (20) tem-se a forma geral da equação de Nernst (EG & G SERVICES, 2004).

$$E = E^\circ + \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod[\text{fugacidade dos reagentes}]}{\prod[\text{fugacidade dos produtos}]} \quad (21)$$

Sendo  $E^\circ$  (V) a tensão padrão ideal em condições normais de pressão, calculado a partir de  $\Delta G^\circ$  a uma dada temperatura. Geralmente as células a combustível operam em pressões baixas o suficiente para que a fugacidade possa ser aproximada pela pressão parcial (EG & G SERVICES, 2004). A tensão  $E$ , obtida pela equação de Nernst (21), fornece a tensão ideal em uma célula de circuito aberto. Tal tensão, estabelece o limite superior ou desempenho máximo alcançado por uma célula.

A equação de Nernst (21) fornece uma relação entre a tensão padrão  $E^\circ$  e o potencial de equilíbrio ideal  $E$ , em outras pressões parciais de reagentes e produtos. Para a reação global na célula, o potencial da célula aumenta com um aumento da pressão parcial dos reagentes (concentração) e uma diminuição na pressão parcial dos produtos (EG & G SERVICES, 2004), a Figura 25 apresenta a variação da tensão padrão ideal da célula e sua eficiência ideal em função da temperatura, para algumas das reações descritas na Tabela 4.

**Figura 25 – (a) Dependência da tensão da célula com a temperatura e (b) eficiência reversível.**

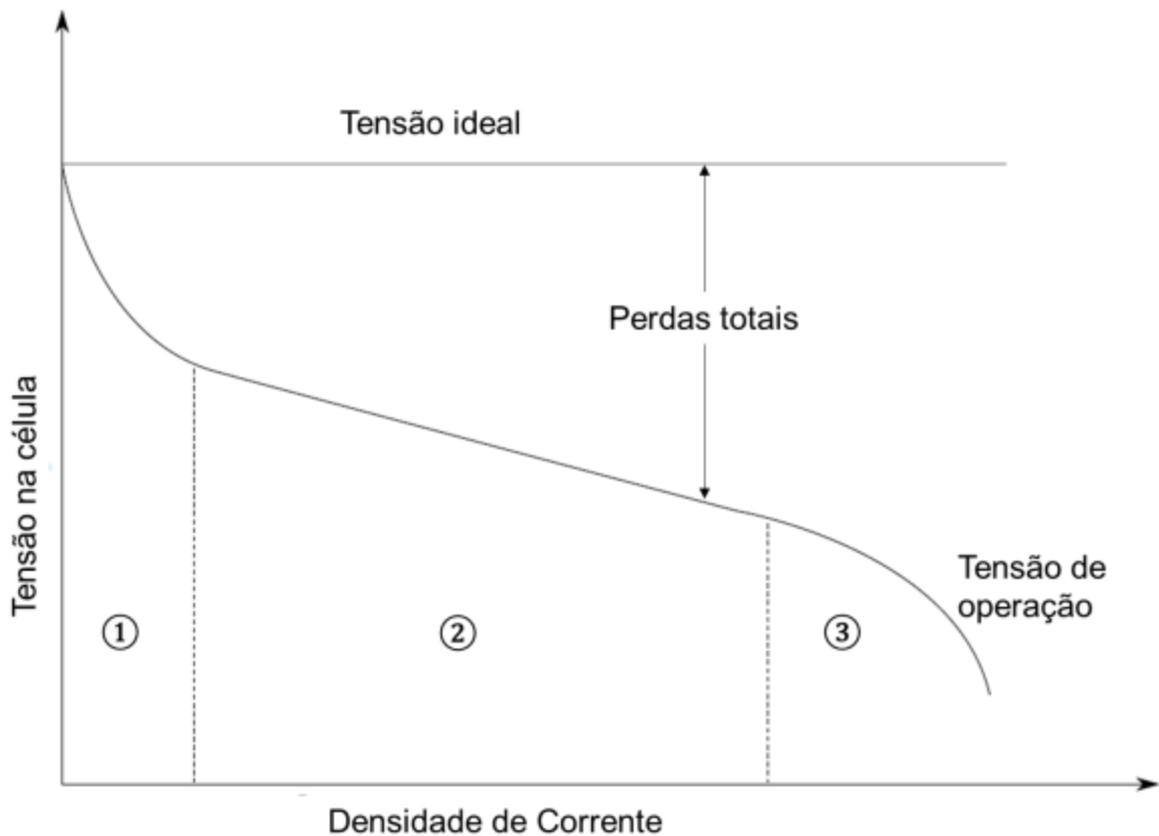


FONTE: Modificado de EHSANI et al., 2018.

### 3.3.4.2 Desempenho real da célula a combustível

Por conta das irreversibilidades do processo, o desempenho de uma célula a combustível real, é reduzido quando se comparado à uma célula ideal. Tais decréscimos de desempenho são frequentemente chamados por perdas de polarização, caracterizadas por três regiões, conforme ilustra a Figura 26 e discutidas adiante.

Figura 26 – Perdas irreversíveis presentes no desempenho real de uma célula.



FONTE: Modificado de CATLIN, 2010.

#### 3.3.4.2.1 Perda por ativação (Região ①)

Derivam da energia de ativação das reações eletroquímicas nos eletrodos. Tal perda depende da reação do material e da microestrutura do catalisador, das atividades dos reagentes e da densidade de corrente (EG & G SERVICES, 2004).

Esta região dominada pela perda de ativação, é resultado da cinética de reação lenta. Este tipo de perda pode ser reduzido usando catalisadores mais eficazes, aumentando a carga catalítica, aumentando a temperatura de operação ou aumentando a concentração de reagente de O<sub>2</sub> na entrada (CATLIN, 2010). Em situações onde a perda por ativação em processos eletroquímicos é maior que 50 mV, pode-se aproximar a queda de tensão na célula devido às perdas por ativação pela equação (22).

$$\eta_{ativação} = \frac{RT}{anF} \ln \frac{i}{i_0} \quad (22)$$

Sendo  $\alpha$ , o coeficiente de transferência de elétrons da reação no eletrodo e  $i_0$  é a densidade de corrente da troca (EG & G SERVICES, 2004).

#### 3.3.4.2.2 Perdas ôhmicas (Região ②)

São causadas por resistência iônica no eletrólito e eletrodos, resistência elétrica nos eletrodos, coletores de corrente, interconexões e conectores. As perdas ôhmicas são proporcionais à densidade de corrente, dependem da seleção de materiais, da geometria do conjunto de células e da temperatura de operação (EG & G SERVICES, 2004).

Tais perdas podem ser reduzidas usando materiais com alta condutividade elétrica, garantindo que as camadas adjacentes façam contato elétrico suficiente, mantendo a hidratação do eletrólito e tornando o eletrólito o mais fino possível, garantindo que não haja curto elétrico entre os eletrodos (CATLIN, 2010). Como os eletrólitos e os eletrodos da célula a combustível obedecem à lei de Ohm, as perdas ôhmicas podem ser expressas pela equação (23), (EG & G SERVICES, 2004).

$$\eta_{ohm} = iRe \quad (23)$$

Sendo  $i$  (A) a corrente elétrica através do circuito, e  $Re$  a resistência total da célula ( $\Omega$ ), que inclui resistência elétrica, ôhmica e de contato como mostra a equação (24), (EG & G SERVICES, 2004).

$$Re = Re_{elétrica} + Re_{ôhmica} + Re_{contato} \quad (24)$$

Um dos parâmetros chave para o desempenho da célula está relacionado a este tipo de perda, é o ASR (Resistencia Específica por Área). O ASR é função dos detalhes construtivos do conjunto de células, bem como os materiais envolvidos e o processo de fabricação do sistema.

#### 3.3.4.2.3 Perda por transporte de massa (Região ③)

Resultado da limitação nas taxas de transporte de massa dos reagentes. Dependem principalmente da densidade de corrente, atividade dos reagentes e estrutura do eletrodo (EG & G SERVICES, 2004).

Para um PEMFC, essa perda está normalmente associada ao lado do cátodo. O ar de entrada é composto por apenas cerca de 20% de O<sub>2</sub> e pode ser esgotado antes que o fluxo alcance a saída da célula para estequiometrias<sup>1</sup> baixas. Estequiometrias mais altas podem ajudar a aumentar a quantidade de O<sub>2</sub> disponível para a reação, mas também resulta em maiores perdas parasitárias do sistema auxiliar devido ao aumento da demanda de energia no compressor de ar. Outra razão para as perdas de transporte de massa em altas densidades de corrente são as inundações devido à produção de grandes quantidades de água líquida que pode saturar a camada de difusão de gás e bloquear o acesso ao reagente. Com os diferentes tipos de mecanismos de perda identificados, é possível fazer a seleção de materiais adequados e recomendações de projeto para diferentes tipos de condições operacionais (CATLIN, 2010). Embora em baixas densidades de corrente e altas concentrações de reagente em massa, as perdas por transporte de massa não sejam significativas, sob condições práticas (altas densidades de corrente, baixas concentrações de combustível e ar), muitas vezes contribuem significativamente para a diminuição do potencial da célula (EG & G SERVICES, 2004).

Para células a combustível que utilizam combustível em fase gasosa, a corrente de difusão à uma dada taxa de transporte de massa para a superfície de um eletrodo, em muitos casos pode ser descrita pela primeira lei de difusão de Fick (EG & G SERVICES, 2004).

$$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\delta} \quad (25)$$

Sendo  $i$  (A/cm<sup>2</sup>),  $n$  o número de elétrons equivalente por mol,  $F$  a constante de Faraday (96487 C/mol),  $D$  (cm<sup>2</sup>/s) o coeficiente de difusão do reagente,  $C_B$  a

---

<sup>1</sup> Termo utilizado para referir a proporção entre combustível e elemento oxidante. Na reação estequiométrica a mesma proporção é utilizada (50/50). Estequiometria alta possui maior quantidade de elemento oxidante, já a estequiometria baixa, a proporção de elemento oxidante é menor

concentração do meio,  $C_S$  a concentração da superfície do eletrodo e  $\delta$  a espessura da camada de difusão em cm. Outro parâmetro importante para se determinar as perdas por transporte de massa, é corrente de difusão limite  $i_L$  (A/cm<sup>2</sup>), medida pela a quantidade máxima na qual um reagente pode ser fornecido a um eletrodo, e ocorre quando  $C_S = 0$ .

$$i_L = \frac{nFD(C_B)}{\delta} \quad (26)$$

Após uma série de manipulações matemáticas envolvendo as equações (21), (25) e (26), as perdas pelo efeito de transporte de massa, pode ser expressa como.

$$\eta_{massa} = \frac{RT}{nF} \ln \left( 1 - \frac{i}{i_L} \right) \quad (27)$$

#### 3.3.4.2.4 Resultado cumulativo das perdas

O efeito combinado das perdas de uma célula a em uma dada condição de operação pode ser expressa como polarização. A polarização total em cada eletrodo é a soma das perdas de ativação com as perdas de massa (EG & G SERVICES, 2004), ou seja.

$$\eta_{anodo} = \eta_{ativação,anodo} + \eta_{massa,anodo} \quad (28)$$

$$\eta_{catodo} = \eta_{ativação,catodo} + \eta_{massa,catodo} \quad (29)$$

Incluindo o efeito de polarização na tensão dos eletrodos tem-se

$$V_{anodo} = E_{anodo} + |\eta_{anodo}| \quad (30)$$

$$V_{catodo} = E_{catodo} - |\eta_{catodo}| \quad (31)$$

O resultado líquido do fluxo de corrente em uma célula de combustível é aumentar o potencial do ânodo e diminuir o potencial do cátodo, reduzindo assim a tensão da célula (EG & G SERVICES, 2004). Incluindo os efeitos das perdas ôhmicas, tem-se:

$$V_{célula} = V_{catodo} - V_{anodo} - \eta_{ohm} \quad (32)$$

Rearranjando a equação (32) com as equações (30), (31) e (24), temos a diminuição da tensão da célula considerando os efeitos cumulativo das perdas.

$$V_{célula} = \Delta E_e - |\eta_{catodo}| - |\eta_{anodo}| - iRe \quad (33)$$

Sendo  $\Delta E_e$  a diferença de tensão entre o cátodo e o anodo. O objetivo principal dos desenvolvedores de células a combustível é buscar reduzir ao máximo as perdas cumulativas trazendo  $\Delta E_e$  o mais próximo possível de  $V_{célula}$  (em V). Tal objetivo pode ser alcançado através de modificações construtivas na célula, como por exemplo o uso de eletrodos e catalisadores mais eficientes, eletrólito com alta capacidade condutiva, etc. Para um determinado projeto de célula, é possível melhorar seu desempenho modificando as condições de operação (por exemplo, pressão de gás mais alta, temperatura mais alta, mudança na composição do gás para diminuir a concentração de impurezas, etc.) (EG & G SERVICES, 2004). No entanto, para qualquer célula a combustível, existem compromissos entre atingir um desempenho mais alto operando em temperatura ou pressão mais altas e os problemas associados às limitações físicas de durabilidade dos componentes (EG & G SERVICES, 2004).

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente é introduzido o software de simulação adotado, incluindo suas características operacionais. Posteriormente um modelo numérico é proposto

detalhando os principais parâmetros que influenciam no desempenho operacional do sistema propulsor e conseqüentemente no veículo.

#### 4.1 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO ADVISOR

O Departamento de Energia dos EUA (DOE) e o Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) desenvolveram o ADVISOR em 1994 como uma ferramenta de análise para projetos de veículos. Com licença aberta até as versões de 2003, sendo possível alterar os códigos fontes de acordo com a necessidade do modelo em estudo, após esse ano, a licença foi adquirida pela AVL *Powertrain Limited*. É um modelo escrito no ambiente MATLAB / Simulink amplamente aceito na indústria automotiva, que permite a simulação e a análise de veículos convencionais e avançados (ADVISOR, 2003). O ADVISOR testa o impacto das variações nos componentes do veículo ou outras alterações que podem afetar os parâmetros de desempenho veicular (PRATHIBHA et al., 2020). Os principais benefícios do software são:

1. Reduz o tempo de teste para avaliar várias configurações do trem de força do veículo.
2. Fornece uma plataforma de simulação compartilhada para o governo e a indústria.
3. Auxilia a indústria automobilística a fabricar veículos com baixo consumo de combustível e seus componentes.
4. Estimar a economia de combustível de veículos que ainda não foram construídos.
5. Aprender sobre como os veículos convencionais, híbridos ou elétricos usam (e perdem) energia em seus sistemas propulsores.
6. Comparar as emissões relativas das linhas de escapamento produzidas em uma série de ciclos.
7. Avaliar uma estratégia de gerenciamento de energia para o conversor de combustível de um veículo híbrido.
8. Otimizar as relações de marcha em sua transmissão para minimizar o uso de combustível ou maximizar o desempenho, etc.

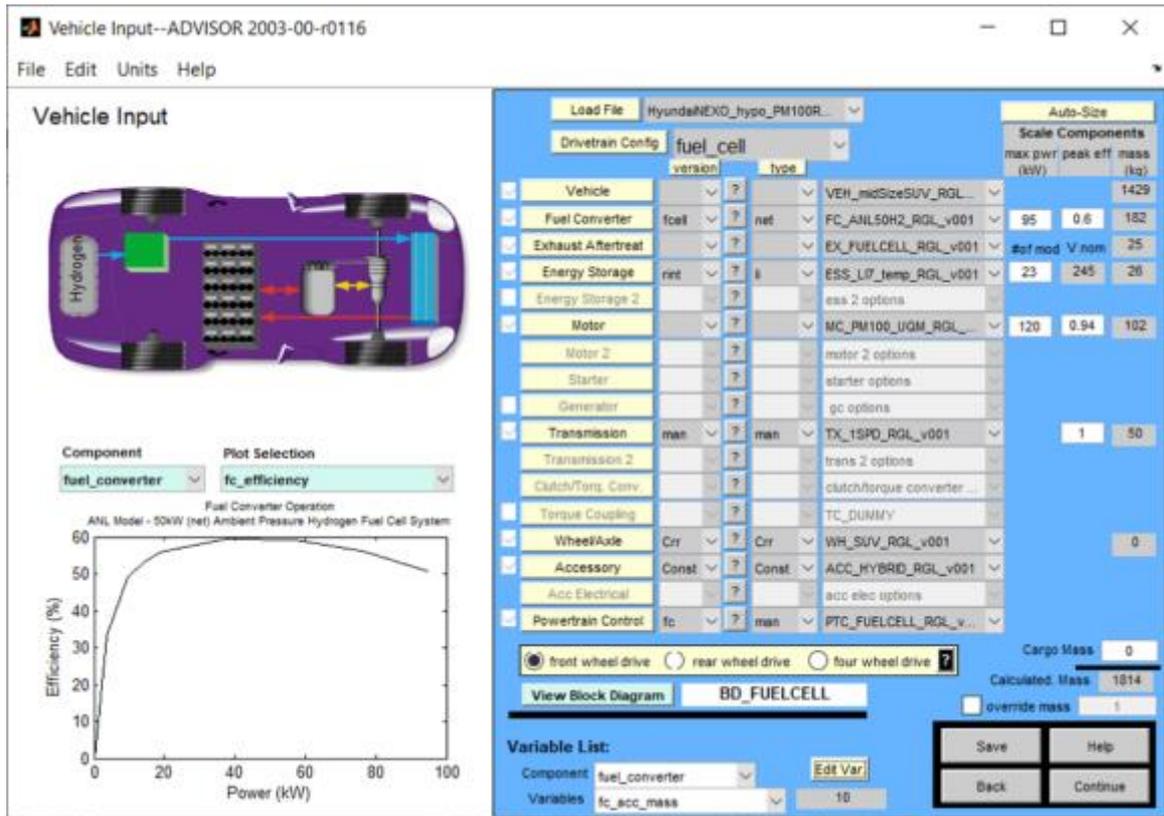
Cerca de 2/3 dos usuários são da indústria e 1/3 das universidades, uma pequena lista das principais empresas que utilizam e contribuem para o

desenvolvimento do ADVISOR inclui: Daimler-Chrysler, Ford Motor Company, General Motors Corp, Delphi Automotive Systems, Visteon e centenas de outros, tal comunidade é amplamente capaz de fornecer feedbacks e contribuições extremamente necessárias para melhorar os modelos e os dados a serem usados nas simulações (MARKEL et al., 2002).

No ADVISOR existem três interfaces gráficas (GUIs) principais que orientam o usuário no processo de simulação. As GUIs permitem a interação com os dados de entrada e saída disponíveis na área de trabalho do MATLAB. O modelo do veículo é ilustrado graficamente usando diagramas de blocos e os resultados podem ser obtidos na janela de resultados. A Figura 27 ilustra, a janela de entrada do veículo ADVISOR é mostrada, onde o usuário pode construir o veículo de seu interesse. Menus suspensos são utilizados para obter várias configurações veiculares pré-existentes que podem ser alteradas ou reformuladas através da modificação e edição dos parâmetros operacionais. Na Figura 28, é mostrada a tela de parâmetros de simulação, onde o usuário pode definir todo o procedimento de teste, incluindo os parâmetros do ciclo de condução a serem simulados (PRATHIBHA et al., 2020), nesta seção também possível incluir testes adicionais tais como aceleração máxima, capacidade de subida em rampa, bem como um estudo paramétrico envolvendo até três variáveis definidas pelo usuário, sendo que seus valores mínimos e máximos podem ser incluídos diretamente no GUI.

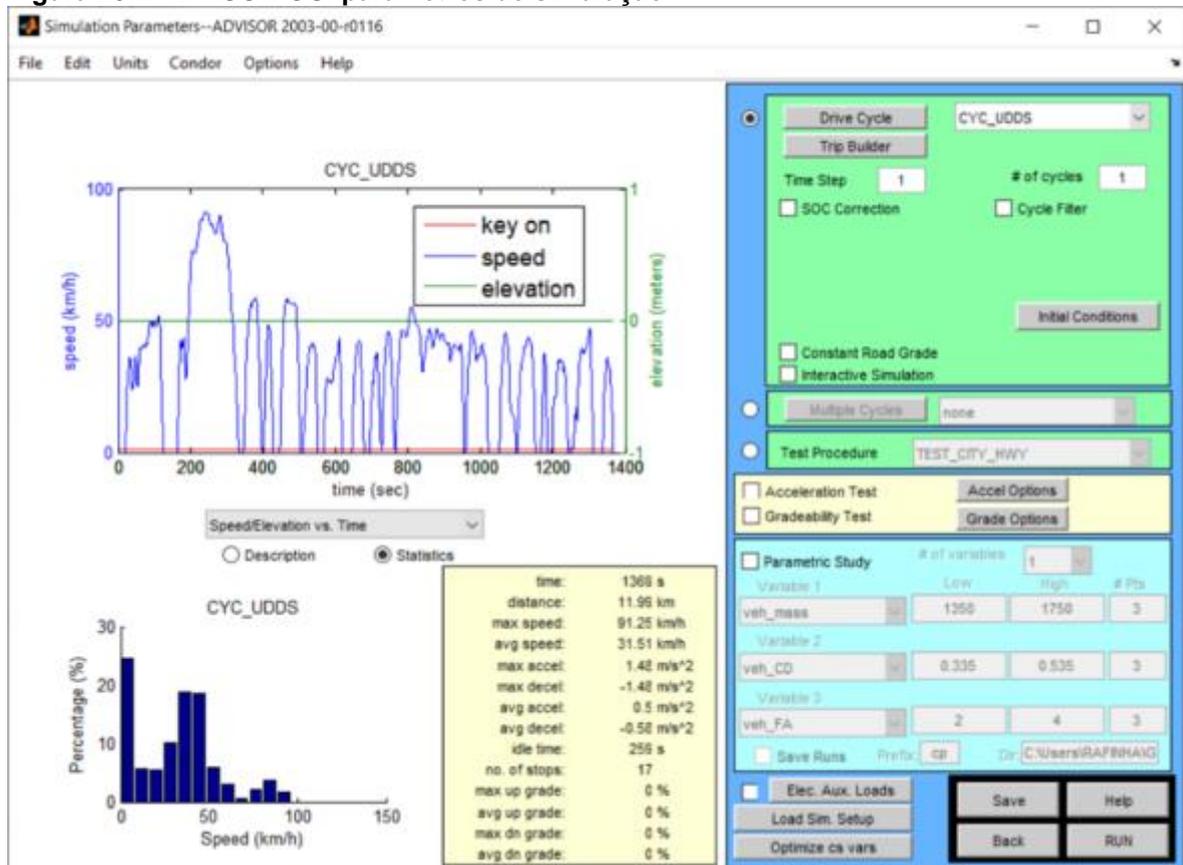
Ao final da simulação, o desempenho do veículo pode ser revisado na janela de resultados mostrada na Figura 29, onde de modo padrão, a economia de combustível e as emissões são exibidas, caso o usuário tenha escolhido realizar os testes de aceleração e máxima, capacidade de rampa, tais resultados também são incluídos. Pode-se escolher um grande número de opções de saída relacionadas à velocidade do veículo e torque do sistema propulsor, consumo de combustível, emissões, estado de carga da bateria (SOC) entre vários outros parâmetros para serem exibidos, de acordo com as necessidades e o escopo do estudo pretendido pelo usuário (PRATHIBHA et al., 2020).

**Figura 27 – ADVISOR GUI dados de entrada.**



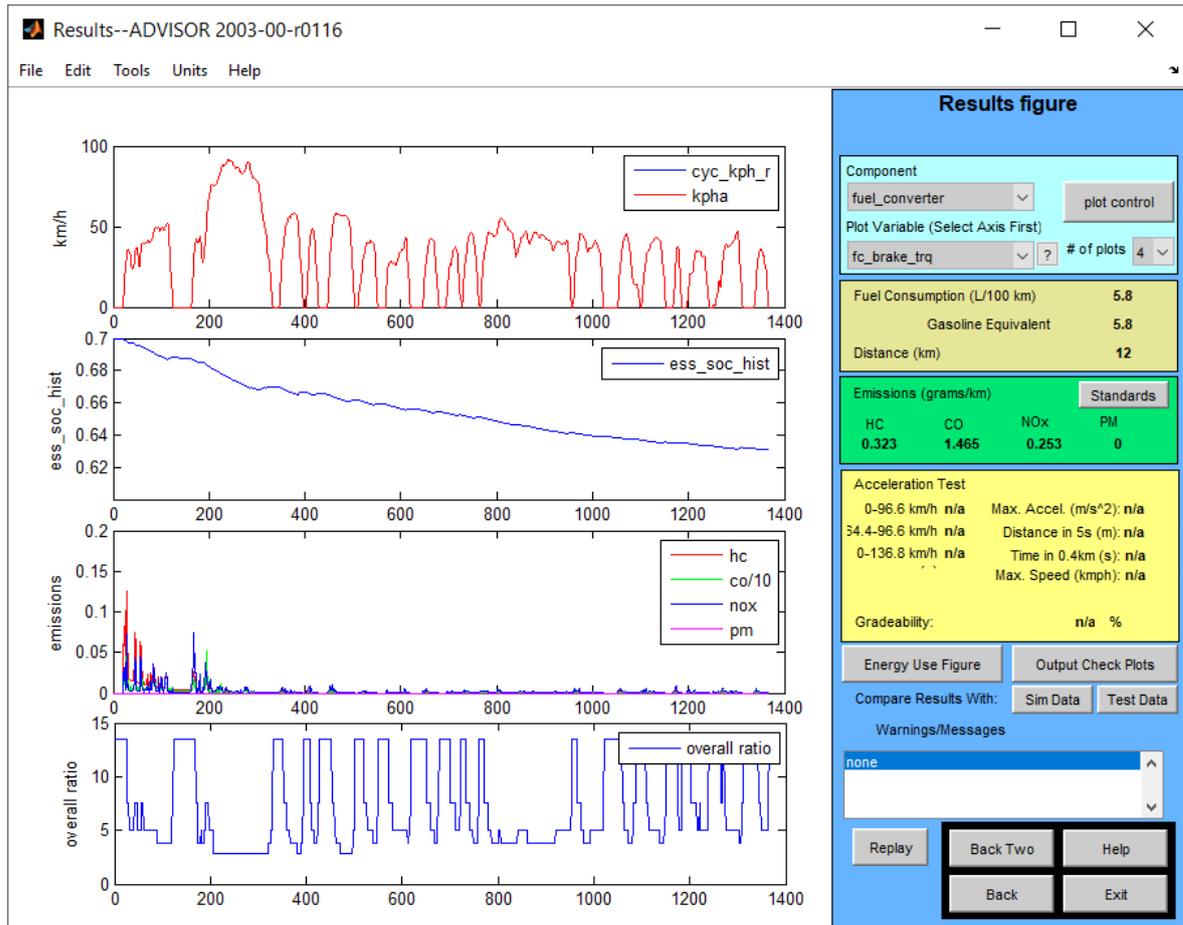
FONTE: ADVISOR, 2003.

Figura 28 – ADVISOR GUI parâmetros de simulação.



FONTE: ADVISOR, 2003.

Figura 29 – ADVISOR GUI Resultados.



FONTE: ADVISOR, 2003.

## 4.2 MODELO VEICULAR

Um modelo de veículo com célula a combustível deve ser fisicamente e matematicamente robusto. Todos os efeitos físicos relevantes devem ser considerados e o modelo deve ser baseado em fundamentos matemáticos sólidos. A menos que essas duas condições sejam atendidas, não se pode confiar nos resultados obtidos (TURKMEN et al., 2017).

O escopo do modelo definido para o presente trabalho é um veículo utilitário esportivo (SUV), sendo os parâmetros operacionais e as principais especificações dos componentes, derivados do Hyundai Nexu versão *Blue*, modelo atualmente em produção a ser usado como referência para posterior validação dos resultados obtidos. A escolha de um SUV está alinhada com o aumento significativo das vendas do segmento no mercado global. Os consumidores em todo o mundo estão migrando para os veículos SUVs e se afastando dos tradicionais sedans, peruas e *hatchbacks*. Verificou-se que a participação de mercado de SUVs nos EUA saltou de menos de 45% em 2012 para quase 65% em 2018. Enquanto isso, na China, as

vendas de automóveis aumentaram cerca de 50% de 2010 a 2018, mas as vendas de SUVs dispararam 600% sem precedentes no mesmo período (BUSINESSWIRE, 2019).

Poucos veículos em produção atualmente utilizam-se de células a combustível como fonte primária de energia para o sistema propulsor elétrico. A escolha do Hyundai Nexo *Blue* 2019 também está relacionada com o nível de informações técnicas disponíveis para o público, informações estas mais difíceis de serem encontradas para os outros modelos, como Toyota Mirai, Honda Clarity e etc. O sistema propulsor do Hyundai Nexo é adequado para o escopo do modelo proposto de um veículo elétrico híbrido com células a combustível. Lançado em 2018, Nexo está disponível nos EUA, Europa, Sul Coréia e Japão (NASSIF; DE ALMEIDA, 2020).

Dada as restrições impostas pelas leis de sigilo e confidencialidade industrial, alguns parâmetros foram estimados baseados nas informações presentes na literatura e disponíveis na internet. A Tabela 5 a seguir, apresenta a especificação técnica dos principais componentes do modelo.

**Tabela 5 – Especificação técnica Hyundai Nexo 2019**

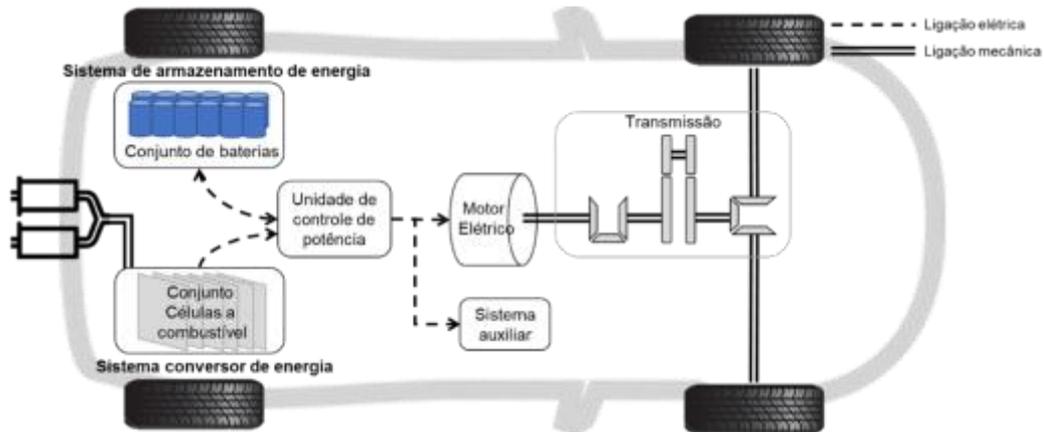
<b>Sistema propulsor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Especificação</b>
Motor elétrico	Tipo	Motor de ímã permanente
Potência máxima	kW	120
Torque máximo	Nm	395
Temperatura de partida a frio	°C	-30
<b>Sistema de energia</b>		
Potência total do sistema de energia	kW	135
Conjunto de baterias	Tipo	Íon-lítio
Potência total do conjunto de baterias	kW	40
Tensão nominal do conjunto de baterias	V	240
Capacidade nominal	Ah	6.5
Conjunto de célula a combustível	Tipo	PEMFC
Potência total do conjunto de células a combustível	kW	95
Densidade de potência do conjunto de células	kW/l	3.1
Combustível	Tipo	Hidrogênio gasoso
Capacidade do tanque de combustível	l	156.6
<b>Desempenho veicular</b>		
Velocidade máxima	km/h	179
Aceleração 0-100 km/h	s	9.2
Aceleração 100-120 km/h	s	7.4
Emissão de CO <sub>2</sub>	g/km	0
Consumo de combustível declarado Cidade/ Estrada/ Combinado (MPGe)	Milhas/galão	65/ 58/ 61
<b>Parâmetros veiculares</b>		
Comprimento	mm	4670

Largura	mm	1860
<b>Continuação Tabela 5.</b>		
Altura	mm	1630
Distância entre eixos	mm	2790
Coefficiente aerodinâmico	-	0.329
Pneus	-	225/60 R17
Raio dinâmico (calculado a partir dos dados do pneu)	m	0.351
Seção transversal da área frontal	m <sup>2</sup>	2.52
Massa do veículo	kg	1814-1873
Classe de inercia segundo EPA	kg	1814
Massa máxima	kg	2340
Aceleração gravitacional	m/s <sup>2</sup>	9.8
Densidade do ar	kg/m <sup>3</sup>	1.2

**FONTE:** Modificado de NASSIF e DE ALMEIDA, 2020; SEREDYNSKI, 2018 e Hyundai NEXO, 2018.

Segundo o código de regulamentos federais § 86.129-94 da EPA (*Environmental Protection Agency*), agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, que determina a massa de teste a serem assumidas baseadas em uma classe de inercia, o veículo proposto com 1814 kg se enquadra nos limites entre 1786 kg e 1871 kg, sendo regulamentado na classe de inercia de 1814 kg, exatamente a massa do modelo. A Figura 30, apresenta a configuração simplificada do Hyundai Nexa, bem como o fluxo de potência e a interação entre os sistemas de propulsão e fonte de energia. A representação numérica do modelo veicular físico, mostrado na Figura 30, com os dados da Tabela 5, exigem a modelagem matemática de pelo menos 9 sistemas, a serem descritos na próxima seção: 1) Veículo SUV, 2) Célula a combustível, 3) Motor elétrico, 4) Sistema de armazenamento de energia, 5) Sistema de escape, 6) Sistema de transmissão, 7) Rodas e eixos, 8) Acessórios e 9) Controle do sistema propulsor. Como resultado final um modelo numérico será proposto com o auxílio do ADVISOR.

**Figura 30 – Configuração simplificada do modelo veicular**



FONTE: O autor, 2020.

#### 4.3 MODELO NUMÉRICO

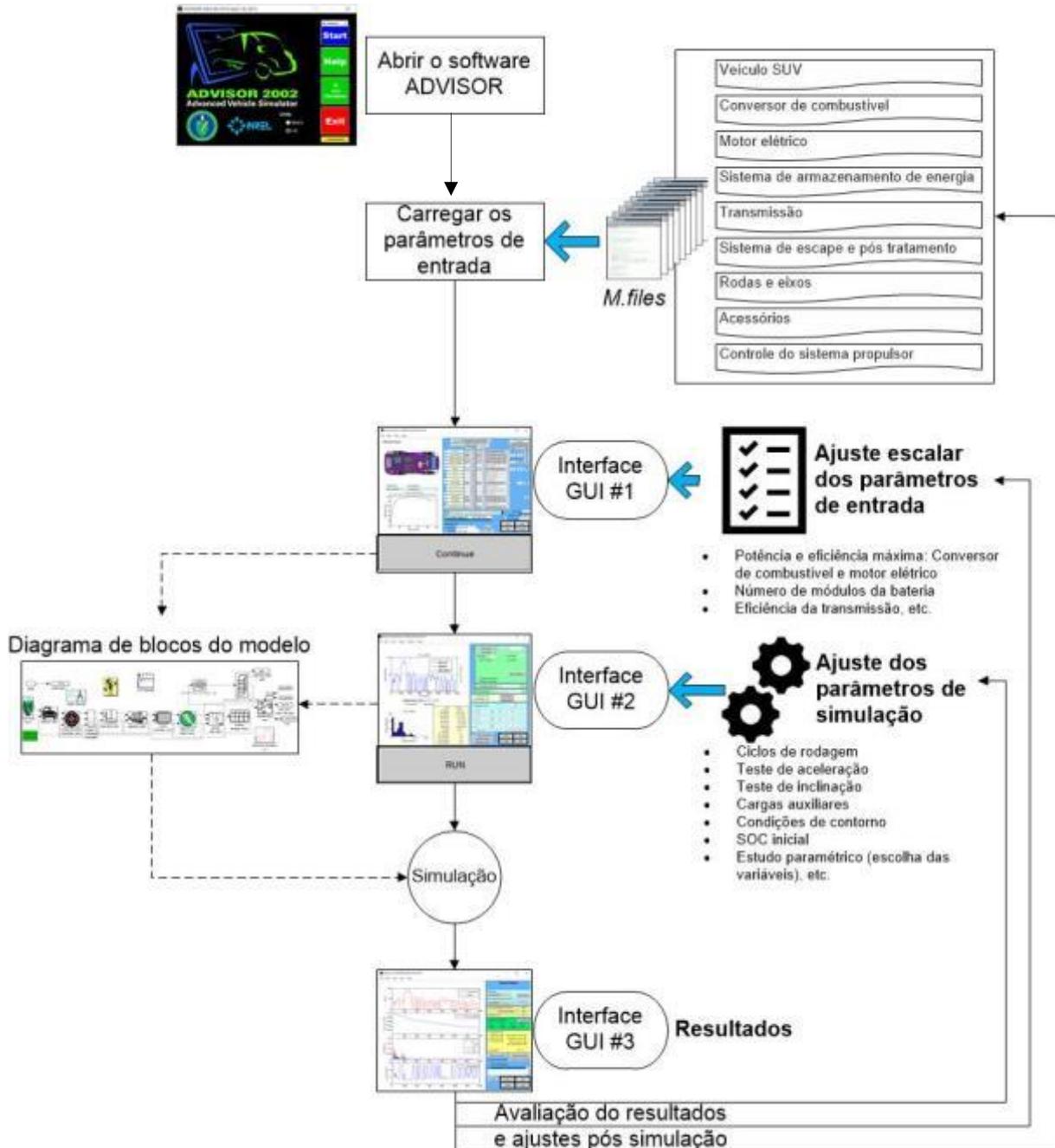
O ADVISOR se baseia em duas metodologias de simulação, a direta e a inversa (do inglês *forward* e *backward simulation*), que estão relacionadas com o sentido de cálculo e o sentido do fluxo de potência do modelo. Enquanto na metodologia inversa se caracteriza por ter sentido de cálculo na direção oposta ao fluxo de potência do sistema, a metodologia direta, possui a mesma direção e sentido entre a rotina de cálculos e o fluxo de potência (DIXON et al., 2015). O modelo inverso toma como entrada o ciclo de condução sobre o qual o veículo deve ser avaliado, ciclos típicos prescrevem a velocidade em função do tempo e, em alguns casos, também define qual das engrenagens da transmissão do veículo deve ser selecionada em função do tempo. Diferenciando a função de velocidade do ciclo de condução em relação ao tempo, a aceleração do veículo é encontrada, essa aceleração é usada para calcular o esforço de tração e os torques resultantes no sistema de transmissão e conseqüentemente do sistema propulsor (DIXON et al., 2015).

A Figura 31, apresenta o fluxograma sobre a simulação do modelo numérico no ADVISOR, desde a introdução dos parâmetros de entrada no software, passando pelo ajuste escalar dos dados de entrada, seleção das condições de contorno e dos parâmetros de simulação através dos ciclos de condução e testes adicionais como aceleração e velocidade máxima, desempenho em rampa, seleção dos dados para o estudo paramétrico, até a coleta dos resultados finais.

A interface GUI, é usada para interagir com os arquivos do programa em segundo plano no MATLAB e controlar a seleção dos modelos de componentes a serem usados. Esses modelos são armazenados individualmente em uma biblioteca

no ADVISOR e representados por diagramas de blocos no Simulink. Cada bloco pode receber parâmetros específicos que serão carregados posteriormente no espaço de trabalho do MATLAB como um conjunto de entrada (WU, 2010).

**Figura 31 – Fluxograma da simulação numérica**



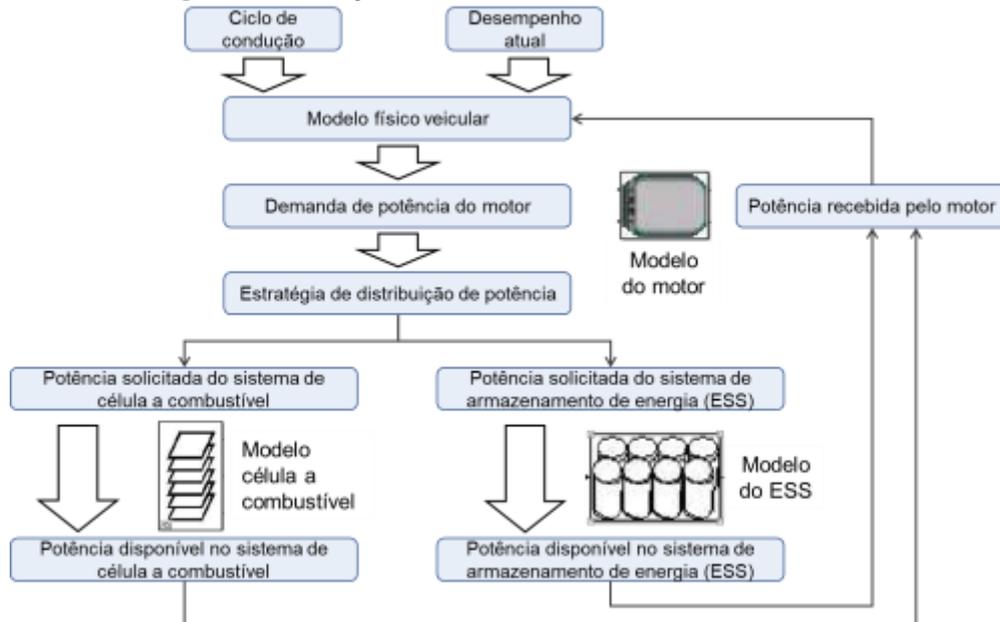
FONTE: O autor, 2020.

A seguir a Figura 33 apresenta o diagrama de blocos que representa o modelo numérico do veículo SUV Hyundai Nexso proposto, todas as variáveis de entrada e saída de cada bloco foram listadas e descritas no ANEXO 1. Em primeiro lugar, emprega-se uma abordagem inversa, onde o bloco do veículo recebe a solicitação de velocidade de um ciclo de direção especificado a cada instante de tempo, juntamente com a força de tração e velocidade linear disponível na saída do bloco das rodas. Em seguida, as solicitações posteriores de torque e velocidade angular são sucessivamente convertidas por meio das relações de transmissão, em

termos do que é requerido e o que está disponível nos blocos adjacentes. Torque e velocidade angular são convertidos em demandas de energia elétrica, proveniente dos blocos de ESS e de célula a combustível, responsáveis pela conversão e armazenamento de energia respectivamente. Ao final, a demanda de torque e velocidade do motor elétrico são calculados, afim de se obter a potência requerida na saída do sistema de células a combustível. No entanto, a potência calculada ou a demanda de velocidade podem exceder a capacidade dos componentes do sistema propulsor, neste caso, a abordagem direta é empregada para superar as limitações dos componentes reais e estimar o desempenho real do veículo a partir do fluxo de potência calculado através dos sub-blocos (WU, 2010).

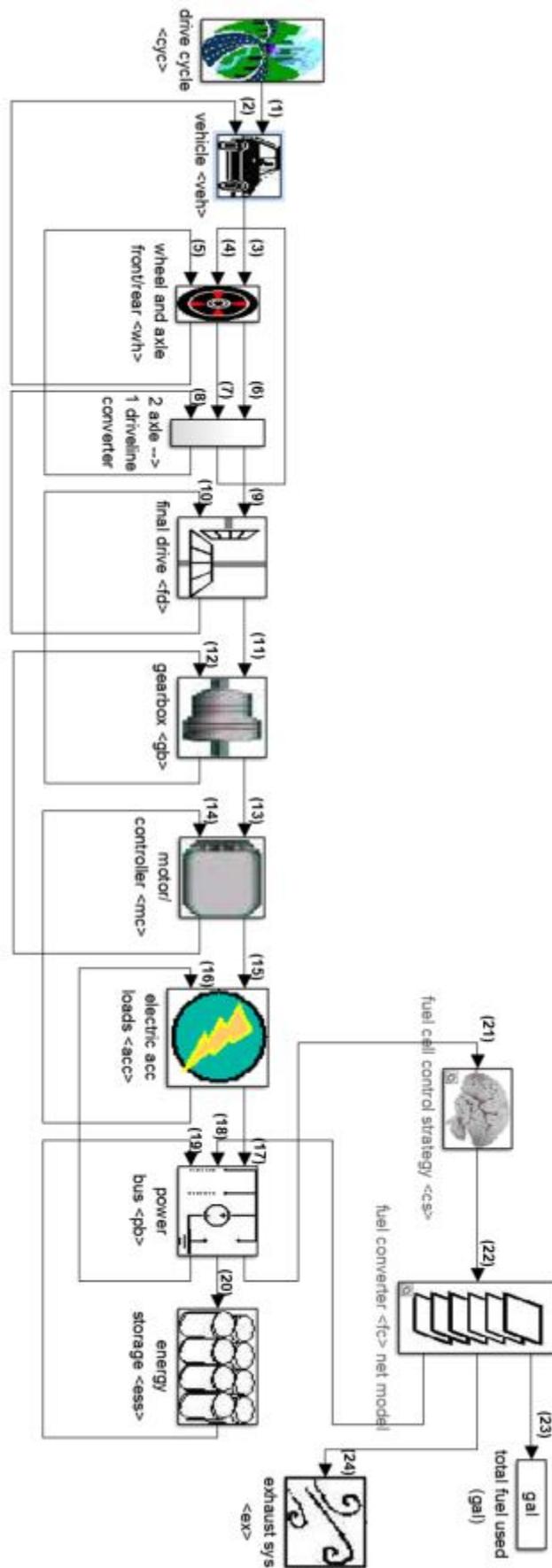
A Figura 32, apresenta o fluxograma simplificado da metodologia inversa de simulação do modelo numérico veicular com células a combustível.

**Figura 32 – Fluxograma simulação inversa no ADVISOR**



**FONTE: Modificado de WU, 2010.**

**Figura 33 – Diagrama de blocos geral do modelo no ADVISOR**

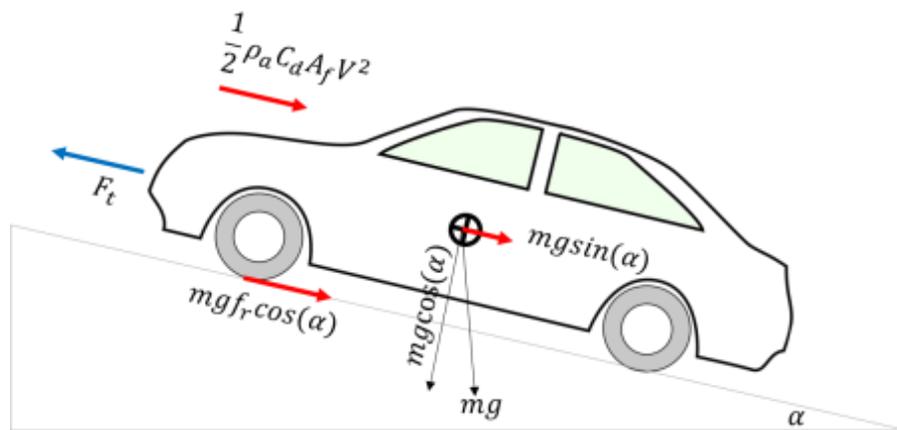


FONTE: Modificado de ADVISOR, 2003.

Embora as equações utilizadas nos modelos numéricos no ADVISOR sejam de primeira ordem, elas são precisas para uma análise de desempenho veicular. Empregando a segunda lei de movimento de Newton em um corpo sólido, pode-se descrever o movimento dinâmico em linha reta de um veículo (WU, 2010), representada a seguir pela equação (34), com o diagrama de equilíbrio de forças num veículo em rampa ilustrado pela Figura 34.

$$F_t = mgf_r \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_d A_f V^2 + mg \sin(\alpha) + m \frac{dv}{dt} \quad (34)$$

**Figura 34 – Diagrama de equilíbrio de forças num veículo em rampa**



**FONTE: O autor, 2020.**

Sendo  $F_t$  é a força de tração do veículo medido em (N) e os quatro termos subsequentes da equação são a força para superar a resistência ao rolamento, a força para superar a resistência aerodinâmica, a força para superar a resistência a aclives e a força para aceleração, respectivamente. Onde  $m$  é a massa operacional do veículo medido em kg,  $g$  a aceleração gravitacional medida em metros por segundo ao quadrado,  $f_r$  o coeficiente de resistência a rolamento,  $\alpha$  o ângulo de aclive ou declive que o veículo se encontra em graus,  $\rho_a$  a densidade do ar em quilograma por metro cúbico,  $C_d$  coeficiente de arrasto aerodinâmico,  $A_f$  área transversal frontal do veículo em metro quadrado e  $V$  a velocidade em metros por segundo.

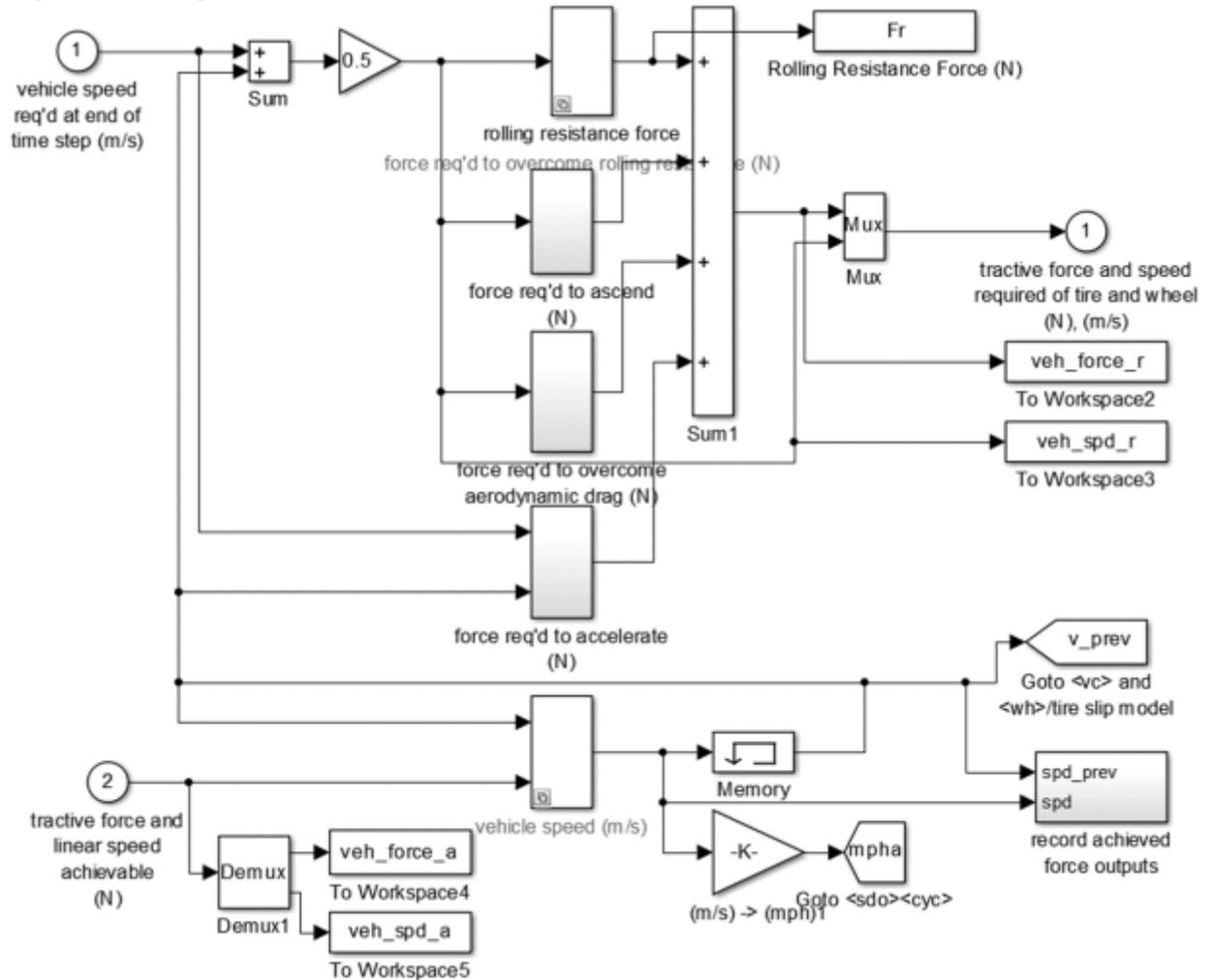
Conforme mostrado na equação (34), a força de tração do veículo em cada instante de tempo pode ser obtida de acordo com a solicitação de velocidade de um determinado ciclo de condução e os parâmetros do modelo físico do veículo, incluindo massa do veículo, coeficiente de arrasto aerodinâmico, área frontal e

resistência ao rolamento, a Figura 35, ao final desta seção, apresenta o sub-blocos do veículo apresentado na Figura 33, que leva em consideração toda a abordagem matemática descrita pela equação (34). Os quatro principais sistemas, incluindo as características funcionais e operacionais do próprio veículo (veículo, motor elétrico, conversor de combustível e sistema de armazenamento de energia) que compõem o modelo numérico para representar o comportamento físico do carro, são ilustrados através do diagrama de blocos das Figuras 35, 36, 37 e 38 respectivamente. A Figura 36, apresenta do diagrama de blocos do motor elétrico, a modelagem dos componentes e conjunto de sistemas no ADVISOR são de natureza quase-estática e empíricos, seus dados foram coletados com base em medições de testes reais em regime permanente e estacionário em laboratório e corrigidos para desempenho de estado transiente (ADVISOR 2003).

O conversor de combustível baseado em célula a combustível, é o dispositivo eletroquímico que converte o combustível em energia utilizável (energia elétrica) para o sistema propulsor. Conforme modelado, ele foi projetado para ser incorporado a uma configuração veicular em série (ADVISOR 2003). Dada uma potência solicitada calculada pelos outros submodelos, o modelo do conversor de combustível determina o ponto operacional da célula a combustível necessário para atender a esses requisitos, ao mesmo tempo em que contabiliza as cargas dos acessórios. Uma vez que a potência alcançável tenha sido determinada, esses valores são utilizados de volta para o resto do modelo do veículo, conforme ilustra a Figura 37 do diagrama de blocos do sistema conversor de combustível. Tais valores também são utilizados para determinar o uso de combustível e, quando aplicável, as emissões para cada etapa de tempo. O uso de combustível e os valores de emissões do conversor de combustível são armazenados em tabelas indexadas pela potência do conversor de combustível. Fatores de correção de temperatura são incorporados para dimensionar o uso de combustível e as emissões para partidas a frio (ADVISOR 2003).

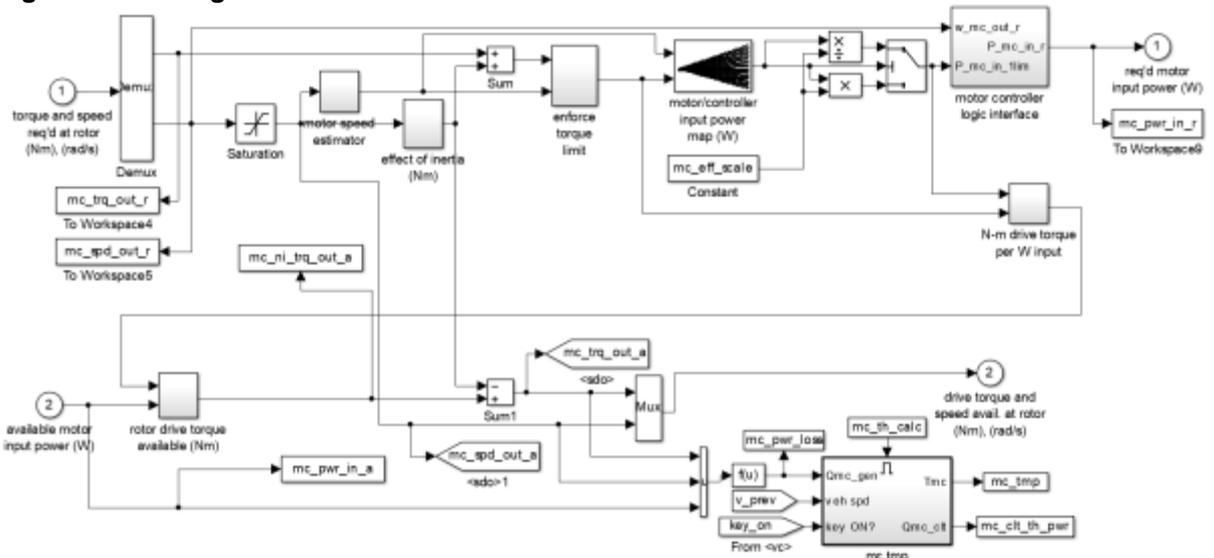
A estratégia de distribuição de potência entre o sistema de armazenamento de energia (ESS) e o sistema conversor de combustível (célula a combustível) é similar à de um veículo híbrido em série, aqui descrito de maneira simplificada como do tipo “termostato”, onde o conversor de combustível é acionado quando o SOC atinge o ponto de ajuste baixo ( $cs\_lo\_soc$ ) e desliga quando o SOC atinge o ponto de ajuste alto ( $cs\_hi\_soc$ ), vide diagrama de bloco do ESS na Figura 38.

Figura 35 – Diagrama de blocos do veículo



FONTE: Modificado de ADVISOR, 2003.

Figura 4.36 – Diagrama de blocos do motor elétrico



FONTE: Modificado de ADVISOR, 2003.



podem ser encontradas no apêndice A da seção de documentação disponível em (ADVISOR, 2003).

#### 4.3.1 Parâmetros de entrada no ADVISOR

A fim de se representar o modelo do veículo descrito nesse trabalho como o mais próximo possível do veículo real, o ajuste dos parâmetros de entrada é de grande importância e dita de maneira direta os resultados ao final de cada esforço de simulação. A seguir são apresentados os principais *M-files* escritos em ambiente MATLAB, que alimentam as simulações realizadas no ADVISOR. Ao todo 9 arquivos foram ajustados baseados nas informações descritas na Tabela 5.

##### 4.3.1.1 Veículo SUV médio

Descrito como *VEH\_midSizeSUV.m*, dada similaridade com a classificação do Hyundai Nexu atualmente em produção, o arquivo foi baseado num SUV de porte médio. Tal documento, é responsável por alimentar o modelo numérico com os parâmetros físicos e as condições de contorno necessárias para os cálculos posteriores. Dentre os principais parâmetros carregados pelo arquivo, estão: aceleração gravitacional, densidade do ar, massa do veículo, coeficiente de arrasto aerodinâmico, área frontal do veículo, distribuição de peso entre eixos, centro de massa, distância entre eixos e carga de massa adicional.

Parâmetros que não estão descritos na Tabela 5, foram estimados utilizando os valores padrões propostos pelo ADVISOR, neste caso a distribuição de peso entre eixos ficou com 55.5% nos eixos dianteiros e o centro de massa de 0.7 m a partir do solo como referência. Outra modificação necessária foi da massa do modelo desconsiderando o conversor de combustível, o conjunto de baterias, o sistema de escape, o motor elétrico e o sistema de transmissão, como resultado descontando-se o valor de massa de cada um desses componentes, tem-se 1427 kg, ao final as massas individuais de cada sistema são somadas para se obter a massa final do veículo.

##### 4.3.1.2 Conversor de combustível

Este arquivo é responsável por descrever um sistema de célula a combustível do tipo PEMFC de 50 kW de potência líquida, operando com hidrogênio

gasoso, apresentado como *FC\_ANL50H2.m* (ADVISOR, 2003). Um dos ajustes necessários, é a adequação da massa considerando os componentes auxiliares do sistema e o tanque de combustível. Para o conversor de combustível foi adotado um fator de escala de 0.947 kg/kW onde baseando-se na potência máxima de 95 kW do sistema, a massa atingisse o valor de aproximadamente 90 kg, conforme estimado por (HOWARD, 2018). Já os valores do sistema auxiliar e do tanque foram mantidos os padrões de 19kg e 73 kg respectivamente (ADVISOR, 2003). Sendo assim, a massa total resultante é de aproximadamente 182 kg. A última adequação está relacionada com a potência máxima, uma vez que o modelo necessita de 95 kW conforme descrito na Tabela 5, tal modificação é feita diretamente na interface GUI, através de um fator de escala. Tal arquivo, alimenta o modelo numérico com todas as especificações do conjunto de células a combustível, incluindo os mapas de potência, eficiência e parâmetros operacionais.

#### 4.3.1.3 Motor elétrico

Descrito como *MC\_PM100\_UQM.m*, este arquivo inclui os parâmetros de um motor CC com ímãs permanentes desenvolvido para aplicações de VE e VHE, baseados nas especificações do fabricante UQM com 100 kW de potência máxima.

De maneira similar ao conversor de combustível, este *M-file* acompanha o (ADVISOR, 2003). Com potência máxima ajustada para 120 kW conforme descrito na Tabela 5, feito diretamente na interface GUI, através de um fator de escala. O arquivo alimenta o modelo numérico com os mapas de torque, potência e eficiência, faixas de rotações, perdas e outros parâmetros operacionais, a massa também foi modificada através de um fator de escala para que o valor final se aproximasse de 102 kg, conforme representado na interface GUI.

#### 4.3.1.4 Sistema de armazenamento de energia

Também conhecido como ESS (*Energy Storage System*), representa os componentes responsáveis pelo armazenamento de energia, no presente trabalho apenas o conjunto de baterias é considerado. Apresentado como *ESS\_LI7\_temp.m*, descreve um modelo *default* do (ADVISOR, 2003) para uma bateria de íons de lítio. O arquivo *.m* introduz ao modelo numérico desde a faixa de temperatura operacional

até os parâmetros de perdas e eficiência da bateria. As adequações do sistema, foram feitas diretamente na interface GUI, através da variação do número de módulos e da capacidade nominal da bateria, a fim de se adequar o mais próximo possível da tensão nominal 240 V e da capacidade de 6.5 Ah, ambas apresentadas na Tabela 5.

#### 4.3.1.5 Sistema de escape e pós tratamento

Arquivo padrão escolhido para a aplicação do trabalho é o *EX\_FUELCELL.m* (ADVISOR, 2003), define os parâmetros do catalisador de pós-tratamento de exaustão para um veículo equipado com uma célula a combustível. Massas, áreas entre outros fatores operacionais são dimensionados com base na potência máxima da célula a combustível (*fc\_pwr\_max*). Como o resultado global da reação eletroquímica de uma célula PEMFC operando com hidrogênio, não envolve emissões de gases poluentes na linha de escape, o resultado esperado para os níveis emissionados de HC, CO, NOx e PM, para o modelo é nulo. Porém o equacionamento de tal sistema se faz necessário, por fazer parte da cadeia de cálculos do ADVISOR. Nenhuma modificação foi necessária no arquivo .m em questão.

#### 4.3.1.6 Sistema de transmissão

Para o sistema de transmissão, o arquivo *TX\_1SPD.m* é carregado automaticamente de forma padrão, quando o sistema propulsor selecionado é alimentado com célula a combustível. Este arquivo é responsável por incluir no modelo numérico as relações de transmissão da caixa de transmissão de uma velocidade, bem como as perdas e eficiências operacionais.

#### 4.3.1.7 Rodas e eixos

Define os parâmetros estáticos e dinâmicos dos pneus, rodas e semieixos para um veículo utilitário esportivo médio. A modificação feita no arquivo *WH\_SUV.m* foi o valor do raio dinâmico da roda estimado a partir dos parâmetros do pneu 225/60 R17 e os dados dinâmicos do veículo, *wh\_radius*: 0.352 m conforme descrito na Tabela 5.

#### 4.3.1.8 Sistema auxiliar

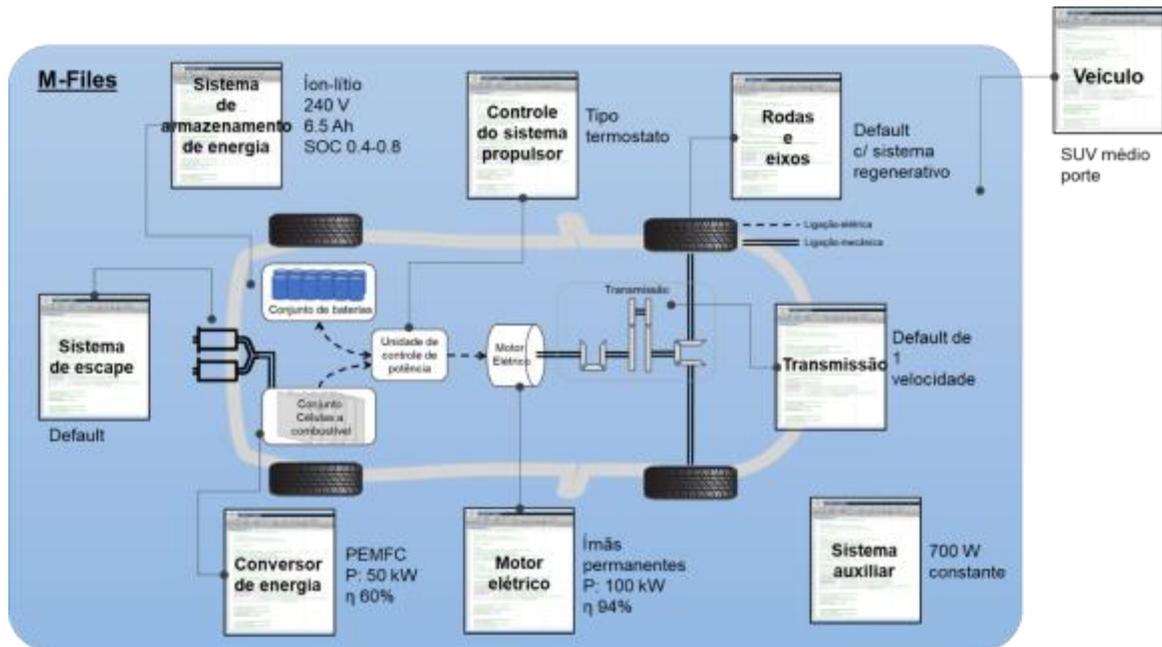
Arquivo ACC\_HYBRID.m carrega os dados de carga dos acessórios padrão para uma aplicação híbrido no ADVISOR. Considera as perdas parasitárias dos componentes auxiliares como uma carga constante de 700 W.

#### 4.3.1.9 Controle do sistema propulsor

O controle do sistema é responsável pela estratégia de distribuição de potência do sistema propulsor, solicitando ao sistema de células a combustível e ao sistema de armazenamento de energia as potências necessárias para o modelo. Conforme já detalhado anteriormente, seu funcionamento do tipo “termostato” que se ajusta dependendo no nível do SOC da bateria. O arquivo *PTC\_FUELCELL.m* foi utilizado de modo *default* no modelo numérico, uma vez não foi possível encontrar informações para o entendimento do controle do sistema propulsor do Hyundai Nexu.

A Figura 39, ilustra como os 9 arquivos .m, apresentados anteriormente, interagem para representar o modelo veicular.

**Figura 39 – M-Files que compõem o modelo numérico.**



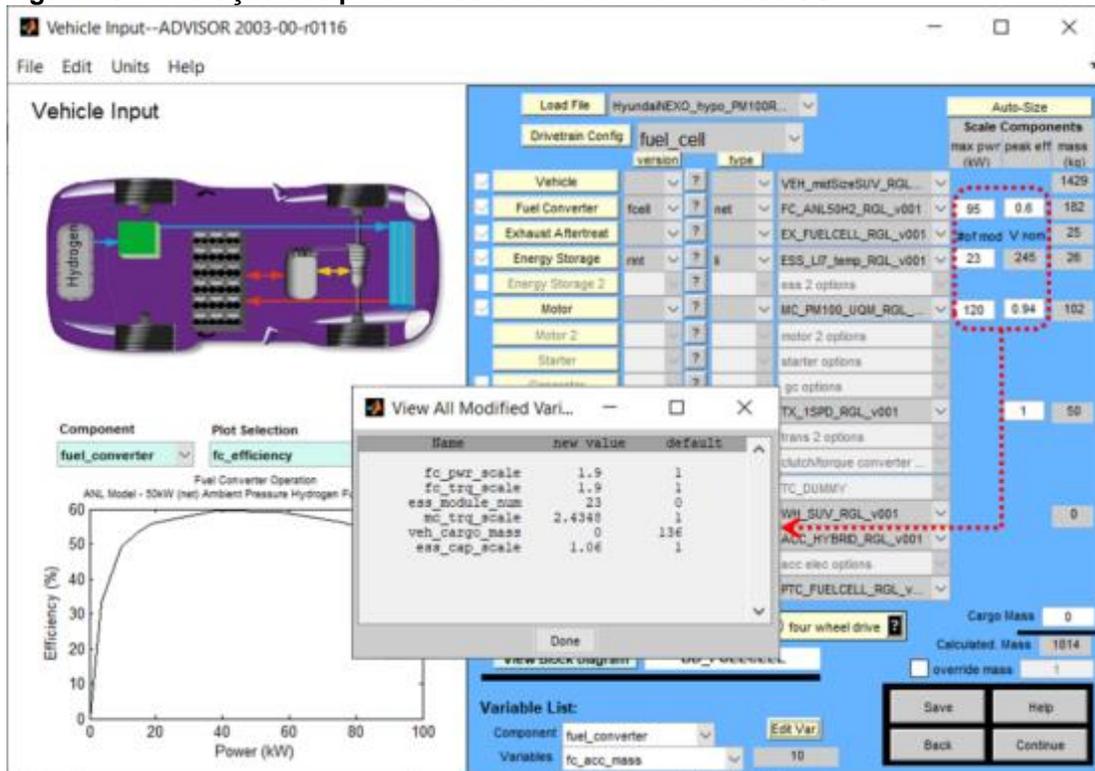
FONTE: O autor, 2020

#### 4.3.2 Ajuste interface GUI

Após a definição dos arquivos que compõem os parâmetros de entrada e que servirão para alimentar o modelo numérico do veículo no ADVISOR, alguns ajustes finais precisam ser feitos diretamente na interface GUI do software. A Figura 40 apresenta os parâmetros alterados de forma escalar diretamente na interface gráfica baseados na Tabela 5. A potência máxima do conversor de combustível e do motor elétrico são ajustados para 95 kW e 120 kW respectivamente, bem como o sistema de armazenamento de energia é ajustado com 23 módulos para se atingir o valor aproximado da tensão nominal de 240 V.

O valor da massa de carga padrão de 136 kg foi zerado, sendo 1814 kg a classe de inércia regulamentada pelo *EPA* como massa de testes de eficiência energética e emissões. Mais adiante um estudo paramétrico é proposto, levando em conta a variação da massa entre 1814 kg até o valor limite de projeto 2340 kg. Outro parâmetro modificado através do ajuste escalar foi a capacidade nominal da bateria de 6 Ah para 6.5 Ah conforme declarado para o Hyundai Nexó, através da variável *ess\_cap\_scale*. Ao final um fator de escala é gerado automaticamente para cada modificação imposta, conforme apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Alteração dos parâmetros de entrada na interface GUI.



FONTE: O autor, 2020

Pela falta de informação que tange a estratégia de controle do sistema de armazenamento de energia, principalmente relacionada à faixa de operação para o ciclo de profundidade de descarga do estado de carga, SOC, o modelo numérico, utilizou-se da faixa de 0.4 a 0.8, que segundo (SILVA, 2017) aplica-se à veículos elétricos híbridos. A faixa de operação do SOC da bateria influência diretamente na vida útil destes componentes, por isto a necessidade de se controlar esse afundamento de carga (SILVA, 2017). Desta maneira o estado de carga inicial de cada ciclo de condução (*ess\_init\_soc*) foi definido com 0.8, diretamente na interface GUI.

#### 4.3.3 Avaliação do modelo

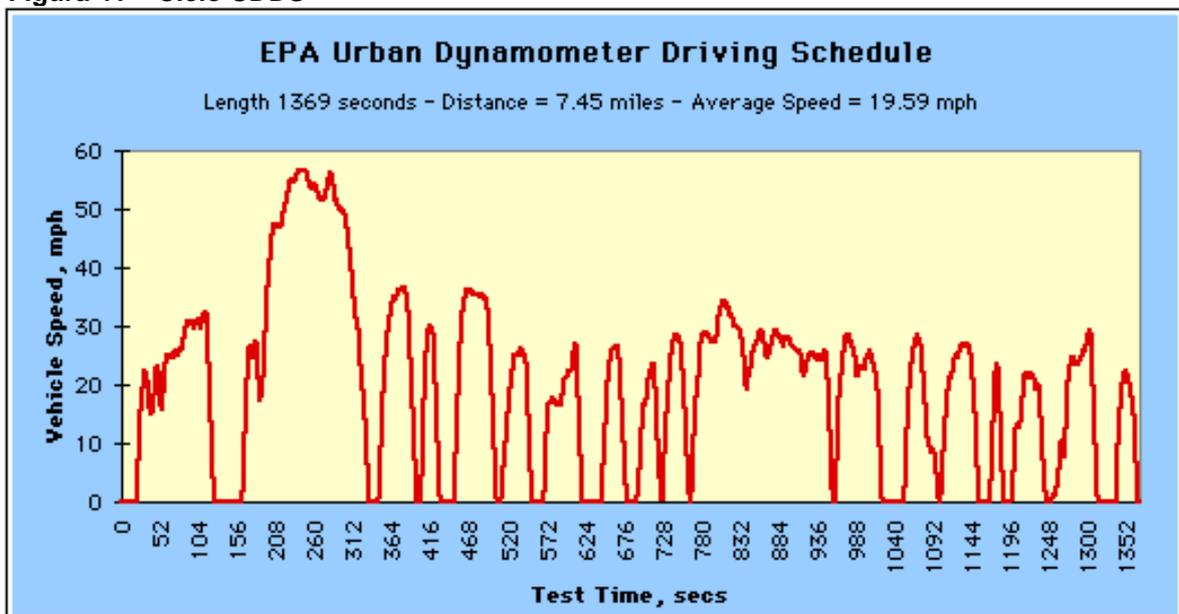
Com os componentes e sistemas modelados devidamente ajustados, a avaliação do modelo é feita através da comparação dos resultados de consumo de combustível equivalente, medidos em milhas por galão equivalente (MPGe), obtidos da simulação do veículo e os valores do Hyundai Nexso versão *Blue*, declarados para o mercado Norte Americano. Conforme mostra a Tabela 7, MPGe para o Hyundai Nexso é de 65, 58 e 61 para os ciclos UDDS (urbano, *Urban Dynamometer Driving*

*Schedule*), HWFET (estrada, *Highway Fuel Economy Test*) e combinado respectivamente. O MPGe é o número de milhas que um veículo pode viajar usando 33.44 kWh de sua fonte de energia equivalente à gasolina, no caso do veículo em estudo, hidrogênio gasoso (NASSIF; DE ALMEIDA, 2020).

#### 4.3.3.1 Ciclos de condução

O primeiro ciclo avaliado e utilizado nas simulações propostas, é o UDDS, refere-se a um teste de dinamômetro obrigatório da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), sobre economia de combustível, que representa as condições de direção da cidade, usadas para testes de veículos leves. Conforme apresentado na Figura 41, o teste tem duração de 1369 segundos, percorrendo uma distância total de 7.45 milhas numa velocidade média de 19.59 milhas por hora.

**Figura 41 – Ciclo UDDS**

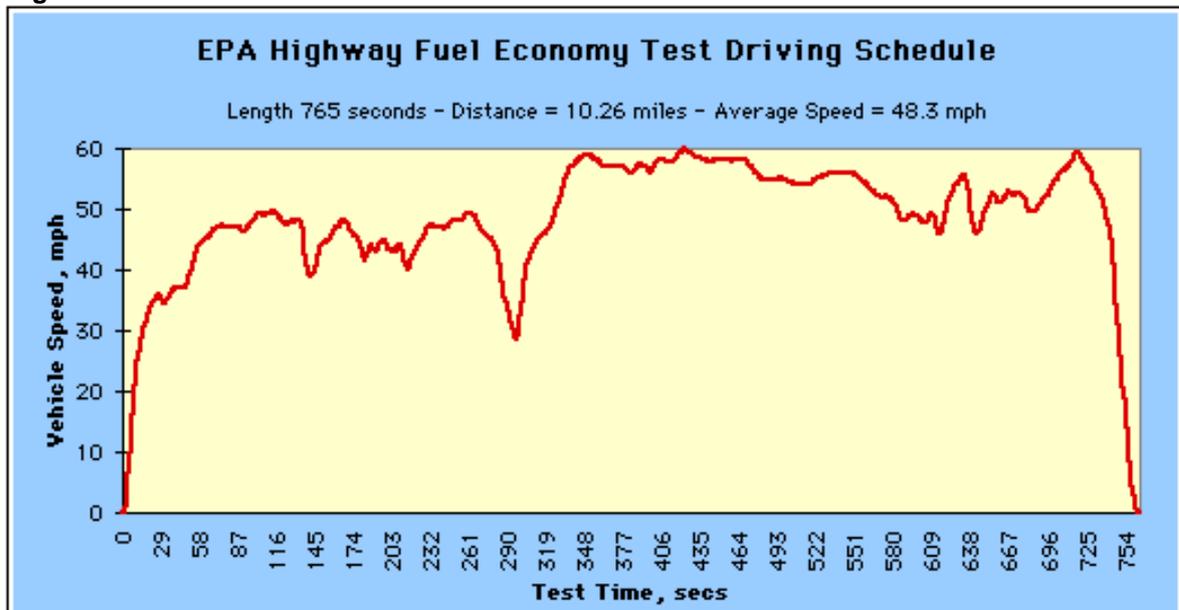


**FONTE:** EPA, *Vehicle and Fuel Emissions Testing*, acesso em 01 de novembro de 2020.

O segundo ciclo foi o HWFET, é usado para avaliar a economia de combustível durante o ciclo de condução em autoestrada, com perfil de velocidade até 60 mph. As principais características desse ciclo são apresentadas na Figura 42,

o teste tem duração de 765 segundos, percorrendo uma distância total de 10.26 milhas numa velocidade média de 48.3 milhas por hora.

**Figura 42 – Ciclo HWFET**



**FONTE:** EPA, *Vehicle and Fuel Emissions Testing*, acesso em 01 de novembro de 2020.

Desde 1977 os veículos comercializados no mercado norte americano recebem a etiqueta de eficiência energética, informando os valores de MPG no ciclo cidade, autoestrada e combinado. O valor MPG combinado é o mais proeminente para fins de comparação rápida e fácil entre veículos, sendo uma média ponderada dos valores MPG cidade e estrada calculada ponderando o valor da cidade em 55% e o valor da estrada em 45%.

#### 4.4 ESTUDO PARAMÉTRICO

Afim de se criar uma relação do impacto dos parâmetros de entrada nos resultados finais da simulação, um estudo paramétrico é proposto levando em consideração a variação de alguns fatores quantitativos presente no modelo numérico.

Nesta etapa do trabalho, o foco recai sobre a eficiência energética do modelo, buscando entender como a configuração veicular altera de maneira direta o desempenho do sistema propulsor. Um relatório publicado pela JRC (*Joint Research Centre*) a serviço da comissão europeia de ciência, aborda os principais fatores que afetam diretamente e indiretamente o consumo de combustível nos veículos de

passageiros em condições operacionais reais (ZACHAROF et al., 2016). A Tabela 4.2 apresentada a seguir, expõe de forma resumida os principais fatores discutidos no relatório. Dentre os oito principais fatores abordados, três parâmetros podem ser variados dentro do modelo numérico a fim de se criar um estudo paramétrico relacionando-os entre si, são eles, parâmetros aerodinâmicos como coeficiente de arrasto e área frontal do veículo, a carga elétrica do sistema auxiliar e a massa operacional. Conforme ilustrado no fluxograma da simulação na Figura 31, o estudo paramétrico é definido na interface GUI#2, onde os ajustes dos parâmetros de simulação são realizados, juntamente com a escolha das variáveis para o estudo paramétrico. Como resultado, um gráfico de superfície tridimensional é gerado, contendo em cada um dos eixos cartesianos, as variáveis predeterminadas.

**Tabela 6 – Fatores que impactam a eficiência energética e emissões veicular**

Fator	Impacto
Sistema auxiliar	Os sistemas auxiliares de um carro são compostos por todos os elementos e acessórios, como ar condicionado, sistemas de assistência à direção, sistemas avançados de assistência ao motorista ou sistemas de luxo, que melhoram a segurança e o conforto ao dirigir. Isso acontece, no entanto, com o incremento da carga elétrica, ou a carga mecânica que, por sua vez, aumentam o consumo de combustível. Dispositivos auxiliares elétricos impõem cargas elétricas mais altas, resultando em maior operação do alternador que, por sua vez, aumenta a demanda de potência do motor e, subsequentemente, o consumo de combustível. Auxiliares mecânicos drenam energia diretamente do motor, resultando também em maiores demandas de potência. Segundo a revisão bibliográfica feita por (ZACHAROF et al., 2016), o consumo de combustível pode aumentar em média cerca de 15% devido aos sistemas auxiliares.
Aerodinâmica	As características aerodinâmicas do veículo são um dos principais fatores que influenciam o consumo de combustível em condições de direção em alta velocidade (HUCHO e SOVRAN, 1993; CROLLA, 2009). A resistência aerodinâmica é expressa em função da velocidade do veículo e proporcional ao produto do coeficiente de arrasto aerodinâmico ( $C_d$ ), área frontal ( $A_f$ ) e densidade do ar, conforme já descrito na Equação (34). Em termos leigos, aerodinâmica se refere à forma e design do carro e sua área frontal projetada. O coeficiente de resistência aerodinâmica é afetado pelo formato do carro. Aumentos no produto $C_d \times A_f$ (também referido como arrasto) se traduzem diretamente em aumento da resistência aerodinâmica, que por sua vez leva à redução da economia de combustível e maiores emissões de CO <sub>2</sub> (FONTARAS et al. 2007). As

	<p>estimativas indicativas do aumento do consumo de combustível são de cerca de 5% para acessórios e bagageiros de teto, 5.1% para janelas abertas a 130 km/h, 2% para o efeito dos ventos laterais, embora isso seja altamente dependente do formato geral do veículo, enquanto várias melhorias aerodinâmicas como spoilers e difusores adequadamente projetados, podem reduzir o consumo de combustível em até 0.4% (ZACHAROF et al., 2016).</p>
Condições climáticas	<p>As condições ambientais referem-se às condições externas, como vento, temperatura e pressão barométrica. Elas afetam o desempenho do consumo de combustível do veículo, pois influenciam a operação do motor (por exemplo, viscosidade do óleo do motor, fluxo de ar de admissão do motor, etc.), também podem afetar o comportamento de direção, já que o motorista deve ajustar seu padrão de direção. A influência da temperatura é estimada na ordem de 0.5% de aumento por °C abaixo de 20 °C. A chuva pode aumentar potencialmente o consumo de combustível em 30% ou mais dependendo das condições (ZACHAROF et al., 2016).</p>
Comportamento de direção	<p>Segundo (ZACHAROF et al., 2016), o comportamento de direção refere-se aos padrões de direção que um motorista individual possui. A direção agressiva pode aumentar drasticamente o consumo de combustível em até 24%, enquanto a direção eco (menos agressiva) pode fornecer benefícios estimados na ordem de 6 a 8% em comparação com a operação padrão. O tipo de viagem e o planejamento adequado podem afetar o consumo de combustível significativamente, já que o consumo difere em 10% em média para diferentes rotas que ligam os mesmos pontos de partida e destinos (ZACHAROF et al., 2016).</p>
Condição veicular	<p>A condição veicular refere-se ao estado do veículo em termos de manutenção, como por exemplo, a troca de óleo, verificação da pressão dos pneus, uso adequado do tipo de pneu, manutenção básica do sistema auxiliar, etc. Verificou-se que o uso de óleo de motor de baixa viscosidade pode levar a uma redução no consumo de combustível de</p>

**Continuação Tabela 6.**

	<p>cerca de 4%. Além disso, diminuir o coeficiente de resistência ao rolamento dos pneus em 10-20%, poderia ter benefícios de 2.1% na economia de combustível. Por outro lado, uma pressão dos pneus 0.2 bar abaixo do recomendado pode resultar em um aumento de 1.4% no consumo de combustível. Vários outros fatores, como filtros de ar entupidos e rodas desalinhadas, podem aumentar o consumo de combustível na ordem de 4 a 5% (ZACHAROF et al., 2016).</p>
Massa operacional	<p>A massa operacional representa o peso total do veículo. Conforme a massa aumenta, mais energia será necessária para acelerar e manter a velocidade constante, conseqüentemente, o consumo de combustível aumenta com a massa (ZACHAROF et al., 2016). Relatórios da literatura sugerem que, para uma massa extra de 100 kg, o consumo de combustível pode aumentar entre 6 e 7% em relação ao valor da certificação, com uma estimativa média da ordem de 2 a 4% (ZACHAROF et al., 2016). O efeito da massa é ainda mais significativo se o bagageiro de teto ou um reboque forem contabilizados conforme as condições adicionais se aplicam (por exemplo, maior resistência ao ar e ao rolamento), nesses casos, o aumento no consumo de combustível pode chegar a até 20% e 37.2%, respectivamente (ADAC, 2012a; THOMAS et al., 2014).</p>
Condição da estrada	<p>Refere-se sobre a condição da superfície sobre a qual o veículo anda, em termos de inclinação, morfologia, curvatura, etc. Diferentes qualidades da superfície da estrada podem afetar o consumo de combustível em 1.9%. O grau de inclinação foi relatado como afetando o consumo de combustível em 18% (direção em active) para gradientes superiores a 2% (ZACHAROF et al., 2016). Embora o consumo seja reduzido na operação</p>

	em declive, o impacto líquido de viajar na mesma estrada em aclives e declives tem um impacto geral negativo no consumo de combustível, no que diz respeito aos veículos convencionais. As condições de tráfego afetam o movimento real do veículo, velocidade média e máxima, acelerações, incidentes de partida e parada, tempo de viagem prolongado, etc., que podem ter um impacto muito negativo no consumo de combustível. Devido à grande variedade de condições de tráfego, é difícil quantificar e resumir o impacto do tráfego em uma figura, os valores máximos relatados na literatura afirmam aumentos de até 50% no consumo de combustível em comparação com os valores de referência correspondentes (ZACHAROF et al., 2016).
Características do combustível	A composição e as características do combustível também são influenciadas por particularidades específicas relacionadas às condições climáticas, diferentes padrões regionais, disponibilidade de mistura no mercado e políticas regionais (ZACHAROF et al., 2016). Este último se torna mais evidente quando se considera as variações de bicomponentes em combustíveis comerciais.

**FONTE: O autor, 2020.**

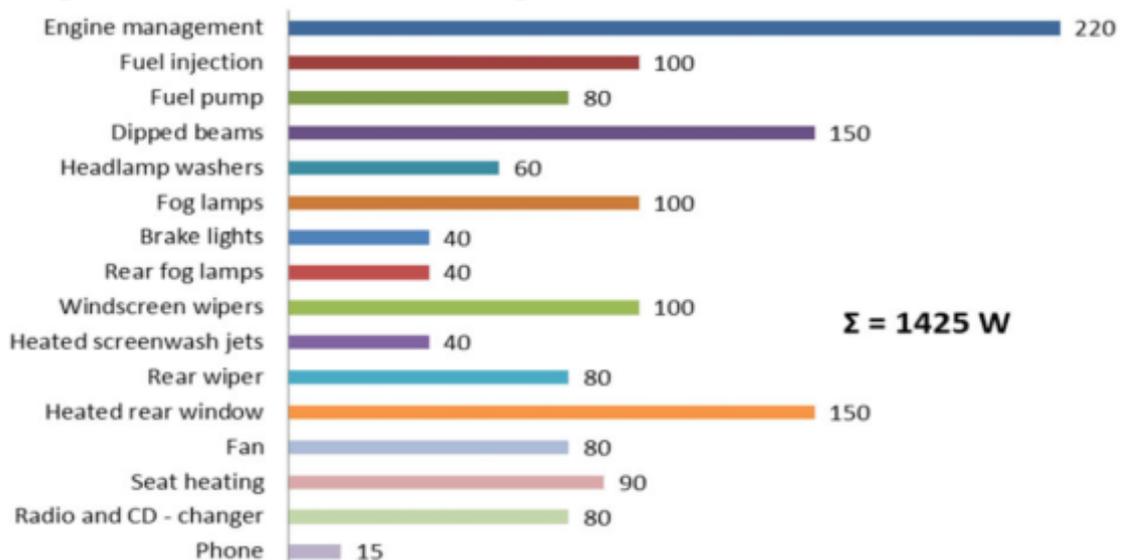
As variáveis escolhidas para compor o estudo paramétrico são: *veh\_mass* representando a massa operacional que varia entre 1814 kg até 2214 kg, massa limite de projeto definida pela Tabela 1.1, *veh\_CD* o coeficiente de arrasto aerodinâmico variando entre 0.329, valor de base do veículo também definido anteriormente na Tabela 1.1, e 0.529 valor limite para veículos SUV de médio porte segundo (ADVISOR, 2003). Finalmente a última variável corresponde à carga elétrica do sistema auxiliar *acc\_elec\_pwr*, variando entre 700 W e 1500 W, sendo 700 W o valor *default* estabelecido pelo (ADVISOR, 2003) e 1500 W a carga máxima dentre as principais aplicações veiculares segundo (ZACHAROF et al., 2016) e ilustrado na Figura 44. Todos os valores máximos e mínimos das variáveis estabelecidas são introduzidos na interface GUI#2 conforme mostra a Figura 43, não houve alteração com relação ao incremento na simulação, utilizando no modo padrão do (ADVISOR, 2003).

**Figura 43 – Escolha das variáveis para o estudo paramétrico**

<input checked="" type="checkbox"/> Parametric Study	# of variables	3	
Variable 1	Low	High	# Pts
veh_mass	1814	2214	3
Variable 2			
veh_CD	0.329	0.529	3
Variable 3			
acc_elec_pwr	700	1500	3
<input checked="" type="checkbox"/> Save Runs	Prefix:	Dir:	

FONTE: O autor, 2020.

Figura 44 – Demanda máxima de energia dos sistemas auxiliares em W.



FONTE: ZACHAROF et al., 2016.

Finalizada a etapa de ajuste dos parâmetros da simulação, bem como a introdução das variáveis que compõem o estudo paramétrico, é possível prosseguir com a simulação para a etapa de extração e avaliação dos resultados obtidos, descritos no próximo capítulo deste trabalho.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo se divide em duas partes principais, a primeira refere-se à discussão dos resultados utilizados para a avaliação do modelo nos ciclos urbano e estrada respectivamente. Na segunda parte, tem-se os resultados do estudo paramétrico proposto, através da interação das variáveis de massa operacional,

aerodinâmica e potência elétrica consumida nos sistemas auxiliares, com seus respectivos impactos no resultado final do desempenho do modelo apresentado.

## 5.1 RESULTADOS INICIAIS

Uma avaliação do modelo veicular é abordada buscando comparar os resultados do modelo numérico frente aos declarados oficialmente pela montadora para o mercado norte americano. Tal comparação buscou principalmente garantir que a proposta do trabalho expresse da maneira mais fiel possível, dentro das limitações matemáticas, operacionais e computacionais, o comportamento do veículo real em estudo.

### 5.1.1 Avaliando os resultados

Baseado no modelo numérico definido, juntamente com os ajustes escalares realizados no ADVISOR, os resultados de consumo de combustível, medidos em milhas por galão equivalente, para os ciclos urbano UDDS, estrada HWFET e combinado, bem como velocidade máxima, são apresentados na Tabela 7 a seguir.

**Tabela 7 – Resultados iniciais de consumo de combustível em MPGe e velocidade máxima**

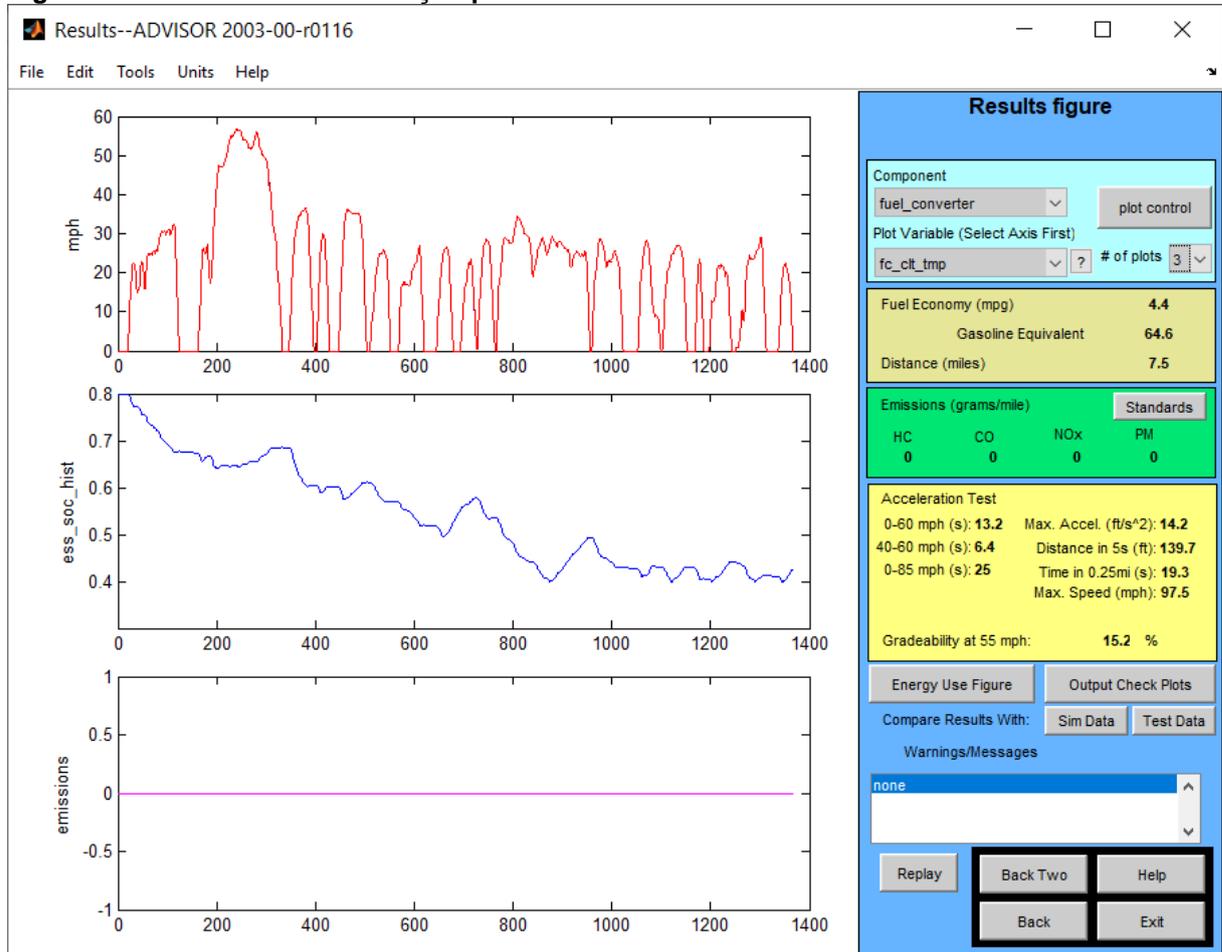
	Simulado	Simulado declarado	Hyundai Nexso Declarado	Diferença (%)
UDDS (MPGe)	64.6	64	65	-1.5%
HWFET (MPGe)	58.2	58	58	0%
COMBINADO (MPGe)	61.7	61	61	0%
Velocidade máxima mph (km/h)	97.5 (157)	97.5 (157)	111 (179)	-12%

**FONTE: O autor, 2020.**

Segundo o registro federal da EPA Vol. 71 de 2006, que regulamenta a regra de etiquetagem de eficiência energética veicular norte americana, o valor de economia de combustível declarado leva em consideração apenas a parte inteira do número resultante dos ciclos testados. Seguindo esta métrica, a base de comparação com os valores declarados pela Hyundai, será a parte inteira dos números provenientes das simulações, apresentados na Tabela 7 como valores

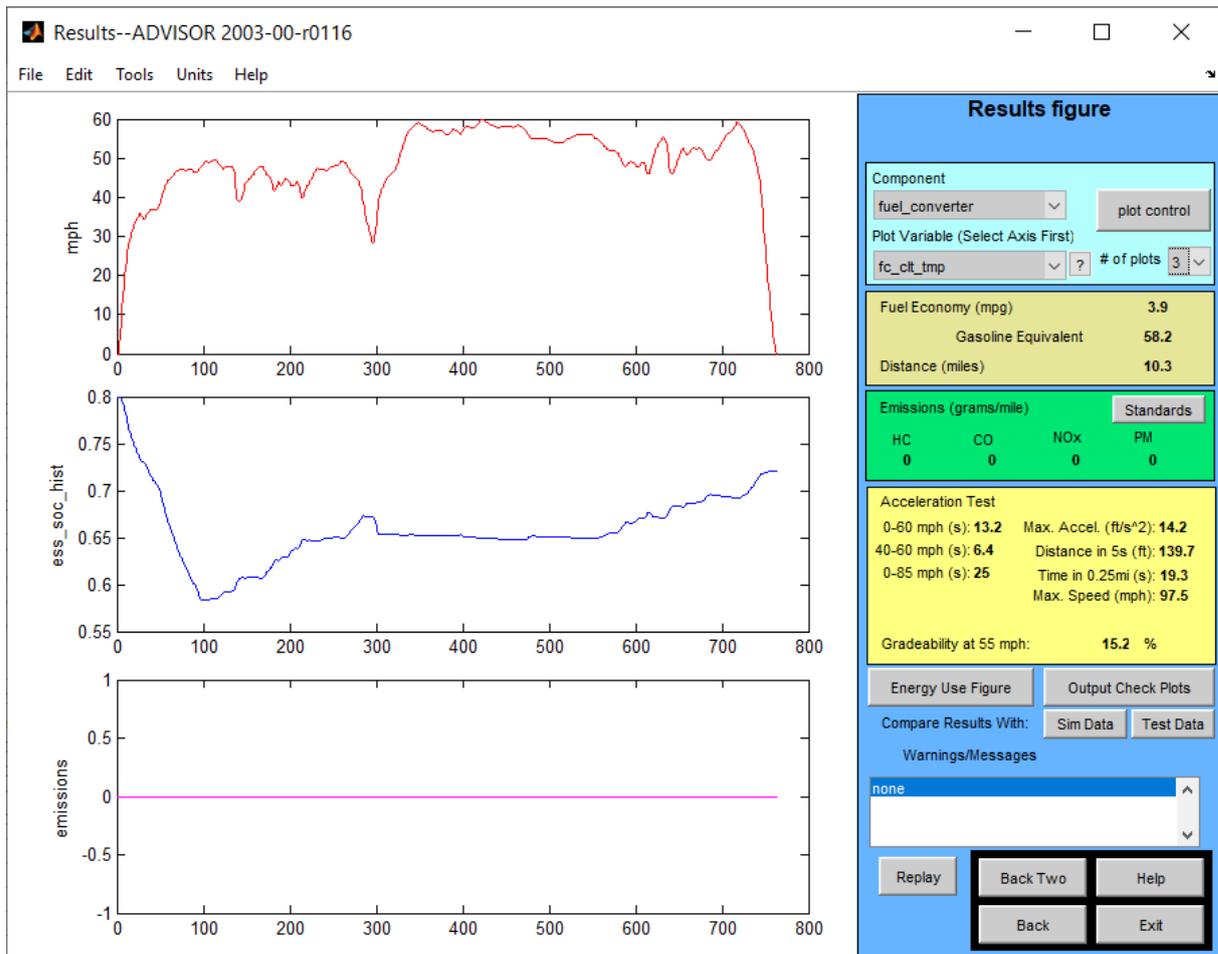
simulados declarados. As Figuras 45 e 46 mostram os resultados simulados para os ciclos UDDS e HWFET respectivamente.

**Figura 45 – Resultado da simulação para o ciclo UDDS**



FONTE: O autor, 2020.

**Figura 46 – Resultado da simulação para o ciclo HWFET**



FONTE: O autor, 2020.

Os resultados simulados se mostraram satisfatórios, apresentando nenhuma diferença entre os valores de consumo de combustível equivalente, para os ciclos HWFET e combinado. Já o resultado de consumo equivalente para o ciclo urbano UDDS, apresentou uma pequena diferença de 1.5%, entre o valor simulado e o valor real declarado, bem como os valores de velocidade máxima, com uma diferença de 12%.

Alguns pontos importantes precisam ser notados quanto às limitações numéricas impostas pelo modelo. Devido à falta de informação sobre o sistema de controle que comanda o conjunto propulsor e o sistema de armazenamento de energia, algumas simplificações foram propostas com o intuito de compreender o modelo numérico em um ambiente acadêmico, tais limitações afetam diretamente a condição de carga disponível no conjunto de baterias através do controle SOC, impactando diretamente os resultados finais. O modelo numérico, buscou atenuar os efeitos das simplificações numéricas a fim de se representar de maneira mais fiel possível o veículo real. Através dos resultados obtidos pode-se concluir que a

grande similaridade nos valores apresentados qualifica o modelo para o trabalho proposto.

### 5.1.2 Teste de aceleração, velocidade máxima e aclave

Os resultados para o teste de aceleração, velocidade máxima e desempenho em aclave são simulados separadamente, uma vez que os ciclos de condução possuem perfis de velocidade que limitam o desenvolvimento da velocidade máxima do modelo definido, interferindo na capacidade veicular em desenvolver sua taxa de aceleração máxima, bem como sua aptidão de subida em aclives. Desta maneira, os mesmos resultados de aceleração, velocidade máxima e inclinação à 55 mph (88.5 km/h) podem ser encontrados através do descritivo gerado pelo software na Figura 47 a seguir.

**Figura 47– Resultados do teste de aceleração, velocidade máxima e aclave**

Acceleration Test	
0-60 mph (s): 13.2	Max. Accel. (ft/s <sup>2</sup> ): 14.2
40-60 mph (s): 6.4	Distance in 5s (ft): 139.7
0-85 mph (s): 25	Time in 0.25mi (s): 19.3
	Max. Speed (mph): 97.5
Gradeability at 55 mph:	15.2 %

**FONTE: O autor, 2020.**

Não foi possível encontrar informações referentes à aceleração máxima do veículo real nos sites oficiais da Hyundai EUA. Segundo as informações disponíveis na mídia especializada, o valor para aceleração de 0 a 60 milhas por horas foi de 9.9 segundos (FLOREA, 2018), apenas 3.3 segundos mais rápido que o modelo. A velocidade máxima simulada foi de aproximadamente 97.5 milhas por horas, 13 milhas por hora mais lento que o valor de 111 mph declarado pela Hyundai EUA. Tal variação, entre os valores simulados e os declarados pela montadora, se dá principalmente pelas simplificações imposta ao modelo numérico, afim de torna-lo matematicamente acessível em termos de capacidade computacional disponível.

O desempenho em aclave, também conhecido como capacidade de rampa ou de inclinação, é conduzido de acordo com a norma SAE J1666, que tem como objetivo fornecer métodos e procedimentos para o teste de veículos elétricos e híbridos no mercado norte americano (BRAYER, 2004). Segundo o procedimento, o veículo deve ser capaz de manter a velocidade de 55 mph, considerando uma massa adicional de 150 kg (dois passageiros de 166 libras cada), com o estado de carga do sistema de armazenamento de energia igual a 50%. Nestas condições, o modelo é capaz de se manter a velocidade constante de 55 mph numa inclinação de 15.2%, equivalente a uma rampa de 8.64°.

### 5.1.3 Ciclo estrada HWFET

Os primeiros resultados avaliados foram referentes ao ciclo de condução em autoestrada, HWFET. Na Figura 48 temos como resultado, o consumo de combustível simulado de 58.2 milhas por galão de combustível equivalente (MPGe), muito próximo ao 58 MPGe declarado pela Hyundai.

**Figura 48 – Resultado de consumo e emissões ciclo HWFET**

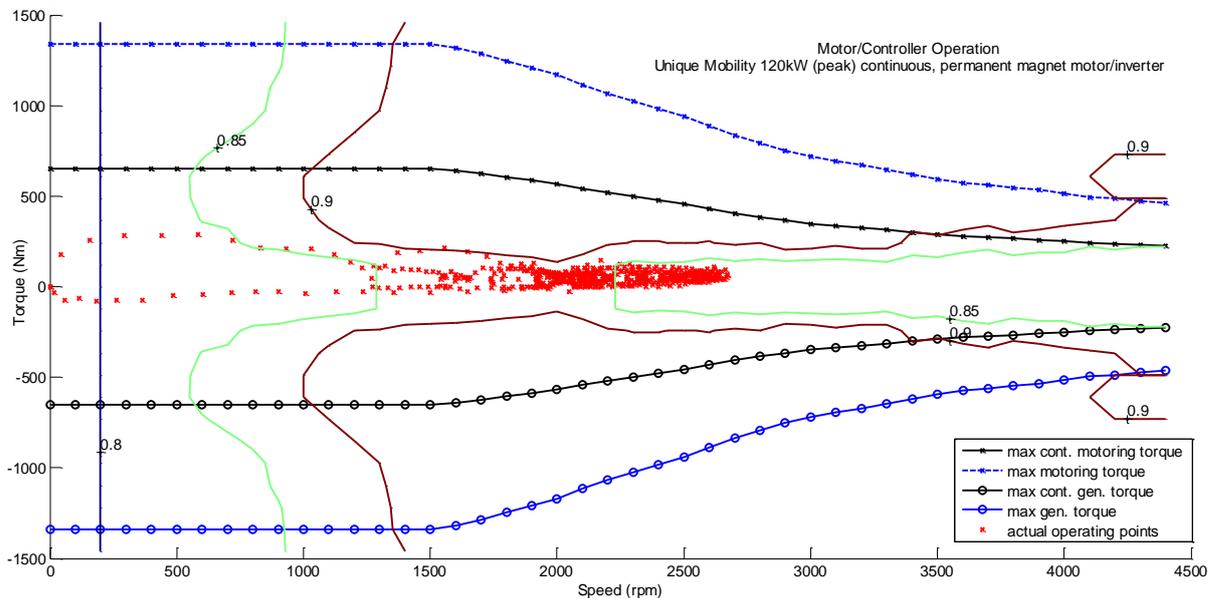
Fuel Economy (mpg)	3.9		
Gasoline Equivalent	58.2		
Distance (miles)	10.3		
<b>Emissions (grams/mile)</b>			
	<b>Standards</b>		
HC	CO	NOx	PM
0	0	0	0

**FONTE: O autor, 2020.**

O ciclo é concluído com distancia total percorrida de 10.26 milhas com o tempo limite de aproximadamente de 765 segundos, buscando representar o uso veicular em condições de estrada, com perfil de velocidades maiores, e com menos taxas de frenagens e desacelerações. Por não haver combustão durante o processo de conversão de energia, mas sim uma reação eletroquímica, os níveis de emissões de HC, CO, NOx e PM conforme esperado é zero.

Na Figura 49 são apresentados os principais pontos de operação em que o motor elétrico atua durante o ciclo de condução em estrada HWFET. A operação do motor elétrico acontece predominantemente na região de media rotação, entre 2000 e 2500 rpm, buscando as isolinhas de contorno do diagrama de eficiência empírica do motor, entre 85 e 90% (linha verde e marrom), com torque máximo disponível nessa região próximo aos níveis de 200 e 250 Nm. Sendo as linhas tracejadas com “x” e as tracejadas com “o”, os limites de torque máximo de motorização e regeneração respectivamente.

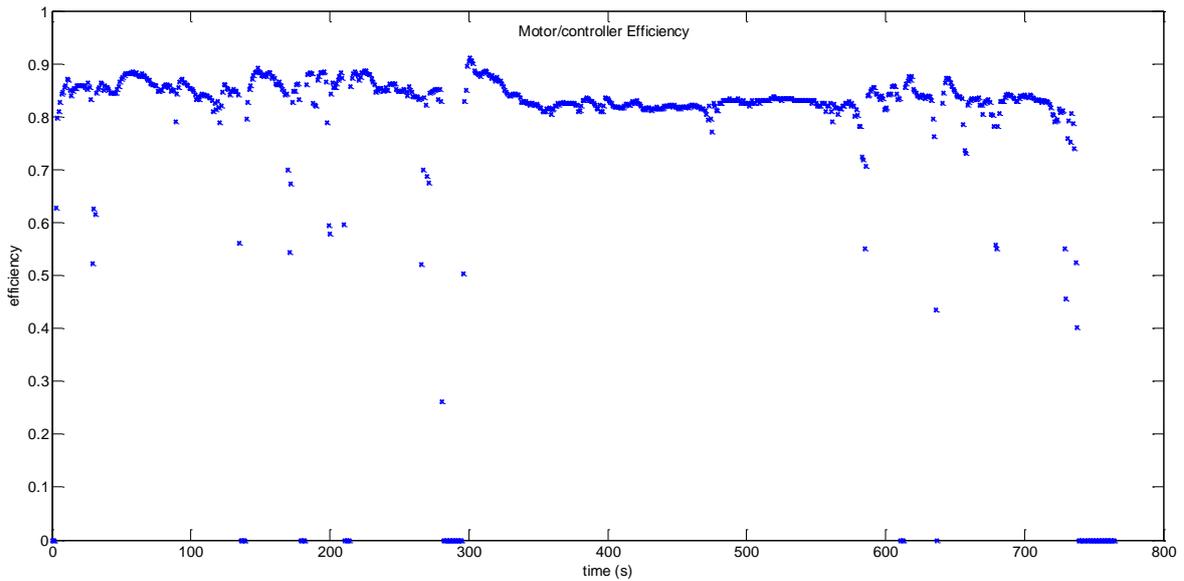
**Figura 49 – Pontos de operação do motor elétrico para o ciclo HWFET**



**FONTE: O autor, 2020.**

O mapa da eficiência operacional do motor elétrico juntamente com seu controlador, Figura 50, mostra que 91% é a eficiência máxima que o motor/controlador pode atingir no ciclo de direção estrada, resultando numa eficiência média final de 84%.

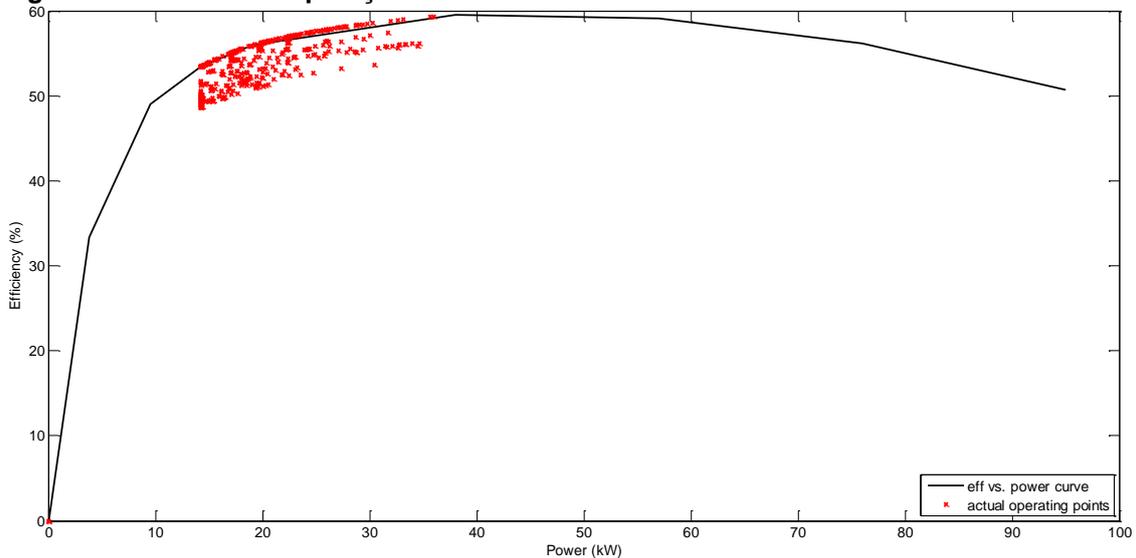
**Figura 50 – Eficiência operacional do motor elétrico no ciclo HWFET**



**FONTE: O autor, 2020.**

A operação da célula a combustível, atinge no ciclo HWFET uma eficiência máxima de 59.3%, atuando muito próximo da curva traçada entre sua eficiência e a potência requerida do sistema, como resultado tem-se que a eficiência média para o ciclo é de 54%, muito próximo dos 60% de eficiência declarada pela Hyundai.

**Figura 51 – Pontos de operação da célula a combustível no ciclo HWFET**

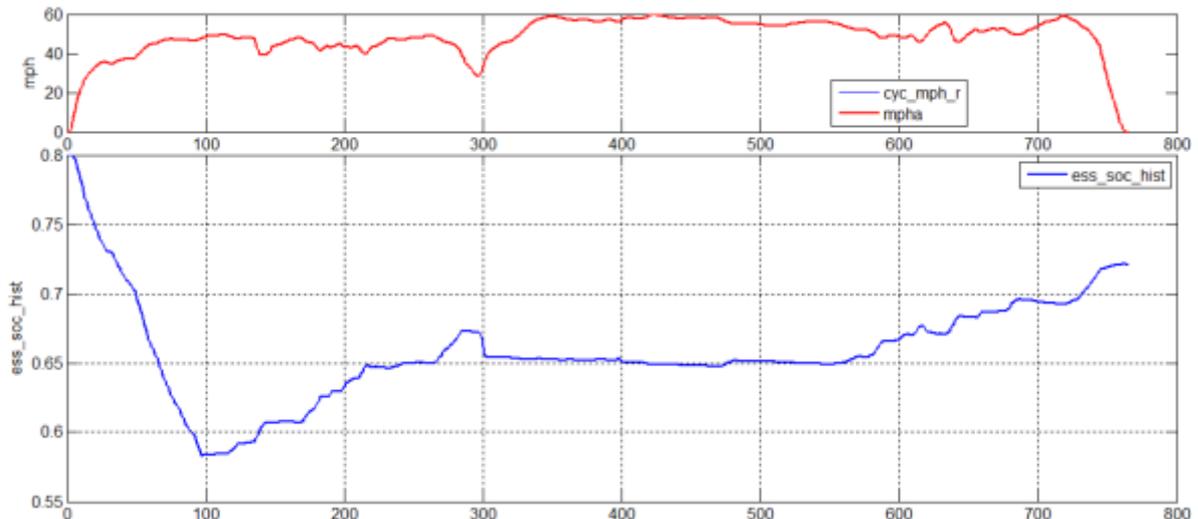


**FONTE: O autor, 2020.**

É muito importante avaliar o comportamento do sistema de armazenamento de energia frente à operação do sistema propulsor no ciclo HWFET, uma vez que o desempenho global do sistema propulsor, dependa principalmente das capacidades de descarga do estado de carga SOC. A Figura 52, ilustra o histórico do SOC do

sistema de armazenamento de energia durante o ciclo de condução. Com estado de carga inicial de 0.8, é possível visualizar a descarga do sistema nos primeiros 100 s do ciclo, onde o veículo precisa de muita energia para vencer a inércia e desenvolver velocidade até o patamar entre 40 e 45 milhas por hora. Nos próximos 200 s precedentes, é possível perceber uma recuperação, ou recarga do SOC, até os níveis entre 0.67 e 0.65, tal fenômeno se dá principalmente pela desaceleração presente no ciclo rodoviário, permitindo que parte da energia seja convertida através do sistema de frenagem regenerativa, fazendo com que o motor elétrico opere de maneira similar à um gerador durante as desacelerações experimentadas no ciclo. Entre 300 e 560 segundos o SOC se mantém na faixa de 0.65, quando o veículo permanece numa velocidade quase que constante de 60 mph, a partir do 600 s o ciclo entra em sua fase final, desacelerando o veículo e consequentemente recarregando o ESS até o patamar de 0.7.

**Figura 52 – Histórico do SOC durante o ciclo HWFET**



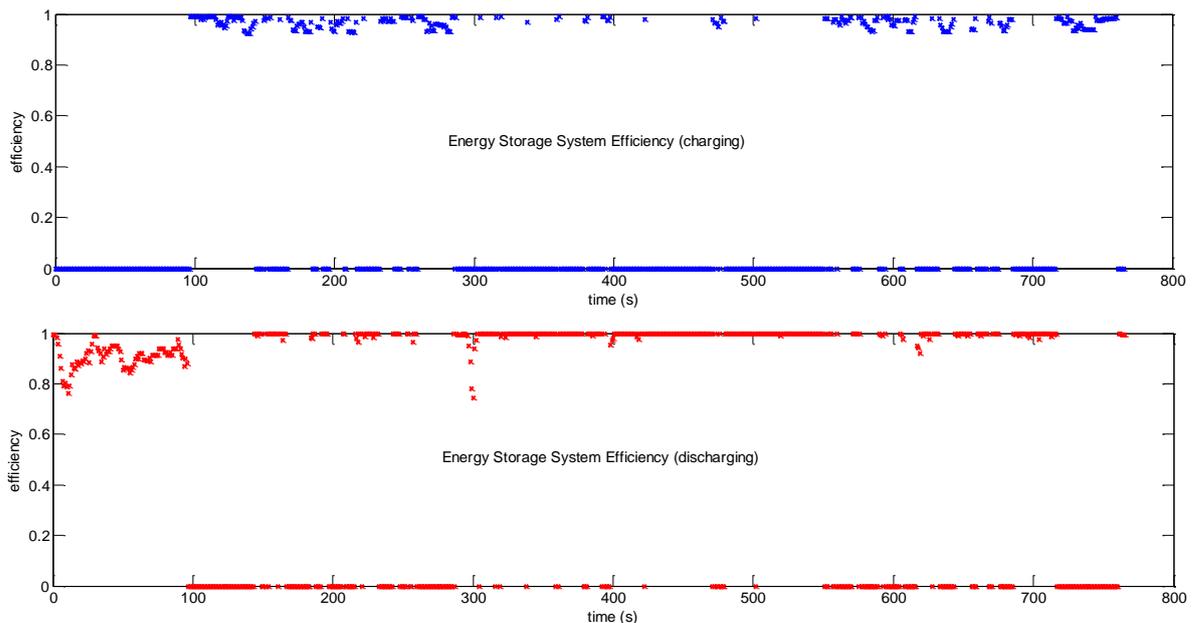
**FONTE: O autor, 2020.**

Ainda sobre o sistema de armazenamento de energia, a Figura 53 apresenta a eficiência operacional do conjunto em duas situações distintas, quando o sistema está na etapa de carregamento, ou seja, recebendo energia dos outros sistemas, via frenagem regenerativa, ou sendo alimentado pelo conjunto de células a combustível, dependendo do estado de carga operante das baterias, representado pelo gráfico superior com os pontos em azuis. Quando está no processo de descarregamento, ou seja, entregando energia diretamente para o sistema propulsor, com a intenção de

gerar potência para movimentar o veículo representado pelo gráfico inferior com os pontos em vermelhos.

Comparando as Figura 52 e 53, é possível notar que a eficiência do sistema de armazenamento de energia durante o carregamento aumenta significativamente próximo de 100% entre 100 e 300 s, justamente onde o SOC se recupera recebendo energia regenerada. Já a eficiência do ESS durante o descarregamento é maior, quando o sistema de baterias é solicitado pelo sistema propulsor, necessitando assim liberar mais energia a fim de que o veículo seja capaz de aumentar sua força de tração e conseqüentemente atingir velocidades maiores. Como consequência de todo esse processo a eficiência média do sistema de armazenamento de energia fica próximo aos 85%.

**Figura 53 – Eficiência operacional do ESS durante carregamento e descarregamento, ciclo HWFET**



**FONTE: O Autor (2020)**

Uma tabela com o uso de energia dos componentes presentes no modelo numérico é gerada ao final da simulação, a Figura 54 apresenta um resumo do balanço de energia, das perdas e eficiências de cada componente, ambos no modo de potência, e no modo regenerativo (recuperando energia).

**Figura 54 – Balanço energético dos componentes no ciclo HWFET.**

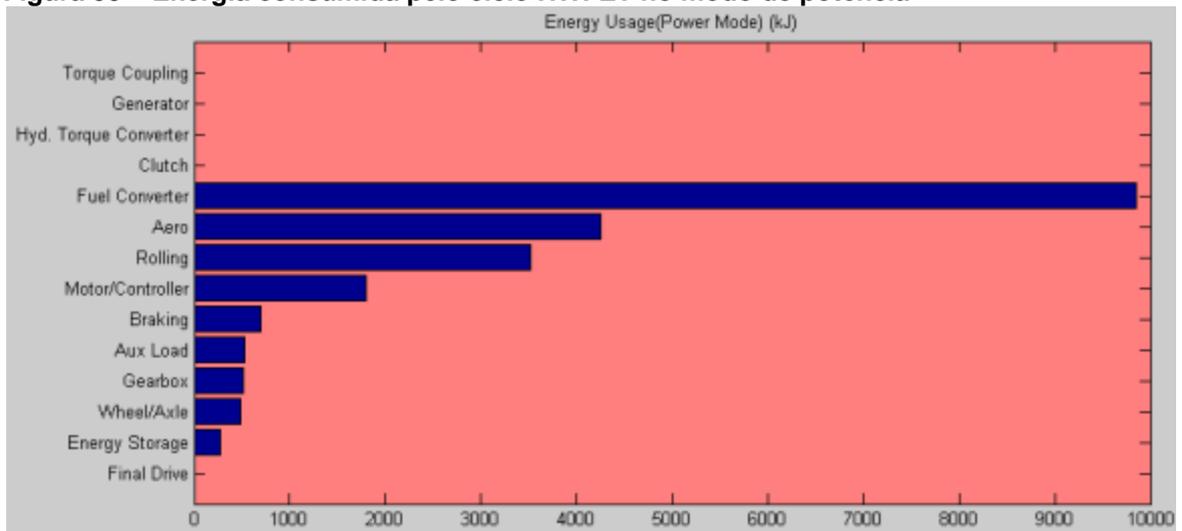
	POWER MODE				REGEN MODE			
	In	Out	Loss	Eff.	In	Out	Loss	Eff.
Fuel	0	21305						
Fuel Converter	21305	11446	9858	0.54			0	
Clutch								
Hyd. Torque Converter								
Generator								
Torque Coupling								
Energy Storage	1352	1712	272	0.85				
Energy Stored	-632							
Motor/Controller	11317	9518	1799	0.84	71	46	25	0.65
Gearbox	9518	9010	508	0.95	89	71	18	0.8
Final Drive	9010	9010	0	1	89	89	0	1
Wheel/Axle	9010	8516	493	0.95	745	782	-37	1.05
Braking							693	
Aux Loads	536	0	536	0				
Aero			4247					
Rolling			3525					

**FONTE: O autor, 2020.**

Os valores de energia utilizados durante o modo de potência, quando o sistema atua gerando energia para a propulsão veicular, bem como no modo regenerativo, são apresentados nas Figuras 55 e 56.

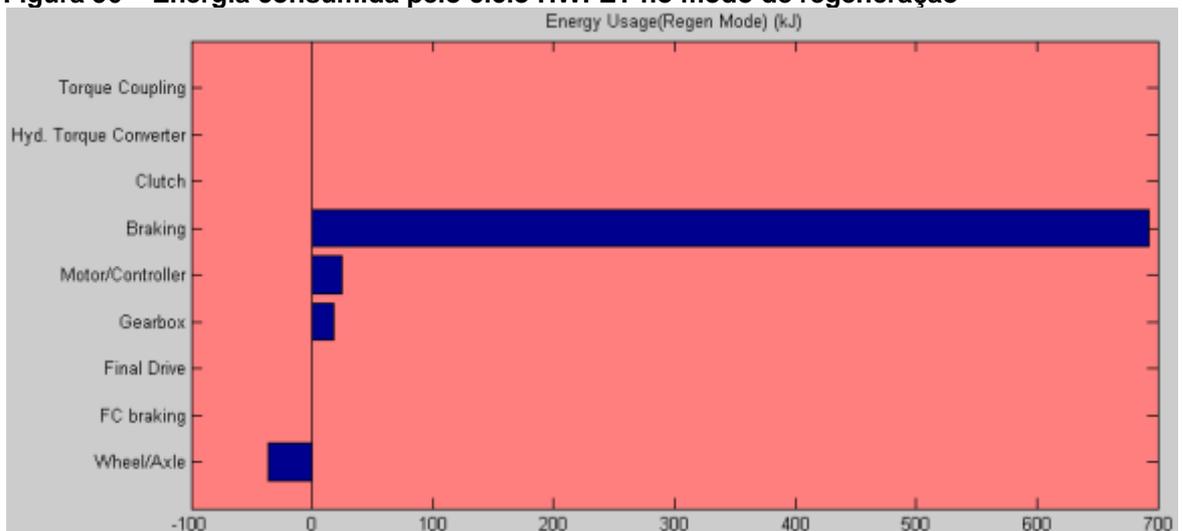
Na Figura 55 fica evidente que a energia utilizada no modo de potência, se dá principalmente no sistema conversor de combustível, através da operação das células a combustível, sendo responsável pela manutenção dos níveis de energia elétrica no conjunto de baterias do ESS, bem como alimentar o sistema propulsor. Conforme apresentado na Figura 54, tem-se que energia proveniente do sistema de combustível (tanque com hidrogênio gasoso pressurizado) alimenta o conversor de combustível com 21305 kJ, cerca de 9858 kJ são necessários para alimentar o sistema em questão, e a energia resultante que sai do conversor é de 11446 kJ. Outros fatores muito importantes que consomem boa parte da energia global do sistema propulsor, são as perdas devido às resistências aerodinâmicas e de rolagem, cerca de 4220 kJ e 3500 kJ respectivamente. Da maneira inversa ao consumo de energia pelo sistema durante o modo de potência, temos também a etapa de regeneração de energia, através do sistema regenerativo que recupera parte da energia de desaceleração dos ciclos, cerca de 693 kJ são recuperados pelo sistema de freio para o ciclo HWFET, ilustrado na Figura 56.

**Figura 55 – Energia consumida pelo ciclo HWFET no modo de potência**



**FONTE: O autor, 2020.**

**Figura 56 – Energia consumida pelo ciclo HWFET no modo de regeneração**



**FONTE: O autor, 2020.**

#### 5.1.4 Ciclo urbano UDSS

O valor de consumo de combustível medido em milhas por galão de combustível equivalente, MPGe, resultante da simulação foi de 64,6, Figura 57. Comparando o valor inteiro de 64 MPGe conforme regulamentado, com o valor declarado pela Hyundai de 65 MPGe, uma variação de 1,5% foi encontrada.

**Figura 57 – Resultado de consumo e emissões ciclo UDDS**

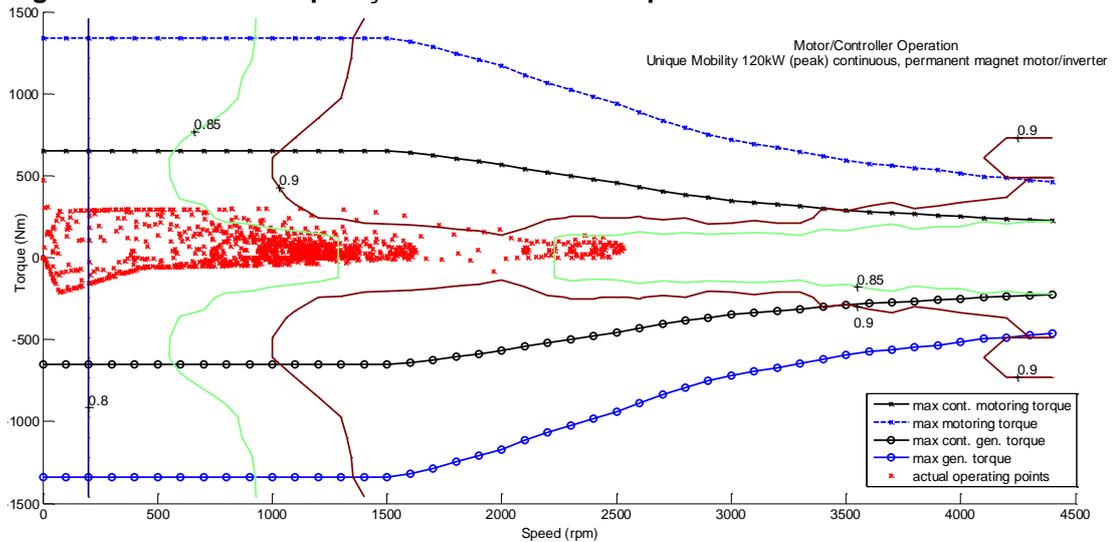
Fuel Economy (mpg)	4.4		
Gasoline Equivalent	64.6		
Distance (miles)	7.5		
<b>Emissions (grams/mile)</b>			
	<b>Standards</b>		
HC	CO	NOx	PM
0	0	0	0

**FONTE: O autor, 2020.**

O ciclo é concluído com distancia total percorrida de 7.45 milhas, com duração de 1369 segundos a uma velocidade média de 19.59 milhas por horas. Através do uso da célula a combustível do tipo PEMFC, como fonte primária de energia para o sistema propulsor, os níveis de emissões em gramas por milha são nulos. Algo interessante de se notar, é que o consumo energético no ciclo urbano UDDS com 64 MPGe, é aproximadamente 9% melhor do que o ciclo estrada HWFET com 58 MPGe, isso é explicado através da capacidade de recuperar a energia cinética de frenagem através do sistema regenerativo, uma vez que as taxas de desacelerações do ciclo UDDS são muito maiores que do ciclo HWFET. Mais adiante neste capítulo é possível visualizar os valores recuperados através do sistema de frenagem regenerativa para ambos os ciclos em kJ.

A Figura 58 traz os pontos de operação do motor elétrico durante o ciclo de condução em cidade UDDS. A operação do motor elétrico atua predominante numa ilha de pontos entre baixa e médias rotações, 0 e 1500 rpm, buscando as isolinhas de contorno do diagrama de eficiência empírica do motor, entre 85 e 90%.

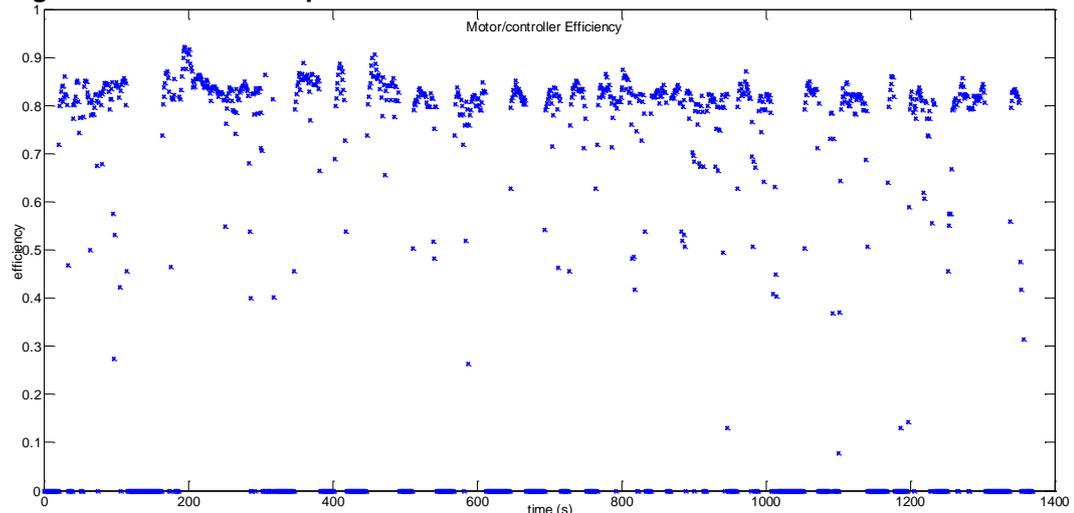
**Figura 58 – Pontos de operação do motor elétrico para o ciclo UDDS**



**FONTE: O autor, 2020.**

O mapa da eficiência operacional do motor elétrico juntamente com seu controlador, Figura 59, mostra que 92% é a eficiência máxima que o conjunto atingiu no ciclo de direção urbano, resultando numa eficiência média final de 83%, apenas 1% menor que a eficiência média encontrada no ciclo estrada HWFET, um resultado expressivo, uma vez que no ciclo urbano o motor elétrico juntamente com seu controlador é submetido à regimes de rotações com faixas mais amplas.

**Figura 59 – Eficiência operacional do motor elétrico no ciclo UDDS**

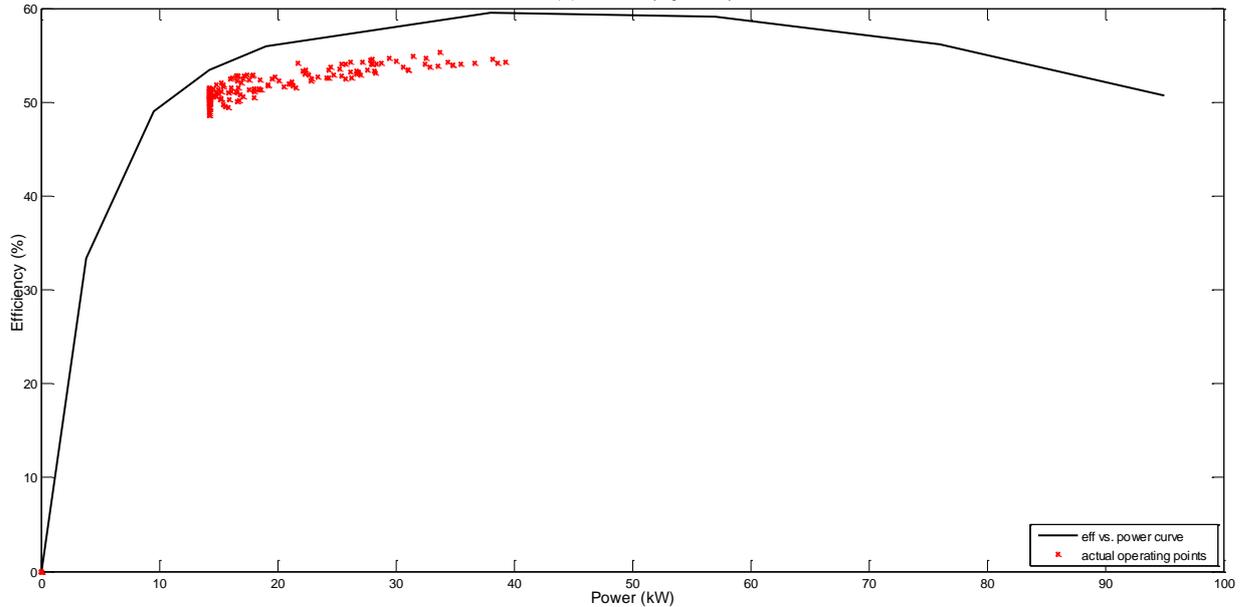


**FONTE: O autor, 2020.**

A operação da célula a combustível para o ciclo cidade, apresentada na Figura 60, atinge uma eficiência operacional máxima de 55.3%, atuando muito próximo da curva traçada entre sua eficiência ótima descrita pelo modelo e a

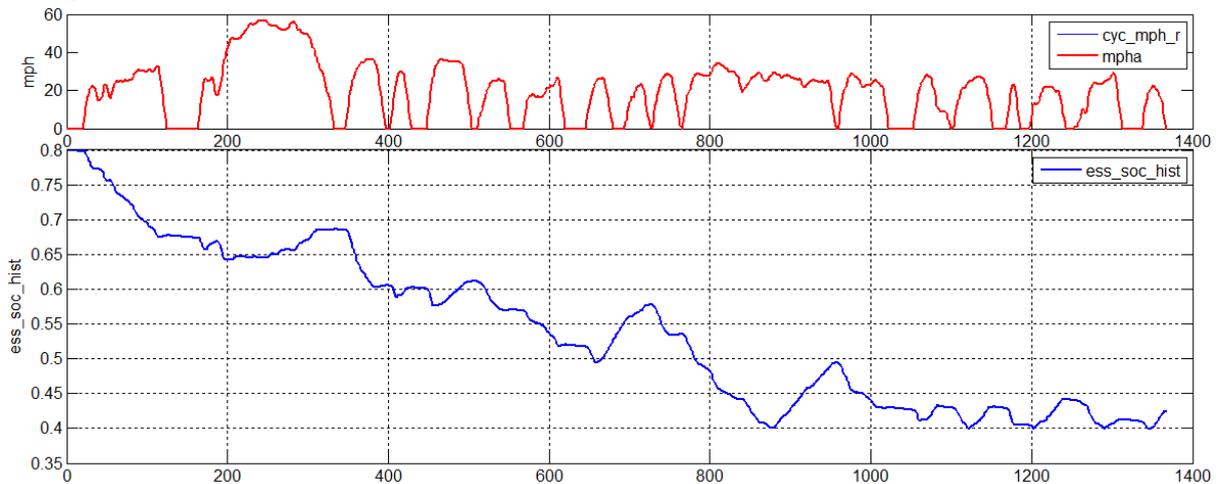
potência requerida para alimentar tanto os sistemas auxiliares, quanto o sistema propulsor, como resultado tem-se que a eficiência média para o ciclo é de 51%, ou seja 3% menor do que a eficiência operacional apresentada para o ciclo de condução em auto estrada HWFET.

**Figura 60 – Pontos de operação da célula a combustível no ciclo UDDS**



**FONTE: O autor, 2020.**

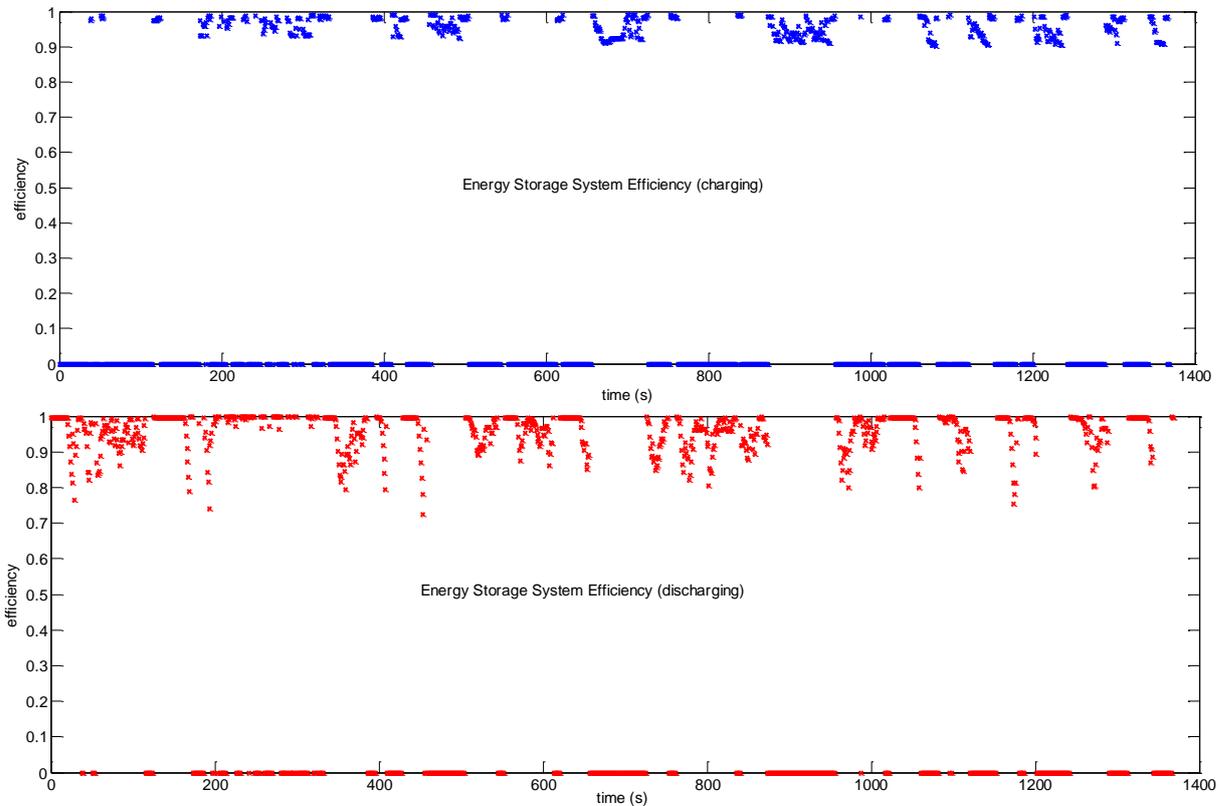
O ciclo cidade UDDS, busca caracterizar o uso do veículo no cotidiano, traçando um perfil de velocidade dos grandes centros urbanos, com padrões de acelerações e frenagens que simulam uma condição de tráfego. A Figura 61 traz o histórico operacional em termos de carga e descarga, do sistema de armazenamento de energia frente no ciclo. Com SOC inicial em 0.8, nos primeiros 200 s é possível perceber a descarga do sistema até o patamar próximo à 0.65, tal profundidade se dá principalmente pela energia necessária para vencer a inercia do movimento imposta logo no início do ciclo. Entre 300 e 350 s, nota-se uma leve recuperação do ESS com SOC próximo de 0.68, devido à regeneração durante a desaceleração no mesmo período de tempo. Tal comportamento de descarga e recarga parcial acontece até o final do ciclo, onde o SOC se estabiliza entre 0.4 e 0.45.

**Figura 61 – Histórico do SOC durante o ciclo UDDS**

**FONTE: O autor, 2020.**

A eficiência operacional do sistema de armazenamento de energia para o ciclo urbano UDDS, é apresentado na Figura 62. Dividido em dois momentos distintos, o primeiro quando o ESS se recarrega, recebendo energia proveniente do conversor de combustível e ou do sistema de frenagem regenerativa, e o segundo quando o ESS descarrega, liberando energia elétrica para alimentar principalmente o sistema propulsor e componentes auxiliares. Durante o processo de recarga a eficiência máxima do sistema opera próximo a 99% em alguns pontos, sendo possível observar comparando-se com a Figura 61 que, entre 300 - 400 s, 650 - 750 s e 850 - 950 s, existe uma regeneração considerável no sistema. Quando o ESS se descarrega, opera também com eficiência máxima muito próxima à 100% em alguns pontos. Comparativamente com a Figura 61, percebe-se que existe uma complementação entre o processo de carga e descarga do ESS, quando o sistema se recarrega a eficiência de carregamento fica próximo de 99%, enquanto que a eficiência de descarregamento se aproxima de 0% e assim vice e versa. Como consequência de todo esse processo a eficiência média do sistema de armazenamento de energia para o ciclo urbano UDDS é de 84%.

**Figura 62 – Eficiência operacional do ESS durante carregamento e descarregamento, ciclo UDDS**



**FONTE: O autor, 2020.**

A tabela com o uso de energia dos componentes presentes no modelo numérico também é gerada ao final da simulação, a Figura 63 apresenta um resumo do balanço de energia, das perdas e eficiências de cada componente, ambos no modo de potência, gerando energia, e no modo regenerativo, recuperando energia através do ciclo UDDS.

O balanço energético da Figura 63, é dividido em quatro informações importantes, a energia em kJ que entra no sistema ou componente em questão, a energia que sai, a parte da energia que é utilizada pelo sistema (classificada como perda, *loss*) e a eficiência energética operacional de cada sistema. Importante notar que os itens de aerodinâmica e rolagem, não são sistemas, mas sim características intrínsecas do modelo, porém são considerados no balanço energético, uma vez que têm uma parcela significativa de impacto sobre o desempenho final do veículo.

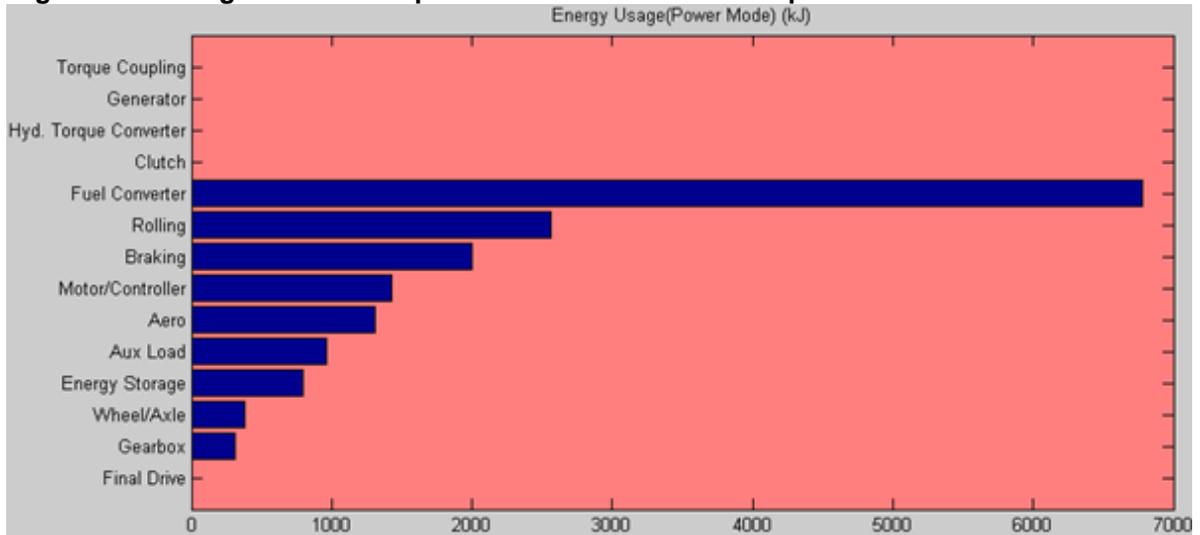
Figura 63 – Balanço energético dos componentes no ciclo UDDS.

	POWER MODE				REGEN MODE			
	In	Out	Loss	Eff.	In	Out	Loss	Eff.
Fuel	0	13930						
Fuel Converter	13930	7151	6778	0.51			0	
Clutch								
Hyd. Torque Converter								
Generator								
Torque Coupling								
Energy Storage	3194	5200	799	0.84				
Energy Stored	-2806							
Motor/Controller	8586	7162	1424	0.83	558	386	172	0.69
Gearbox	7162	6850	312	0.96	612	558	54	0.91
Final Drive	6850	6850	0	1	612	612	0	1
Wheel/Axle	6850	6473	377	0.94	2607	2610	-3	1
Braking							1998	
Aux Loads	958	0	958	0				
Aero			1307					
Rolling			2560					

FONTE: O autor, 2020.

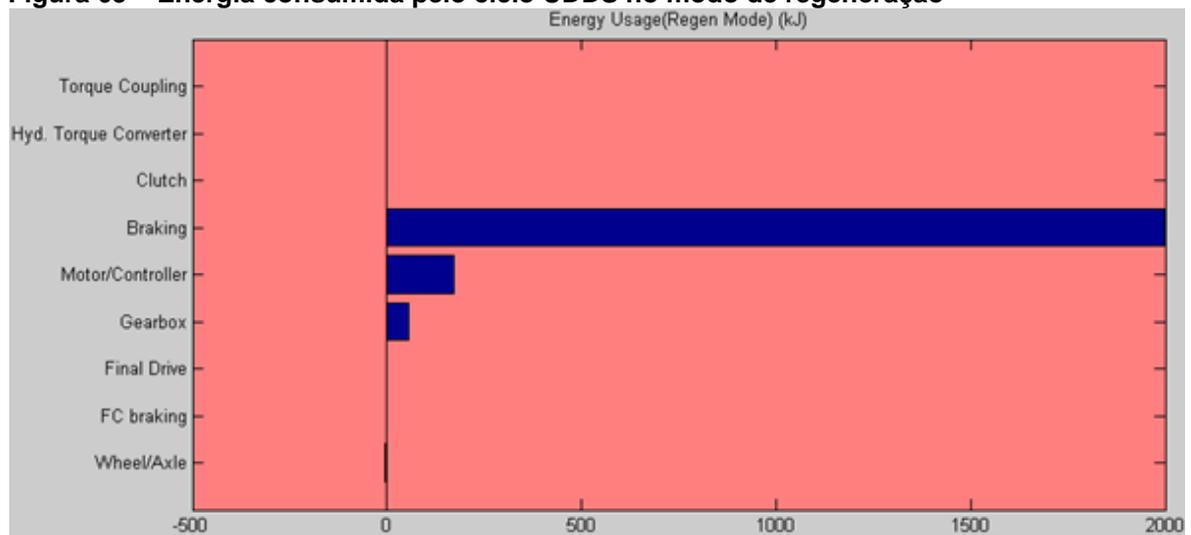
As Figuras 64 e 65, trazem os valores de energia utilizada durante o modo de geração potência e no modo regenerativo para ciclo urbano. O conversor de combustível, de maneira similar ao encontrado no ciclo HWFET, também é responsável pelo maior consumo de energia no modo de geração de potência com 6778 kJ. Diferentemente do ciclo HWFET, onde o segundo item que mais consumiu energia foi a resistência aerodinâmica, o segundo item que consome mais energia no ciclo UDDS é a resistência à rolagem com 2560 kJ, isso é explicado por conta das diversas desacelerações e paradas que o ciclo demanda, simulando uma condição de tráfego e exigindo que o veículo vença à cada parada a resistência à inércia de rolagem do automóvel. Já os efeitos aerodinâmicos possuem maior impacto em altas velocidades, o que não acontece no ciclo urbano UDDS. Na figura 65, fica evidente o efeito da frenagem regenerativa, sendo capaz de recuperar 1998 kJ, cerca de 1305 kJ a mais que no ciclo estrada HWFET, isso acontece por conta das altas taxas de desacelerações do ciclo UDDS.

**Figura 64 – Energia consumida pelo ciclo UDDS no modo de potência**



FONTE: O autor, 2020.

**Figura 65 – Energia consumida pelo ciclo UDDS no modo de regeneração**



FONTE: O autor, 2020.

### 5.1.5 Comparando os ciclos

As Tabelas 8 e 9, bem como as Figuras 66 e 67, mostram um comparativo entre os resultados em termos de energia consumida para o modo de potência e regenerativo para os ciclos estrada e cidade respectivamente. Por meio da avaliação das Figuras 66 e 67, fica evidente como o consumo de energia muda de acordo com as demandas necessárias para cumprir cada um dos ciclos.

**Tabela 8 – Energia consumida (kJ) pelo ciclo HWFET e UDDS no modo de potência**

<b>Sistema</b>	<b>HWFET (kJ)</b>	<b>UDDS (kJ)</b>	<b>Diferença (kJ) (HWFET-UDDS)</b>
Conversor de combustível	9858	6778	3080
Aerodinâmica	4247	1307	2940
Rolagem	3525	2560	965
Motor e controlador	1799	1424	375
Freios	693	1998	-1305
Sistema auxiliar	536	958	-422
Transmissão	508	312	196
Rodas e eixos	493	377	116
Sistema de armazenamento de energia	272	799	-527

**FONTE: O autor, 2020.**

**Tabela 9 – Energia consumida (kJ) pelo ciclo HWFET e UDDS no modo regenerativo**

<b>Sistema</b>	<b>HWFET (kJ)</b>	<b>UDDS (kJ)</b>	<b>Diferença (kJ) (HWFET-UDDS)</b>
Freios	693	1998	-1305
Motor e controlador	25	172	-147
Transmissão	18	54	-36
Rodas e eixos	-37	-3	-34

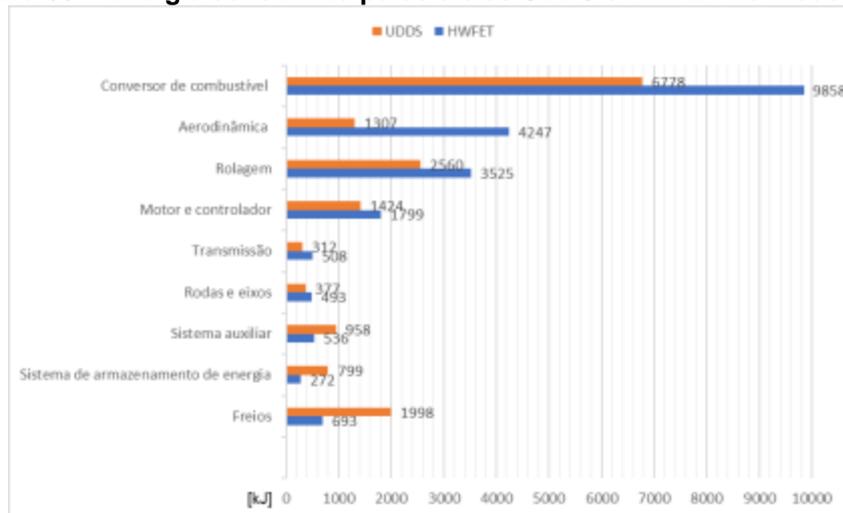
**FONTE: O autor, 2020.**

A maior parte da energia consumida em ambos os ciclos no modo de potência, é no conversor de combustível. Por ser o sistema responsável por gerar energia através das células a combustível e alimentar ambos os sistemas de armazenamento de energia e o sistema propulsor, é natural que seu consumo seja maior no ciclo estrada por conta da necessidade de desenvolver velocidades maiores.

Analisando a Figura 66 a seguir, fica evidente que o gasto energético devido à resistência aerodinâmica no ciclo estrada é muito maior que no ciclo urbano, uma vez que a força desenvolvida pelo arrasto aerodinâmico é proporcional ao quadrado da velocidade e, portanto, a potência necessária para superar o arrasto é proporcional ao cubo da velocidade. Isso significa que há uma relação muito forte entre a velocidade com que um veículo está se deslocando e a proporção do

combustível usado para superar o arrasto. Já a energia gasta pela resistência ao rolamento do veículo, está principalmente relacionada ao tipo e especificação do pneu utilizado, que determina o coeficiente de resistência ao rolamento  $f_r$ . Devido ao perfil de velocidades mais altas presentes no ciclo HWFET, é natural que seu consumo energético seja maior, isso explica porque a maioria dos itens avaliados consomem mais quando submetidos ao ciclo de condução em estrada.

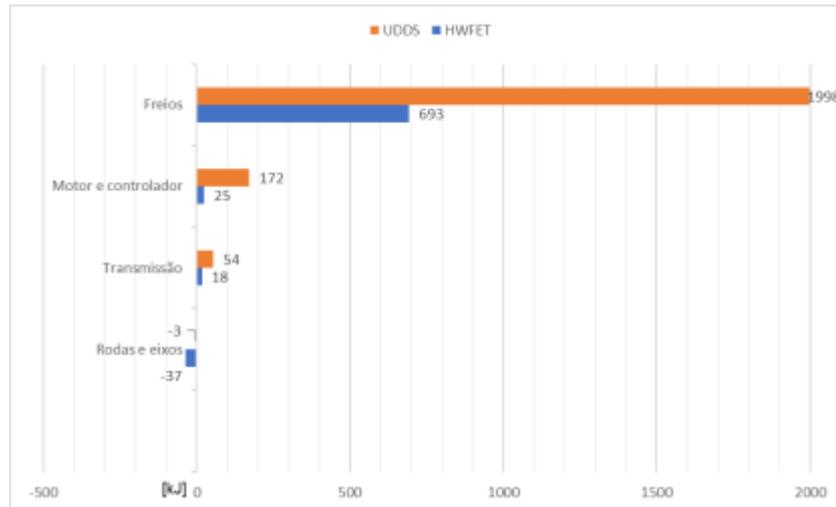
**Figura 66 – Energia consumida pelos ciclos UDDS e HWFET no modo de potência**



**FONTE: O autor, 2020.**

Os sistemas que consumiram mais energia no ciclo urbano do que no ciclo estrada foram, sistema auxiliar, devido ao tempo de duração do ciclo havendo a necessidade de operar por mais tempo, o sistema de armazenamento de energia, por estar submetido à uma recarga constante provinda do sistema de frenagem regenerativa, o que explica também a energia consumida nos freios, que é recuperada e convertida em eletricidade para o conjunto de baterias, conforme ilustra a Figura 67.

**Figura 67 – Energia consumida pelos ciclos UDDS e HWFET no modo regenerativo**



**FONTE: O autor, 2020.**

## 5.2 RESULTADOS DO ESTUDO PARAMÉTRICO

No estudo paramétrico, buscou-se avaliar o impacto de três das principais variáveis introduzidas no capítulo anterior, que influenciam diretamente no desempenho veicular em termos de aceleração máxima e consumo de combustível nos veículos de passageiros para os ciclos estrada e cidade respectivamente. Amplamente discutidas no relatório publicado por ZACHAROF et al., (2016), as variáveis em questão, foram avaliadas e expostas na Figura 43, sendo elas a massa operacional do veículo (*veh\_mass*), o coeficiente de arrasto aerodinâmico (*veh\_CD*) e carga elétrica do sistema auxiliar (*acc\_elec\_pwr*). A Tabela 10 apresenta os valores mínimos e máximos dos parâmetros escolhidos para o estudo paramétrico.

**Tabela 10 – Variação dos parâmetros de simulação**

Parâmetros	Mínimo	Máximo	Unidade
<i>veh_mass</i>	1814	2214	<b>kg</b>
<i>veh_CD</i>	0.329	0.529	-
<i>acc_elec_pwr</i>	700	1500	<b>W</b>

**FONTE: O autor, 2020.**

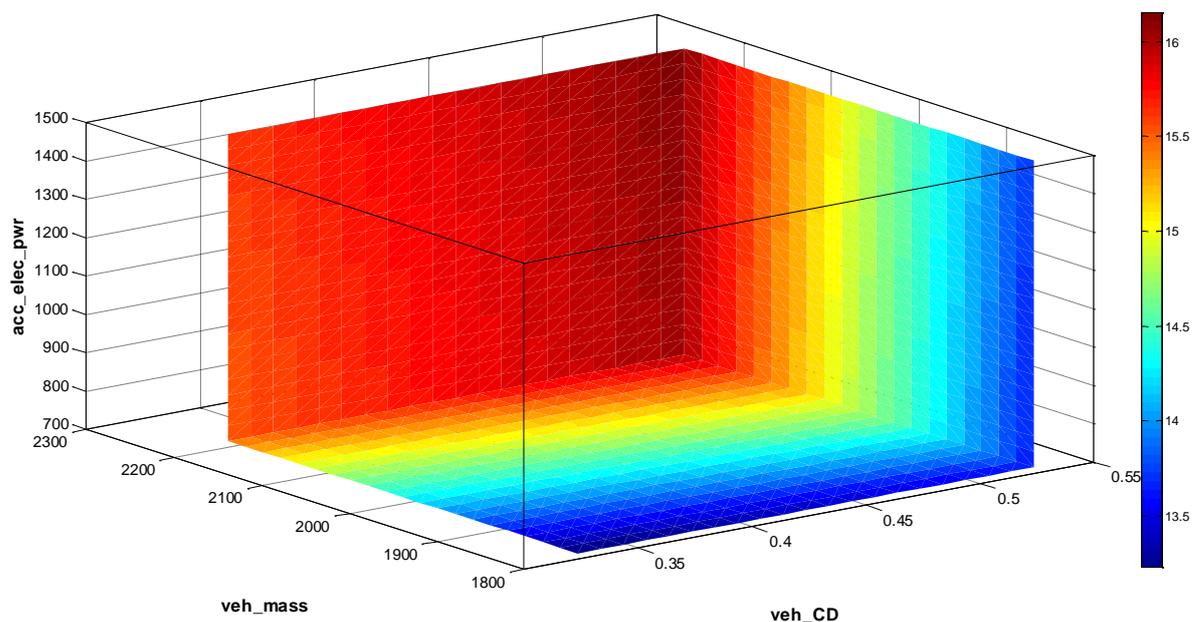
Por meio desses três parâmetros é possível cobrir grande parte dos fatores que impactam diretamente a eficiência energética dos modelos, tais impactos tem sido tema de intensas discussões na indústria automotiva, desafiando os times de pesquisa e desenvolvimento a buscarem soluções cada vez mais eficientes (ZACHAROF et al., 2016).

### 5.2.1 Teste de aceleração e desempenho ativo

De maneira similar ao que foi anteriormente explicado nos resultados iniciais, os testes de aceleração e desempenho em acrive, são feitos de maneira independente dos ciclos HWFET e UDDS. Os primeiros resultados a serem apresentados são aceleração de 0 a 60 mph, distância máxima percorrida durante 5 segundos e capacidade de subida em condição de acrive à 55 mph.

A Figura 68, traz o tempo em segundos, necessário para o modelo acelerar 0 até 60 mph, sendo capaz de superar todas as forças resistivas descritas na equação (34). O vértice inferior mais à frente da superfície tridimensional gerada na Figura 68, apresenta a configuração base do modelo, com massa operacional de 1814 kg, coeficiente de arrasto aerodinâmico 0.329 e carga constante no sistema auxiliar de 700 W, em tais condições o modelo necessita de 13.2 segundos para vencer a inércia do movimento e desenvolver velocidade até 60 mph. É interessante notar que o maior impacto no tempo de aceleração acontece no eixo em que a massa do veículo varia, *veh\_mass*, chegando próximo aos 15.5 segundos quando se mantem as características iniciais do modelo e aumenta a massa até o valor máximo de 2214 kg. Conforme a classe de inercia do modelo aumenta, mais energia precisa ser gasta para movimentar o veículo comprometendo assim os resultados de desempenho em aceleração.

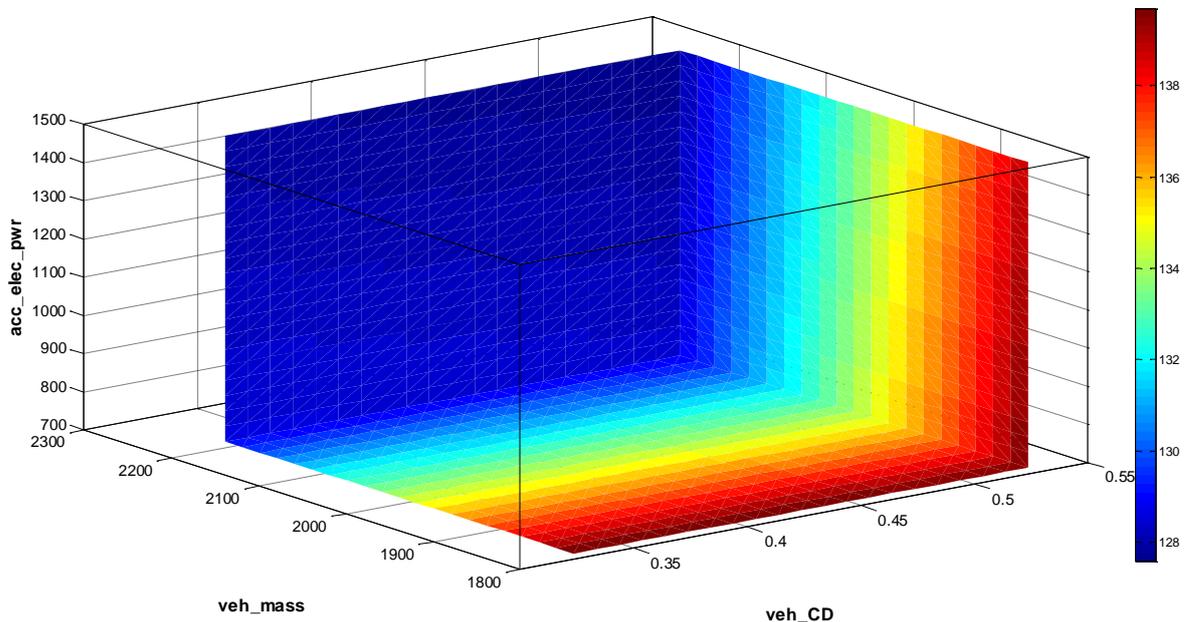
**Figura 68 – Aceleração 0 a 60 mph (segundos)**



**FONTE: O autor, 2020.**

A taxa de distância máxima percorrida pelo modelo num período de 5 segundos é expressa em pés, conforme ilustra a Figura 69 a seguir. Tal teste é proposto pelo próprio ADVISOR e baseado na norma SAE J1666, para avaliar veículos híbridos e elétricos. Como esperado e já explicado na Figura 68, a variação da massa operacional do veículo, altera sua classe de inercia, comprometendo de maneira mais intensa o desempenho de aceleração do modelo. Nas condições iniciais de simulação a distância máxima percorrida é de 139.7 pés, cerca de 43 metros. A variação apenas do coeficiente de arrasto, assim como o consumo de potência no sistema auxiliar, pouco altera a distância percorrida ao final dos 5 segundos de teste, isso é explicado pois os efeitos aerodinâmicos são amplificados em regimes de alta velocidade, a partir de 85 km/h, cerca de 53 mph (KATZ, 2016). Os 5 segundos de duração do teste, não são suficientes para o modelo atingir o nível de velocidade para que os efeitos aerodinâmicos sejam consideráveis.

**Figura 69 – Distância máxima percorrida durante 5 segundos (pés)**

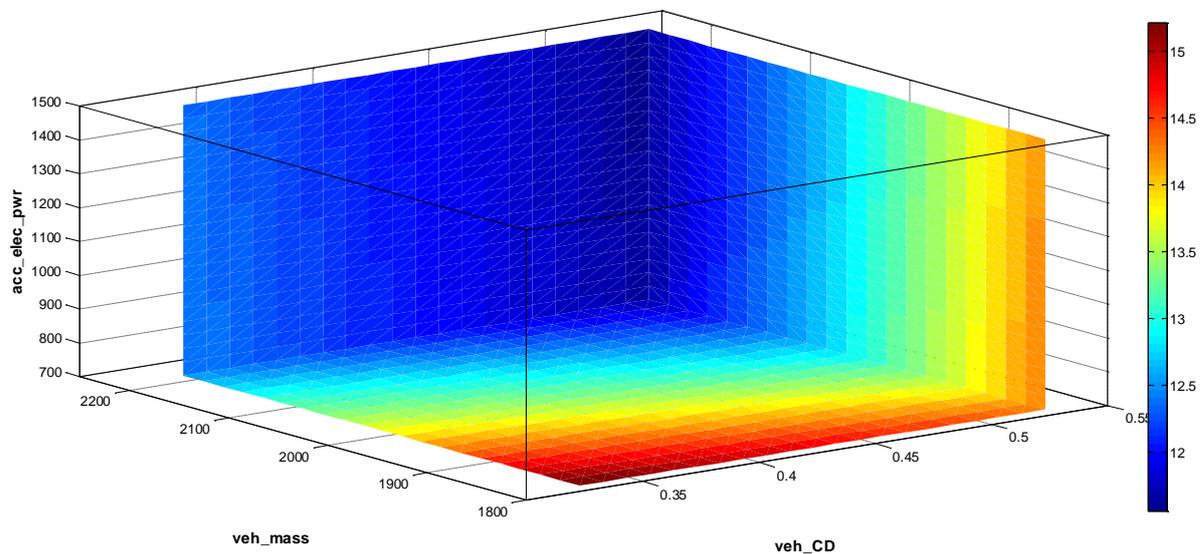


**FONTE: O autor, 2020.**

O desempenho em aclive, também conhecido como desempenho sobre rampa, mede a capacidade do veículo de se manter à 55 mph numa rampa máxima medida em % de inclinação, baseado na norma SAE J1666. A Figura 70, apresenta que os efeitos da variação dos três parâmetros em estudo, impactam diretamente o desempenho do modelo. Em sua configuração inicial, tem-se que 15.2% é a

inclinação máxima que o veículo se mantém nas condições descritas. Conforme os parâmetros de massa operacional, coeficiente de arrasto aerodinâmico e carga do sistema auxiliar se aproxima dos limites máximos propostos para a análise paramétrica, a inclinação diminui para 11.5%, uma redução do desempenho veicular de aproximadamente 24 pontos percentuais. Pode-se constatar o impacto dos efeitos da resistência aerodinâmica para a velocidade de teste a 55 mph, através do incremento do coeficiente de arrasto variando entre 0.329 até 0.529, uma redução de até 8 pontos percentuais no desempenho de rampa, resultando num limite de 14% de inclinação para o modelo.

**Figura 70 – Desempenho em acive percentual a 55 mph (%)**



**FONTE: O autor, 2020.**

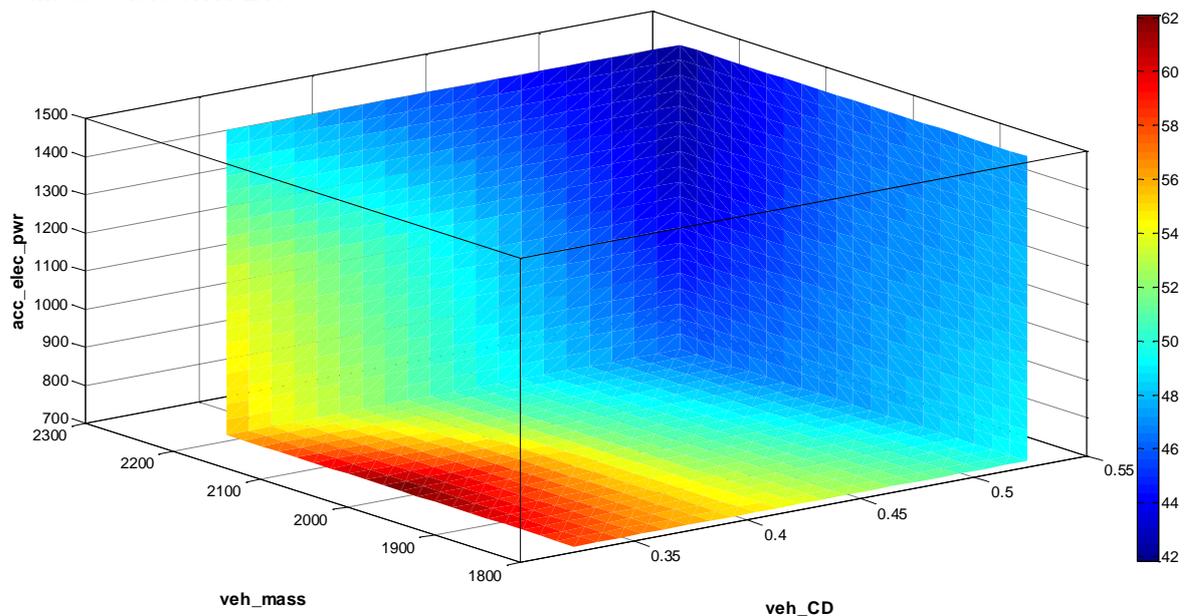
### 5.2.2 Ciclo estrada HWFET

A Figura 71, apresenta o resultado da avaliação paramétrica, em termos de consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente, MPGe, conforme a variação dos parâmetros descritos anteriormente na Tabela 10, para o ciclo de condução em auto estrada. O vértice mais à frente do gráfico tridimensional, onde o eixo do coeficiente de arrasto aerodinâmico se encontra com o eixo da massa veicular, coincidindo com o nível mais baixo da carga do sistema auxiliar, traz o resultado de 58.2 MPGe na condição inicial do modelo numérico, ou seja, os valores mínimos da Tabela 10.

Através da Figura 71, fica evidente que o aumento do veh\_CD até o limite de 0.529 juntamente com o acc\_elec\_pwr próximo dos 1500 W e mantendo-se a

veh\_mass no nível inicial de 1814 kg, o consumo de combustível aumenta significativamente, tendo seu desempenho impactado de 58.2 para aproximadamente 48 MPGe, um aumento de cerca de 17.5% no consumo energético, levando em consideração apenas os parâmetros aerodinâmicos e de carga do sistema auxiliar. A condição máxima dos parâmetros da Tabela 10, é apresentada pela Figura 71 como sendo a região azul escuro ao fundo do gráfico tridimensional de maior consumo de combustível, cerca de 42 milhas com um galão de combustível equivalente, nesta configuração o modelo gasta 27.8% mais combustível quando se comparado à configuração inicial, tal condição se dá pelo fato de que as principais forças que se opõem ao movimento são maiores, o aumento do coeficiente de arrasto aerodinâmico de 0.329 para 0.529 tem seus efeitos amplificados no ciclo estrada, onde a potência gasta é função da velocidade do veículo ao cubo, já a aumento do consumo de energia do sistema auxiliar de 700 W para 1500 W, contribui para que uma parcela menor de energia gerada pelo sistema conversor de combustível seja gasta para propulsionar o modelo, deteriorando assim seu desempenho de aceleração, diminuindo sua capacidade de transportar uma massa operacional maior.

**Figura 71 – Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe ciclo HWFET.**

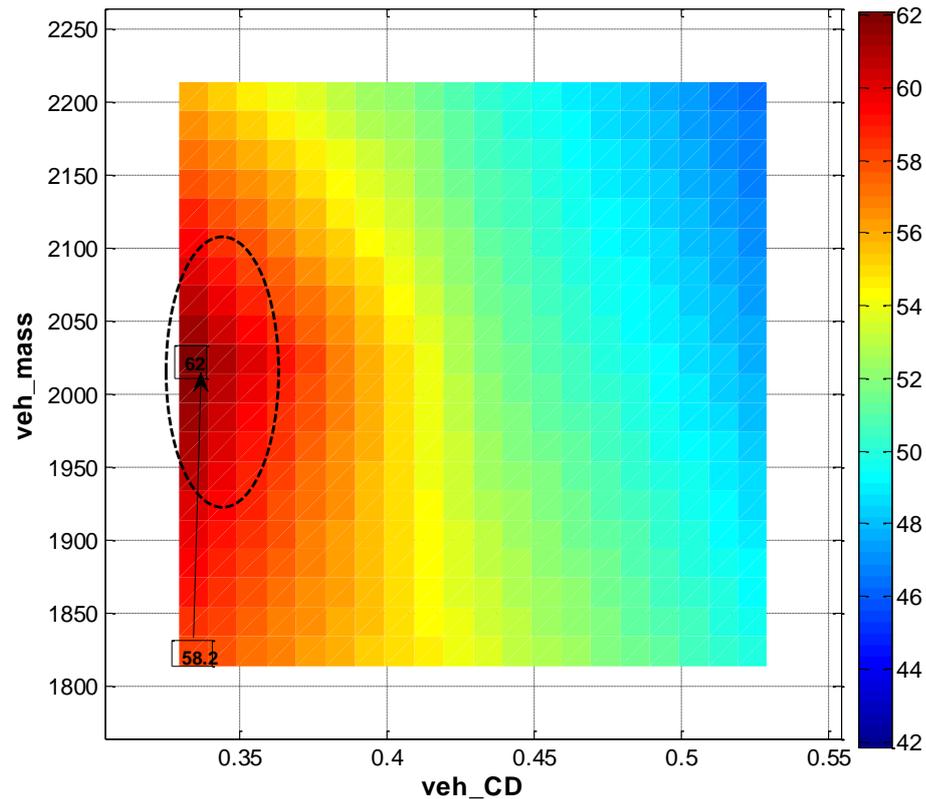


**FONTE: O autor, 2020.**

Um detalhe interessante de uma região da Figura 71 é apresentado separadamente pela Figura 72 a seguir, sobre um plano cartesiano representado

com  $y = veh\_mass$  e  $x = veh\_CD$ , considerando a carga elétrica para o sistema auxiliar ( $acc\_elec\_pwr$ ) no nível constante de 700 W. É formado uma ilha de alta eficiência energética com o consumo otimizado de aproximadamente 62 milhas por galão de combustível equivalente, um aumento de aproximadamente 6.5% quando se comparado com o consumo nas condições iniciais do modelo com 58.2 MPGE. Tal região possui baixo coeficiente de arrasto aerodinâmico, variando entre 0.329 e 0.35 e a massa operacional do veículo maior do que a inicial proposto, entre 2000 e 2050 kg. Uma das razões para que isso aconteça está relacionada ao fato de que as forças aerodinâmicas tem um impacto relativamente maior frente ao aumento de uma faixa da classe de inercia do veículo para as condições do ciclo de condução estrada HWFET, com perfis de velocidades mais altas. Ou seja, um veículo com maior massa operacional, não precisa ser necessariamente menos eficiente que outro mais leve, desde que respeite as limitações da classe de inercia, capaz de manter o consumo de combustível próximo à região de eficiência otimizada, juntamente com melhorias aerodinâmicas que busquem diminuir as forças resistivas de arrasto aerodinâmico através de soluções avançadas de engenharia que mantenham os níveis do coeficiente de arrasto aerodinâmico e a área frontal do veículo menores possíveis.

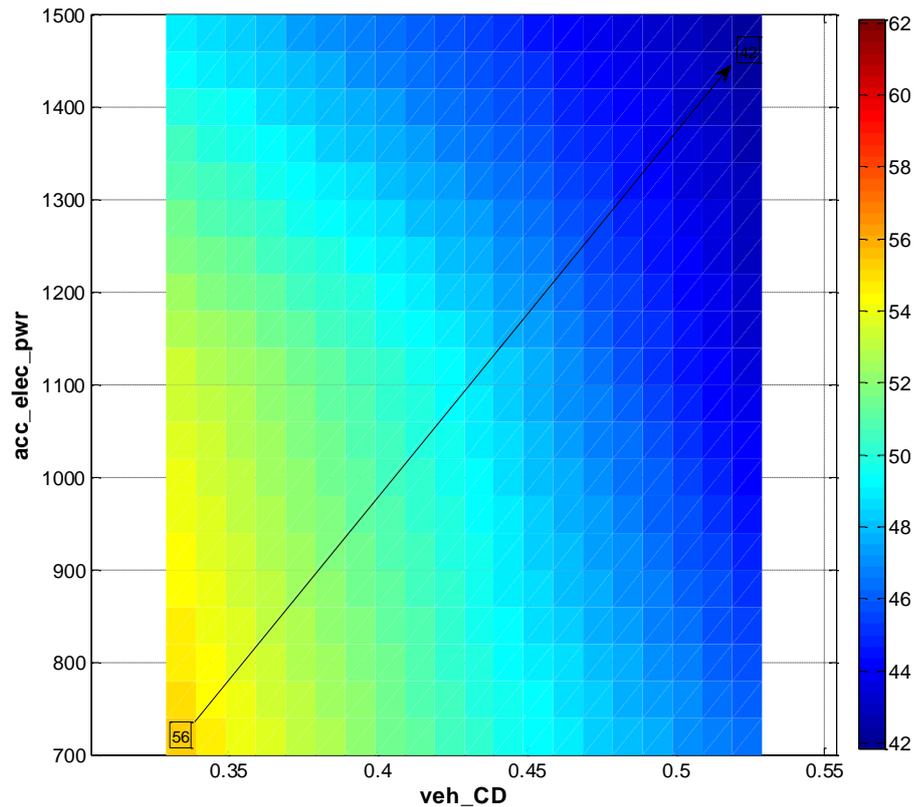
**Figura 72 – Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe, plano cartesiano  $veh\_mass$  vs  $veh\_CD$ , ciclo HWFET**



FONTE: O autor, 2020.

A Figura 73, apresenta o plano cartesiano com  $y = acc\_elec\_pwr$  e  $x = veh\_CD$ , considerando o parâmetro da massa operacional ( $veh\_mass$ ) em seu limite máximo de 2214 kg. É possível observar uma região com maior MPGe próxima aos níveis mínimos da carga do sistema auxiliar e do coeficiente de arrasto aerodinâmico, proporcionando um melhor desempenho operacional para o modelo, já o aumento gradativo de ambos os parâmetros leva à diminuição de eficiência energética até próximo ao nível de 42 MPGe, ou seja, um impacto de 27.8% no consumo de combustível equivalente. Isso se explica, pois, quanto maior a potência desviada do sistema de armazenamento de energia para o sistema auxiliar, menor a eficiência global do sistema propulsor, naturalmente o incremento do coeficiente de arrasto aerodinâmico até o valor máximo de 0.529, causa um aumento da resistência aerodinâmica do modelo e conseqüentemente, mais energia é necessária para tracionar o veículo causando o aumento no consumo de combustível. Na Figura 73 fica evidente o impacto de ambos os parâmetros nos resultados finais do modelo.

**Figura 73 – Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe, plano cartesiano  $acc\_elec\_pwr$  vs  $veh\_CD$ , ciclo HWFET**

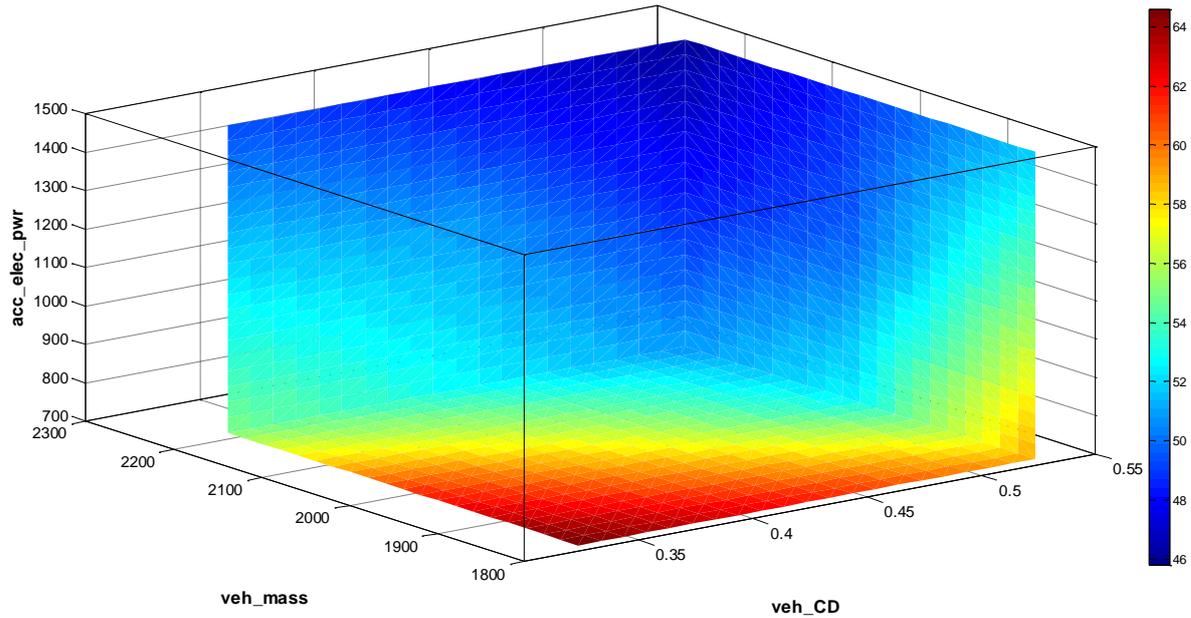


FONTE: O autor, 2020.

### 5.2.3 Ciclo urbano UDDS

A Figura 74, mostra o resultado do consumo de combustível em MPGe no ciclo UDDS, respeitando a variação dos parâmetros apresentados na Tabela 10. Fica evidente que o modelo proposto baseado nos parâmetros veiculares do Hyundai Nexu, opera na região de maior eficiência energética, ou seja, menor consumo de combustível, conforme apresentado no canto inferior mais à frente do gráfico tridimensional, com resultado de 64.6 MPGe. De maneira similar ao comportamento do resultado HWFET, o ciclo UDDS na condição máxima dos parâmetros da Tabela 10, tem o consumo de combustível significativamente reduzido até 46 MPGe, como mostra a região mais azul do gráfico, uma deterioração no consumo de aproximadamente 29%, quando se comparado à condição inicial do modelo proposto.

**Figura 74 – Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe ciclo UDDS.**



**FONTE: O autor, 2020.**

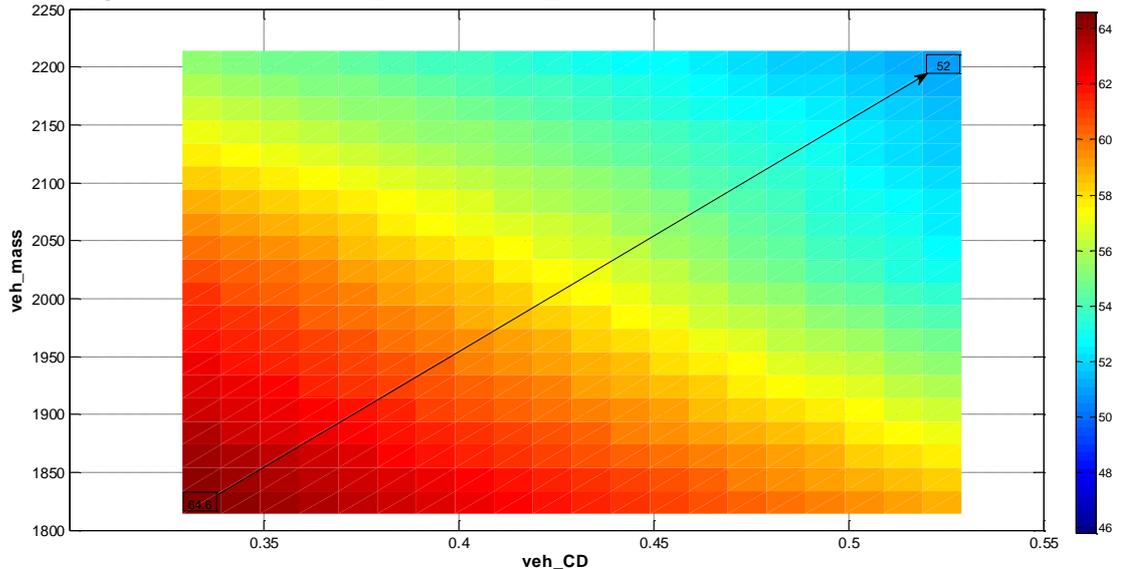
Diferentemente do resultado apresentado para o ciclo HWFET na Figura 71, o resultado de consumo de combustível do ciclo UDDS na Figura 74, a região de melhor consumo coincide com os parâmetros iniciais do modelo, ou seja, num primeiro momento pode-se concluir que os parâmetros veiculares foram definidos favorecendo uma condição de uso urbano, propiciando um resultado favorável no ciclo UDDS.

É possível observar, que o modelo resultou num consumo de 58.2 MPGe e 64.6 MPGe para os ciclos HWFET e UDDS respectivamente, um veículo com sistema propulsor tradicional movido com motor de combustão interna, normalmente possui um melhor desempenho em termos de consumo de combustível, no ciclo estrada, uma vez que o regime de velocidade mais estável, sem desacelerações e frenagens abruptas, propiciam no comportamento dinâmico do carro, porém não é esse o resultado observado nos dados extraídos da simulação do modelo proposto baseado no Hyundai Nexso, isso é explicado principalmente pela capacidade de regeneração, que recupera a energia de frenagem e a reaproveita para alimentar o conjunto de baterias no sistema de armazenamento, aumentando assim a energia disponível para geração de potência no sistema propulsor, melhorando a eficiência global do sistema.

A Figura 75, apresenta um detalhe interessante sobre um plano cartesiano com  $y=veh\_mass$  e  $x=veh\_CD$ , considerando  $acc\_elec\_pwr$  no nível constante de 700 W. É possível observar como o incremento de massa operacional e do

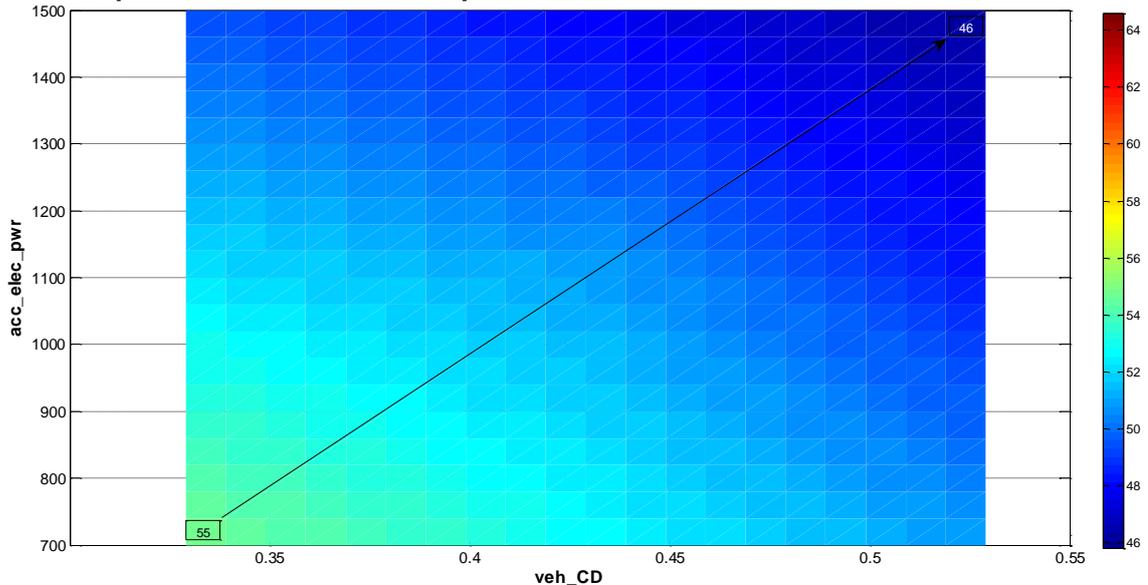
coeficiente de arrasto aerodinâmico impactam negativamente o consumo de combustível no ciclo, conforme os dois parâmetros caminham para seus valores máximos da Tabela 10, o consumo de combustível equivalente piora de 64.6 MPGe para aproximadamente 52 MPGe, uma deterioração de 19.5%.

**Figura 75 – Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe, plano cartesiano  $veh\_mass$  vs  $veh\_CD$ , ciclo UDDS**



**FONTE: O autor, 2020.**

**Figura 76 – Consumo de combustível em milhas por galão de combustível equivalente MPGe, plano cartesiano  $acc\_elec\_pwr$  vs  $veh\_CD$ , ciclo UDDS**



**FONTE: O autor, 2020.**

A Figura 76 também apresenta o plano cartesiano com  $y=acc\_elec\_pwr$  e  $x=veh\_CD$ , considerando o parâmetro da massa em seu limite máximo de 2214 kg. De maneira muito parecida com a Figura 73, no ciclo UDDS também é possível

observar uma região com maior MPGe próxima aos níveis mínimos da carga do sistema auxiliar e do coeficiente de arrasto aerodinâmico, 55 MPGe, proporcionando um melhor desempenho operacional para o modelo, já o aumento gradativo de ambos os parâmetros leva à diminuição de eficiência energética até próximo ao nível de 46 MPGe, ou seja, uma piora de 16% no consumo de combustível equivalente.

Os resultados do estudo paramétrico se mostraram muito eficientes sobre a maneira que se pode avaliar o impacto da variação dos parâmetros escolhidos no resultado final do modelo numérico. É visualmente mais fácil perceber como os principais fatores que regem a eficiência global do sistema têm influência direta no comportamento e no desempenho final do veículo.

## **6 CONCLUSÕES FINAIS**

### **6.1 CONCLUSÕES**

O software ADVISOR se mostrou uma ferramenta eficaz, flexível e capaz de conduzir uma avaliação detalhada do comportamento veicular sob diversas condições e ciclos de condução, bem como analisar a influência mútua entre os sistemas e subsistemas definidos. Os parâmetros podem ser facilmente ajustados e modificados a fim de se compreender seus respectivos impactos no desempenho final do veículo.

Conforme apresentado na Tabela 7, os resultados simulados de consumo de combustível equivalente, se mostraram muito próximos dos declarados para o Hyundai Nexso versão *Blue*, com diferença de 1.5% para o ciclo urbano UDDS, entre o valor simulado de 64 MPGe, e declarado pela montadora 65 MPGe. Já para o ciclo estrada HWFET e combinado essa diferença diminui para 0%, tendo em ambos os casos 58 e 61 MPGe respectivamente, comprovando a capacidade do modelo em representar de maneira muito próxima o comportamento do veículo real em termos de eficiência energética para os ciclos regulamentados para o mercado Norte Americano.

Os últimos resultados obtidos, foram realizados através de um estudo paramétrico. Para os resultados de tempo aceleração de 0 a 60 mph, distância máxima percorrida durante 5 segundos e desempenho em active à 55 mph, apresentados nas Figuras 68, 69 e 70 respectivamente, fica evidente que a maior variação na escala de cores nos gráficos tridimensionais, se dá no eixo da massa operacional, podendo-se concluir que tal fator, foi o que mais contribuiu para a deterioração dos resultados, em comparação com os valores mínimos dos parâmetros definidos pela Tabela 10. Já os resultados da eficiência energética em termos de consumo de combustível equivalente em ambos ciclos de condução estrada e cidade, apresentados nas Figuras 71 e 74, mostraram um resultado interessante sob o ponto de vista da estratégia de posicionamento operacional frente aos ciclos. Através das simulações paramétricas, fica evidente que o modelo, prioriza o desempenho energético nas condições urbanas, uma vez que para o ciclo UDDS os parâmetros iniciais, correspondentes à condição normal do Hyundai Nexso, coincidem diretamente com a região de melhor consumo em milhas por galão de combustível equivalente (Figura 75). Tal efeito não acontece para o ciclo estrada HWFET, conforme apresentado no detalhe da Figura 72, o plano cartesiano mostra que a região de melhor consumo de combustível para o ciclo, seria com a massa

operacional próxima aos 2030 kg, mantendo-se os parâmetros do coeficiente de arrasto aerodinâmico e carga elétrica do sistema auxiliar em seus valores mínimos.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram identificados alguns pontos interessantes a serem abordados em estudos futuros:

- Aprofundar os estudos quanto à faixa de operação do estado de carga inicial e final do sistema de armazenamento de energia composto pelo conjunto de baterias.
- Incluir no sistema de armazenamento de energia um ultra capacitor, afim de se entender os impactos em termos de eficiência energética e desempenho operacional no modelo numérico veicular.
- Avaliar os custos de manutenção dos veículos elétricos híbridos com células a combustível atualmente em produção.

## REFERÊNCIAS

ADAC (2012a), ADAC Spartipps: **Das verbrauchen Dachträger**, Dachbox und Co. Disponível em: <<http://dachbox.info/adacspritspartipps-das-verbrauchen-dachtrager-dachbox-und-co>>. Acesso em 08 de novembro de 2020.

ADVISOR, **Advanced Vehicle Simulator**, versão r2003-00-r0116, April 24, 2013.

AL SAKKA, Monzer et al. **DC/DC converters for electric vehicles. Electric vehicles—modelling and simulations**, v. 309, 2011.

ALIASAND, Arun Eldho; JOSH, F. T. **Selection of Motor foran Electric Vehicle: A Review. Materials Today: Proceedings**, v. 24, p. 1804-1815, 2020.

ALVES, Janaina. **O que é célula de combustível?** Disponível em <[http://www.usp.br/portaliobiosistemas/?p=4316#:~:text=O%20hidrog%C3%AAnio%20gasoso%20\(o%20combust%C3%ADvel,e%20formando%20pr%C3%B3tons%20\(H%2B\).>](http://www.usp.br/portaliobiosistemas/?p=4316#:~:text=O%20hidrog%C3%AAnio%20gasoso%20(o%20combust%C3%ADvel,e%20formando%20pr%C3%B3tons%20(H%2B).>) , 2012. Acesso em 25 de julho de 2020.

BAUSE, K.; RADIMERSKY, A.; IWANICKI, M.; ALBERS, A. **Feasibility studies in the product development process**. Procedia CIRP, v. 21, p. 473–478, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.128>>. Acesso em: 04 de julho de 2019.

BHATT, Pooja; MEHAR, Hemant; SAHAJWANI, Manish. **Electrical Motors for Electric Vehicle—A Comparative Study**. Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA), 2019.

BRAJTERMAN, O. **Introdução De Veículos Elétricos E Impactos Sobre O Setor Energético Brasileiro**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016.

Business wire 2019, Disponível em <<https://www.businesswire.com/news/home/20191105005522/en/The-Rise-of-the-SUV---2019-Thematic-Research-Report---ResearchAndMarkets.com>>. Acesso em 25 de setembro de 2020.

BRASIL. Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ISSN 1677-7042, p. 1-13, 10 dez. 2018.

**Cálculo do raio dinâmico do pneu**, Disponível em: <<https://x-engineer.org/automotive-engineering/chassis/vehicle-dynamics/calculate-wheel-radius/>>. Acesso em: 03 de julho de 2020.

CANO, Zachary P. et al. **Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets**. Nature Energy, v. 3, n. 4, p. 279-289, 2018.

CATLIN, Glenn. **PEM fuel cell modeling and optimization using a genetic algorithm**. 2010. Tese de Doutorado. University of Delaware.

CHINDAMO, D; GADOLA, M; ROMAN, M. **Simulation tool for optimization and performance prediction of generic hybrid electric series powertrain**. International Journal of Automotive Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 135 - 144, 2014.

CROLLA, David. **Automotive engineering: powertrain, chassis system and vehicle body**. 2009.

DAS, Himadry Shekhar; TAN, Chee Wei; YATIM, A. H. M. **Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 76, p. 268-291, 2017.

DIXON, G.; STOBART, R.; STEFFEN, T. **Unified Backwards Facing and Forwards Facing Simulation of a Hybrid Electric Vehicle using MATLAB Simscape**. SAE Technical Paper Series, v. 1, 2015.

EG & G SERVICES (FIRM). **Fuel cell handbook**. US Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2004.

EHSANI, Mehrdad et al. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. CRC press, 2005.

EHSANI, Mehrdad et al. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**.

CRC press, 2018.

EPA Fuel Economy Labeling of Motor Vehicles: **Revisions To Improve Calculation of Fuel Economy Estimates**; Proposed Rule. 40 CFR Parts 86 and 600. Federal Register / Vol. 71, No. 21, 2006.

EPA, 40 CFR § 86.129-94 - **Road load power, test weight, inertia weight class determination, and fuel temperature profile**. Disponível em: <<https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/86.129-94>>. Acesso em: 23 de outubro de 2020.

EPA, **Vehicle and Fuel Emissions Testing**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>>. Acesso em: 01 de novembro de 2020.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia - 2050**. MME/EPE-Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética, 2018.

FLOREA, Ciprian. **New-generation hydrogen SUV has better mileage than Tesla Model X**, dezembro 2018. Disponível em: <<https://www.topspeed.com/cars/hyundai/2019-hyundai-nexo-ar177314.html>>. Acesso em 16 de novembro de 2020.

Fontaras, G., Kouridis, H., Samaras, Z., Elst, D. and Gense, R. (2007), **Use of a vehicle-modelling tool for predicting CO2 emissions in the framework of European regulations for light goods vehicles**, Atmospheric Environment 41(14): 3009-3021. 2007.

Guarnieri, M. (2012). **Looking back to electric cars**. Proc. HISTELCON 2012 – 3rd Region-8 IEEE HISTory of Electro – Technology Conference: The Origins of Electrotechnologies. pp. 1–6. doi:10.1109/HISTELCON.2012.6487583. ISBN 978-1-4673-3078-7.

HEYWOOD, John B. Combustion engine fundamentals. 1ª Edição. Estados Unidos,

1988.

HORN, Michael et al. **Supercapacitors: A new source of power for electric cars?** Economic Analysis and Policy, v. 61, p. 93-103, 2019.

HOWARD, BILL, **2019 Hyundai Nexo Review: 380 Miles (on Hydrogen). Can Your EV Go That Far?** novembro 2018. Disponível em <<https://www.extremetech.com/extreme/280219-2019-hyundai-nexo-review-380-miles-on-hydrogen-can-your-ev-go-that-far>>. Acesso em 15 de outubro de 2020.

HUCHO, Wolf; SOVRAN, Gino. **Aerodynamics of road vehicles**. Annual review of fluid mechanics, v. 25, n. 1, p. 485-537, 1993.

Hybridcars, **History of Hybrid Vehicles**, março 2006. Disponível em:<<https://web.archive.org/web/20090208230718/http://www.hybridcars.com/history/history-of-hybrid-vehicles.html>>. Acesso em 26 de maio de 2020.

Hyundai NEXO **Technical Specification, 2018**. Disponível em <<https://www.hyundai.news/eu/press-kits/all-new-hyundai-nexo-technical-specifications/>>. Acesso em 25 de setembro de 2020.

Hyundai Nexo, **full technical specification**. Disponível em: <[https://www.automobile-catalog.com/auta\\_details1.php](https://www.automobile-catalog.com/auta_details1.php)>. Acesso em 15 outubro de 2020.

Hyundai USA spec, **HYUNDAI NEXO Fuel Cell specification 2020**. Disponível em: <<https://www.hyundaiusa.com/us/en/vehicles/nexo/compare-specs>>. Acesso em: 21 de outubro de 2020.

INMETRO. **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Tabelas de consume/ eficiência energética veículos automotores leves, categoria todas, 12 março de 2020.

IPCC. Climate Change 2014: **Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment**. [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y.

Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)], Cambridge, United Kingdom e New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.

KARAMUK, M; EMIN, Ç; GÜR, S. **Electric Vehicle Powertrain Development – Conceptual Design and Implementation**. International Conference on Automotive and Vehicle Technologies-AVTECH, 2013.

KATZ, Joseph. **Automotive aerodynamics**. John Wiley & Sons, 2016.

LANZAROTTO, D. et al. **Overview of different hybrid vehicle architectures**. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 9, p. 218-222, 2018.

LANZAROTTO, D.; MARCHESONI, M.; PASSALACQUA, M.; PRATO, A. P.; REPETTO, M. **Overview of different hybrid vehicle architectures**. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 9, p. 218–222, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.036>>. Acesso em 24 de agosto de 2019.

MANOHARAN, Y; HOSSEINI, S. E.; BUTLER, B.; et al. **Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect**. Applied Sciences, v. 9, n. 11, p. 2296, 2019.

MARKEL, Tony et al. **ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling**. Journal of power sources, v. 110, n. 2, p. 255-266, 2002.

MUZAFFAR, Aqib et al. **A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications**. Renewable and sustainable energy reviews, v. 101, p. 123-145, 2019.

NASSIF, Guilbert G.; DE ALMEIDA, Silvio CA. **Impact of powertrain hybridization on the performance and costs of a fuel cell electric vehicle**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 45, n. 41, p. 21722-21737, 2020.

ORD, D. A.; FERRIS, J. B. **Advanced Vehicle Powertrain Design using Model-Based Design**, 2014. Disponível em: <[https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/49106/Ord\\_DA\\_T\\_2014.pdf?sequence=1](https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/49106/Ord_DA_T_2014.pdf?sequence=1)>. Acesso em 12 de maio de 2019.

PRATHIBHA, P. K.; SAMUEL, Elizabeth Rita; UNNIKRIISHNAN, A. **Parameter Study of Electric Vehicle (EV), Hybrid EV and Fuel Cell EV Using Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR) for Different Driving Cycles**. In: Green Buildings and Sustainable Engineering. Springer, Singapore, 2020. p. 491-504.

QUEIROZ, J. de F. **Introdução do veículo híbrido no Brasil: evolução tecnológica aliada à qualidade de vida**. Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 2006.

ROBERT BOSCH GMBH. Vehicle Control Unit: **The powertrain domain controller as central E/E-architecture component for all powertrain types**. Disponível em: <<https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/electric-drive/vehicle-control-unit/>>. Acesso em: 16 de junho de 2020.

ROUSSEAU, A.; HALBACH, S.; MICHAELS, L.; et al. **Electric drive vehicle development and evaluation using system simulation**. IFAC, 2014.

SANTOS, Marco Aurélio da Silva. **Eletricidade: Acionamento de Motores Elétricos**; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/eletricidade-acionamento-motores-eletricos.htm>. Acesso em 06 de junho de 2020.

SEREDYNSKI, Paul. 2019 Hyundai Nexo: **Fuel-cell refinement, SUV luxury**. SAE International, 2018. Disponível em < <https://www.sae.org/news/2018/11/2019-hyundai-nexo-fuel-cell-launch> >. Acesso em 26 de setembro de 2020.

SIEMENS. **Motores de Corrente Contínua, guia rápido para uma especificação precisa**. Ed. 1, 2006.

SILVA, Rafael Átila. **Avaliação da hibridização de um veículo nacional compacto utilizando arquitetura paralela de eixos separados**. 2017.

TANÇ, B.; ARAT, H. T.; BALTACIOĞLU, E.; AYDIN, K. **Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, n. 20, p. 10120–10128, 2019.

THOMAS, John; HUFF, Shean; WEST, Brian. **Fuel economy and emissions effects of low tire pressure, open windows, roof top and hitch-mounted cargo, and trailer**. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, v. 7, n. 2014-01-1614, p. 862-872, 2014.

TOSHIZAEMOM NOCE. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. Belo Horizonte: PUC-MG, 2009.

TURKMEN, Anil Can; SOLMAZ, Salim; CELIK, Cenk. **Analysis of fuel cell vehicles with advisor software**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 70, p. 1066-1071, 2017.

VOGEL, W.; LASCH, R. **Approach for Complexity Management in Variant rich**. 2.ed. Hamburgo, 2015.

WILBERFORCE, Tabbi et al. **Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 40, p. 25695-25734, 2017.

WU, Yin. **Power Distribution System Modeling and Simulation of an Alternative Energy Testbed Vehicle**. 2010. Tese de Doutorado. Ohio University.

ZACHAROF, N. et al. Review of in use factors affecting the fuel consumption and CO2 emissions of passenger cars. **European Commission**, 2016.

ZHANG, C.; SHEN, K.; YANG, F.; YUAN, C. **Multiphysics Modeling of Energy Intensity and Energy Efficiency of Electric Vehicle Operation**. Procedia CIRP, v.

80, p. 322–327, 2019. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827119300605>>. Acesso em 16 de maio de 2020.

### ANEXO 1 – PRINCIPAIS VARIÁVEIS DO MODELO NUMÉRICO

#	Variável	Descrição	Unidade
(1)	veh_spd	Velocidade requerida do veículo pelo ciclo	m/s
(2)	veh_force_a; veh_spd_a	Força de tração disponível para o veículo; Velocidade linear disponível para o veículo	N m/s
(3)	F_req v_ave_req	Força de tração requerida pela roda; Velocidade requerida pela roda	N m/s
(4)	wh_front_trq_a wh_front_spd_a	Torque disponível do eixo dianteiro; Velocidade angular rodas dianteiras	Nm rad/s
(5)	wh_rear_trq_a wh_rear_spd_a	Torque disponível do eixo traseiro; Velocidade angular rodas traseiras	Nm rad/s
(6)	wh_front_trq_r wh_front_spd_r	Torque requerido pelo eixo dianteiro; Velocidade angular requerida pelas rodas dianteiras	Nm rad/s
(7)	wh_rear_trq_r wh_rear_spd_r	Torque requerido pelo eixo traseiro; Velocidade angular requerida pelas rodas traseiras	Nm rad/s
(8)	fd_trq_out_a fd_spd_out_a	Torque disponível após diferencial; Velocidade angular disponível após diferencial	Nm rad/s
(9)	fd_trq_in_r fd_spd_in_r	Torque requerido na entrada do diferencial; Velocidade angular requerida na entrada do diferencial	Nm rad/s
(10)	fd_trq_in_a fd_spd_in_a	Torque disponível na entrada do diferencial; Velocidade angular disponível na entrada do diferencial	Nm rad/s
(11)	gb_trq_out_r gb_spd_out_r	Torque requerido na saída da transmissão; Velocidade angular requerida na saída da transmissão	Nm rad/s
(12)	gb_trq_in_a gb_spd_in_a	Torque disponível na entrada da transmissão; Velocidade angular disponível na entrada da transmissão	Nm rad/s
(13)	mc_trq_out_r mc_spd_out_r	Torque requerido na saída do motor elétrico; Velocidade angular requerida na saída do motor elétrico	Nm rad/s
(14)	mc_pwr_in_a	Potência disponível na entrada do motor elétrico	W
(15)	mc_pwr_in_r	Potência requerida na entrada do motor elétrico	W
(16)	pb_pwr_out_a	Potência disponível na saída do barramento elétrico	W
(17)	pb_pwr_out_r	Potência requerida na saída do barramento elétrico	W
(18)	fc_pwr_out_a	Potência disponível na saída da célula a combustível	W
(19)	ess_pwr_out_a	Potência disponível na saída do ESS	W
(20)	ess_pwr_out_r	Potência requerida na saída do ESS	W
(21)	pb_pwr_out_r	Potência requerida na saída do barramento elétrico	W
(22)	fc_pwr_out_r	Potência requerida na saída da célula a combustível	W
(23)	fc_fuel	Combustível consumido pela célula	Gal
(24)	fc_emis	Emissões de saída da célula a combustível	-