

**VEÍCULOS ELÉTRICOS: ANÁLISE COMPARATIVA DE  
DESEMPENHO, ECONOMIA E PANORAMA DAS ESTAÇÕES DE  
RECARGA EM BRASÍLIA**

**PEDRO CARDOZO NUNES DA SILVA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VEÍCULOS ELÉTRICOS: ANÁLISE COMPARATIVA DE  
DESEMPENHO, ECONOMIA E PANORAMA DAS ESTAÇÕES DE  
RECARGA EM BRASÍLIA**

**PEDRO CARDOZO NUNES DA SILVA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. FERNANDO CARDOSO MELO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO: ???**

**BRASÍLIA/DF: OUTUBRO - 2021**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VEÍCULOS ELÉTRICOS: ANÁLISE COMPARATIVA DE  
DESEMPENHO, ECONOMIA E PANORAMA DAS ESTAÇÕES DE  
RECARGA EM BRASÍLIA**

**PEDRO CARDOZO NUNES DA SILVA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Dr. Fernando Cardoso Melo – ENE/Universidade de Brasília  
Orientador**

---

**Prof. Dr. Ivan Marques de Toledo Camargo – ENE/Universidade de Brasília  
Membro Interno**

---

**Prof. Dr. Francis Arody Moreno Vásquez – ENE/Universidade de Brasília  
Membro Interno**

**BRASÍLIA, 26 DE OUTUBRO DE 2021.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

NUNES DA SILVA, PEDRO CARDOZO

VEÍCULOS ELÉTRICOS: ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO, ECONOMIA E PANORAMA DAS ESTAÇÕES DE RECARGA EM BRASÍLIA [Distrito Federal] 2021. xxiii, 221p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Elétrica, 2021).

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Veículos Elétricos

2. Estação de Recarga

3. *Drive Cycles*

4. Máquinas Elétricas

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, P.C.N. (2021). VEÍCULOS ELÉTRICOS: ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO, ECONOMIA E PANORAMA DAS ESTAÇÕES DE RECARGA EM BRASÍLIA . Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Publicação ???, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 221p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Pedro Cardozo Nunes da Silva

TÍTULO: VEÍCULOS ELÉTRICOS: ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO, ECONOMIA E PANORAMA DAS ESTAÇÕES DE RECARGA EM BRASÍLIA .

GRAU: Bacharel ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta trabalho de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Pedro Cardozo Nunes da Silva

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil



## AGRADECIMENTOS

*Agradeço, primeiramente, aos meus pais. À minha mãe, Joana Darc (in memoriam), por todo o amor, dedicação e esforço para minha formação e educação. Ao meu pai, José Salvador, pelo suporte e incentivo dado durante toda minha jornada. Vocês são as minhas maiores referências e me sinto abençoado por tê-los como meus pais.*

*À minha namorada e companheira, Anievelyn, por todo o amor, compreensão e suporte dado ao longo de todos os momentos da minha trajetória universitária.*

*Ao meu orientador, professor Fernando, pela dedicação e suporte em me ajudar na elaboração deste trabalho, sempre com muita disponibilidade e paciência.*

*Aos amigos da UnB, por todo o apoio, companheirismo e experiências vividas ao longo dos últimos anos. Um abraço especial para os amigos Edson Sousa, Rafael Amorim, Hugo Brito e Arthur Dias, que tornaram essa jornada tão desafiadora em uma experiência especial e inesquecível.*

*Aos companheiros da ENETEC - Consultoria Júnior, que enriqueceram minha jornada universitária com aprendizados e os bons momentos vividos. Um agradecimento especial aos amigos Lucas Ferreira, Luiz Augusto Fidalgo, Luiz Fernando Naretto, João Pedro Zanatta, Helena Coutinho e Felipe Santana por todas as conversas e experiências que tivemos enquanto fazíamos história na nossa EJ.*

*À Universidade de Brasília, por permitir que tudo isso fosse possível.*

*À todos vocês, muito obrigado !*

*Pedro Cardozo Nunes da Silva*

## RESUMO

**Título:** VEÍCULOS ELÉTRICOS: ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO, ECONOMIA E PANORAMA DAS ESTAÇÕES DE RECARGA EM BRASÍLIA

**Autor:** Pedro Cardozo Nunes da Silva

**Orientador:** Prof. Dr. Fernando Cardoso Melo

**Graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasília, 26 de outubro de 2021**

O presente trabalho tem como objetivo comparar o desempenho de veículos convencionais, híbridos e elétricos em diferentes condições de trânsito em Brasília. Percorrendo os trajetos intercampi da Universidade de Brasília e outro de maior extensão, são utilizados dois simuladores veiculares para analisar as perdas ocorridas e a operação detalhada dos sistemas de propulsão e baterias dos veículos. A partir do consumo ocorrido de combustível e energia das baterias, são estimados os custos nos diferentes *drive cycles* realizados.

De modo a compreender o cenário da mobilidade elétrica em Brasília, é realizado um estudo sobre as estações de recarga atualmente disponíveis. São abordados quesitos como distribuição pela cidade, tipos de carregadores disponíveis e estabelecimentos que oferecem pontos de recarga. Por fim, avalia-se a autonomia do veículo totalmente elétrico para diferentes níveis iniciais de carga nos trajetos de referência.

**Palavras-chave:** Veículos Elétricos; *Drive Cycles*; Estações de Recarga; Baterias; Máquinas Elétricas.

## **ABSTRACT**

**Title:**

**Author:** Pedro Cardozo Nunes da Silva

**Supervisor:** Prof. Dr. Fernando Cardoso Melo

**Graduate Program in Electrical Engineering**

**Brasília, October 26th, 2021**

The present work aims to compare the performance of conventional, hybrid and electric vehicles under different traffic conditions in Brasília. Driving through the intercampi routes of the University of Brasilia and another lengthier road, two vehicle simulators are used to analyze the occurred losses and the detailed operation of the propulsion systems and batteries of the vehicles. Based on fuel and energy consumption throughout the drive cycles, the costs are estimated.

In order to obtain a wider perspective on electric mobility in Brasília, a study is carried out on the charging stations currently available. Issues such as distribution of charging points throughout the city, types of chargers available and locations which offer charging stations are addressed. Finally, the autonomy of the all-electric vehicle is evaluated in a wide range of initial charge levels on the reference routes.

**Keywords:** Electric Vehicles; Drive Cycles; Charging Stations; Batteries; Electric Machines.



## SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
2.1	DINÂMICA VEICULAR	4
2.1.1	FORÇAS RESISTIVAS	5
2.1.1.1	FORÇA DE ARRASTE AERODINÂMICO	5
2.1.1.2	FORÇA DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO	6
2.1.1.3	INCLINAÇÃO DA PISTA	6
2.1.2	FORÇA DE TRAÇÃO	6
2.1.3	FATOR DE INÉRCIA ROTACIONAL	7
2.1.4	PARÂMETROS DE DESEMPENHO VEICULAR	8
2.1.4.1	VELOCIDADE MÁXIMA	8
2.1.4.2	ACELERAÇÃO	9
2.1.4.3	CAPACIDADE DE SUBIDA	10
2.2	ARQUITETURA VEICULAR	10
2.2.1	VEÍCULO CONVENCIONAL	11
2.2.2	VEÍCULO HÍBRIDO - HEV E PHEV	12
2.2.3	VEÍCULO ELÉTRICO - BEV	14
2.3	BATERIAS	15
2.3.1	CARACTERÍSTICAS GERAIS	15
2.3.2	BATERIAS TRACIONÁRIAS	18
2.3.3	MODO DE CARREGAMENTO	19
2.3.3.1	CARREGAMENTO CC	20
2.3.3.2	CARREGAMENTO CV	20
2.3.3.3	CARREGAMENTO CORRENTE CONSTANTE E TENSÃO CONSTANTE (CC-CV)	20
2.3.3.4	CARREGAMENTO MCC	21
2.3.4	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA (BMS)	22
2.4	MOTORES	23
2.4.1	MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA (MCI)	23
2.4.2	MÁQUINAS ELÉTRICAS	25
2.4.2.1	MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	27
2.4.2.2	MOTOR DE INDUÇÃO	28
2.4.2.3	MOTOR SÍNCRONO DE IMÃS PERMANENTES	28
2.4.2.4	MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL	29

2.4.3	COMPARATIVO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS .....	30
2.5	ESTAÇÕES DE RECARGA .....	31
2.5.1	TOPOLOGIA CA .....	31
2.5.2	TOPOLOGIA CC .....	32
2.5.3	TIPOS DE CARREGAMENTO E ESTAÇÕES .....	32
2.5.4	POTÊNCIA E TEMPO DE RECARGA .....	35
2.6	CONECTORES .....	36
2.6.1	CONECTORES CA.....	36
2.6.1.1	TIPO 1 .....	36
2.6.1.2	TIPO 2 .....	38
2.6.1.3	TESLA CA.....	39
2.6.2	CONECTORES CC .....	40
2.6.2.1	COMBO CCS – TIPO 1 E TIPO 2 .....	41
2.6.2.2	CHADEMO ( <i>CHARGE DE MOVE</i> ) .....	43
2.6.2.3	TESLA CC .....	45
2.6.2.4	PADRÃO CHINÊS GB/T CC .....	45
2.6.3	COMUNICAÇÃO .....	47
2.6.4	LEGISLAÇÃO VIGENTE RECARGA DE VEÍCULOS .....	47
2.6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	48
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	49
3.1.1	ADVISOR® .....	49
3.1.2	FASTSIM™ .....	49
3.1.3	PLUGSHARE™ .....	49
3.1.4	MICROSOFT EXCEL® .....	50
3.1.5	GOOGLE MAPS™ .....	50
3.1.6	SPEEDOMETER-2™ .....	50
3.1.7	GPS TRACKER™ .....	50
3.2	METODOLOGIA .....	51
3.2.1	MODELAGEM DE VEÍCULOS .....	51
3.2.2	MODELAGEM FASTSIM™ .....	53
3.2.2.1	CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS .....	53
3.2.2.2	RODAS.....	54
3.2.2.3	MCI .....	54
3.2.2.4	MÁQUINA ELÉTRICA .....	55
3.2.2.5	COMBUSTÍVEL .....	56
3.2.2.6	BATERIA .....	56
3.2.2.7	GERENCIAMENTO DE ENERGIA.....	57

3.2.2.8 OUTROS COMPONENTES .....	57
3.2.3 MODELAGEM ADVISOR® .....	58
3.2.3.1 CARROCERIA .....	59
3.2.3.2 RODAS.....	59
3.2.3.3 TRANSMISSÃO .....	59
3.2.3.4 ESCAPAMENTO.....	60
3.2.3.5 MCI .....	60
3.2.3.6 MÁQUINA ELÉTRICA.....	60
3.2.3.7 BATERIA .....	61
3.2.3.8 ACESSÓRIOS.....	61
3.2.4 CICLOS DE CONDUÇÃO ( <i>DRIVE CYCLES</i> ) .....	61
3.2.5 SIMULAÇÃO.....	66
3.2.5.1 DESEMPENHO VEICULAR E VALIDAÇÃO .....	66
3.2.6 ESTAÇÕES DE RECARGA.....	68
3.2.7 ANÁLISE ECONÔMICA .....	68
3.3 ESTAÇÕES DE RECARGA .....	68
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
4.1 OBTENÇÃO DOS <i>DRIVE CYCLES</i> .....	70
4.1.1 UNB DARCY RIBEIRO - UNB CEILÂNDIA (FCE) .....	70
4.1.2 UNB DARCY RIBEIRO - UNB PLANALTINA (FUP).....	72
4.1.3 UNB DARCY RIBEIRO - UNB GAMA (FGA) .....	74
4.1.4 VALPARAÍSO-GO - UNB PLANALTINA (FUP) .....	76
4.1.5 ANÁLISE COMPARATIVA.....	78
4.1.5.1 NÚMERO DE PARADAS .....	78
4.1.5.2 VELOCIDADES MÉDIA E MÁXIMA .....	79
4.1.5.3 ACELERAÇÕES E DESACELERAÇÕES .....	79
4.1.5.4 PERFIL DE ELEVAÇÕES .....	80
4.2 VALIDAÇÃO DOS MODELOS SIMULADOS .....	80
4.2.1 VEÍCULO CONVENCIONAL - CHEVROLET ONIX LT 1.4 2019 .....	82
4.2.2 VEÍCULO HEV - TOYOTA YARIS XP21 .....	84
4.2.3 VEÍCULO PHEV - VOLKSWAGEN GOLF GTE 1.4 2019 .....	86
4.2.4 VEÍCULO BEV - CHEVROLET BOLT EV 2020 .....	88
4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO .....	90
4.3.1 UNB DARCY RIBEIRO - UNB CEILÂNDIA (FCE) .....	91
4.3.1.1 ADVISOR® .....	92
4.3.1.2 FASTSIM™ .....	108
4.3.2 UNB DARCY RIBEIRO - UNB PLANALTINA (FUP).....	113

4.3.2.1 ADVISOR® .....	113
4.3.2.2 FASTSIM™ .....	130
4.3.3 UNB DARCY RIBEIRO - UNB GAMA (FGA) .....	133
4.3.3.1 ADVISOR® .....	134
4.3.3.2 FASTSIM™ .....	150
4.3.4 VALPARAÍSO-GO - UNB PLANALTINA (FUP) .....	154
4.3.4.1 ADVISOR® .....	155
4.3.4.2 FASTSIM™ .....	172
4.4 ESTAÇÕES DE RECARGA .....	177
4.4.1 DISTRIBUIÇÃO GERAL .....	177
4.4.2 DISTRIBUIÇÃO NOS PERCURSOS .....	181
4.4.3 ASPECTOS GERAIS DAS ESTAÇÕES .....	184
4.4.4 ANÁLISE DE AUTONOMIA.....	186
4.5 CONCLUSÕES .....	196
<b>5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>199</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>201</b>
<b>A COMPOSIÇÃO DE TRECHOS <i>DRIVE CYCLES</i>.....</b>	<b>207</b>
<b>B ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO - ADVISOR® .....</b>	<b>210</b>
<b>C ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO - FASTSIM™ .....</b>	<b>219</b>

## LISTA DE FIGURAS

---

2.1	Sistema de coordenadas veiculares SAE.....	4
2.2	Diagrama de forças sobre um veículo em pista inclinada.....	5
2.3	<i>Powertrain</i> geral de um automóvel.....	7
2.4	Diagrama força de tração e resistência ao movimento .....	9
2.5	Arquitetura veículo convencional .....	11
2.6	Arquitetura veículo híbrido-série .....	12
2.7	Arquitetura veículo híbrido-paralelo.....	13
2.8	Arquitetura veículo híbrido série-paralelo.....	14
2.9	Arquitetura veículo puramente elétrico .....	15
2.10	Carregamento CC-CV.....	21
2.11	Carregamento MCC .....	21
2.12	Motor à Combustão Interna.....	24
2.13	Ciclos do MCI: (a) Admissão; (b) Compressão; (c) Explosão–Expansão; (d) Escape .....	25
2.14	Máquinas elétricas .....	26
2.15	Curva torque-velocidade ideal.....	27
2.16	Seção transversal dos motores elétricos: (a) Motor CC; (b) Motor de indu- ção; (c) Motor de ímãs permanentes; (d) Motor de relutância variável .....	27
2.17	Topologia estações CA.....	31
2.18	Topologia estações CC.....	32
2.19	Estação de recarga <i>wallbox</i> .....	34
2.20	Estação de recarga <i>totem</i> .....	34
2.21	Conector Tipo 1 .....	37
2.22	Pinagem Tipo 1 .....	37
2.23	Pinagem Tipo 2 .....	38
2.24	Pinagem Tipo 2 .....	38
2.25	Conector Tesla .....	39
2.26	Pinagem conector Tesla.....	40
2.27	Conector Combo Tipo 1 .....	41
2.28	Conector Combo Tipo 2 .....	41
2.29	Pinagem Combo Tipo 1.....	42
2.30	Pinagem Combo Tipo 2.....	43
2.31	Conector CHAdeMO.....	44
2.32	Pinagem CHAdeMO.....	44
2.33	Conector GB/T CC.....	46

2.34	Conector GB/T CC.....	46
3.1	Chevrolet Onix 1.4 LT .....	51
3.2	Toyota Yaris XP21 1.5 Híbrido .....	52
3.3	Volkswagen Golf GTE Híbrido .....	52
3.4	Chevrolet Bolt EV.....	52
3.5	Categorias modelagem FASTSim™ .....	53
3.6	Curva de rendimento MCI FASTSim™ .....	55
3.7	Curva de rendimento Máquina Elétrica FASTSim™ .....	56
3.8	Potência recuperada na Frenagem Regenerativa FASTSim™ .....	58
3.9	Categorias modelagem ADVISOR® .....	59
3.10	Ciclo de condução urbano FTP-75. ....	62
3.11	Histograma ciclo FTP-75.....	62
3.12	Ciclo de condução rodoviário HWFET.....	63
3.13	Histograma ciclo HWFET.....	63
3.14	Ciclo europeu WLTP .....	64
3.15	Ciclo europeu NEDC. ....	64
3.16	Mapa rodoviário de Brasília .....	66
4.1	Trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia. ....	70
4.2	Ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	71
4.3	Altitude do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	71
4.4	Histograma de velocidades UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia. ....	71
4.5	Trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina.....	72
4.6	Ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina.....	73
4.7	Altitude do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina.....	73
4.8	Histograma de velocidades UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina.....	73
4.9	Trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama. ....	74
4.10	Ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama .....	75
4.11	Altitude do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama .....	75
4.12	Histograma de velocidades UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama. ....	75
4.13	Trajeto Valparaíso-GO - UnB Planaltina .....	76
4.14	Ciclo Valparaíso-GO - UnB Planaltina.....	77
4.15	Altitude do trajeto Valparaíso-GO - UnB Planaltina.....	77
4.16	Histograma de velocidades Valparaíso-GO - UnB Planaltina.....	77
4.17	FASTSim™ Chevrolet Onix LT 1.4 .....	82
4.18	ADVISOR® Ciclo Urbano Chevrolet Onix LT 1.4.....	83
4.19	ADVISOR® Ciclo Rodoviário Chevrolet Onix LT 1.4.....	83
4.20	Validação FASTSim™ Toyota Yaris XP21 .....	84
4.21	ADVISOR® Ciclo Urbano Toyota Yaris XP21.....	85

4.22	ADVISOR <sup>®</sup> Ciclo Rodoviário Toyota Yaris XP21 .....	85
4.23	Validação FASTSim <sup>™</sup> Golf GTE 1.4 .....	86
4.24	ADVISOR <sup>®</sup> Ciclo Urbano Golf GTE 1.4 .....	87
4.25	ADVISOR <sup>®</sup> Ciclo Rodoviário Golf GTE 1.4.....	87
4.26	Validação FASTSim <sup>™</sup> Chevrolet Bolt EV .....	88
4.27	ADVISOR <sup>®</sup> Ciclo Urbano Chevrolet Bolt EV .....	89
4.28	ADVISOR <sup>®</sup> Ciclo Rodoviário Chevrolet Bolt EV .....	89
4.29	Ciclo de condução e altitude UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	91
4.30	Torques do trajeto para veículo convencional - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	92
4.31	Curva de torque-velocidade MCI veículo convencional - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> )	93
4.32	Eficiência MCI veículo convencional - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	94
4.33	Torques do trajeto para veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	94
4.34	Curva de torque-velocidade MCI veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	95
4.35	Curva de torque-velocidade máquina elétrica HEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .	95
4.36	Eficiência MCI veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ).....	96
4.37	Eficiência máquina elétrica (motor) veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) ...	96
4.38	Estado de carga do veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	97
4.39	Corrente da bateria do veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	97
4.40	Potência da bateria do veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ).....	98
4.41	Torques do trajeto para veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ).....	98
4.42	Curva de torque-velocidade MCI veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ).....	99
4.43	Curva de torque-velocidade máquina elétrica veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> )	99
4.44	Eficiência MCI veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ).....	100
4.45	Eficiência máquina elétrica (motor) veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .	101
4.46	Estado de carga do veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	101
4.47	Corrente da bateria do veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ).....	102
4.48	Potência da bateria do veículo PHEV - Ceilândia ADVISOR <sup>®</sup> .....	103
4.49	Torques do trajeto para veículo BEV - Ceilândia ADVISOR <sup>®</sup> .....	103
4.50	Curva de torque-velocidade máquina elétrica veículo BEV - Ceilândia ADVISOR <sup>®</sup> .....	104
4.51	Eficiência da máquina elétrica (motor) veículo BEV - Ceilândia ADVISOR <sup>®</sup> .	105
4.52	Estado de carga do veículo BEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	105
4.53	Corrente da bateria do veículo BEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ).....	106
4.54	Potência da bateria do veículo BEV - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ).....	106
4.55	Custo do trajeto por veículo - Ceilândia (ADVISOR <sup>®</sup> ) .....	108
4.56	Perdas totais (kJ) - Ceilândia (FASTSim <sup>™</sup> ) .....	110
4.57	Perdas percentuais (kJ) - Ceilândia (FASTSim <sup>™</sup> ) .....	111
4.58	Custo do percurso por veículo - Ceilândia (FASTSim <sup>™</sup> ) .....	112
4.59	Custo do percurso por veículo - Planaltina .....	113

4.60	Torques do trajeto para veículo convencional - Planaltina (ADVISOR®) .....	114
4.61	Curva de torque-velocidade MCI para veículo convencional - Planaltina (ADVISOR®) .....	114
4.62	Eficiência MCI veículo convencional - Planaltina (ADVISOR®) .....	115
4.63	Torques do trajeto para veículo HEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	115
4.64	Curva torque-velocidade MCI veículo HEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	116
4.65	Curva torque-velocidade máquina elétrica veículo HEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	116
4.66	Eficiência MCI veículo HEV - Planaltina ADVISOR® .....	117
4.67	Eficiência máquina elétrica (motor) veículo HEV - Planaltina ADVISOR® .....	117
4.68	Estado de carga bateria veículo HEV - Planaltina ADVISOR® .....	118
4.69	Corrente da bateria do veículo HEV - Planaltina ADVISOR® .....	118
4.70	Potência da bateria do veículo HEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	119
4.71	Torques do percurso para veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	120
4.72	Curva de torque-velocidade MCI veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	120
4.73	Curva de torque-velocidade máquina elétrica (motor) PHEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	121
4.74	Eficiência MCI veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	122
4.75	Eficiência máquina elétrica veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	122
4.76	Estado de carga bateria do veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	123
4.77	Corrente da bateria do veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	123
4.78	Potência da bateria do veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	124
4.79	Torques do percurso veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	124
4.80	Curva de torque-velocidade máquina elétrica veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	125
4.81	Eficiência máquina elétrica (motor) veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	126
4.82	Estado de carga bateria veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	126
4.83	Corrente bateria veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	127
4.84	Potência da bateria do veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®) .....	128
4.85	Custo total do trajeto - Planaltina ADVISOR® .....	129
4.86	Perdas totais - Planaltina FASTSim™ .....	132
4.87	Perdas percentuais - Planaltina FASTSim™ .....	132
4.88	Custos totais - Planaltina FASTSim™ .....	133
4.89	Ciclo de condução e altitude - Gama .....	134
4.90	Torques do trajeto para veículo convencional - Gama (ADVISOR®) .....	135
4.91	Curva de torque-velocidade MCI veículo convencional - Gama ADVISOR® .....	135
4.92	Eficiência do MCI do veículo convencional - Gama (ADVISOR®) .....	136
4.93	Torques do trajeto para veículo HEV - Gama ADVISOR® .....	136
4.94	Curva de torque-velocidade MCI veículo HEV - Gama ADVISOR® .....	137
4.95	Curva torque-velocidade máquina elétrica veículo HEV - Gama ADVISOR® .....	137
4.96	Eficiência do MCI para veículo HEV - Gama (ADVISOR®) .....	138
4.97	Eficiência da máquina elétrica (motor) veículo HEV - Gama (ADVISOR®) .....	138



4.98 Estado de carga bateria veículo HEV - Gama ADVISOR® .....	139
4.99 Corrente bateria veículo HEV - Gama ADVISOR® .....	139
4.100 Potência bateria veículo HEV - Gama ADVISOR® .....	140
4.101 Torques do trajeto para veículo PHEV - Gama (ADVISOR®) .....	140
4.102 Curva de torque-velocidade MCI do veículo PHEV - Gama (ADVISOR®) .....	141
4.103 Curva de torque-velocidade da máquina elétrica veículo PHEV - Gama (ADVISOR®) .....	141
4.104 Eficiência da máquina elétrica (motor) para veículo PHEV - Gama (ADVISOR®) .....	142
4.105 Eficiência MCI veículo PHEV - Gama (ADVISOR®) .....	143
4.106 Estado de carga da bateria do veículo PHEV - Gama (ADVISOR®) .....	143
4.107 Corrente da bateria do veículo PHEV - Gama (ADVISOR®) .....	144
4.108 Potência da bateria do veículo PHEV - Gama (ADVISOR®) .....	145
4.109 Torques do trajeto para veículo BEV - Gama (ADVISOR®) .....	145
4.110 Curva de torque-velocidade da máquina elétrica veículo BEV - Gama (ADVISOR®) .....	146
4.111 Eficiência da máquina elétrica para veículo BEV - Gama ADVISOR® .....	147
4.112 Estado de carga bateria veículo BEV - Gama (ADVISOR®) .....	147
4.113 Corrente da bateria do veículo BEV - Gama (ADVISOR®) .....	148
4.114 Potência da bateria do veículo BEV - Gama ADVISOR® .....	148
4.115 Custo total do percurso - Gama ADVISOR® .....	150
4.116 Perdas totais - Gama (FASTSim™) .....	152
4.117 Perdas percentuais - Gama FASTSim™ .....	153
4.118 Custos totais - Gama FASTSim™ .....	154
4.119 Ciclo de condução e altitude - Valparaíso-GO .....	155
4.120 Torques do trajeto para veículo convencional - Valparaíso-GO ADVISOR® .....	156
4.121 Curva torque-velocidade MCI veículo convencional - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	156
4.122 Eficiência do MCI para veículo convencional - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	157
4.123 Torques do trajeto para veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	157
4.124 Curva de torque-velocidade MCI do veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	158
4.125 Curva de torque-velocidade máquina elétrica do veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	158
4.126 Eficiência do MCI para veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	159
4.127 Eficiência da máquina elétrica (motor) veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	160
4.128 Estado de carga da bateria veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	160
4.129 Corrente da bateria do veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	161
4.130 Potência da bateria do veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	162
4.131 Torques do trajeto para veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	162
4.132 Curva torque-velocidade MCI veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	163

4.133	Curva torque-velocidade máquina elétrica veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®).....	163
4.134	Eficiência do MCI do veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	164
4.135	Eficiência da máquina elétrica (motor) do veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®).....	165
4.136	Estado de carga da bateria do veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) ..	165
4.137	Corrente da bateria do veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®).....	166
4.138	Potência da bateria para veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	167
4.139	Torques do trajeto para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®).....	167
4.140	Curva de torque-velocidade veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	168
4.141	Eficiência da máquina elétrica (motor) para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®).....	169
4.142	Estado de carga bateria para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®).....	169
4.143	Corrente da bateria para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	170
4.144	Potência da bateria para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®) .....	170
4.145	Gastos totais do percurso - Valparaíso-GO (ADVISOR®).....	172
4.146	Perdas totais - Valparaíso-GO FASTSim™ .....	174
4.147	Perdas percentuais - Valparaíso-GO FASTSim™ .....	175
4.148	Custo total - Valparaíso-GO (FASTSim™) .....	176
4.149	Estações de recarga em Brasília.....	177
4.150	Raio de 6,4 km da Rodoviária do Plano Piloto.....	178
4.151	Estações de recarga em raio de 6,4 km.....	178
4.152	Raio de 12,9 km da Rodoviária do Plano Piloto .....	179
4.153	Estações de recarga em raio de 12,9 km .....	179
4.154	Raio de 20,9 km do centro de Brasília .....	180
4.155	Estações de recarga em raio de 20,9 km do centro de Brasília .....	180
4.156	Estações de recarga para o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	181
4.157	Estações de recarga para o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina .....	182
4.158	Estações de recarga para o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama .....	182
4.159	Estações de recarga para o trajeto Valparaíso-GO - UnB Planaltina .....	183
4.160	Estações em estabelecimentos comerciais.....	184
4.161	Estações em edifícios públicos .....	185
4.162	SOC 90% - 60% UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	187
4.163	SOC 50% - 40% UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	187
4.164	SOC 30% - 20% UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	188
4.165	SOC 90% - 60% UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina .....	189
4.166	SOC 50% - 40% UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina .....	190
4.167	SOC 30% - 20% UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina .....	190
4.168	SOC 90% - 70% UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama .....	191

4.169SOC 60% - 40% UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama .....	192
4.170SOC 30% - 20% UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama .....	192
4.171SOC 90% - 60% Valparaíso-GO - UnB Planaltina .....	193
4.172SOC 50% - 40% Valparaíso-GO - UnB Planaltina .....	194
4.173SOC 30% - 20% Valparaíso-GO - UnB Planaltina .....	194

## LISTA DE TABELAS

---

2.1	Comparativo de baterias tracionária .....	19
2.2	Comparação de máquinas elétricas.....	30
2.3	Padrão de estações de recarga IEC 61851-1 .....	33
2.4	Padrão de estações de recarga SAE J1772 .....	33
2.5	Funções pinagem Tipo 1 .....	37
2.6	Funções pinagem Tipo 2.....	39
2.7	Funções pinagem Tesla CA .....	40
2.8	Funções pinagem CCS Tipo 1.....	42
2.9	Funções pinagem CCS Tipo 2.....	43
2.10	Funções pinagem CHAdeMO .....	45
2.11	Funções pinagem GB/T CC.....	47
4.1	Datas e horários da obtenção dos percursos.....	70
4.2	Estatísticas do ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	72
4.3	Estatística ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina .....	74
4.4	Estatísticas ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama .....	76
4.5	Estatística ciclo Valparaíso-GO - UnB Planaltina .....	78
4.6	Características construtivas dos veículos .....	81
4.7	Resultados da validação para o veículo convencional .....	84
4.8	Resultados da validação para o veículo HEV.....	86
4.9	Resultados da validação para veículo PHEV .....	88
4.10	Resultados validação veículo BEV.....	90
4.11	Pontos de referência de altitude UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia .....	92
4.12	Operação geral dos sistemas de propulsão - Ceilândia (ADVISOR®).....	107
4.13	Operação geral das baterias - Ceilândia (ADVISOR®) .....	107
4.14	Custo total de combustível e energia - Ceilândia (ADVISOR®).....	107
4.15	Operação geral sistemas de propulsão - Ceilândia (FASTSim™).....	108
4.16	Relações de consumo de energia e gasolina - Ceilândia (FASTSim™).....	109
4.17	Operação geral da bateria - Ceilândia (FASTSim™).....	109
4.18	Perdas por condições dinâmicas e componentes - Ceilândia (FASTSim™).....	110
4.19	Consumo total de combustível e energia - Ceilândia (FASTSim™).....	111
4.20	Pontos de referência altitude - Planaltina .....	113
4.21	Operação geral dos sistemas de propulsão - Planaltina (ADVISOR®) .....	128
4.22	Operação geral das baterias - Planaltina (ADVISOR®).....	129
4.23	Custo total de combustível e energia - Planaltina ADVISOR® .....	129
4.24	Operação geral dos sistemas de propulsão - Planaltina FASTSim™ .....	130

4.25	Relações de consumo de energia e gasolina - Planaltina FASTSim™	130
4.26	Operação geral da bateria - Planaltina FASTSim™	131
4.27	Perdas por condições dinâmicas e componentes - Planaltina FASTSim™	131
4.28	Consumo total de combustível e energia - Planaltina FASTSim™	133
4.29	Pontos de referência altitude - Gama	134
4.30	Operação geral dos sistemas de propulsão - Gama (ADVISOR®)	149
4.31	Operação geral das baterias - Gama (ADVISOR®)	149
4.32	Custo total de combustível e energia - Gama (ADVISOR®)	149
4.33	Operação geral sistemas de propulsão - Gama FASTSim™	150
4.34	Relações de consumo de energia e gasolina - Gama (FASTSim™)	151
4.35	Operação geral da bateria - Gama (FASTSim™)	151
4.36	Perdas por condições dinâmicas e componentes - Gama (FASTSim™)	152
4.37	Custo do trajeto por veículo - Gama (FASTSim™)	154
4.38	Pontos de referência altitude - Valparaíso-GO	155
4.39	Operação geral dos sistemas de propulsão - Valparaíso-GO (ADVISOR®)	171
4.40	Operação geral das baterias - Valparaíso-GO (ADVISOR®)	171
4.41	Consumo de combustível e energia elétrica - Valparaíso-GO ADVISOR®	171
4.42	Operação geral dos sistemas de propulsão - Valparaíso-GO (FASTSim™)	172
4.43	Relações de consumo de energia e gasolina - Valparaíso-GO (FASTSim™)	173
4.44	Operação geral das baterias - Valparaíso-GO (FASTSim™)	173
4.45	Perdas por condições dinâmicas e componentes - Valparaíso-GO (FASTSim™)	174
4.46	Custo do trajeto por veículo - Valparaíso-GO FASTSim™	175
4.47	Quantidade de estações e porcentagem	180
4.48	Número de estações e médias nos percursos	183
4.49	Estações em estabelecimentos comerciais	184
4.50	Estações em estabelecimentos públicos	185
4.51	Conectores disponíveis nas estações de recarga	185
4.52	Fabricantes de estações de recarga em estabelecimentos comerciais	186
4.53	Operação geral da bateria UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia	189
4.54	Operação geral da bateria UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina	191
4.55	Operação geral da bateria UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama	193
4.56	Operação geral da bateria Valparaíso-GO - UnB Planaltina	195
A.1	Coordenadas geográficas UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia	207
A.2	Composição de trechos UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia	207
A.3	Coordenadas geográficas UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina	207
A.4	Composição de trechos UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina	208
A.5	Coordenadas geográficas UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama	208
A.6	Composição de trechos UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama	208

A.7	Coordenadas geográficas Valparaíso - UnB Planaltina.....	208
A.8	Composição de trechos Valparaíso - UnB Planaltina .....	209
C.1	Parâmetros Construtivos ( <i>Vehicle</i> ).....	219
C.2	Parâmetros Tanque de Combustível ( <i>Fuel Storage</i> ).....	219
C.3	Parâmetros MCI ( <i>Fuel Converter</i> ) .....	219
C.4	Parâmetros Máquina Elétrica ( <i>Motor</i> ).....	220
C.5	Parâmetros Bateria ( <i>Traction Battery</i> ).....	220
C.6	Parâmetros Pneus ( <i>Wheel</i> ).....	220
C.7	Parâmetro Gerenciamento de Energia ( <i>Energy Management</i> ).....	221
C.8	Outros parâmetros ( <i>Miscellaneous</i> ).....	221

## LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIACÕES

---

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas. 61
<b>ADVISOR®</b>	<i>Advanced Vehicle Simulator</i> . 49
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica. 47
<b>ANP</b>	Agência Nacional do Petróleo. 68
<b>BEV</b>	<i>Battery Electric Vehicle</i> . 14
<b>BMS</b>	<i>Battery Management System</i> . 35
<b>CA</b>	Corrente Alternada. 25
<b>CAN</b>	<i>Controller Area Network</i> . 44
<b>CC</b>	Corrente Contínua. 25
<b>CHAdEMO</b>	<i>Charge de Move</i> . 40
<b>DER-DF</b>	Departamento de Estradas e Rodagem. 65
<b>DOD</b>	<i>Depth of Discharge</i> . 18
<b>EPA</b>	<i>Environmental Protection Agency</i> . 51
<b>FASTSim™</b>	<i>Future Automotive Systems Technology Simulator</i> . 49
<b>FTP</b>	<i>Federal Test Procedure</i> . 61
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i> . 50
<b>HEV</b>	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> . 12
<b>HWFET</b>	<i>Highway Fuel Economy Test</i> . 61
<b>IEC</b>	<i>International Electrotechnical Commission</i> . 32
<b>INMETRO</b>	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. 66
<b>MCI</b>	Motor de Combustão Interna. 11
<b>NEDC</b>	<i>New European Drive Cycle</i> . 64
<b>NREL</b>	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> . 49
<b>PHEV</b>	<i>Plug-In Hybrid Electric Vehicle</i> . 12
<b>PLC</b>	<i>Power Line Communication</i> . 47

<b>PM BLDC</b>	<i>Permanent Magnet Brushless DC Motor.</i> 29
<b>PMSM</b>	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor.</i> 29
<b>PWM</b>	<i>Pulse Width Modulation.</i> 47
<b>SLP</b>	Sistema de Levantamento de Preços. 68
<b>SOC</b>	<i>State of Charge.</i> 16
<b>SOH</b>	<i>State of Health.</i> 17
<b>UnB</b>	Universidade de Brasília. 65
<b>WLTP</b>	<i>Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure.</i> 63



# 1 INTRODUÇÃO

---

Em se tratando da busca por soluções sustentáveis e com menor impacto ambiental, a mobilidade urbana e rodoviária passa por uma mudança de paradigmas. Discutido em escala global, esse cenário abre espaço para tecnologias de transporte envolvendo a utilização de veículos de propulsão elétrica, parcial ou total. Dada a amplitude que o tema mobilidade possui, questões para as quais ainda não há um consenso tornam-se mais frequentes e instigam maior aprofundamento. Assim, compreender o ecossistema da mobilidade elétrica é crucial para garantir sua viabilidade de implementação e estabelecimento efetivo.

Apesar de ainda inexpressiva no Brasil, com cerca de 0,025% da frota em 2018 (SINDI-PEÇAS, 2019), as projeções apontam para uma representatividade de 5% até 2030 (ÉPOCA NEGÓCIOS, 2019). Entretanto, já é possível identificar suas partes interessadas (*stakeholders*) e os novos desafios que enfrentarão com o advento dessas tecnologias. No caso de Brasília, a discussão ganha contornos ainda mais relevantes, uma vez que essa busca a condição de cidade inteligente com o certificado ISO 37120 (AGÊNCIA BRASÍLIA, 2019), sendo a mobilidade urbana sustentável um dos seus pilares. Dessa forma, espera-se um maior número de políticas de iniciativas públicas voltadas ao estabelecimento da mobilidade elétrica.

Indo de uma perspectiva micro para macro, a primeira parte interessada é o grupo de consumidores dos veículos. Sejam proprietários ou usuários indiretos, sua opção por essa alternativa envolve desde consciência sustentável até a economia gerada a longo prazo em relação aos veículos tradicionais (BCG, 2019). Dentre as dificuldades enfrentadas por esse grupo, estão os altos custos da tecnologia, a preocupação de descarregamento da bateria aliada à falta de estações de recarga (*range anxiety*) e o tempo dispendido na recarga do veículo (GRAHN, 2014).

Outra parte interessada de importância crucial são as empresas do setor automobilístico. Essas terão como desafio adaptar suas já consolidadas operações para atendimento da demanda crescente pela eletrização da frota e definir estratégias de transição tecnológica de acordo com o contexto nas quais estão inseridas (BCG, 2019). Incentivos tributários diretos e indiretos também desempenham um fator de relevância para a consolidação do mercado de veículos elétricos.

Em termos operacionais, tem-se que o meio automotivo apresenta condições distintas das encontradas em aplicações comerciais e industriais (CHENG ET AL, 2015). Sendo esse um ambiente caracterizado pela alta imprevisibilidade, vibrações e impactos (CHENG ET AL, 2015; SHAFIEI, 2014), o entendimento da atuação de máquinas elétricas, conversores de

potência e baterias nesse meio permite o desenvolvimento de novas soluções, gerando assim expansão tecnológica da área.

Com a perspectiva de crescimento da frota de veículos elétrico, questões como os impactos causados nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia tornam-se cruciais para os órgãos reguladores do setor. Há estimativas de que a eletrificação total da frota dos veículos de passeio de um país representará uma demanda adicional de energia na ordem de TWh (GRAHN, 2014). Nesse cenário, torna-se fundamental a utilização de fontes renováveis de energia no tocante ao aumento da capacidade de geração para atendimento da demanda energética crescente.

O presente trabalho tem como objetivo comparar o desempenho de veículos convencionais, híbridos e elétricos, além de analisar, de forma quali-quantitativa, as estações de recarga instaladas em Brasília. Busca-se avaliar, em diferentes perspectivas, as condições gerais da cidade em termos de mobilidade elétrica, indo desde a operação detalhada dos componentes veiculares até a distribuição e tipos de estações de recargas disponíveis para os usuários.

Inicialmente, são definidos os trajetos de referência na cidade, escolhidos de modo a refletir a distância média diária percorrida pelos condutores e incluir as principais vias da cidade. Em seguida, são utilizados dois simuladores veiculares para modelagem dos veículos analisados. Com diferentes níveis de detalhamento, ambos serão utilizados na análise da operação dos sistemas de propulsão e baterias, verificando-se também as perdas ocorridas nos percursos. Assim, utilizando valores de combustível e energia praticados em Brasília no mês de setembro de 2021, serão estimados os custos de cada veículo por trajeto.

Em se tratando das estações de recarga, serão avaliados aspectos como a distribuição dessas pela cidade, tipos de carregadores disponíveis e os estabelecimentos que possuem pontos de recarga. Dessa forma, busca-se obter um panorama geral das estações em Brasília. Por fim, o veículo totalmente elétrico é analisado em diferentes níveis iniciais de carga da bateria, de modo a observar sua autonomia nos trajetos de referência.

O trabalho está dividido da seguinte forma:

- Capítulo 2: Revisão bibliográfica, que aborda trabalhos e conceitos relativos aos componentes dos veículos convencionais, híbridos e elétricos, como também as estações de recarga;
- Capítulo 3: Materiais e Métodos, em que são descritos, de forma detalhada, as ferramentas e procedimentos utilizados para a realização das simulações de desempenho dos veículos, análise econômica e levantamento das estações de recarga em Brasília;
- Capítulo 4: Resultados e Discussões, em que são discutidos os resultados das simulações realizadas e a análise econômica decorrente dessas, verificação do atual panorama

das estações de recarga em Brasília e análise de autonomia do veículo puramente elétrico nos trajetos de referência.

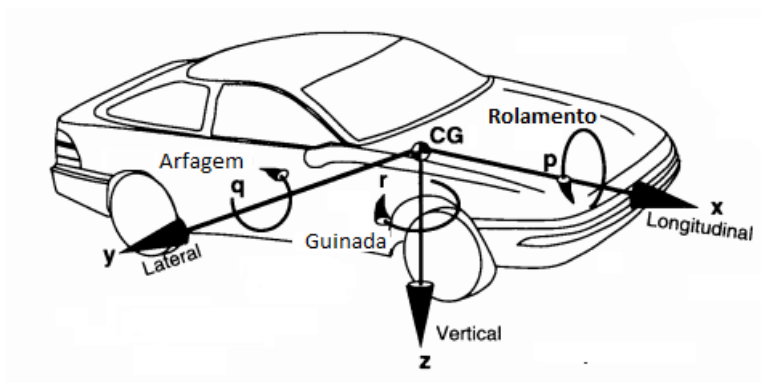
- Capítulo 5: Conclusão e Trabalhos Futuros, em que tiram-se conclusões a respeito dos resultados obtidos, como também são levantados tópicos para trabalhos futuros;
- Capítulo 6: Referências Bibliográficas, em que são mostradas as fontes utilizadas para a realização deste trabalho.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1 DINÂMICA VEICULAR

Para análise da dinâmica veicular, é necessário primeiramente definir um sistema de coordenadas de referência, sob o qual os movimentos do veículo e as forças nele atuantes serão referenciadas (EHSANI ET AL, 2018). Para essa finalidade, a *SAE International* conveniona a utilização de um sistema ortogonal em três dimensões, com origem no centro de gravidade (CG) do veículo e lateralmente orientado para a direita (*right-hand orientation*):

Figura 2.1 – Sistema de coordenadas veiculares SAE.



Fonte: Gillespie, 1992 - Traduzido.

Em que:

- x: eixo horizontal orientado para a frente do veículo;
- y: eixo lateral orientado para a direita do veículo;
- z: eixo vertical orientado para baixo do veículo;
- p: velocidade angular sobre o eixo x (rolamento ou *roll*);
- q: velocidade angular sobre o eixo y (arfagem ou *pitch*);
- r: velocidade angular sobre o eixo z (guinada ou *yaw*);

Em se tratando do estudo do desempenho de veículos convencionais, híbridos e elétricos, todos de dois eixos, a análise da dinâmica veicular pode ser restringida ao movimento em uma única direção, adotando-se o eixo horizontal como referência (EHSANI, 2018).

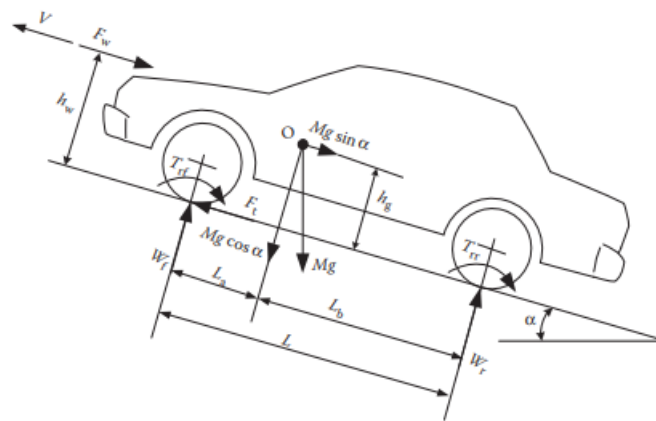
O comportamento dinâmico na direção longitudinal é definido pelas forças atuantes nessa direção. Para que um veículo entre e permaneça em movimento, é necessário que o somatório das forças de tração supere as forças de resistência (SILVA, 2017). Nessa direção, as forças de resistência são dadas pelo arraste aerodinâmico, resistência ao rolamento e inclinação da pista, enquanto o esforço de tração é produzido pelo motor e transferido pelo sistema de transmissão até as rodas do veículo (EHSANI, 2018).

Pela segunda Lei de Newton, a aceleração veicular é dada por:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad [\text{m s}^{-2}] \quad (2.1)$$

Sendo  $v$  a velocidade do veículo (m/s),  $\sum F_t$  o esforço total de tração (N),  $\sum F_r$  a resistência total ao movimento (N),  $M$  a massa total do veículo a ser acelerada (kg) e  $\delta$  o fator adimensional de massa que converte as inércias rotacionais dos componentes girantes em massa translacional (EHSANI, 2018).

Figura 2.2 – Diagrama de forças sobre um veículo em pista inclinada.



Fonte: Ehsani et al, 2018.

## 2.1.1 FORÇAS RESISTIVAS

### 2.1.1.1 FORÇA DE ARRASTE AERODINÂMICO

Força causada pela resistência encontrada pelo veículo ao se deslocar por um volume de massa de ar. Sua intensidade depende de fatores construtivos do veículo (área frontal, aerofólios, espelhos retrovisores e dutos de ar), características do ar (densidade e velocidade do vento), e velocidade de deslocamento do automóvel (SILVA, 2017). É definida pela expressão:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot (v - v_w) \quad [\text{N}] \quad (2.2)$$

Em que,  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  é a área frontal do veículo ( $\text{m}^2$ ),  $C_d$  é o coeficiente de arraste aerodinâmico do automóvel (adimensional),  $v$  é a velocidade do veículo ( $\text{m/s}$ ) e  $v_w$  é a velocidade do vento ( $\text{m/s}$ ).

### 2.1.1.2 FORÇA DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

Força causada pelo atrito entre os pneus e o solo, sendo influenciada também pelos atritos dos rolamentos e engrenagens mecânicas (SILVA, 2017). Ao serem tracionados, os pneus sofrem uma deformação causada pela distribuição assimétrica da pressão interna durante seu deslocamento (EHSANI, 2018). Sendo aplicada ao centro da roda do veículo, a intensidade dessa força é expressa por:

$$F_{rr} = M \cdot g \cdot f_r \quad [\text{N}] \quad (2.3)$$

Sendo  $M$  a massa total do veículo ( $\text{kg}$ ),  $g$  a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ) e  $f_r$  o coeficiente de resistência ao rolamento (adimensional). Esse fator é dado em função dos pneus do veículo (material, estrutura geométrica, temperatura e pressão) e do pavimento (tipo de solo, irregularidades e presença ou não de líquidos) (EHSANI, 2018).

### 2.1.1.3 INCLINAÇÃO DA PISTA

Força atuante no veículo devido à componente do seu peso paralela à superfície de deslocamento, estando presente em pistas com inclinação positiva ou negativa. Para análise de desempenho do veículo, entretanto, é avaliada somente sua capacidade de se deslocar em uma pista com determinada inclinação (SILVA, 2017). Sua intensidade é dada conforme a expressão:

$$F_g = M \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [\text{N}] \quad (2.4)$$

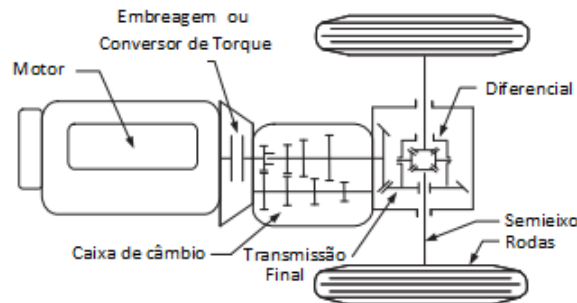
Em que,  $M$  é a massa do veículo ( $\text{kg}$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ) e  $\alpha$  é a inclinação, em graus, da pista em que o veículo trafega.

## 2.1.2 FORÇA DE TRAÇÃO

O esforço de tração, gerado pelo motor, é transferido até as rodas do veículo pelo sistema de transmissão (*drivetrain*), que é composto pela embreagem (transmissão manual) ou

conversor de torque (transmissão automática), caixa de câmbio, diferencial (localizado na transmissão final) e semieixos. De forma simplificada, o *powertrain* (conjunto do sistema de propulsão e transmissão) de um veículo pode ser ilustrado como mostra a Figura 2.3:

Figura 2.3 – *Powertrain* geral de um automóvel



Fonte: Ehsani et al, 2018 - Traduzido.

Os componentes de transmissão serão abordados no tópico referente às arquiteturas veiculares. A força de tração nas rodas pode ser expressa por:

$$F_t = \frac{T_w}{r_d} \quad [\text{N}] \quad (2.5)$$

Sendo  $T_w$  o torque atuante nas rodas (N.m) e  $r_d$  o raio dos pneus (m). O torque  $T_w$ , por sua vez, é dado pela expressão:

$$T_w = i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p \quad [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (2.6)$$

Em que,  $i_g$  indica a relação de marchas na caixa de câmbio,  $i_0$  é a relação de marcha na transmissão final,  $\eta_t$  a eficiência geral do sistema de transmissão e  $T_p$  o torque de saída do sistema de propulsão (N.m). As perdas mecânicas no sistema de transmissão se devem, principalmente, ao atrito entre os dentes de engrenagens e também entre mancais e eixos (EHSANI ET AL, 2018).

Substituindo a expressão 2.6 em 2.5, tem-se:

$$F_t = \frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} \quad [\text{N}] \quad (2.7)$$

### 2.1.3 FATOR DE INÉRCIA ROTACIONAL

Considerando o aumento equivalente da massa do veículo devido ao momento angular dos seus componentes girantes, adota-se um fator de correção de massa  $\delta$ , adimensional,

(EHSANI et al, 2018), expresso por:

$$\delta = 1 + \frac{I_w}{M.r_d^2} + \frac{i_0^2.i_g^2.I_p}{M.r^2} \quad (2.8)$$

Em que,  $I_w$  e  $I_p$  são os momentos de inércia (kg.m<sup>2</sup>) da roda e dos componentes girantes associados ao motor, respectivamente. Uma vez que esses valores por vezes não são conhecidos, seria necessário determiná-los para cada elemento girante do motor e do sistema de transmissão. Dessa forma, adota-se a seguinte simplificação para sua estimativa:

$$\delta = 1,04 + 0,0025i_0^2.i_g^2 \quad (2.9)$$

## 2.1.4 PARÂMETROS DE DESEMPENHO VEICULAR

### 2.1.4.1 VELOCIDADE MÁXIMA

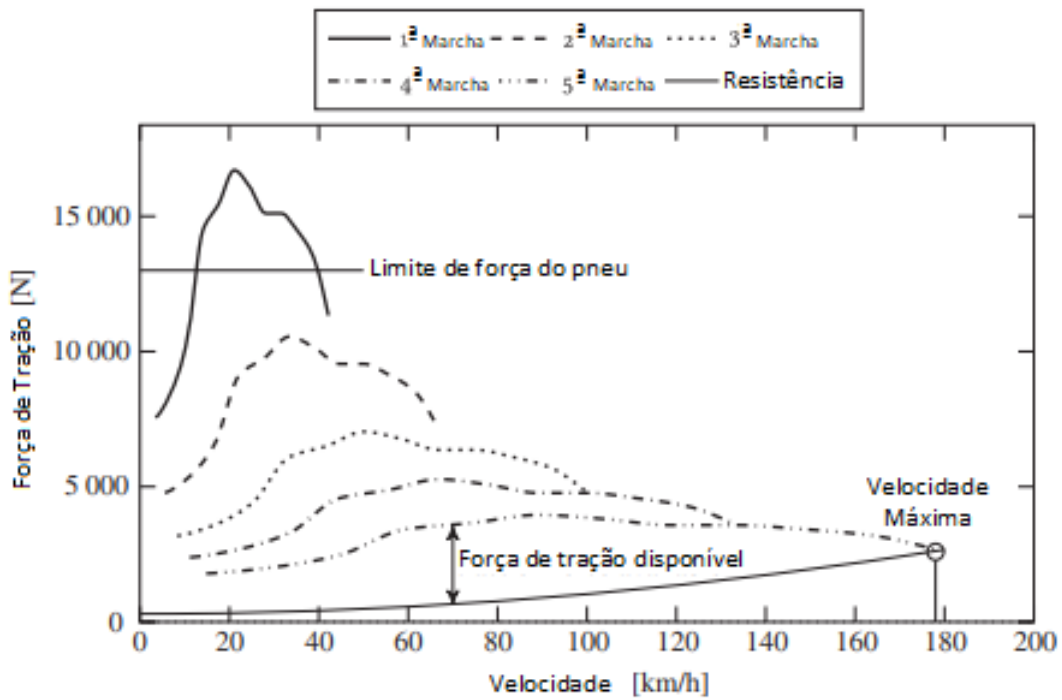
Indicador definido pela máxima velocidade constante que um veículo consegue alcançar em uma pista plana (SILVA, 2017). A velocidade máxima depende do motor do veículo, considerando-se sua operação em máxima potência, como também das forças de oposição ao movimento (EHSANI, 2018). Dinamicamente, ocorre quando as forças de resistência estão em equilíbrio com a força de tração do veículo. Assim, desprezando-se a inclinação da pista, tem-se:

$$F_t = F_w + F_{rr} \quad [\text{N}] \quad (2.10)$$

Ressalta-se que, a força de tração depende da relação de marcha e da relação de diferencial. Dessa forma, para um veículo com transmissão em múltiplas marchas com motor de combustão interna, um diagrama de força de tração em função da velocidade pode ser ilustrado na Figura 2.4:



Figura 2.4 – Diagrama força de tração e resistência ao movimento



Fonte: Minaker, 2020 - Traduzido.

Para motores de alta potência, não ocorre a intercessão das curvas de tração e resistência ao movimento (EHSANI, 2018), de modo que a velocidade máxima é limite pela velocidade do sistema de propulsão do veículo, dada por:

$$v_{max} = \frac{\pi \cdot n_{pmax} \cdot r_d}{30 \cdot i_0 \cdot i_{gmin}} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (2.11)$$

Em que,  $n_{pmax}$  é a rotação máxima de operação do motor e  $i_{gmin}$  é a menor relação de marcha do sistema de transmissão.

#### 2.1.4.2 ACELERAÇÃO

Avaliado em pista plana, é o parâmetro definido pelo tempo de aceleração do veículo até determinada velocidade, tipicamente de zero a 100 km/h. Desprezando a resistência devido às inclinações da pista, a equação 2.1 é expressa por:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F_t - F_w - F_{rr}}{\delta \cdot M} \quad [\text{m s}^{-2}] \quad (2.12)$$

Integrando em relação à velocidade, o tempo de aceleração entre as velocidades  $v_1$  e  $v_2$  é dado por:

$$t_a = \int_{v_1}^{v_2} \frac{\delta.M}{F_t - F_w - F_{rr}} dv \quad [\text{s}] \quad (2.13)$$

A distância percorrida pode ser escrita por:

$$S_a = \int_{v_1}^{v_2} \frac{\delta.M.v}{F_t - F_w - F_{rr}} dv \quad [\text{m}] \quad (2.14)$$

### 2.1.4.3 CAPACIDADE DE SUBIDA

Indicador da inclinação máxima da pista na qual o veículo consegue manter uma dada velocidade constante de subida. É limitada pela capacidade de tração fornecida pelo motor e pela aderência do pneu à pista (MINAKER, 2020). Para baixas inclinações, considera-se que:

$$\sin \alpha \approx \alpha \quad (2.15)$$

No equilíbrio, tem-se:

$$F_t = F_w + F_g + F_{rr} \quad [\text{N}] \quad (2.16)$$

Assim, a capacidade de subida é dada por:

$$\alpha = \frac{F_w + F_g + F_{rr}}{M.g} = d - f_r \quad (2.17)$$

Em que,  $d$  é o fator de desempenho:

$$d = \frac{F_t + F_w}{M.g} \quad (2.18)$$

Para pistas de maior inclinação, a capacidade de subida é expressa por:

$$\sin \alpha = \frac{d - f_r \sqrt{1 - d^2 + f_r^2}}{1 + f_r^2} \quad (2.19)$$

## 2.2 ARQUITETURA VEICULAR

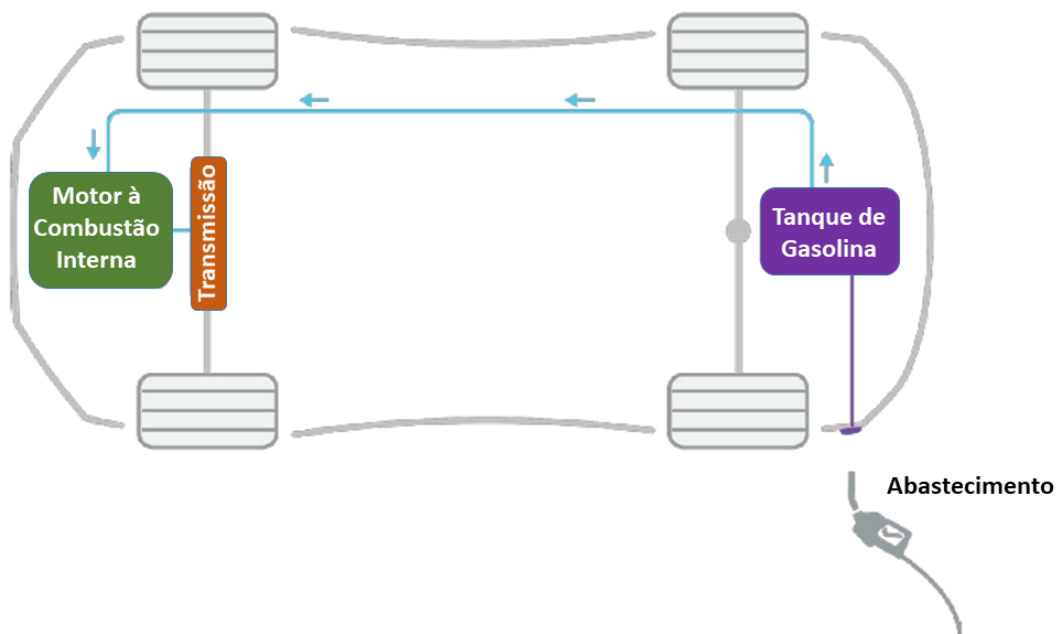
Os sistemas de tração e transmissão dos veículos são responsáveis pela geração e transferência de torque e potência do motor até suas rodas. O sistema de tração é composto por

uma fonte de potência, que pode ser um Motor de Combustão Interna (MCI), nos veículos convencionais, máquina elétrica para os veículos puramente elétricos ou mesmo uma combinação de ambos, no caso dos veículos híbridos (SILVA, 2017). A embreagem é responsável pela conexão dos motores à caixa de câmbio, que realiza o ajuste da relação de rotações do motor e rodas do veículo, sendo de uma ou múltiplas velocidades (EHSANI ET AL, 2018). Por fim, a caixa de câmbio é conectada ao diferencial, que distribui torque e potência do motor para as rodas do veículo.

## 2.2.1 VEÍCULO CONVENCIONAL

Veículo tomado como referência para comparação com as demais arquiteturas, é aquele cujo sistema de propulsão é exclusivamente o motor de combustão interna. Representa a maior parte da frota de veículos de passeio, com tecnologia estabelecida a mais de um século (EHSANI ET AL, 2018). Sua arquitetura pode ser dada como mostra a Figura 2.5:

Figura 2.5 – Arquitetura veículo convencional



Fonte: Autoria Própria, 2021.

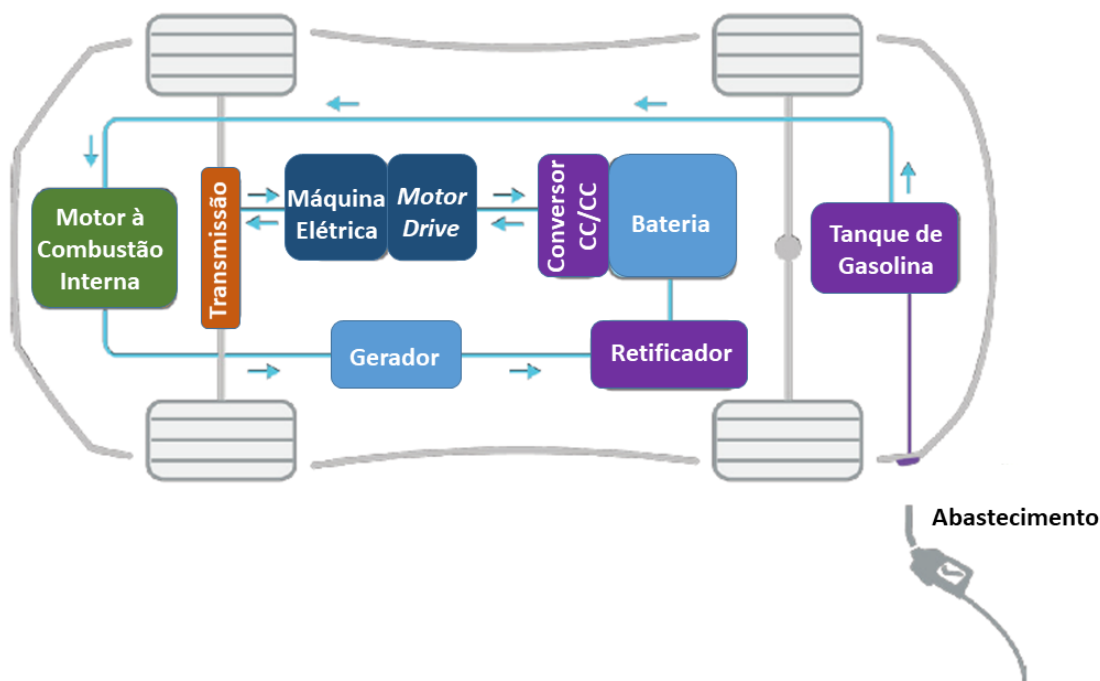
Dentre suas vantagens, encontram-se a extensa autonomia devido à utilização de combustíveis de alta densidade energética (gasolina, etanol ou diesel) e rápido abastecimento, ocorrido em alguns minutos. Entretanto, é responsável pela emissão de grande volume de gases poluentes, além da baixa eficiência do MCI, que opera entre 20-30% a depender das condições de tráfego enfrentadas (SILVA,2017).

## 2.2.2 VEÍCULO HÍBRIDO - HEV e PHEV

Veículos que apresentam diversidade de propulsão, possuindo tanto o MCI quanto a máquina elétrica. Sua classificação depende da forma de recarga das baterias: se apenas os fluxos internos de potência (MCI ou frenagem regenerativa) carregam as baterias, o veículo é chamado de *Hybrid Electric Vehicle* (HEV), mas se for possível recarregá-lo mediante fonte externa, é classificado em *Plug-In Hybrid Electric Vehicle* (PHEV).

Sua arquitetura possui diferentes arranjos, definidos de acordo com a forma de interação dos sistemas de propulsão para tração do veículo (EHSANI ET AL, 2018). Dentre essas, a híbrida série, ilustrada na Figura 2.6, em que o MCI possui finalidade exclusiva de atuar como fonte primária de energia para alimentar o motor elétrico, único responsável pela propulsão. Assim, o MCI trabalha no seu ponto de máxima eficiência (SILVA, 2017).

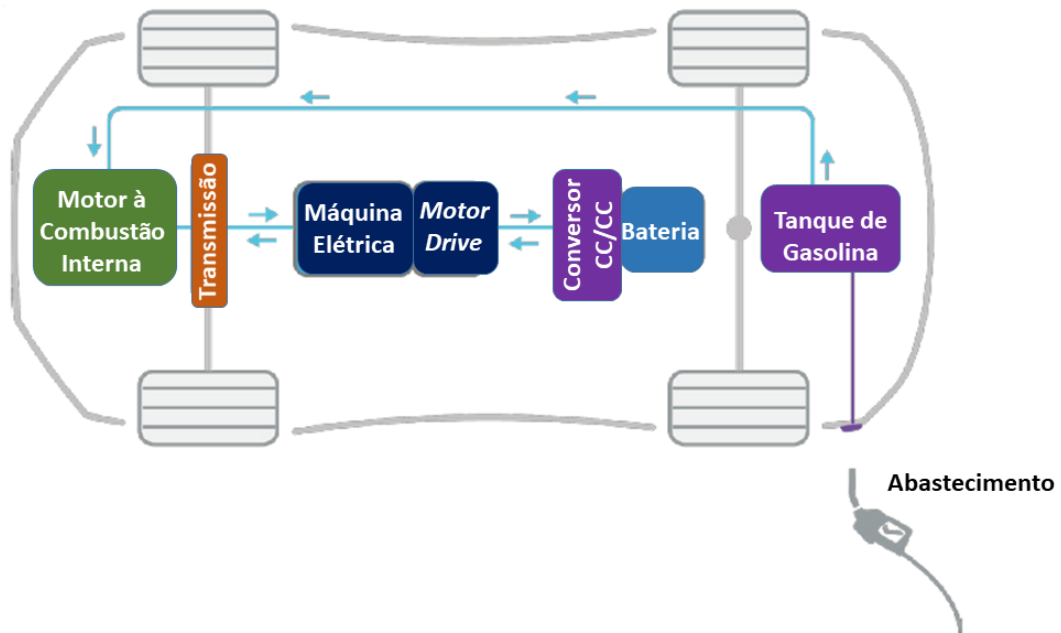
Figura 2.6 – Arquitetura veículo híbrido-série



Fonte: Bauer et al, 2018 - Traduzido.

Já na configuração híbrida paralela, mostrada na Figura 2.7, o MCI e motor elétrico estão acoplados ao mesmo sistema de transmissão, contribuindo de forma conjunta ou individual para a propulsão (EHSANI ET AL, 2018). A conexão ocorre mediante um acoplador de torque, isolados da transmissão, sendo denominado Paralelo-SA (*Parallel Starter/Alternator*), ou cada sistema de propulsão pode tracionar eixos diferente, sendo classificada como paralela de eixos separados (ES) ou também *Through-The-Road (TTR) Parallel* (SILVA,2017).

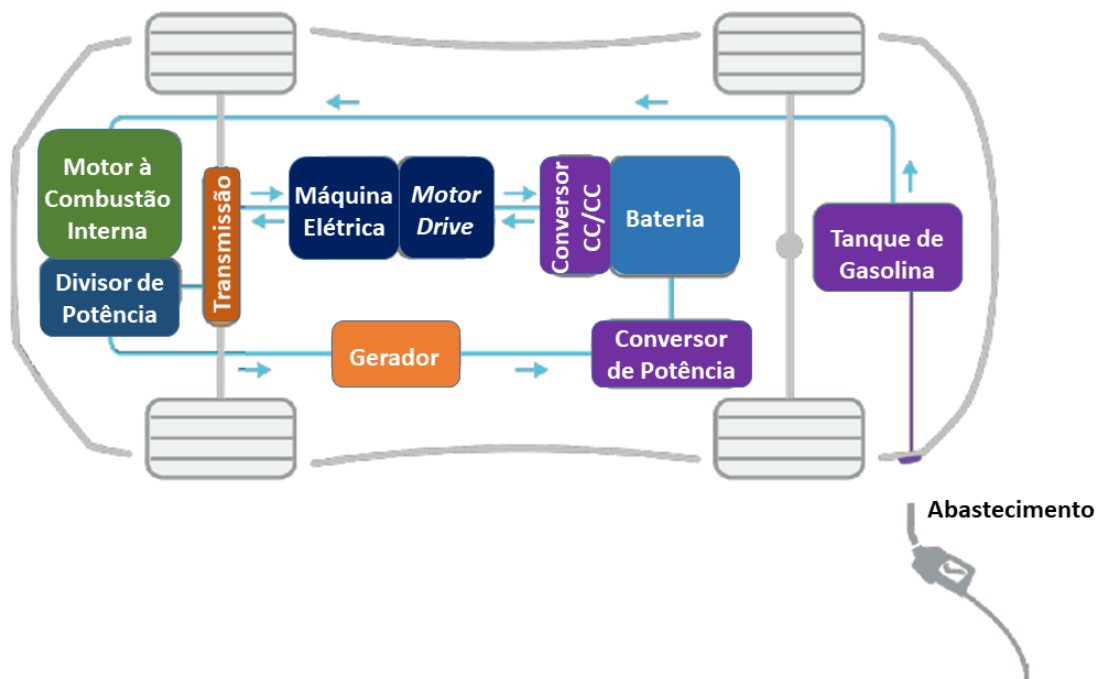
Figura 2.7 – Arquitetura veículo híbrido-paralelo



Fonte: Bauer et al, 2018 - Traduzido.

Na configuração série-paralela, também conhecida como combinada, um gerador acoplado mecanicamente ao MCI é adicionado à arquitetura paralela. Esse gerador atua na transferência do fluxo de potência do MCI para o sistema de baterias, permitindo maior flexibilidade para operação em modo de condução híbrido. É a topologia mais utilizada pelos veículos híbridos do mercado (SILVA, 2017).

Figura 2.8 – Arquitetura veículo híbrido série-paralelo



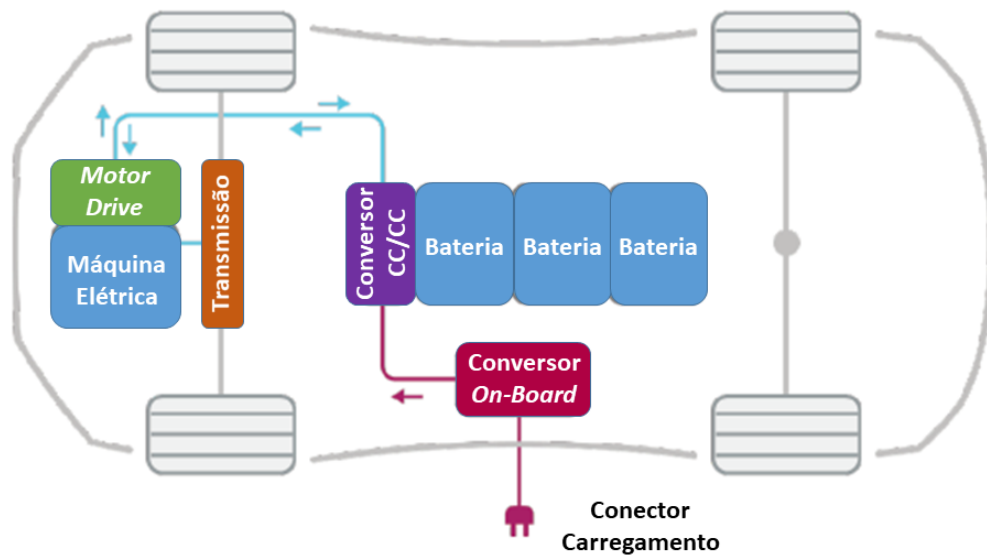
Fonte: Bauer et al, 2018 - Traduzido.

Em relação aos veículos convencionais, apresentam vantagens em se tratando de eficiência energética, já que é possível estabelecer estratégias de operação que permitem o MCI atuar na sua região mais eficaz, além da recuperação de energia por frenagem regenerativa. Porém, como também utilizam combustíveis fósseis para propulsão, são emissores de gases poluentes (SILVA, 2017).

### 2.2.3 VEÍCULO ELÉTRICO - BEV

Também chamados de *Battery Electric Vehicle* (BEV), são os veículos com propulsão exclusivamente elétrica, compostos por bateria, máquina elétrica e conversores. Para esses últimos, destacam-se os conversores *on-board* (retificador), CC/CC e o *motor drive* (atua como inversor no fluxo direto de potência e retificador no fluxo reverso). Seu carregamento é realizado pela conexão com estação de recarga, havendo também recuperação de energia por frenagem regenerativa. Sua arquitetura é mostrada na Figura 2.9

Figura 2.9 – Arquitetura veículo puramente elétrico



Fonte: Bauer et al, 2018 - Traduzido.

Em comparação com os veículos convencionais e híbridos, suas vantagens são a maior eficiência de operação e a ausência de emissão de gases poluentes. Por outro lado, a autonomia ainda menor que a do convencional, o tempo envolvido na recarga e os impactos ambientais relativos à produção e descarte de metais pesados para fabricação das baterias são as principais desvantagens desse tipo de automóvel (EHSANI ET AL, 2018).

## 2.3 BATERIAS

Sistemas de armazenamento de energia mais utilizados em veículos híbridos e elétricos, as baterias são dispositivos formados por um conjunto de células eletroquímicas, conectadas em série ou paralelo, capazes de converter energia química em energia elétrica (SHAFIEI,2014).

São classificadas em primárias, quando podem ser usadas apenas uma vez, ou secundárias, quando o processo de recarga é permitido. Além da aplicação veicular, também são utilizadas em dispositivos portáteis, como *smartphones* e *notebooks*, além de sistemas de armazenamento de energia conectados às redes elétricas (PLETT,2015).

### 2.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

- CAPACIDADE DE CARGA NOMINAL

É a quantidade de carga elétrica fornecida pela bateria desde seu estado completamente carregado até totalmente descarregado. É dada pela corrente elétrica necessária para descarregar completamente a bateria no período de uma hora, sendo sua unidade mais usual o ampère-hora (Ah). Esse parâmetro é fortemente afetado pelas condições de operação da bateria, como temperatura, cargas conectadas e taxas de cargas e descargas, sendo crucial para determinar o fim da sua vida útil (PLETT, 2015).

- TAXA DE CARGA E DESCARGA (*C-RATE*)

É uma medida relativa para medir a corrente elétrica de carga e descarga da bateria. É dada pela razão entre a corrente e sua capacidade de carga nominal. Assim, uma bateria com capacidade de 10 Ah deve fornecer:

- 10 A (1C) por 1 hora;
- 20 A (2C) por 30 minutos (0,5 hora);
- 1 A (0,5C) em 10 horas.

- ESTADO DE CARGA

Também denominado de *State of Charge* (SOC), é a medida da quantidade de carga disponível na bateria em relação à sua capacidade de armazenamento total no processo de carga ou descarga. É dado em percentual da quantidade total de carga da bateria. Ao nível da célula eletroquímica, a única grandeza capaz de alterar seu estado de carga é a corrente elétrica, não sendo afetada por fatores como tensão da célula e sua temperatura (PLETT,2015).

Conhecendo-se a corrente elétrica requerida pela carga, pode ser estimada pela expressão:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{Q} \int_{t_0}^t \eta_{batt}(\tau) i(\tau) d\tau \quad (2.20)$$

Em que,  $SOC(t_0)$  é o estado de carga no instante inicial  $t_0$ ,  $\eta_{batt}$  é a eficiência de carga ou descarga da bateria,  $i$  é a corrente elétrica (positiva para carregamento e negativa para descarga) e  $Q$  é a capacidade nominal de carga da bateria.

Outra forma de estimativa é dada pela análise da tensão de circuito aberto, que é obtida pela modelagem da bateria e seus parâmetros internos (PLETT, 2015). A verificação do estado de carga deve ser realizada depois de um tempo de descanso (*resting time*) após a desconexão da carga, inviabilizando sua utilização em aplicações que requerem estimativas em tempo real, como os veículos elétricos (LIU ET AL, 2018)



- ESTADO DE CONSERVAÇÃO

Grandeza que quantifica o envelhecimento da bateria baseado no seu histórico de operação, é também conhecida como *State of Health* (SOH), sendo utilizada para determinar o fim da sua vida útil (PLETT,2015). Seus principais indicadores são a capacidade de armazenamento de carga e resistência interna da bateria, que sofrem alterações à medida em que o dispositivo envelhece (LIU ET AL, 2018). Pode ser dada por:

$$SOH(t) = SOH(t_0) - \int_{t_0}^t \delta_{func}(i, T, SOC) d\tau \quad (2.21)$$

Em que,  $SOH(t_0)$  é o estado de conservação inicial da bateria e  $\delta_{func}$  representa a taxa de envelhecimento, que depende de fatores como as correntes de carga e descarga, temperatura e estado de carga. Outros fatores que podem influenciar essa taxa são as vibrações mecânicas e operação fora das características nominais da bateria (LIU ET AL, 2018).

De forma simplificada, pode ser calculada avaliando-se a capacidade de carga ou a resistência interna da bateria, sendo expressa por:

$$SOH = \frac{C_{atual}}{C_n} \times 100 \quad (2.22)$$

$$SOH = \frac{R_{atual}}{R_n} \times 100 \quad (2.23)$$

Em que,  $C_{atual}$  é a capacidade de carga atual da bateria,  $C_n$  é a capacidade de carga nominal,  $R_{atual}$  representa o aumento da resistência interna e  $R_n$  é a resistência interna de uma bateria sem uso (LIU ET AL, 2018).

- EFICIÊNCIA DE CARREGAMENTO

É a razão entre a energia fornecida pela bateria, pelo processo de descarga, e a energia necessária para carregá-la completamente. Permite mensurar as perdas ocorridas durante a descarga do dispositivo, devido aos fatores como reações químicas colaterais e dissipação de calor. Atua também como indicador do estado de conservação da bateria, uma vez que quanto mais preservada, maior sua eficiência, que decai com sua utilização (SHAFIEI, 2014).

- ENERGIA ESPECÍFICA

É a quantidade da máxima energia armazenada por unidade de massa de um dispositivo armazenador de energia. É dada em watt-hora por quilo ( $Wh/kg$ ) e, para as baterias, está

relacionada a suas características eletroquímicas e construtivas. Para aplicações em veículos híbridos e elétricos, é o indicador de autonomia da bateria, influenciando também a massa total do veículo (PLETT, 2015).

- POTÊNCIA ESPECÍFICA

É a quantidade de potência por unidade de massa de um dispositivo armazenador de energia. É dada em watt por quilo ( $W/kg$ ) e, para as baterias, se relaciona a sua taxa de entrega de energia, dependendo da carga conectada. Para aplicações em veículos elétricos, atua como indicador de aceleração (PLETT, 2015).

- PROFUNDIDADE DE DESCARGA

Também chamada de *Depth of Discharge* (DOD), é a grandeza indicativa da descarga máxima a qual a bateria pode ser submetida sem que ocorram danos à sua integridade. É dada em percentual da capacidade de armazenamento nominal da bateria (SHAFIEI, 2014).

### 2.3.2 BATERIAS TRACIONÁRIAS

Para aplicações de baterias em propulsão de veículos elétricos (BEV) ou híbridos (PHEV e HEV), são buscadas as seguintes características (SHAFIEI, 2014):

- Alta energia específica, resultando em maior autonomia do veículo e redução de recargas necessárias;
- Alta potência específica, conferindo maior aceleração para os veículos ao fornecer correntes de maior intensidade sem causar danos permanentes à bateria;
- Vida útil prolongada, com vários ciclos de carga e descarga disponíveis;
- Mecanismos de segurança de alta confiabilidade, preservando a integridade dos usuários e da bateria durante operação e manutenção do veículo;
- Baixo impacto ambiental, sendo viável sua reciclagem e com baixas quantidades de elementos tóxicos utilizados em sua construção;
- Baixo custo, permitindo a comercialização dos veículos em larga escala.

Assim, destacam-se as seguintes tecnologias de baterias (SHAFIEI,2014):

- Chumbo-ácido;

- Níquel - Cádmio (Ni-Ca);
- Níquel-hidreto metálico (Ni-MH);
- Íons de Lítio (Li-ion);
- Polímeros de Lítio (Li-Po);

As principais vantagens e desvantagens dessas baterias são mostradas na Tabela 2.1 (SHAFIEI,2014; PLETT,2015).

Tabela 2.1 – Comparativo de baterias tracionária

Bateria	Vantagens	Desvantagens
Chumbo-Ácido	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta eficiência (95-99%);</li> <li>2. Maturidade tecnológica;</li> <li>3. Pouca manutenção.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixa energia específica (30-40 Wh/kg);</li> <li>2. Proteção contra descarga excessiva;</li> <li>3. Necessita de proteção contra sobrecarga.</li> </ol>
NiCa	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Maturidade tecnológica;</li> <li>2. Baixo custo;</li> <li>3. Robustez em condições hostis de operação.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixa energia específica (45 – 60 Wh/kg);</li> <li>2. Possui metais tóxicos em sua composição (Cádmio);</li> <li>3. Auto-descarregamento significativo;</li> <li>4. Alto efeito memória.</li> </ol>
NiMH	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Intercalação iônica no eletrodo negativo aumenta a vida útil do dispositivo;</li> <li>2. Alta energia específica (75 – 100 Wh/kg);</li> <li>3. Alta potência específica.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alto custo pela utilização de terras-raras nos eletrodos negativos das células;</li> <li>2. Auto-descarregamento significativo;</li> <li>3. Alto efeito memória.</li> </ol>
Li-ion	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Intercalação iônica nos dois eletrodos das células;</li> <li>2. Alta energia específica (100 – 250 Wh/kg);</li> <li>3. Alta potência específica;</li> <li>4. Alta eficiência.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Risco de explosão em casos de aquecimento por sobrecarga;</li> <li>2. Requer monitoramento por dispositivo especializado (BMS);</li> <li>3. Custo elevado.</li> </ol>
Li-Po	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta energia específica (100 – 250 Wh/kg);</li> <li>2. Alta potência específica;</li> <li>3. Menor risco em casos de acidentes;</li> <li>4. Fabricação confere flexibilidade de produção.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixa maturidade tecnológica;</li> <li>2. Baixa resistência a temperaturas altas.</li> </ol>

Fonte: Shafiei, 2014; Plett, 2015 - Traduzido.

### 2.3.3 MODO DE CARREGAMENTO

Em se tratando do carregamento de baterias, busca-se garantir que o processo atenda tanto às limitações operacionais definidas pelos fabricantes quanto à comodidade aos usuários. Fatores como tecnologia da bateria, tempo de carregamento, temperatura e eficiência desempenham papel crucial para a escolha de diferentes estratégias de recarga (LIU ET AL, 2018). Os métodos mais adotados são corrente constante (*CC Charging*), tensão constante (*CV Charging*), híbrido CC-CV e o MCC (*Multi-Stage Constant Current*) (LIU ET AL, 2018):

### 2.3.3.1 CARREGAMENTO CC

Método em que a corrente é mantida fixa durante todo o processo de carregamento, sendo encerrada ao atingir um limite de tempo para recarga. O principal desafio é estabelecer uma corrente que equilibre o tempo de recarga e a capacidade de carga das baterias, já que suas características são afetadas pelas taxas de recarga. Uma corrente alta permite um carregamento rápido ao custo de maior degradação da bateria, sendo essa causada por reações químicas colaterais ou colapso de materiais ativos devido às temperaturas mais elevadas de carregamento (PLETT, 2015). Uma baixa corrente, por sua vez, apesar da alta capacidade de carga aceita, acarreta em alto tempo de carregamento.

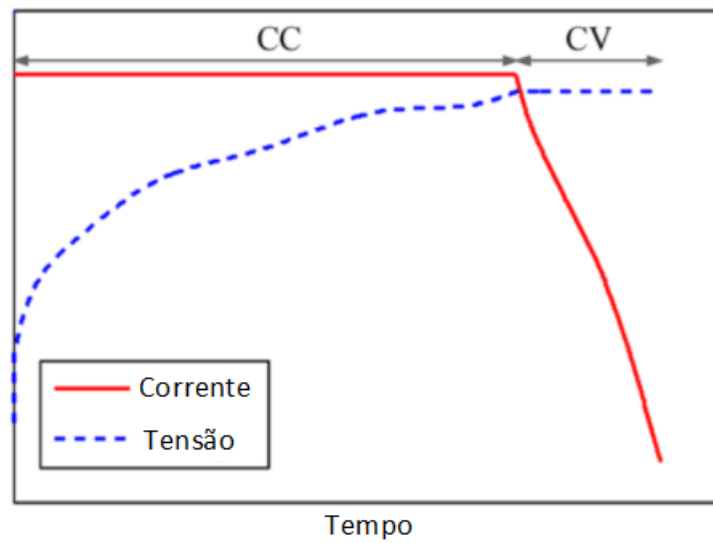
### 2.3.3.2 CARREGAMENTO CV

Método de carregamento em que se aplica uma tensão predefinida nos terminais das baterias. A corrente de recarga é reduzida ao longo do processo, pois a capacidade de aceitação de carga da bateria diminui. Uma das suas vantagens é a prevenção de sobretensões durante a recarga, que poderiam ocasionar reações irreversíveis nas baterias. Assim, sua vida útil é prolongado após este processo. Entretanto, é necessária uma alta corrente inicial para estabelecer tensão constante, podendo causar danos às redes cristalinas e polos da bateria.

### 2.3.3.3 CARREGAMENTO CORRENTE CONSTANTE E TENSÃO CONSTANTE (CC-CV)

O método híbrido CC-CV combina as estratégias CC e CV, que atuam de forma complementar. A bateria é carregada inicialmente com corrente constante, ocorrendo o aumento da sua tensão até um limite de segurança definido pelo fabricante. Após isso, o carregamento entra no modo de tensão constante, ocasionando na diminuição gradual da corrente de carregamento. Essa etapa é finalizada quando a corrente de carregamento é menor que um valor pré-estabelecido ou determinada capacidade de carga é atingida.

Figura 2.10 – Carregamento CC-CV

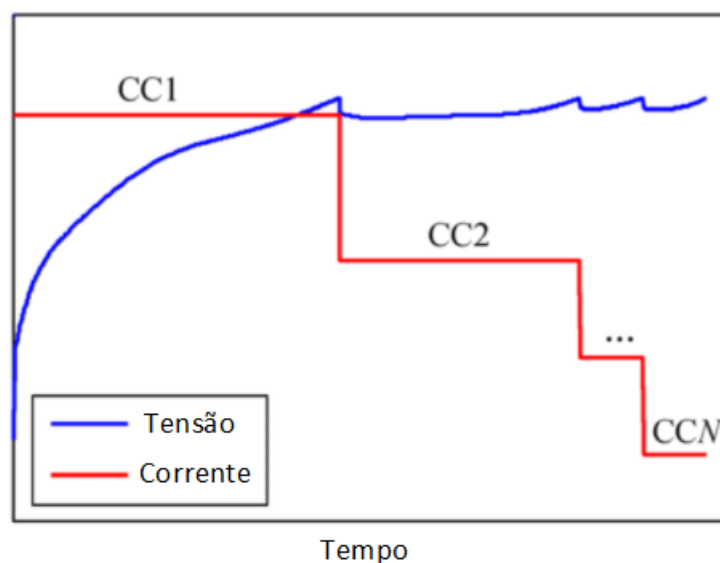


Fonte: Liu et al, 2018 - Traduzido.

#### 2.3.3.4 CARREGAMENTO MCC

O método utiliza uma série de correntes constantes decrescentes durante todo o processo de recarga. O critério para reduzir a corrente de recarga é a ultrapassagem da tensão limite da bateria. Uma vez reduzida a corrente, monitora-se novamente a ultrapassagem da tensão, e quando essa ocorre, a corrente é reduzida novamente. O processo continua até que a bateria alcance sua tensão limite com a menor corrente disponível pelo carregamento.

Figura 2.11 – Carregamento MCC



Fonte: Liu et al, 2018 - Traduzido.

### 2.3.4 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA (BMS)

Sistema embarcado cuja função é gerenciar a operação das baterias em uma dada aplicação, minimizando os riscos para o usuário e garantindo o atendimento de parâmetros de desempenho e segurança definidos pelo fabricante. Como regra geral, deve ser empregado em aplicações em que o custo da troca das baterias é significativo, como veículos elétricos e sistema de armazenamento de energia (PLETT, 2015). Quanto mais funcionalidades o BMS possuir, maior será seu custo.

Está conectado com todos os componentes do sistema de baterias (células, módulos, sistema de refrigeração, contadores e computador de bordo), tendo cinco principais funcionalidades (PLETT, 2015):

#### 1. Sensoriamento e controle de altas tensões:

- Medir tensão, corrente e temperatura das células e módulos da bateria;
- Controlar acionamento de chaves contadoras para conexão com a carga;
- Monitorar a isolamento entre os terminais da bateria e o chassi do veículo (*ground-fault detection*), evitando acidentes.

#### 2. Proteção contra:

- Sobrecorrentes durante carga ou descarga da bateria;
- Sobretensões e subtensões;
- Curto-circuito;
- Temperaturas extremas;
- Danos físicos e perda de isolamento.

#### 3. Interface:

- Controle de carregamento;
- Comunicação (*Control Area Network – CAN protocol*), requerendo robustez para ambientes automotivos;
- Registro de condições anormais de operação (*datalog*).

#### 4. Gerenciamento de performance da bateria:

- Estimativa de estado de carga (SOC) de células e bateria;
- Estimativa de potência de células e bateria;
- Balanceamento e equalização de carga das células de um módulo.

## 5. Diagnóstico:

- Estado de conservação (SOH);
- Detecção de operação anormal externa (tensão, corrente potência e temperatura fora dos limites designados);
- Detecção de falhas internas (falha de sensores de medição, sistema de balanceamento das células, resfriamento, comunicação, conexão com a carga).

## 2.4 MOTORES

Em aplicações veiculares, os motores são responsáveis pela conversão de energia térmica ou elétrica em energia mecânica, fornecendo torque e potência para propulsão do automóvel. Considerando as arquiteturas veiculares abordadas, os principais motores empregados são o motor à combustão interna (MCI) e o motor elétrico.

### 2.4.1 MOTOR À COMBUSTÃO INTERNA (MCI)

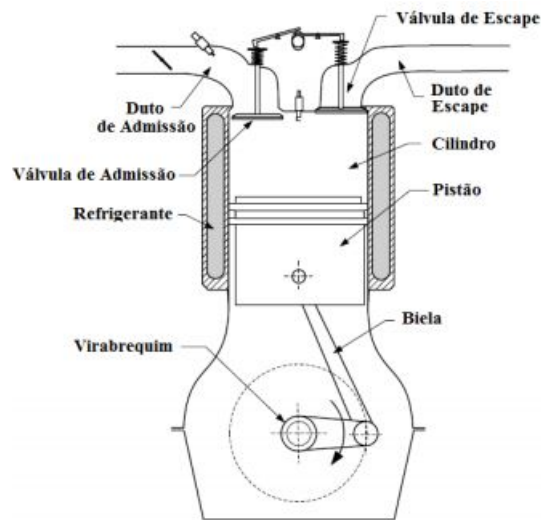
São máquinas térmicas que realizam a conversão da energia química dos combustíveis em energia mecânica. Seu princípio de funcionamento se baseia na combustão e expansão da mistura de ar-combustível. Podem ser alternativos, com repetitivos movimentos de translação (motor a pistão) ou motores rotativos (motor Wankel).

Foram inicialmente desenvolvidos no século XIX, passando por processos de aprimoramento com objetivo de torná-los mais adaptáveis para as amplas condições de utilização, além de permitir a utilização de combustíveis variados, como gás natural e etanol. Dentre as classificações possíveis para os motores a pistão, têm-se (SILVA,2017):

- Motores de Ciclo Otto: ignição por centelha, gerada por velas, sendo utilizados combustíveis de baixa volatilidade, como gasolina e álcool.
- Motores de Ciclo Diesel: ignição por compressão de ar, levando o combustível utilizado, diesel, a altas temperaturas e causando sua combustão.

Ambos os motores podem operar em ciclos de dois ou quatro tempos. Os motores mais utilizados em veículos automotores são aqueles de ignição por centelha com ciclo em quatro tempos, sendo a gasolina o combustível mais comum. A Figura 2.12 mostra a estrutura básica desse modelo de MCI.

Figura 2.12 – Motor à Combustão Interna



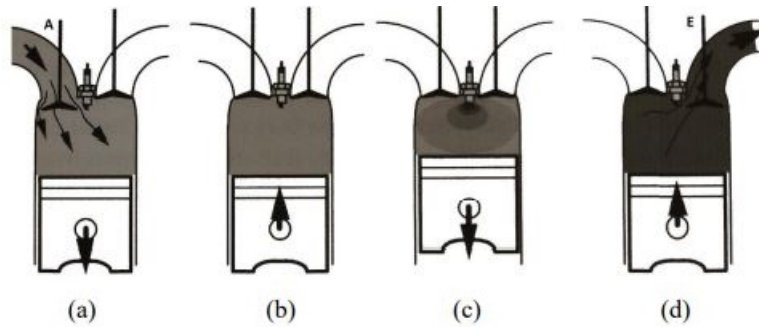
Fonte: Silva, 2017.

Os ciclos de trabalho dos MCI de Ciclo Otto possuem as seguintes etapas:

- Admissão (primeiro tempo): A válvula de admissão se abre, permitindo a admissão da mistura ar-combustível para o interior da câmara de combustão. Assim, o pistão desloca-se para baixo;
- Compressão (segundo tempo): Nessa etapa, a válvula de admissão se fecha, e há o deslocamento do pistão para cima, comprimindo a mistura ar-combustível;
- Expansão (terceiro tempo): No ponto de maior compressão da mistura ar-combustível, uma centelha é gerada pela vela de ignição, causando a explosão da mistura. O aumento da pressão decorrente impulsiona o pistão novamente para baixo;
- Exaustão (quarto tempo): É aberta a válvula de escape, por onde os gases provenientes da combustão são liberados para o exterior. O pistão torna a subir, limpando o interior da câmara de combustão. Ao final, a válvula de escape se fecha, e o processo se repete pela admissão novamente.



Figura 2.13 – Ciclos do MCI: (a) Admissão; (b) Compressão; (c) Explosão–Expansão; (d) Escape



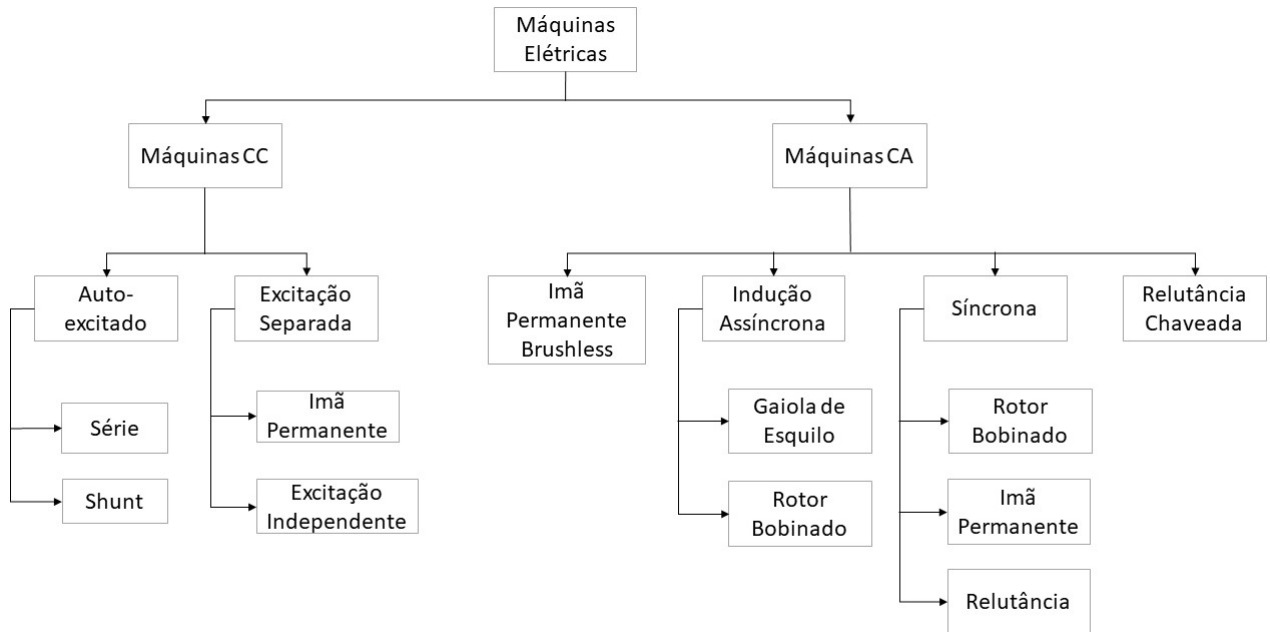
Fonte: Silva, 2017.

## 2.4.2 MÁQUINAS ELÉTRICAS

São máquinas que utilizam princípios do eletromagnetismo para gerar transformações de energia. Dentre os fenômenos, tem-se a indução eletromagnética, descrita em termos de variação de fluxo magnético por Faraday-Lenz e pela corrente por Ampère. O primeiro relaciona a exposição de materiais condutores elétricos a campos magnéticos variáveis com o aparecimento de uma tensão induzida oposta ao campo que a gerou, enquanto o segundo associa o surgimento de um campo magnético em torno de um condutor percorrido por corrente elétrica, com intensidade e sentido proporcionais a essa corrente (SILVA, 2017).

Seu aspecto construtivo envolve uma estrutura estática (estator) e uma parte rotacional (rotor). As conversões de energia realizadas pela máquina definem sua classificação quanto à operação: motor, quando transforma energia elétrica em energia mecânica, e gerador, quando energia mecânica é convertida em elétrica (EHSANI ET AL, 2018). Dentre suas formas de alimentação, podem ser definidas as máquinas de corrente contínua (Corrente Contínua (CC)) e máquinas de corrente alternada (Corrente Alternada (CA)). A Figura 2.14 mostra um diagrama com as variações existentes dessas máquinas:

Figura 2.14 – Máquinas elétricas



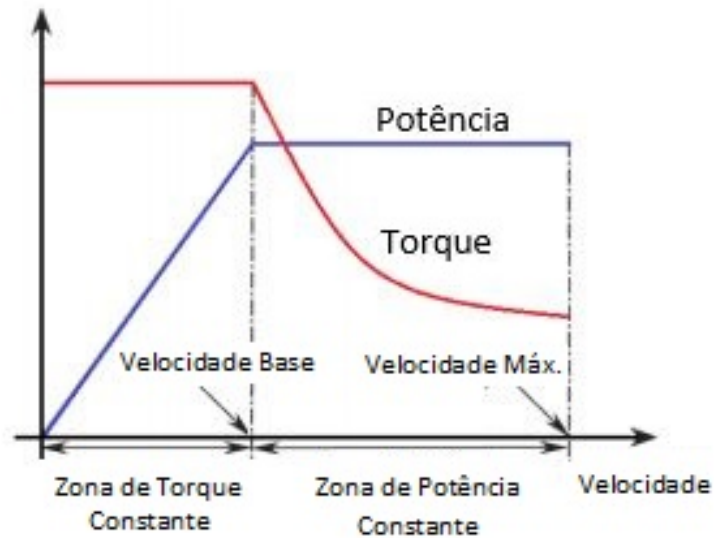
Fonte: Autoria Própria, 2021.

As características desejáveis de motores elétricos para aplicações em sistema de propulsão veicular incluem (ZERAOULIA, 2005):

- Alto torque em baixas rotações para tração inicial e subida em aclives;
- Alta potência em rotações elevadas;
- Amplo intervalo de velocidades permitidas, incluindo regiões de torque constante e potência constante;
- Resposta rápida de torque;
- Alta densidade de potência e potência instantânea elevada;
- Alta eficiência em amplo intervalo de velocidade;
- Alta confiabilidade e robustez para diferentes condições de operação;
- Custo razoável.

Dessa forma, a curva ideal de torque-velocidade para máquinas elétricas nessa aplicação:

Figura 2.15 – Curva torque-velocidade ideal

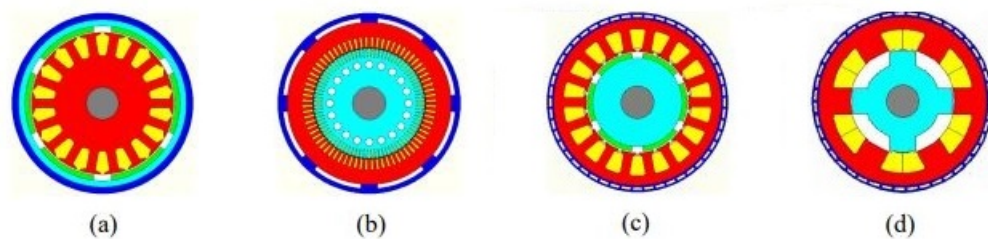


Fonte: Zeraoulia et al, 2005 - Traduzido.

Os principais motores elétricos utilizados para propulsão veicular são (EHSANI, 2018):

- Motor de corrente contínua (CC);
- Motor assíncrono de indução;
- Motor síncrono de ímãs permanentes;
- Motor de relutância variável.

Figura 2.16 – Seção transversal dos motores elétricos: (a) Motor CC; (b) Motor de indução; (c) Motor de ímãs permanentes; (d) Motor de relutância variável



Fonte: Zeraoulia et al, 2005 - Traduzido.

#### 2.4.2.1 MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Os motores de corrente contínua possuem ampla utilização em diferentes aplicações de propulsão elétrica, devido às suas características de torque-velocidade atenderem de forma

satisfatória às exigências de tração, maturidade tecnológica e pelo fato de seu controle de velocidade ser simples e de fácil implementação (ZERAOUZIA, 2005). Sua construção se dá a partir de um estator, rotor, escovas e comutador. Ao alimentar os enrolamentos do rotor, a corrente elétrica produz um campo magnético ao seu redor, sendo esse atraído ou repellido pelos imãs do estator, gerando assim o movimento de rotação do eixo. Nos instantes próximos ao alinhamento dos campos do rotor e do estator, o comutador, mediante as escovas, inverte o sentido da corrente nos enrolamentos do rotor, permitindo a continuidade do movimento.

#### 2.4.2.2 MOTOR DE INDUÇÃO

Composto por estator e rotor, mas sem comutadores. Seu funcionamento ocorre pela criação e interação entre campos magnéticos girantes. Aplica-se uma corrente alternada ao estator, havendo a produção de um campo magnético rotacional. Sua interação com os condutores do rotor induz nesse tensão e corrente elétrica, sendo responsável pela sua rotação. A corrente induzida no rotor é essencial para o torque produzido, e depende da diferença de velocidade dos campos magnéticos girantes e do eixo mecânico do rotor. Essa diferença, denominada escorregamento, é responsável pela designação do motor de indução como assíncrono. A topologia do seu rotor pode ser:

- Gaiola de esquilo: barras condutoras são encaixadas em ranhuras localizadas na superfície do rotor, sendo curto-circuitadas nos dois extremos por anéis condutores;
- Rotor bobinado: composto por um conjunto de enrolamentos semelhantes aos do estator conectados a anéis deslizantes localizados no seu eixo. É possível acessar suas correntes elétricas a partir de escovas, permitindo a utilização de resistências internas em seu circuito.

Em aplicações veiculares, os motores com rotor em gaiola de esquilo são mais utilizados que os de rotor bobinado, uma vez que apresentam menor custo, menor necessidade de manutenção e maior robustez (EHSANI ET AL, 2018).

#### 2.4.2.3 MOTOR SÍNCRONO DE IMÃS PERMANENTES

Seu princípio de operação consiste na interação do campo magnético girante do estator com o campo magnético estacionário do rotor, gerado pelos imãs permanentes. O torque eletromagnético é produzido quando ocorre a tentativa de alinhamento dos dois campos, fazendo o rotor girar na mesma velocidade do campo girante, justificando a denominação de motor síncrono.

O rotor é composto por ímãs permanentes, que podem ser alocados na sua superfície ou interior. A configuração com ímãs na superfície é a mais comum. O estator é composto por enrolamentos distribuídos de forma uniforme ou senoidal, que definem a denominação do motor: síncrono para enrolamento senoidal, sendo a máquina denominada *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM), ou CC sem escovas para enrolamento uniforme nas máquinas *Permanent Magnet Brushless DC Motor* (PM BLDC). No último caso, a denominação CC se deve aos fatores construtivos da máquina, e não à sua forma de alimentação (EHSANI ET AL, 2018).

A partida do motor requer um mecanismo especial. Para essa finalidade, podem ser utilizados inversores de frequência ou uma construção com barras e anéis (gaiola de esquilo) alocada no estator (EHSANI ET AL, 2018). Para chaveamento das correntes elétricas fornecidas ao estator, é necessário o monitoramento da posição do rotor, feito mediante uso de sensores de efeito Hall ou *encoders* ópticos.

Devido à ausência de corrente de campo para excitação, não há perdas por efeito Joule, o que torna sua construção mais compacta. Em comparação ao motor de indução, o motor de ímãs permanentes apresenta maior eficiência e menor tamanho. Entretanto, necessita de controle mais robusto, uma vez que a comutação de corrente do estator deve ser sincronizada com a posição do rotor.

#### 2.4.2.4 MOTOR DE RELUTÂNCIA VARIÁVEL

Possui construção diferente em relação aos demais motores de corrente alternada, uma vez que seu rotor não possui enrolamentos nem ímãs permanentes. Ao se energizar um dos enrolamentos do estator, ocorre a produção de fluxo magnético. Como a relutância entre estator e rotor é variável, ocorre um torque pela tendência do rotor se mover para a direção de menor relutância. Assim, o conjugado produzido é denominado torque de relutância, diferindo do torque eletromagnético, gerado pela interação entre campos magnéticos.

O rotor é constituído por polos salientes e não possui enrolamentos ou ímãs permanentes. O estator é composto por enrolamentos concentrados e polos salientes. O número de polos do estator e rotor é diferente, havendo configurações com 6/4, 8/6 e 4/2 polos. O primeiro número indica polos do estator, e o segundo os do rotor. A configuração mais comum é a de 6/4 polos (EHSANI ET AL, 2018).

Em comparação aos motores de ímãs permanentes, a ausência desses dispositivos no rotor torna sua construção mais barata. Sua operação também pode ser estendida para regiões de maior velocidade, já que os esforços mecânicos nos ímãs permanentes são eliminados (KARKI, 2020).

### 2.4.3 COMPARATIVO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Em termos comparativos, as máquinas elétricas podem ser avaliadas nos seguintes aspectos (EHSANI ET AL, 2018):

- Densidade de potência;
- Eficiência;
- Controlabilidade;
- Confiabilidade;
- Maturidade tecnológica;
- Custo;
- Vibração;
- Manutenção

Adotando-se uma classificação desses parâmetros em uma escala crescente de desempenho indo de 1 até 5, tem-se (KARKI, 2020):

Tabela 2.2 – Comparação de máquinas elétricas

Fatores	DC	Indução	Relutância	PMSM	PM BLDC
Densidade de Potência	2	3	3,5	4,5	5
Eficiência	2	3	3,5	4,5	5
Controlabilidade	5	4	3	4	4
Confiabilidade	3	5	5	4	4
Maturidade Tecnológica	5	5	4	5	4
Custo	4	5	4	3	3
Vibração	3	5	2	5	5
Manutenção	1	5	5	5	5
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>35</b>

Fonte: Karki, 2020 - Traduzido.

A escolha de uma máquina dependerá dos parâmetros de maior relevância no projeto e aplicação do veículo, de modo a garantir sua operação com eficiência e segurança. Verifica-se um empate em termos gerais entre as máquinas de indução, PMSM e e PM BLDC. Em termos de custo, a máquina de indução aparece como melhor opção, ao passo que o motor PM BLDC apresenta a maior eficiência para aplicação veicular.

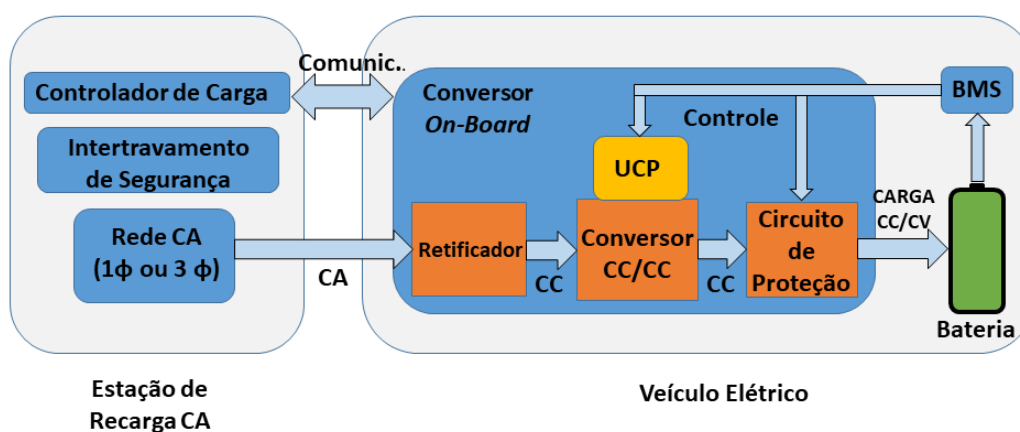
## 2.5 ESTAÇÕES DE RECARGA

As estações de recarga são dispositivos utilizados para recarga de veículos elétricos *plug-in* (PHEV ou BEV), permitindo conectá-los à rede elétrica local. Sua implementação requer adaptações nas instalações elétricas da unidade consumidora. Assim, o dimensionamento adequado de condutores, dispositivos de proteção contra sobrecorrente e curto-circuito (disjuntores termomagnéticos), dispositivos contra fugas de corrente (dispositivo diferencial-residual), em conjunto com um aterramento adequado, garantem sua operação apropriada e segurança para os usuários (OMS ENGENHARIA, 2019).

### 2.5.1 TOPOLOGIA CA

A topologia de carregamento CA possui a seguinte configuração:

Figura 2.17 – Topologia estações CA



Fonte: Ronanki, 2019 - Traduzido

As etapas do carregamento são:

1. Quando a estação de recarga e o veículo elétrico são conectados, o Controlador de Carga inicia a comunicação com o conversor *on-board*. São trocadas informações sobre limitação de potência de carregamento, conectividade e condições de falta antes de permitir o início da recarga.
2. Caso sejam verificadas condições impróprias de conexão entre o veículo elétrico e a estação de recarga, o intertravamento de segurança interrompe o carregamento;
3. Quando a potência CA é fornecida ao veículo elétrico, ocorre a conversão da potência CA para CC, a partir do retificador presente no conversor *on-board*. Em seguida, a

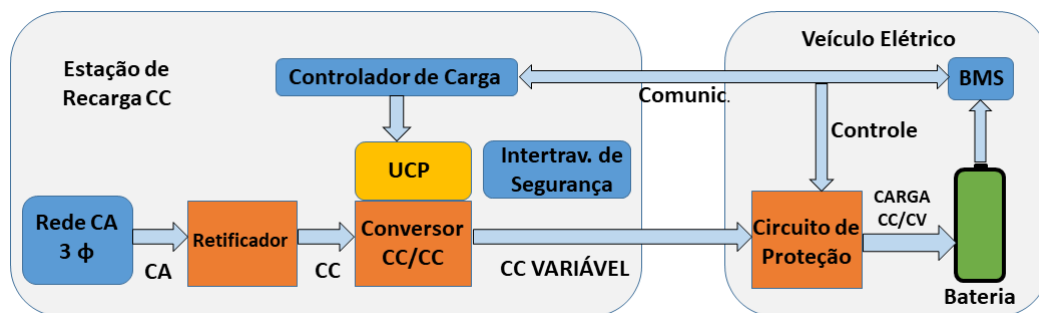
UCP (Unidade de Controle de Potência) ajusta a tensão e corrente na saída do conversor CC/CC, de modo a controlar a potência entregue à bateria.

4. Para controlar o carregamento da bateria, o BMS envia sinais para a Unidade de Controle de Potência;

### 2.5.2 TOPOLOGIA CC

A topologia de carregamento CC é dada como:

Figura 2.18 – Topologia estações CC



Fonte: Ronanki, 2019 - Traduzido

As etapas do carregamento são:

1. A conversão da potência CA fornecida pela rede elétrica ocorre diretamente na estação de recarga, a partir de um retificador;
2. Em seguida, a UCP ajusta os limites de tensão e corrente na saída do conversor CC/CC, fornecendo uma potência variável para o carregamento da bateria;
3. O BMS desempenha o papel de comunicar ao Controlador de Carga os limites de tensão e corrente a serem fornecidos à bateria, acionando o circuito de proteção em caso de operação fora dos valores permitidos;
4. De forma semelhante às estações CA, o circuito de proteção e o intertravamento de segurança são acionados quando condições impróprias de conexão e operação são detectadas;

### 2.5.3 TIPOS DE CARREGAMENTO E ESTAÇÕES

As potências e as formas de alimentação das estações de recargas são padronizadas segundo normas da *International Electrotechnical Commission* (IEC) (IEC 61851-1) e *SAE*



*International* (SAE J1772) (KONGJEEN, 2018). De acordo com a IEC 61851-1, as estações de recarga podem ser classificadas em quatro categorias, como apresentadas na Tabela 2.3:

Tabela 2.3 – Padrão de estações de recarga IEC 61851-1

<b>Modo de Conexão</b>	<b>Conexão à rede</b>	<b>Tensão</b>	<b>Corrente</b>	<b>Tipo de Carregamento</b>
Modo 1 (CA)	Monofásico	230 V	16 A	Lento
	Trifásico	400 V	16 A	Lento
Modo 2 (CA)	Monofásico	230 V	32 A	Lento
	Trifásico	400 V	32 A	Lento
Modo 3 (CA)	Monofásico	230 V	32 A	Lento
	Trifásico	690 V	250 A	Média
Modo 4 (CC)	-	600 V	400 A	Rápida

Fonte: Kongjeen, 2018 - Traduzido

Pela SAE J1772, têm-se os tipos de carregamento na Tabela 2.4:

Tabela 2.4 – Padrão de estações de recarga SAE J1772

<b>Modo de conexão</b>	<b>Conexão à rede</b>	<b>Tensão</b>	<b>Corrente</b>	<b>Tipo de Carregamento</b>
CA Nível 1	Monofásico	120 V	12-16 A	Lento
CA Nível 2	Monofásico	240 V	<80 A	Lento
CA Nível 3	Monofásico	240 V	>80 A	Lento
	Trifásico			
CC Nível 1	-	200-450 V	80 A	Lento
CC Nível 2	-	200-450 V	200 A	Médio
CC Nível 3	-	200-450 V	400 A	Rápido

Fonte: Kongjeen, 2018 - Traduzido

A partir de levantamento realizado das estações de recarga das principais marcas atuantes no mercado brasileiro (WEG, ABB e Schneider Electric), verifica-se a seguinte padronização, por potência:

- Estação Monofásica de até 7,4 kW;
- Estação Trifásica de até 22 kW;
- Estação Trifásica de até 60 kW (CA) e 43 kW (CC);
- Estação de Corrente Contínua de até 150 kW;

As duas primeiras estações de recarga se encontram no formato *wallbox*, podendo ser fixadas em parede ou pedestal apropriado, sendo seu uso mais comum em residências, condomínios e estacionamentos (públicos e privados). As demais são comumente encontradas na forma de *totem* e são mais utilizadas em locais com maior rotatividade de veículos, como centros comerciais e postos de abastecimento.

Figura 2.19 – Estação de recarga *wallbox*



Fonte: Schneider Electric, 2021.

Figura 2.20 – Estação de recarga *totem*



Fonte: WEG, 2021.

À medida em que a potência da estação aumenta, maiores são as adaptações necessárias nas instalações elétricas da unidade consumidora. Em caso de estações em empreendimentos comerciais, é mandatória a declaração de carga para a concessionária de energia local (ANEEL, 2018), de modo a verificar a necessidade de alterações contratuais do consumidor.

## 2.5.4 POTÊNCIA E TEMPO DE RECARGA

Considerando um fator de potência unitário para as estações de recarga, a potência de carregamento monofásico CA pode ser dada por:

$$P_{1\phi} = V_{CA} \cdot I_{CA} \quad [\text{W}] \quad (2.24)$$

Em que,  $V_{CA}$  é a tensão de fase (V) e  $I_{CA}$  é a corrente elétrica de carregamento (A). Para estações trifásicas, a potência é dada por:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_{3CA} \cdot I_{CA} \quad [\text{W}] \quad (2.25)$$

Em que,  $V_{3CA}$  é a tensão de linha (V) e  $I_{CA}$  é a corrente elétrica de carregamento (A). Para estações em corrente contínua:

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_{CC} \quad [\text{W}] \quad (2.26)$$

Em que,  $V_{CC}$  é a tensão CC de saída da estação (V) e  $I_{CC}$  é a corrente elétrica CC de carregamento (A). Para carregamentos CA, considerando a estação de recarga com fator de potência unitário, o tempo de carregamento é dado por:

$$t_{carreg} = \frac{E_{batt}}{P_{carreg}} \quad (2.27)$$

Em que,  $t_{carreg}$  é o tempo de carregamento, em horas,  $E_{batt}$  é a capacidade de armazenamento de energia da bateria e  $P_{carreg}$  é a potência de carregamento.

Considerando as especificações do veículo BMW i3 fabricado em 2019, com bateria de capacidade de 42,2 kWh, conversor *on-board* monofásico de 7,4 kW, conversor *on-board* trifásico de 11 kW e carregamento CC máximo em 50 kW (BMW PRESS, 2018), o tempo de carregamento total é estimado em:

- 05:42 horas nas estações monofásicas CA de 7,4 kW;
- 03:50 horas nas estações trifásicas CA de 22 kW;
- 51 minutos nas estações CC de 150 kW.

Observa-se que o tempo de carregamento ainda é muito maior que o relativo aos veículos de combustíveis fósseis, realizado em torno de alguns minutos. Ressalta-se que a potência de carregamento é limitada pela potência dos conversores *on-board*, no carregamento CA, e pelo *Battery Management System* (BMS), no carregamento CC. Além disso, fatores como

a temperatura da bateria no momento da recarga e o estado de carga inicial influenciam o tempo de carregamento (PLETT, 2015).

## **2.6 CONECTORES**

Os conectores integram o sistema de carregamento de veículos elétricos *plug-in*. Além de transferir potência para os automóveis, realizam também a comunicação entre a estação de recarga e os sistemas de gerenciamento do veículo, garantindo um carregamento apropriado e seguro para os usuários e dispositivos.

Em se tratando dos tipos de conectores, não há uma padronização amplamente adotada, observando-se uma variedade que depende do país, dos fabricantes dos veículos e da forma de carregamento (CA ou CC). As normas IEC 62196-1:2014 e IEC 62196-2:2016 regulamentam os quesitos técnicos de operação desses dispositivos.

### **2.6.1 CONECTORES CA**

Segundo as normas IEC, os conectores para carregamento CA podem ser classificados em tipo 1, tipo 2 e tipo 3. Ressalta-se que os conectores tipo 1 e 2 são os mais comumente utilizados, estando o tipo 3 em desuso pelas fabricantes de conectores (BAUER ET AL, 2018). Dentre os conectores disponíveis, tem-se:

#### **2.6.1.1 TIPO 1**

Proposto pela SAE *International* em 2001 (SAE J1772-2001) com o objetivo de padronizar os conectores de veículos recarregáveis nos Estados Unidos. Com formato inicialmente retangular, passou por uma atualização em 2009, adquirindo formato arredondado (SAE J1772-2009). Suas especificações foram posteriormente utilizadas pela IEC 62196-2 para definir parâmetros técnicos e operacionais de carregadores tipo 1. É mais utilizado em países como Estados Unidos e Japão, sendo conhecido também como conector Yazaki ou SAE J1772 (BAUER ET AL, 2018).

Figura 2.21 – Conector Tipo 1



Fonte: CPFL, 2021.

É utilizado exclusivamente para carregamento monofásico. Sua tensão de operação varia entre 120 V até 240 V, suportando correntes de até 80 A (SAE J1772-2017). É composto por 5 pinos, conforme apresentado pela Figura 2.22 :

Figura 2.22 – Pinagem Tipo 1



Fonte: CPFL, 2021.

Tabela 2.5 – Funções pinagem Tipo 1

<b>Nº Pino</b>	<b>Função</b>	<b>Categoria</b>
1	Fase 1	Potência
2	Fase 2/Neutro	Potência
3	Controle Piloto	Comunicação
4	Deteção de Proximidade	Comunicação
5	Terra	Proteção

Fonte: CPFL, 2021.

### 2.6.1.2 TIPO 2

Inicialmente proposto e padronizado pela Associação Alemã de Indústria Automotiva, foi posteriormente recomendado para fabricação e uso pela Associação de Fabricantes de Automóveis da Europa em 2011. Seu formato é circular com achatamento no topo, garantindo maior segurança na instalação devido ao seu encaixe único. Seu formato é também utilizado para o carregador chinês de corrente alternada (GB/T CA), sendo também adotado pela Tesla nos seus postos de carregamento na Europa (BAUER ET AL, 2018).

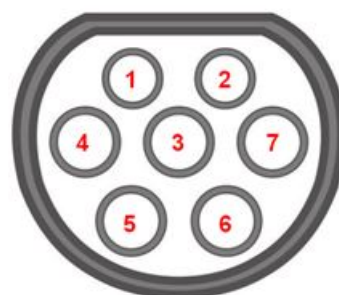
Figura 2.23 – Pinagem Tipo 2



Fonte: CPFL, 2021.

Para carregamentos monofásicos, a tensão é de 230 V e a corrente opera em até 80 A. Para carregamentos trifásicos, a tensão é de 400 V e a corrente até 63 A. É composto por 7 pinos, conforme apresentado na Figura 2.24 :

Figura 2.24 – Pinagem Tipo 2



Fonte: CPFL, 2021.

Tabela 2.6 – Funções pinagem Tipo 2

<b>Nº Pino</b>	<b>Função</b>	<b>Categoria</b>
1	Detecção de Proximidade	Comunicação
2	Controle Piloto	Comunicação
3	Terra	Proteção
4	Fase 1	Potência
5	Fase 2	Potência
6	Fase 3	Potência
7	Neutro	Potência

Fonte: CPFL, 2021.

### 2.6.1.3 TESLA CA

Conector utilizado pelos veículos da Tesla para carregamento em estações da própria marca nos Estados Unidos, permite realizar recargas em corrente contínua ou alternada. Possui também um adaptador para conexão em outras estações, como a do tipo 1 para carregamento CA (BAUER ET AL, 2018).

Figura 2.25 – Conector Tesla



Fonte: Charging Shop Europe, 2021.

Sua tensão de operação é de 240 V, enquanto a corrente suportada vai até 72 A. Sua pinagem segue o seguinte padrão da Figura 2.26 :

Figura 2.26 – Pinagem conector Tesla



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 2.7 – Funções pinagem Tesla CA

<b>Nº Pino</b>	<b>Função</b>	<b>Categoria</b>
1	Fase 1 (CA) Polo Positivo (CC)	Potência
2	Neutro (CA) Polo Negativo (CC)	Potência
3	Terra	Proteção
4	Controle Piloto	Comunicação
5	Detecção de Proximidade	Comunicação

Fonte: CPFL, 2021.

## 2.6.2 CONECTORES CC

Para carregamento em corrente contínua, os principais carregadores são:

- Combo CCS (*Combined Charging System*) – Tipo 1 ou Tipo 2;
- *Charge de Move* (CHAdeMO) (*Charge de Move*);
- Conector Tesla CC;
- Padrão Chinês GB/T CC;



### 2.6.2.1 COMBO CCS – TIPO 1 E TIPO 2

Usados principalmente nos Estados Unidos (tipo 1) e Europa (tipo 2). Desenvolvido a partir da *Charging Interface Initiative e.V* (CharIN e.V), associação fundada por fabricantes como Audi, BMW, Daimler, Mennekes, Opel, Phoenix Contact, Porsche, TÜV SÜD e Volkswagen. Sua premissa é a utilização de um único conector tanto para o carregamento CA quanto CC. Suas características são (BAUER ET AL, 2018):

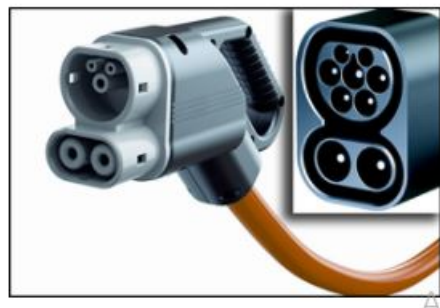
- Combo Tipo 1: formado pela junção do padrão SAE J1772 na parte superior e por duas entradas específicas para recarga CC, na parte inferior. Seus parâmetros de recarga lenta seguem as mesmas especificações do padrão SAE J1772, enquanto a recarga CC opera em até 500 V e 200 A (100 kW);
- Combo Tipo 2: formado pelo conector padrão tipo 2 na parte superior e pelas entradas de recarga rápida na parte inferior, com potência de carregamento até 500 kW. Seu carregamento CA segue os mesmos limites de potência do padrão tipo 2.

Figura 2.27 – Conector Combo Tipo 1



Fonte: CPFL, 2021.

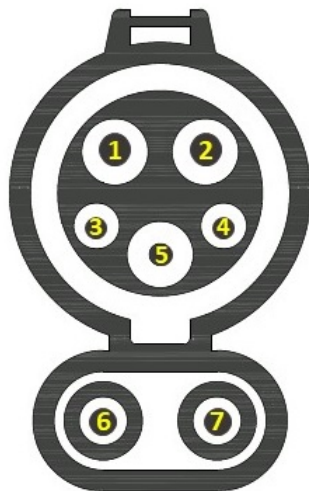
Figura 2.28 – Conector Combo Tipo 2



Fonte: CPFL, 2021.

Para comunicação, ambos os conectores utilizam o protocolo PLC (*Power Line Commu-  
nication*). A pinagem dos conectores CCS Tipo 1 e Tipo 2 é mostrada pela Figuras 2.29:

Figura 2.29 – Pinagem Combo Tipo 1



Fonte: Autoria Própria, 2021.

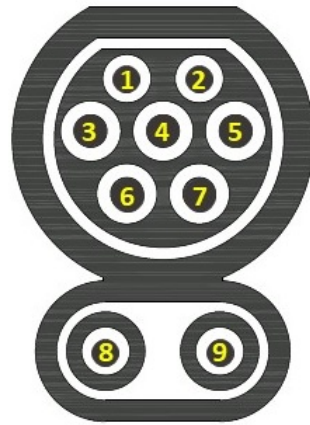
Tabela 2.8 – Funções pinagem CCS Tipo 1

<b>Nº Pino</b>	<b>Função</b>	<b>Categoria</b>
1	Fase 2/Neutro (CA)	Potência
2	Fase 1 (CA)	Potência
3	Controle Piloto	Comunicação
4	Deteccção de Proximidade	Comunicação
5	Terra	Proteção
6	Polo Negativo (CC)	Potência
7	Polo Positivo (CC)	Potência

Fonte: Bauer et al, 2018 - Traduzido.

Para o conector CSS Tipo 2, a pinagem é mostrada na Figura 2.30:

Figura 2.30 – Pinagem Combo Tipo 2



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 2.9 – Funções pinagem CCS Tipo 2

<b>Nº Pino</b>	<b>Função</b>	<b>Categoria</b>
1	Detecção de Proximidade	Comunicação
2	Controle Piloto	Comunicação
3	Fase 1 (CA)	Potência
4	Terra	Proteção
5	Neutro	Potência
6	Fase 2 (CA)	Potência
7	Fase 3 (CA)	Potência
8	Polo Negativo (CC)	Potência
9	Polo Positivo (CC)	Potência

Fonte: Bauer et al, 2018 - Traduzido.

#### 2.6.2.2 CHADEMO (*CHARGE DE MOVE*)

Padrão desenvolvido por uma associação formada em 2010 pelas empresas Toyota, Nissan, Mitsubishi, Fuji *Heavy Industries* e Tokyo *Electric Power Company*. É utilizada globalmente pelos carros das montadoras japonesas, possuindo rede com cerca de 16.500 estações de recarga em 2017.

Figura 2.31 – Conector CHAdeMO

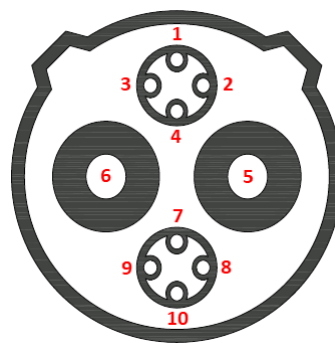


Fonte: CHAdeMO Association, 2018.

Foi o primeiro padrão a permitir bidirecionalidade do fluxo de potência, possibilitando o fornecimento de energia dos veículos para a rede elétrica local (*Vehicle to Grid - V2G*) (BAUER ET AL, 2018).

Sua tensão de operação possui faixa de 50 V e 1 kV, com corrente de até 400 A. Assim, fornece uma potência máxima de até 400 kW em sua versão 2.0 (CHADEMO ASSOCIATION, 2018). Para comunicação entre o veículo e a estação de recarga, é utilizado o protocolo *Controller Area Network (CAN)*. Sua pinagem é mostrada na Figura 2.32:

Figura 2.32 – Pinagem CHAdeMO



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 2.10 – Funções pinagem CHAdeMO

<b>Nº Pino</b>	<b>Função</b>	<b>Categoria</b>
1	Terra	Proteção
2	Relé 1 de Controle do VE	Proteção
3	Sem atribuição	Proteção
4	Controle de Carga	Comunicação
5	Polo negativo	Potência
6	Polo positivo	Potência
7	Detecção de proximidade	Comunicação
8	Comunicação CAN +	Comunicação
9	Comunicação CAN -	Comunicação
10	Relé 2 de Controle do VE	Potência

Fonte: Autoria Própria, 2021.

### 2.6.2.3 TESLA CC

Conectores utilizados pela Tesla para carregamento dos seus veículos. Nos Estados Unidos, as estações de recarga rápida são chamadas *superchargers*, e o mesmo conector é utilizado para carregamento CA e CC. Na Europa, o carregamento CC é realizado por conector tipo 2 adaptado. Para essa modalidade de carregamento, a fabricante oferece adaptadores que permitem carregamento em estações do tipo CHAdeMO (BAUER ET AL, 2018).

A potência de sua recarga vai até 250 kW, operando em tensão de 480 V e correntes de até 525 A. Sua construção e funcionalidade dos pinos são as mesmas do modo CC.

### 2.6.2.4 PADRÃO CHINÊS GB/T CC

Padrão de conector desenvolvido para automóveis de fabricantes chinesas. Esse conector permite o carregamento da bateria auxiliar de baixa tensão do veículo, além da bateria de tração de alta tensão.

Figura 2.33 – Conector GB/T CC



Fonte: Phoenix Contact, 2021.

Sua tensão de operação varia entre 750 V até 1 kV, com correntes de até 250 A, chegando a uma potência máxima de 250 kW. Para comunicação, utiliza protocolo CAN. Sua pinagem é mostrada pela Figura 2.34

Figura 2.34 – Conector GB/T CC



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 2.11 – Funções pinagem GB/T CC

<b>Nº Pino</b>	<b>Função</b>	<b>Categoria</b>
1	Comunicação CAN +	Comunicação
2	Detecção de Proximidade	Comunicação
3	Comunicação CAN -	Comunicação
4	Detecção de Proximidade	Comunicação
5	Polo Positivo	Potência
6	Polo Negativo	Potência
7	Polo Positivo Carregamento Bateria Auxiliar	Potência
8	Terra	Proteção
9	Polo Negativo Carregamento Bateria Auxiliar	Potência

Fonte: Autoria Própria, 2021.

### 2.6.3 COMUNICAÇÃO

A comunicação entre veículo e estação de recarga é feita mediante utilização de dois pinos exclusivos: Piloto de Proximidade (PP) e Controle Piloto (CP). O primeiro pino verifica se a conexão do conector ao veículo foi realizada de forma apropriada. Caso não tenha sido, o processo de carregamento é suspenso. O segundo pino é utilizado para controlar a corrente de recarga fornecida. Comunicando-se com o veículo mediante sinais digitais *Pulse Width Modulation* (PWM), a estação determina a máxima corrente elétrica de recarga (BAUER ET AL, 2018). Protocolos como CAN (*Controller Area Network*) e *Power Line Communication* (PLC) são utilizados, com parâmetros operacionais definidos pelas normas IEC 61851-1:2017, ISO 15118 e IEC 61851-24:2014.

### 2.6.4 LEGISLAÇÃO VIGENTE RECARGA DE VEÍCULOS

A Resolução Normativa 819 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), datada de junho de 2018, apresenta a regulamentação sobre serviços de recarga para veículos elétricos por agentes públicos e privados. Nela, são definidos os quesitos relativos à instalação, segurança e exploração comercial da atividade, permitindo assim maiores investimentos na prestação desse serviço. Um dos seus principais pontos é a proibição, por ora, da modalidade *Vehicle-to-Grid* (V2G), em que veículos elétricos poderiam injetar energia elétrica na rede local e obter compensação na fatura de energia elétrica, de forma semelhante aos sistemas fotovoltaicos ligados à rede (*On-Grid*) após a Resolução Normativa 482 de 2012.

## **2.6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram abordados assuntos de interesse para um estudo comparativo de veículos convencionais, híbridos e elétricos. É um tópico que envolve desde a questão sócio-ambiental da mobilidade elétrica até aspectos técnicos e econômicos.

Buscou-se abordar os componentes integrantes comuns acerca dos veículos convencionais, híbridos e elétricos, com ênfase nos sistemas de propulsão e baterias. Não foram aprofundados os temas relacionados aos sistemas mecânicos do veículo, uma vez que, para o objetivo do trabalho, uma abordagem simplificada do sistema de transmissão veicular era suficiente.

Espera-se que esta revisão bibliográfica traga o contexto necessário para a condução do trabalho, que utiliza extensivamente a conceituação abordada neste capítulo. O Capítulo 3 discorre sobre as ferramentas e metodologias utilizadas para a realização dos estudos.



# 3 MATERIAIS E MÉTODOS

---

O objetivo deste capítulo é apresentar as ferramentas e métodos utilizados para a realização das simulações, análises e levantamentos que serviram de base para o trabalho. Estão inclusas a descrição da modelagem de veículos convencionais, híbridos e elétricos, das simulações realizadas para análise do desempenho desses automóveis em vias urbanas e rodoviárias de Brasília, considerações realizadas para análise econômica dos veículos estudados e o levantamento do contexto atual das estações de recarga em Brasília.

## 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.1.1 ADVISOR<sup>®</sup>

O *Advanced Vehicle Simulator* (ADVISOR<sup>®</sup>) é um *software* de simulação veicular desenvolvido em ambiente MATLAB/Simulink<sup>®</sup> pela *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), dos Estados Unidos. Com um extenso banco de arquiteturas automotivas e componentes disponíveis, como baterias e motores (MCI e elétricos), permite a modelagem de veículos convencionais, híbridos, elétricos e movidos à hidrogênio, sendo utilizado para análises, validação de testes e comparação entre esses modelos. No presente trabalho, a modelagem de veículos e obtenção das características gerais dos percursos realizados e operação dos componentes veiculares foi feita com o auxílio dessa ferramenta.

### 3.1.2 FASTSim<sup>™</sup>

O *Future Automotive Systems Technology Simulator* (FASTSim<sup>™</sup>) é também um *software* de simulação veicular desenvolvido pela NREL. Possui extensa base de dados com diferentes *powertrains*, tendo como premissa a realização de simulações rápidas focadas nos fluxos de potência envolvidos na propulsão veicular nos trajetos analisados. É possível estimar o impacto de mudanças em diferentes sistemas na eficiência, desempenho e custo dos veículos modelados. Nesse estudo, foi utilizado de forma complementar ao ADVISOR<sup>®</sup>, com análises focadas no balanço energético e consumos (combustível e energia) ao longo dos percursos.

### 3.1.3 PlugShare<sup>™</sup>

O PlugShare<sup>™</sup> é um aplicativo gratuito que permite a localização e avaliação de estações de recarga existentes em uma localidade pelos seus usuários. É possível, também, planejar

trajetórias e configurar as distâncias máximas para localizar as estações mais próximas dos percursos estabelecidos. Nesse estudo, foi utilizado para definir a quantidade de estações instaladas em Brasília, os tipos de conectores disponíveis e a distribuição dos pontos de recarga ao longo dos trajetos percorridos.

#### **3.1.4 Microsoft Excel®**

Desenvolvido pela Microsoft, o Microsoft Excel® é um editor de planilhas. Dentre as suas funcionalidades, encontram-se ferramentas de cálculo e construção de gráficos e tabelas (MICROSOFT, 2020). Neste projeto, o Excel® foi utilizado para elaboração de gráficos comparativos presentes na análise econômica dos diferentes veículos utilizados.

#### **3.1.5 Google Maps™**

O Google Maps™ é um aplicativo de mapas e imagens de satélite desenvolvido pela Google®. Dentre suas funcionalidades, encontram-se a criação de diferentes rotas dados os pontos de partida e chegada, fornecimento das condições de trânsito da trajetória e estimativa de tempo de percurso. Sua utilização ocorreu com o objetivo de selecionar os trajetos que seriam percorridos para a obtenção dos perfis de velocidade, posteriormente utilizados na simulação de desempenho dos veículos estudados.

#### **3.1.6 Speedometer-2™**

O Speedometer-2 é um aplicativo de posicionamento de dispositivo móvel por *Global Positioning System* (GPS), desenvolvido pela empresa Cool Niks™. Em aplicações veiculares, possibilita a medição da velocidade do automóvel em todos os instantes da trajetória percorrida, fornecendo também estatísticas do percurso (tempo parado e em movimento, velocidades média e máxima alcançadas e distância percorrida). Possui precisão de um segundo para obtenção de velocidades, sendo sua acurácia dependente da conectividade do dispositivo móvel com os satélites de navegação GPS. Sua utilização teve como objetivo traçar o perfil de velocidade de cada trajetória percorrida.

#### **3.1.7 GPS Tracker™**

De forma semelhante ao Speedometer-2™, o GPS Tracker é um aplicativo de rastreamento de dispositivo móvel desenvolvido pela GPS-Server™. Sua principal aplicação é voltada para a logística de frotas veiculares, uma vez que sua plataforma permite o gerenciamento de histórico de percursos, notificação de veículos em trânsito e emissão de relatórios. Possui precisão máxima de velocidade em seis segundos, com sua acurácia também depen-

dente da conexão do dispositivo móvel com satélites de navegação. No projeto, sua utilização ocorreu de forma redundante na obtenção dos perfis de velocidade dos trajetos percorridos, permitindo comparar as velocidades obtidas pelo Speedometer-2™ e garantir que eventuais perdas de conexão durante a trajetória não comprometessem os dados já obtidos.

## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1 MODELAGEM DE VEÍCULOS

A escolha dos veículos simulados constituiu a primeira etapa do projeto. De modo a garantir uma referência comum para as comparações realizadas, as modelagens feitas basearam-se em automóveis de passeio com carroceria *hatchback*, classificados na categoria subcompacta, com volume do compartimento de passageiros e carga entre 2,47 e 2,8 m<sup>3</sup> (80 a 99 pés-cúbicos), ou compacta, com volumes entre 2,83 e 3,08 m<sup>3</sup> (100 a 109 pés-cúbicos). A classificação da categoria é definida pela *Environmental Protection Agency* (EPA) (*Environmental Protection Agency*), e a escolha pelos *hatchbacks* se deve ao fato de terem sido os mais vendidos no Brasil em 2020 (AUTO ESPORTE MERCADO, 2021). Dentre esses, para refletir com fidelidade a frota nacional, priorizou-se a escolha de automóveis comercializados no mercado brasileiro entre 2018 e 2020. Somente no caso do veículo HEV não foi possível atender esse critério, sendo escolhido um modelo comercializado em países europeus. Assim, os seguintes veículos foram escolhidos:

- Veículo convencional: Chevrolet Onix 1.4 LT (2020);
- Veículo HEV: Toyota Yaris XP21 1.5 Híbrido (2020);
- Veículo PHEV: Volkswagen Golf GTE 1.4 TSI Híbrido (2019);
- Veículo BEV: Chevrolet Bolt EV (2020);

Figura 3.1 – Chevrolet Onix 1.4 LT



Fonte: Chevrolet, 2021.

Figura 3.2 – Toyota Yaris XP21 1.5 Híbrido



Fonte: Inside EVs UOL, 2020.

Figura 3.3 – Volkswagen Golf GTE Híbrido



Fonte: Inside EVs UOL, 2020.

Figura 3.4 – Chevrolet Bolt EV



Fonte: Chevrolet, 2021.

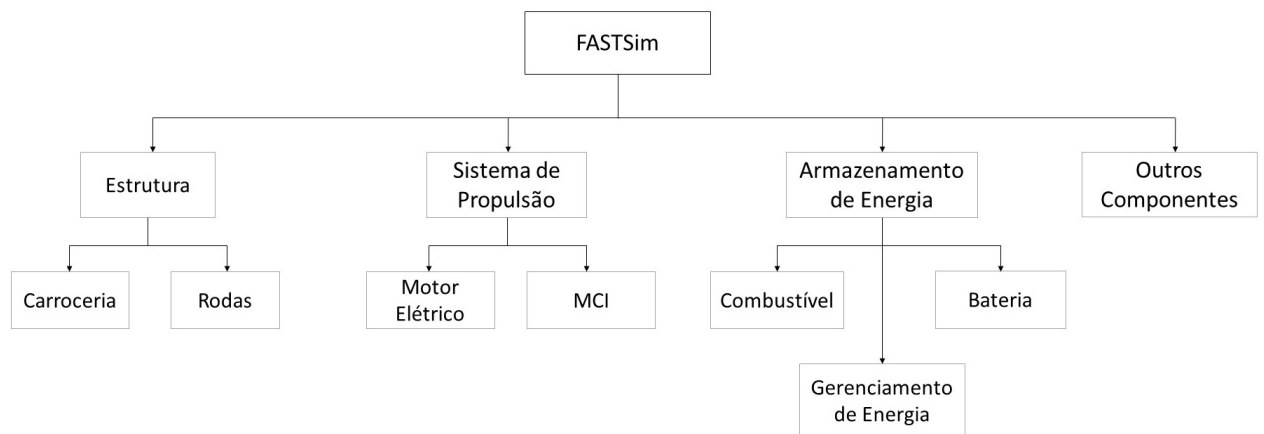
Utilizaram-se os simuladores FASTSim™ e ADVISOR® para a modelagem dos veículos selecionados. Foram modelados os sistemas de armazenamento de energia, propulsão, transmissão e rodas dos veículos, além das características mecânicas e de carroceria, utilizando as

fichas técnicas dos veículos escolhidos. Ressalta-se que as duas ferramentas foram empregadas de forma complementar, já que o grau de detalhamento dos sistemas é diferente em cada uma delas. Dessa forma, buscou-se reproduzir de modo abrangente as características construtivas dos veículos para posterior análise de desempenho ao longo dos trajetos percorridos. Os parâmetros de modelagem de cada veículo, tanto no ADVISOR<sup>®</sup> quanto no FASTSim<sup>™</sup>, estão descritos no Anexo B e C, respectivamente.

### 3.2.2 Modelagem FASTSim<sup>™</sup>

No FASTSim<sup>™</sup>, é possível efetuar a modelagem dos veículos conforme apresentado na Figura 3.5:

Figura 3.5 – Categorias modelagem FASTSim<sup>™</sup>



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para cada categoria, os parâmetros são mostrados a seguir:

#### 3.2.2.1 Características Estruturais

Nesse quesito, são modelados os parâmetros mecânicos e de carroceria dos veículos. Dentre esses, se encontram:

1. Coeficiente de arraste aerodinâmico;
2. Área frontal;
3. Massa da carroceria do veículo, sem *drivetrain* (*glider mass*);
4. Massa de cargas adicionais (*cargo mass*);
5. Centro de gravidade;

6. Fração de peso do veículo sobre o eixo propulsor (*drive axle weight fraction*);
7. Distância entre eixos (*wheelbase*);

Os primeiros quatro parâmetros são utilizados nas equações dinâmicas do veículo, de modo a estimar a potência necessária para atingir as velocidades do ciclo de condução. Os últimos três atuam no teste de aceleração e na determinação dos limites de tração no alcance das velocidades requeridas.

#### 3.2.2.2 Rodas

Em se tratando das rodas do veículo, podem ser ajustados:

1. Inércia;
2. Número de rodas;
3. Coeficiente de resistência ao rolamento;
4. Raio;
5. Coeficiente de aderência.

De modo semelhante à carroceria, os parâmetros são utilizados nas equações dinâmicas do veículo e na determinação dos seus limites de tração.

#### 3.2.2.3 MCI

Esse sistema de propulsão é modelado em quatro parâmetros:

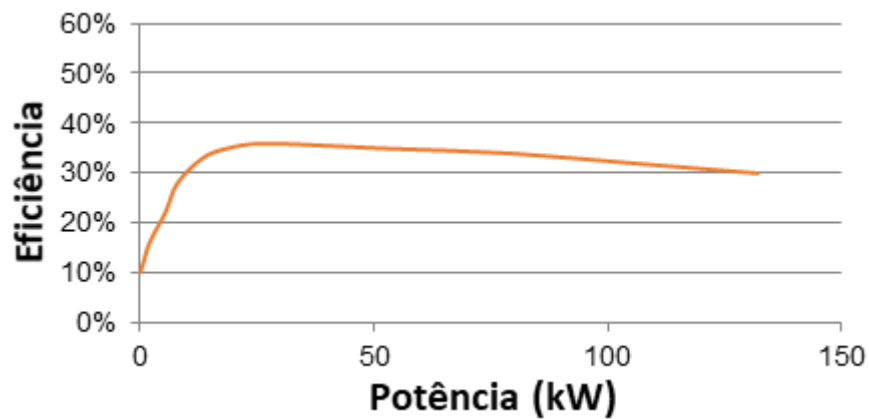
1. Potência;
2. Tempo para máxima potência;
3. Massa-base;
4. Potência específica;
5. Eficiência.

O desempenho do motor é limitado pelos quesitos potência e tempo para máxima potência. Esse último parâmetro assume valores distintos a depender do tipo de veículo simulado

(convencional, híbrido HEV ou PHEV). Os parâmetros de massa-base e potência específica são utilizados para estimar a massa total do motor em função da potência.

A eficiência estimada do MCI é modelada por uma curva de potência e eficiência dada pela Figura 3.6. Segundo Brooker et al (2015), essa relação mostra alto nível de acurácia, uma vez que, para a maioria dos MCI, a precisão da modelagem fica em torno de 5%. Os valores assumidos de eficiência dependem dos ciclos termodinâmicos adotados pelo motor, que para o MCI podem ser ciclo Otto, ciclo Diesel ou ciclo Atkinson.

Figura 3.6 – Curva de rendimento MCI FASTSim™

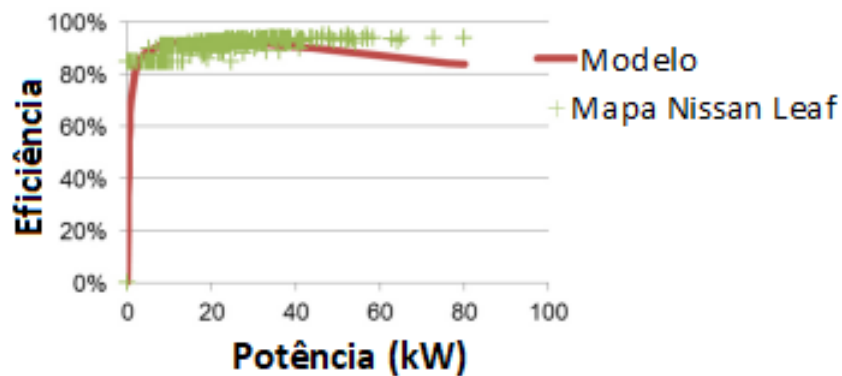


Fonte: Brooker et al, 2015 - Traduzido.

#### 3.2.2.4 Máquina Elétrica

A modelagem da máquina elétrica é feita considerando os mesmos quesitos do MCI. A curva de eficiência é baseada em pontos de operação amostrados sobre o mapa de eficiência da máquina elétrica do Nissan Leaf, verificando-se maior eficiência para potências mais altas. Ressalta-se que o simulador não disponibiliza opção de escolha da tecnologia da máquina elétrica, sendo essa ausência contornada por ajustes da eficiência máxima.

Figura 3.7 – Curva de rendimento Máquina Elétrica FASTSim™



Fonte: Brooker et al, 2015 - Traduzido.

### 3.2.2.5 Combustível

Para veículos convencionais e híbridos, essa categoria representa o combustível utilizado e seu armazenamento, possuindo os seguintes parâmetros:

1. Potência de armazenamento (*fuel storage power*);
2. Tempo para máxima potência;
3. Energia;
4. Densidade de energia do combustível.

Esses quesitos estimam os limites de potência e autonomia para diferentes tipos de combustíveis. Em se tratando de gasolina, a potência de armazenamento pode assumir valores arbitrariamente altos, já que o motor irá limitar a quantidade de combustível injetada (BROOKER ET AL, 2015). O tempo para potência máxima indica os limites transitórios de potência, enquanto o parâmetro de energia representa a quantidade de energia armazenada no combustível. Para a gasolina, considerou-se uma energia equivalente de 8,9 kWh por litro (NRCAN, 2021) O indicador de densidade de energia do combustível permite relacionar a energia armazenada com sua massa.

### 3.2.2.6 Bateria

Os parâmetros de modelagem da bateria incluem:

1. Potência;



2. Energia;
3. Massa-base;
4. Energia específica.

A eficiência da bateria é considerada constante, uma vez que seu estado é assumido como novo (BROOKER ET AL, 2015). As tecnologias de referência são NiMH e Li-ion, e os parâmetros de massa-base e energia específica são utilizados para estimar a massa total do sistema de armazenamento de energia, sendo obtidos da base de dados do simulador.

### 3.2.2.7 Gerenciamento de Energia

Nessa categoria, são definidos os parâmetros de controle da operação da bateria e do MCI, sendo:

1. Mínimo SOC da bateria;
2. Máximo SOC da bateria;
3. Nível de descarga da bateria voltada para aumento da eficiência do MCI;
4. Nível de carga da bateria voltada para aumento da eficiência do MCI;
5. Velocidade máxima na qual a bateria contribui na aceleração do veículo;
6. Porcentagem da bateria reservada para aceleração do veículo;
7. Velocidade de acionamento do MCI, nos veículos híbridos;

A partir da configuração desses quesitos, é definida a estratégia de utilização de energia na propulsão dos veículos. Assim, é possível configurar os modos de condução de veículos híbridos, permitindo sua atuação em modo totalmente elétrico, híbrido ou totalmente à combustão, além de determinar as condições iniciais de carga das baterias, utilizadas para avaliar a autonomia dos veículos elétricos.

### 3.2.2.8 Outros componentes

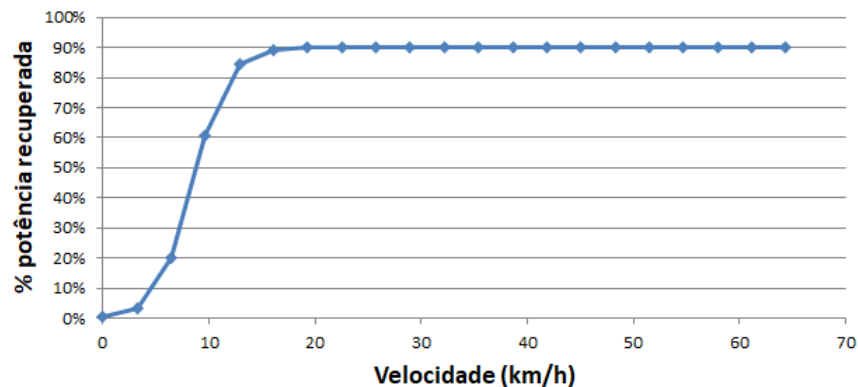
Estão disponíveis para configuração componentes não enquadrados nas categorias acima, como:

1. Eficiência do alternador;

2. Potência de cargas auxiliares;
3. Massa do sistema de transmissão;
4. Eficiência do sistema de transmissão;
5. Máxima frenagem regenerativa capturada.

A potência de cargas auxiliares refere-se aos sistemas elétricos não envolvidos na propulsão do veículo, como centrais multimídia, ar-condicionado e lâmpadas internas e do farol. O último quesito, relativo à recuperação de energia pela frenagem, é dado em percentual da potência dispendida na redução de velocidade do veículo, avaliada nas suas rodas. A potência recuperada é limitada pela máquina elétrica e bateria, sendo a energia relativa calculada considerando o passo de tempo da simulação. Sua curva de eficiência é dada em função da velocidade do veículo, como mostra a Figura 3.8:

Figura 3.8 – Potência recuperada na Frenagem Regenerativa FASTSim™



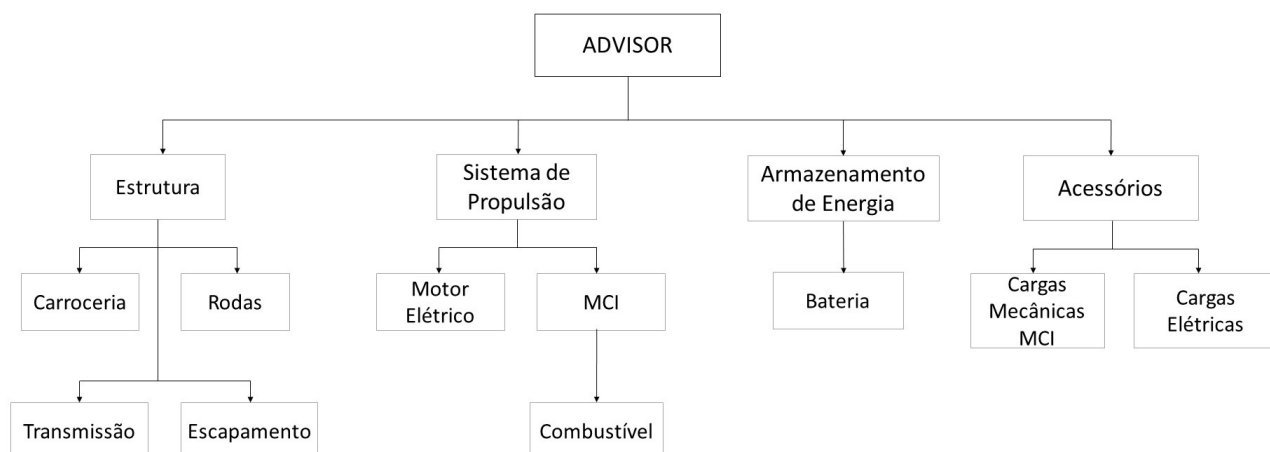
Fonte: Brooker et al, 2015 - Traduzido.

Assume-se, para efeitos de modelagem, que frenagens em baixas velocidades são realizadas majoritariamente por freios à fricção, com alta dissipação de energia (BROOKER ET AL, 2015; EHSANI ET AL, 2018). Para velocidades maiores, considera-se a predominância da frenagem regenerativa.

### 3.2.3 Modelagem ADVISOR®

Diferentemente do FASTSim™, o ADVISOR® adota modelos pré-definidos para cada sistema do veículo, sendo possível alterar suas características para adequá-las aos modelos construídos. Assim, as seguintes características podem ser modeladas conforme mostra a Figura 3.9:

Figura 3.9 – Categorias modelagem ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria - 2021.

Como cada característica acima possui ampla quantidade de parâmetros, serão abordados aqueles com maior relevância para as simulações realizadas.

### 3.2.3.1 Carroceria

Uma vez que serão simulados veículos subcompactos ou compactos de carroceria hatchback, foram utilizadas as opções de carroceria correspondentes, com adaptação das massas totais seguindo as fichas técnicas dos veículos simulados. Os quesitos configuráveis para a carroceria dos veículos são os mesmos adotados pelo FASTSim.

### 3.2.3.2 Rodas

Para as rodas, a modelagem permite a configuração de características estruturais, como massa, raio e inércia, além do coeficiente de resistência ao rolamento, limites de força aplicada aos eixos e perdas ocorridas. Nesse último quesito, é utilizado o coeficiente de escoreamento. Para veículos híbridos e elétricos, é possível ajustar a porcentagem da recuperação de energia por frenagem regenerativa.

### 3.2.3.3 Transmissão

Para esse sistema, estão disponíveis as opções de transmissão manual, automática e continuamente variável (CVT - *Continuously Variable Transmission*), que possui um número infinito de relações de marcha. O simulador considera como componentes da transmissão a caixa de câmbio e o diferencial, sendo possível a configuração de cada um desses. Para a

caixa de câmbio, o principal parâmetro é o número de marchas, enquanto que, para o diferencial, destaca-se a taxa de redução de rotações. A massa de ambos os componentes pode ser alterada, e a soma dessas resulta na massa total da transmissão. Por fim, é possível também configurar a eficiência total do sistema.

#### 3.2.3.4 Escapamento

Sistema responsável pela filtragem e eliminação de gases gerados após a queima de combustível nos veículos com MCI. No ADVISOR<sup>®</sup>, os modelos disponíveis estão relacionados ao tipo de combustível do veículo, como gasolina ou diesel, tendo sua massa dimensionada a partir da potência máxima do MCI adotado para o veículo.

#### 3.2.3.5 MCI

O ADVISOR<sup>®</sup> possui em sua base de dados diferentes modelos de MCI, disponibilizando as curvas de torque e mapas de eficiência em função das rotações do motor para cada uma das opções. Os principais parâmetros configuráveis dos MCI são:

1. Ciclo de operação (Ciclo Otto ou Ciclo Diesel);
2. Variação do intervalo de rotações do motor ;
3. Variação do intervalo de torque do motor;

Ao serem alterados os parâmetros acima, o simulador realiza o ajuste das características de potência, inércia e massa do MCI. Os parâmetros do combustível utilizado, como densidade de massa e de energia, são configurados também nessa categoria.

#### 3.2.3.6 Máquina Elétrica

De modo semelhante ao MCI, o ADVISOR<sup>®</sup> possui extensa base de máquinas elétricas, estando disponíveis suas curvas de torque-velocidade e eficiência. É possível a escolha da sua tecnologia, estando disponíveis máquinas de indução e de ímãs-permanentes. Além dos parâmetros de torque e rotações, é possível configurar também:

1. Tensão máxima de operação;
2. Corrente máxima de operação;
3. Sobretorque máximo do motor.

### 3.2.3.7 Bateria

Para esta categoria, estão disponíveis baterias de chumbo-ácido, NiCa, NiMH e Li-ion. Dentre as representações possíveis de bateria, pode-se escolher entre a modelagem por resistência interna ( $R_{int}$ ), utilizando um circuito equivalente composto por fonte de tensão constante em série com um resistor, ou o modelo por capacitor (RC), em que são adicionados um capacitor e sua resistência em paralelo ao modelo anterior para representar limitações de corrente baseadas em características eletroquímicas. Após determinação da modelagem e tecnologia da bateria, é possível configurar os seguintes parâmetros:

1. Tensão máxima e mínima dos módulos;
2. Capacidade de carga;
3. Número de módulos da bateria;
4. Massa dos módulos.

Ressalta-se que o simulador efetua a conexão de todos os módulos da bateria em série. Assim, é necessário ajustar a capacidade de carga para a correta modelagem da bateria dos veículos.

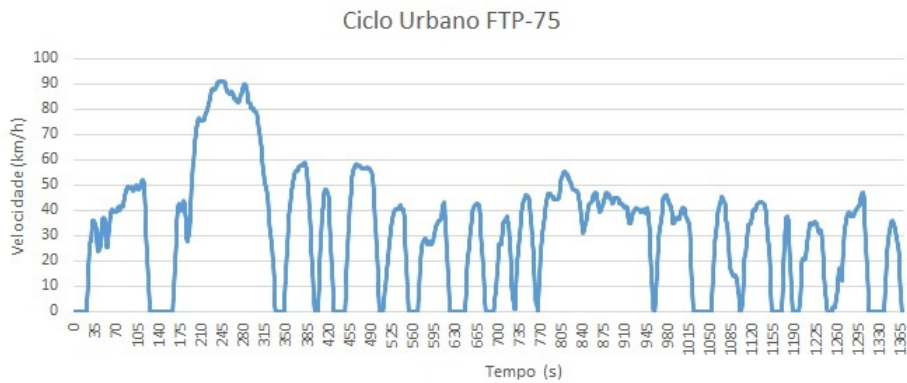
### 3.2.3.8 Acessórios

Representados pela potência consumida, são considerados como acessórios componentes consumidores de energia não atuantes na propulsão do veículo, podendo ser mecânicos ou elétricos. Nos veículos convencionais, compõem essa categoria o alternador e elementos de resfriamento do MCI, como ventilador e bomba de óleo. Para veículos elétricos e híbridos, consideram-se as cargas como ar-condicionado e centrais multimídia. Em todos os veículos, é possível configurar a eficiência do consumo de energia desses componentes.

## 3.2.4 CICLOS DE CONDUÇÃO (*DRIVE CYCLES*)

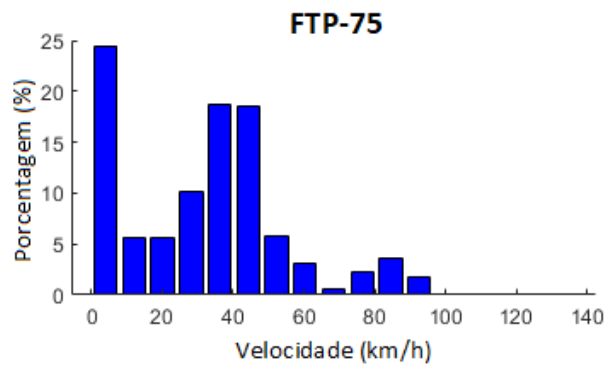
Para análise dos níveis de emissão de poluentes e consumo de combustível dos veículos, são utilizados ciclos de condução (*drive cycles*) definidos por agências reguladoras em cada país (SILVA, 2017). Esses ciclos mostram o perfil de velocidade em função do tempo para determinado trajeto percorrido, e para efeitos regulatórios, os veículos são analisados em ciclos classificados em urbanos ou rodoviários. No Brasil, são utilizadas as normas NBR 7024:2017 e NBR 16567:2020 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por sua vez baseadas no ciclo urbano US *Federal Test Procedure* (FTP) e no ciclo rodoviário *Highway Fuel Economy Test* (HWFET).

Figura 3.10 – Ciclo de condução urbano FTP-75.



Fonte: Autoria Própria - 2021.

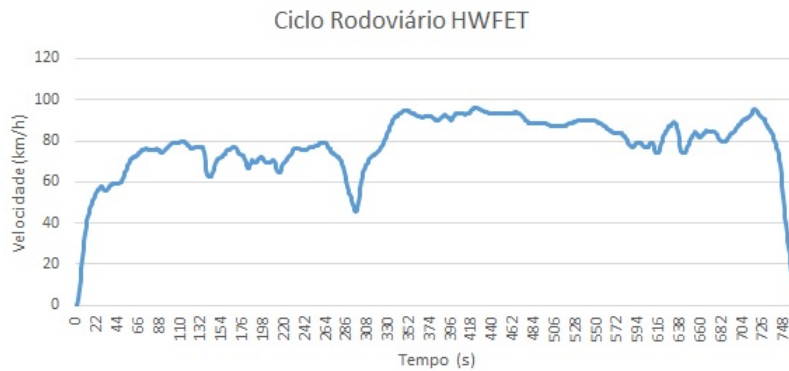
Figura 3.11 – Histograma ciclo FTP-75.



Fonte: Autoria Própria - 2021.

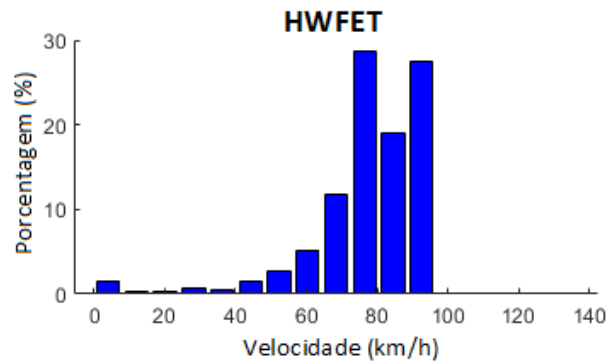
Analisando-se o perfil de condução FTP-75, é possível observar no histograma a distribuição majoritária das velocidades em valores abaixo de 60 km/h, com predominância de velocidade nula. Ao longo de um trajeto de 12 km, são contabilizadas 17 paradas, velocidade média de 31,5 km/h e a máxima velocidade alcançada de 91,25 km/h. As baixas velocidades atingidas e o alto número de paradas são as principais características dos ciclos urbanos.

Figura 3.12 – Ciclo de condução rodoviário HWFET.



Fonte: Autoria Própria - 2021.

Figura 3.13 – Histograma ciclo HWFET.

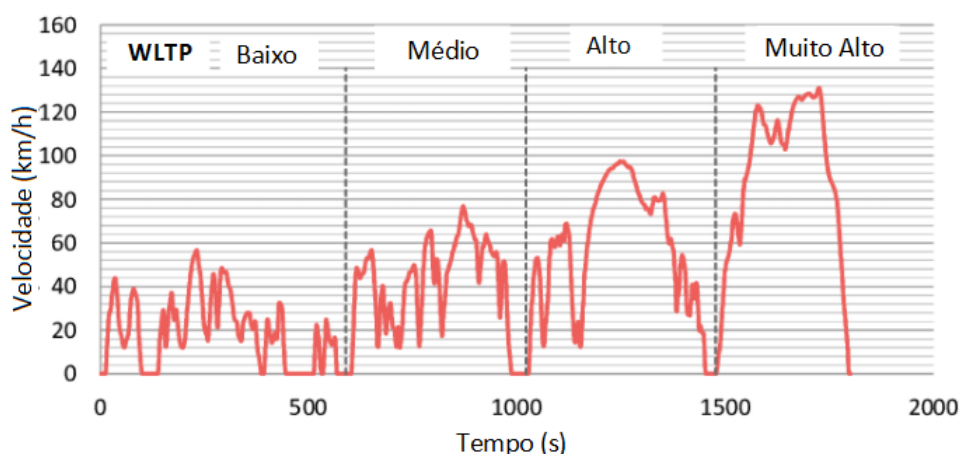


Fonte: Autoria Própria - 2021.

Para o ciclo de condução rodoviária, observam-se velocidades superiores a 50 km/h sendo percorridas de forma mais constante, com a única parada registrada ao final do percurso. Pelo histograma, é verificada a predominância de velocidades acima de 60 km/h, com intervalo de operação majoritário entre 70 e 90 km/h. Ao longo do trajeto de 16,5 km, a velocidade máxima alcançada foi de 96,4 km/h e a média de 77,58 km/h. As altas velocidades atingidas e o baixo número de paradas são as principais características dos ciclos urbanos.

Para veículos comercializados no mercado europeu, o ciclo utilizado para avaliação é o *Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP)*, conforme mostra a Figura 3.14:

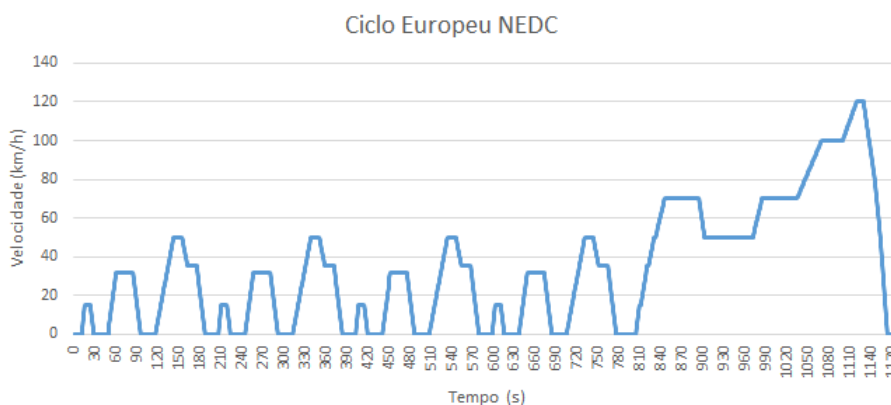
Figura 3.14 – Ciclo europeu WLTP



Fonte: Fontaras et al, 2017 - Traduzido

A principal característica desse trajeto é a divisão em quatro partes, cada uma com diferentes perfis de velocidade. As velocidades baixas representam os ciclos urbanos e as médias os subúrbios, enquanto as altas indicam as velocidades em estradas rurais e as muito altas em rodovias (FONTARAS ET AL, 2017). A distância do ciclo é de 23,27 km, com velocidade média de 43,5 km/h e máxima de 131,5 km/h. O tempo parado corresponde a 13% da duração do ciclo, de 1800 segundos. Ao contrário dos padrões norte-americanos, o ciclo WLTP informa valores combinados de consumo de combustível, não fazendo diferenciação entre cidade e rodovia. Esse ciclo entrou em vigor em 2019, substituindo o antigo padrão *New European Drive Cycle* (NEDC), alvo de críticas por apresentar características como baixas acelerações e tráfego em velocidade constante. Tais condições não refletem o estilo real de condução dos motoristas e, conseqüentemente, o consumo de combustível e emissões de poluentes (TSIAKMAKIS ET AL, 2017).

Figura 3.15 – Ciclo europeu NEDC.



Fonte: Autoria Própria, 2021



Para os ciclos de condução apresentados, não foram consideradas elevações na pista, fatores esses que afetam o desempenho e consumo dos veículos analisados. De modo a refletir com maior precisão as condições locais de trânsito e trazer mais realismo às análises deste projeto, foram obtidos ciclos de condução em Brasília, considerando as elevações de pista. Para defini-los, foram verificadas características como:

- Extensão

Em Brasília, a distância média anual percorrida por veículos com até um ano de uso foi estimada em 14.600 km no ano de 2019 (KBB, 2019), acarretando em uma média diária de 40 km. Assim, essa extensão foi utilizada como referência para a escolha dos trajetos.

- Abrangência

Para selecionar as vias com maiores fluxos de trânsito, foram escolhidos trechos com altos índices de Tráfego Médio Diário (TMD) no ano de 2020. Em Brasília, esse parâmetro é calculado pelo Departamento de Estradas e Rodagem (DER-DF) (Departamento de Estradas e Rodagem) e disponibilizado no relatório Sistema Rodoviário do Distrito Federal (DER-DF, 2020).

- Estações de recarga

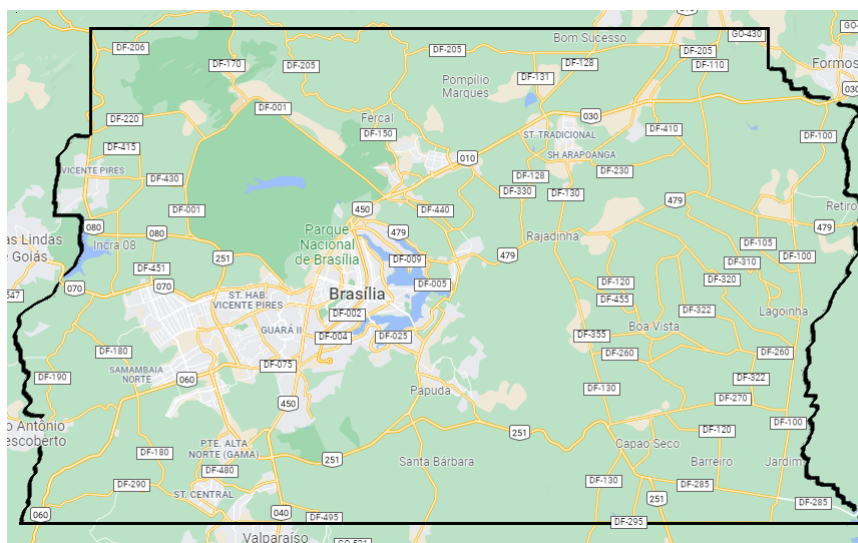
O início dos trajetos foi definido em pontos em que houvesse disponibilidade de ao menos uma estação de recarga, de modo a permitir que os veículos PHEV e BEV iniciassem os percursos com as baterias totalmente carregadas. A distribuição de estações ao longo dos percursos escolhidos também foi obtida.

Considerando esses parâmetros, foram definidos os seguintes trajetos:

- UnB Darcy Ribeiro – UnB Ceilândia (FCE);
- UnB Darcy Ribeiro – UnB Planaltina (FUP);
- UnB Darcy Ribeiro – UnB Gama (FGA);
- Valparaíso de Goiás – UnB Planaltina (FUP);

Os três primeiros são os trajetos *intercampi* da Universidade de Brasília (UnB), enquanto o último é um percurso customizado notável pela distância total. Para cada um dos trajetos, foram escolhidas as rotas de menor extensão entre as alternativas apresentadas pelo Google Maps™. A composição detalhada dos trechos de cada percurso e coordenadas geográficas dos pontos iniciais estão disponíveis no Anexo A.

Figura 3.16 – Mapa rodoviário de Brasília



Fonte: Google Maps™, 2021 - Adaptado

### 3.2.5 SIMULAÇÃO

#### 3.2.5.1 DESEMPENHO VEICULAR E VALIDAÇÃO

O desempenho veicular possui diferentes quesitos de avaliação. Em termos dinâmicos, são observados os seguintes pontos:

- Velocidade máxima;
- Tempo de aceleração de zero a 100 km/h;
- Capacidade de subida em velocidade constante.

Os dois primeiros critérios são amplamente divulgados pelas montadoras dos veículos e fontes especializadas, sendo assim utilizados para análise dos veículos modelados. Ressalta-se que, em caso de veículos comercializados nos mercados norte-americano e europeu, o tempo de aceleração também pode ser avaliado entre zero a 60 milhas/h (aproximadamente 96,6 km/h).

Em se tratando dos níveis de emissão de gases e consumo de energia em veículos leves, a norma ABNT NBR 7024:2017 estabelece os métodos de avaliação de automóveis convencionais, enquanto a ABNT NBR 16567:2020 define os parâmetros de avaliação de veículos elétricos e híbridos. No Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) utiliza-se dessas diretrizes no Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) para avaliar os veículos leves comercializados no Brasil nos quesitos:

- Emissão de gases poluentes (monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos);
- Quilometragem por litro (km/l) para veículos convencionais (movidos à gasolina ou etanol) e a equivalência em consumo de gasolina para elétricos e híbridos;
- Consumo energético (MJ/km);

Para veículos elétricos e híbridos PHEV, avalia-se a autonomia alcançada considerando trajetórias padronizadas. Como os simuladores utilizados foram desenvolvidos por agências norte-americanas, o ciclo de referência é o utilizado pela EPA, que adota uma combinação de percurso com 55% de características urbanas (FTP-75) e 45% de características rodoviárias (HWFET). No caso do veículo HEV escolhido, por ser comercializado apenas no mercado europeu, o ciclo de referência é o WLTP.

As ferramentas de simulação utilizadas permitem verificar o desempenho em níveis gerais e de componentes durante as trajetórias simuladas, tais como:

- Curvas de torque, rotação, eficiências média e instantânea dos MCI e motores elétricos;
- Variação do estado de carga e corrente do sistema de baterias de veículos híbridos e elétricos;
- Curvas de potência fornecida pelos sistemas de propulsão veicular, evidenciando a operação desses em diferentes momentos da trajetória;
- Perdas ocorridas nos sistemas internos do veículo (armazenamento de energia, propulsão e transmissão) e resistências ao movimento (aerodinâmica, subida e rolamento);
- Razão de utilização de energia da bateria e combustível fóssil em veículos híbridos;
- Consumo energético médio por distância, em kWh/km.

Dessa forma, para validação das modelagens realizadas, serão utilizados os parâmetros de desempenho dinâmico divulgados pelas montadoras dos veículos e fontes automotivas especializadas, assim como os quesitos de consumo de combustível do PBEV. Para análise de desempenho dos veículos, será avaliada a operação instantânea das baterias e sistemas de propulsão com o ADVISOR, enquanto que no FASTSim esses sistemas serão observados em termos de valores médios, além das perdas decorrentes de fatores dinâmicos (arraste, resistência ao rolamento e subida) e dos componentes dos veículos.

### **3.2.6 ESTAÇÕES DE RECARGA**

Utilizando o aplicativo PlugShare™, neste tópico será analisado o panorama atual das estações de recarga em Brasília. O primeiro objetivo será realizar o levantamento da quantidade de estações instaladas, os tipos de conectores disponíveis e a distribuição desses pontos ao longo dos trajetos percorridos.

Outro ponto abordado nesse tópico será o alcance de veículo puramente elétrico modelado nos diferentes trajetos realizados, considerando diferentes estados iniciais de carga. Assim, será obtida a carga mínima de bateria suficiente para completar os percursos, permitindo avaliar de forma quantitativa o *range anxiety* nas diferentes condições de tráfego em Brasília.

Por fim, serão levantadas as considerações qualitativas para expansão das estações de recarga na cidade. Dentre esses pontos, destacam-se os custo de aquisição e instalação das estações, modelos de negócio possíveis e legislação vigente.

### **3.2.7 ANÁLISE ECONÔMICA**

Para calcular os custos de combustível e energia elétrica consumidos nos trajetos, serão utilizados os valores médios praticados em Brasília no mês de setembro de 2021. O valor da gasolina comum será obtido mediante consulta Sistema de Levantamento de Preços (SLP), fornecido pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), enquanto o preço do quilowatt-hora será verificado na tabela de preços da Neoenergia Brasília, considerando os valores para tarifa convencional e consumidor no grupo B com consumo entre 201 e 300 kWh.

## **3.3 ESTAÇÕES DE RECARGA**

Utilizando o aplicativo PlugShare™, será verificado o panorama atual das estações de recarga em Brasília. O primeiro objetivo será realizar o levantamento da quantidade de estações já instaladas na cidade, os tipos de carregadores disponíveis e a distribuição desses pontos em diferentes tipos de estabelecimento.

Outro ponto abordado nesse tópico será o alcance de veículo puramente elétrico nos diferentes trajetos realizados, considerando diferentes estados iniciais de carga. Assim, será verificada a carga mínima de bateria suficiente para completar os percursos, permitindo avaliar de forma quantitativa a autonomia do veículo BEV.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ferramentas e metodologias descritas neste capítulo serão utilizados de modo a realizar amplo estudo da mobilidade convencional e elétrica em Brasília. De modo a garantir maior abrangência das análises realizadas, foram utilizados dois *softwares* de modelagem e simulação automotiva, sendo descritos os parâmetros dos sistemas veiculares. Baseando-se em quesitos avaliativos já utilizados por agências reguladoras e fontes automotivas especializadas, foram definidos os pontos de validação dos modelos construídos, além dos parâmetros de análise da operação dos componentes veiculares ao longo dos trajetos estabelecidos. Para a análise econômica, os custos relativos à aquisição e propriedade dos veículos estudados no período de um ano foram considerados.

Por último, foram descritos os pontos de análise do contexto das estações de recarga, considerando distribuição, características e expansão, além de análise da autonomia do veículo elétrico para diferentes níveis de carga inicial. No Capítulo 4, serão mostrados os resultados das simulações, as análises de desempenho, levantamento das estações de recarga em Brasília e o estudo da autonomia do veículo BEV.

# 4 RESULTADOS

## 4.1 OBTENÇÃO DOS *DRIVE CYCLES*

Nesta etapa, serão mostrados os ciclos de condução obtidos das trajetórias de referência, como também suas variações de altitude. Posteriormente, suas características são descritas, buscando-se identificar os fatores que influenciam seus perfis de velocidade. Todos os trajetos foram percorridos em horários que favorecessem a condução contínua do veículo, sendo esses mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Datas e horários da obtenção dos percursos.

Trajetos	Data	Horário Inicial	Horário Final
UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia	11/05/2021	10:19:59	11:14:54
UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina	07/05/2021	15:52:56	16:34:06
UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama	11/05/2021	15:29:06	16:08:47
Valparaíso-GO - UnB Planaltina	12/05/2021	14:41:10	15:39:46

Fonte: Autoria Própria, 2021.

### 4.1.1 UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia (FCE)

O trajeto realizado entre a UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia é ilustrado na Figura 4.1:

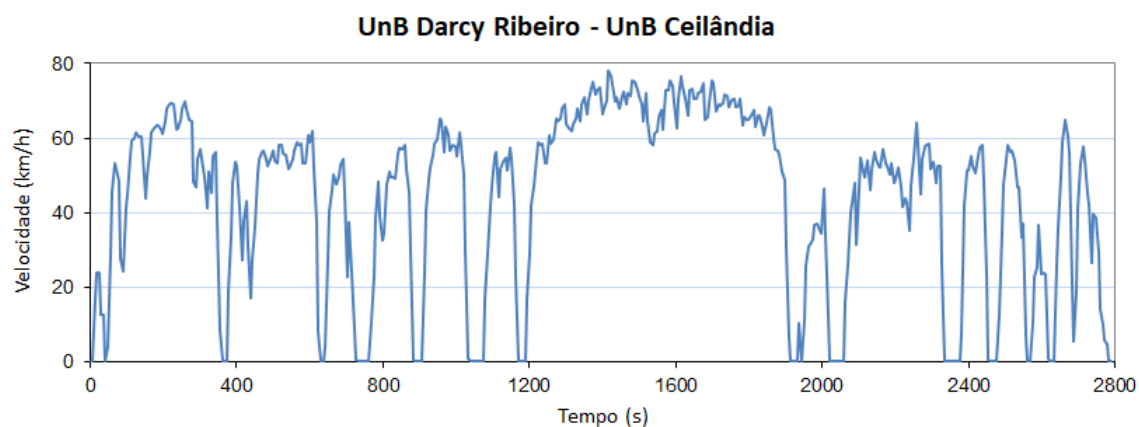
Figura 4.1 – Trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia.



Fonte: Autoria Própria, 2021.

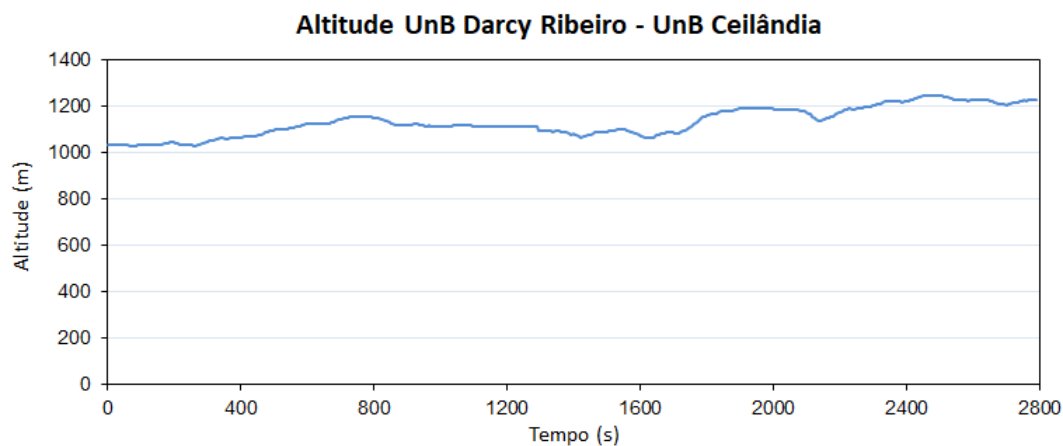
O ciclo de condução, elevações do percurso e histograma de velocidades são mostrados nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

Figura 4.2 – Ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia



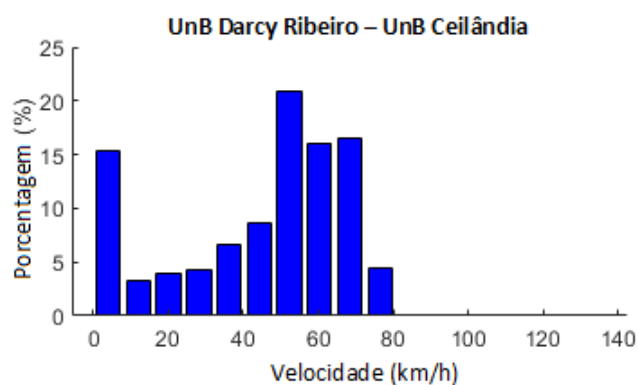
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.3 – Altitude do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.4 – Histograma de velocidades UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia.



Fonte: Autoria Própria, 2021.

As características gerais do percurso se encontram na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Estatísticas do ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia

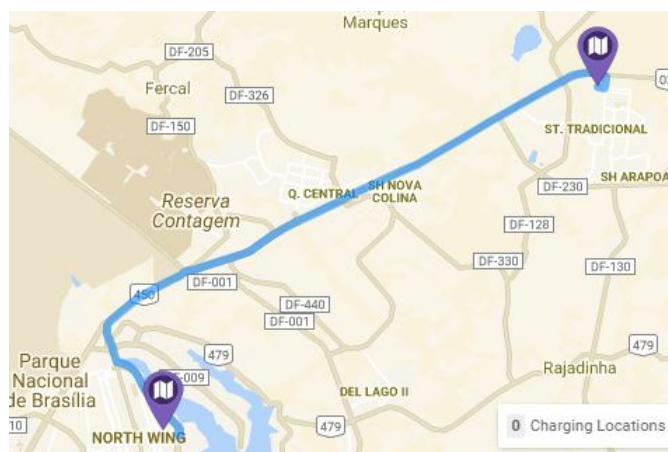
Grandeza	Valor
Tempo	46,5 min
Distância	34,14 km
Velocidade Máxima	78,16 km/h
Velocidade Média	44,04 km/h
Aceleração Máxima	1,57 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração Máxima	-1.62 m/s <sup>2</sup>
Aceleração Média	0,28 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração Média	-0.31 m/s <sup>2</sup>
Tempo Parado	262 s
Número de Paradas	14

Fonte: Autoria Própria, 2021.

#### 4.1.2 UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina (FUP)

O percurso utilizado na realização da trajetória entre a UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina é mostrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina.

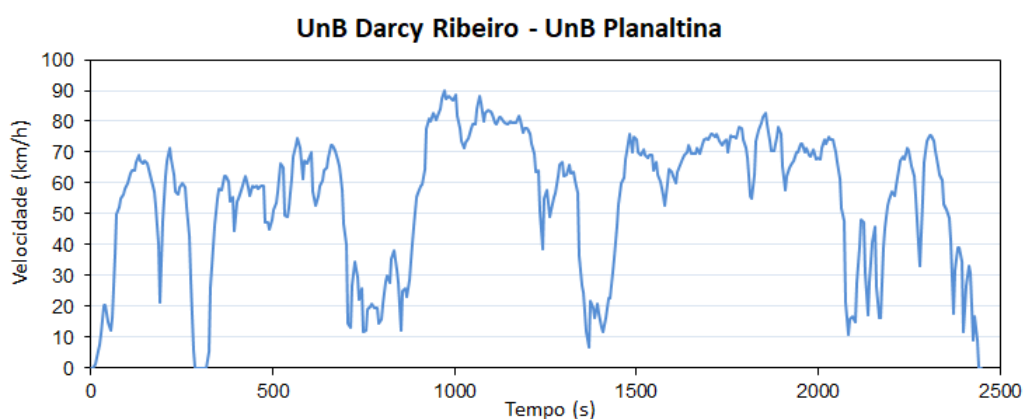


Fonte: Autoria Própria, 2021.

O ciclo de condução, elevações do percurso e histograma de velocidades são ilustrados, respectivamente, nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8.

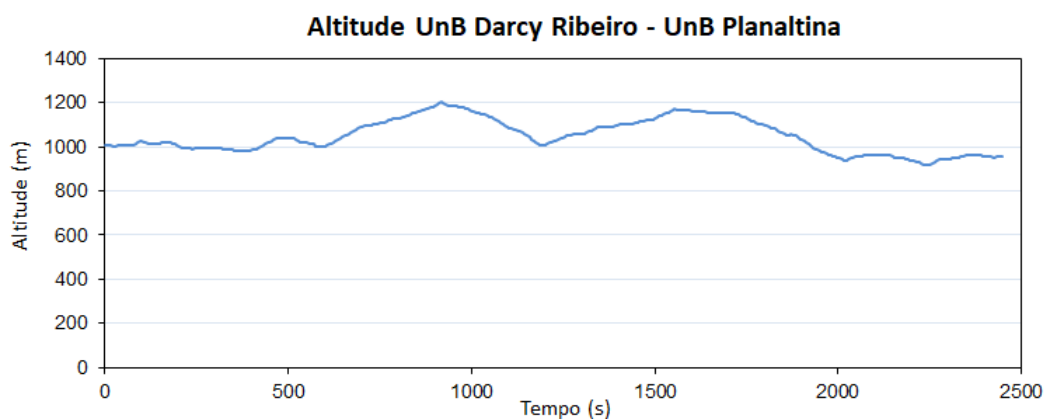


Figura 4.6 – Ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina



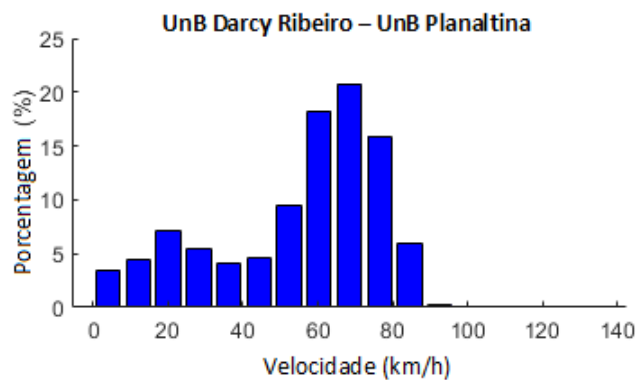
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.7 – Altitude do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.8 – Histograma de velocidades UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina.



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A Tabela 4.3 mostra as informações gerais do percurso.

Tabela 4.3 – Estatística ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina

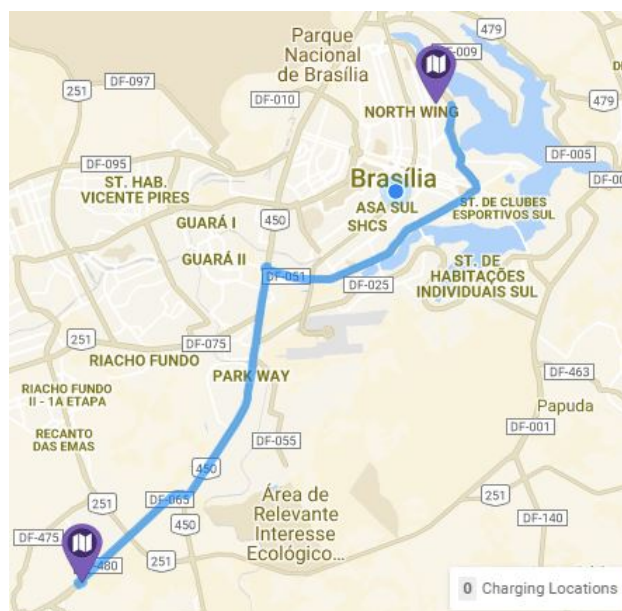
Grandeza	Valor
Tempo	42,9 min
Distância	37,27 km
Velocidade Máxima	89,85 km/h
Velocidade Média	54,79 km/h
Aceleração Máxima	1,21 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração Máxima	-1,22 m/s <sup>2</sup>
Aceleração Média	0,21 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração Média	-0,22 m/s <sup>2</sup>
Tempo Parado	45 s
Número de Paradas	1

Fonte: Autoria Própria, 2021.

#### 4.1.3 UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama (FGA)

Para o trajeto entre a UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama, a rota percorrida é mostrada na Figura 4.9.

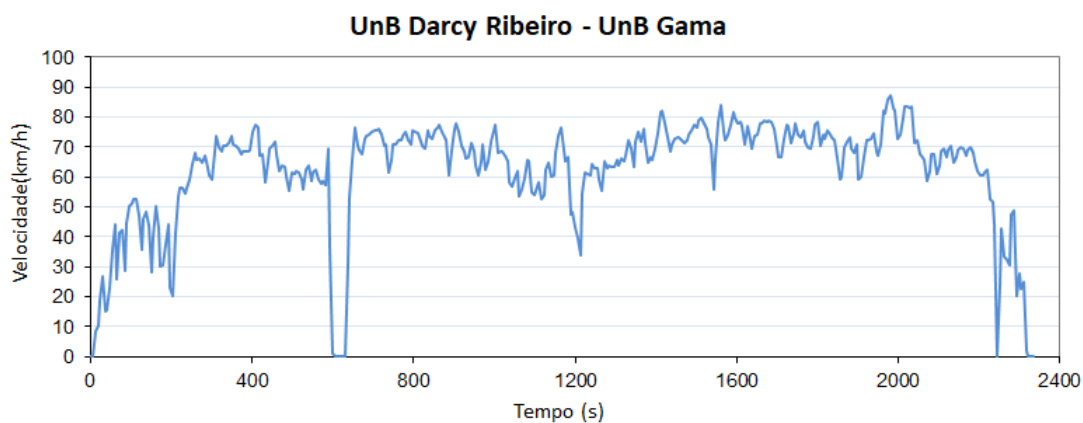
Figura 4.9 – Trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama.



Fonte: Autoria Própria, 2021.

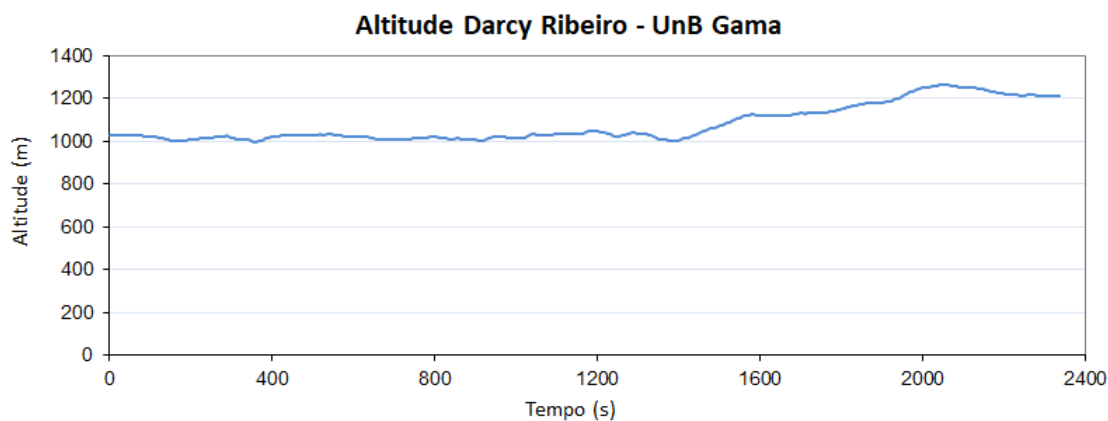
O ciclo de condução, elevações do percurso e histograma de velocidades são representados nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12.

Figura 4.10 – Ciclo UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama



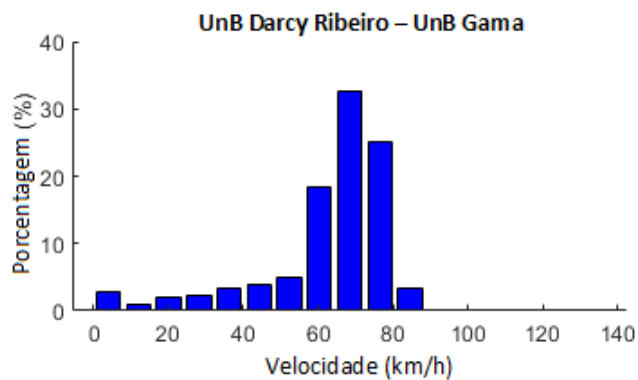
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.11 – Altitude do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.12 – Histograma de velocidades UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama.

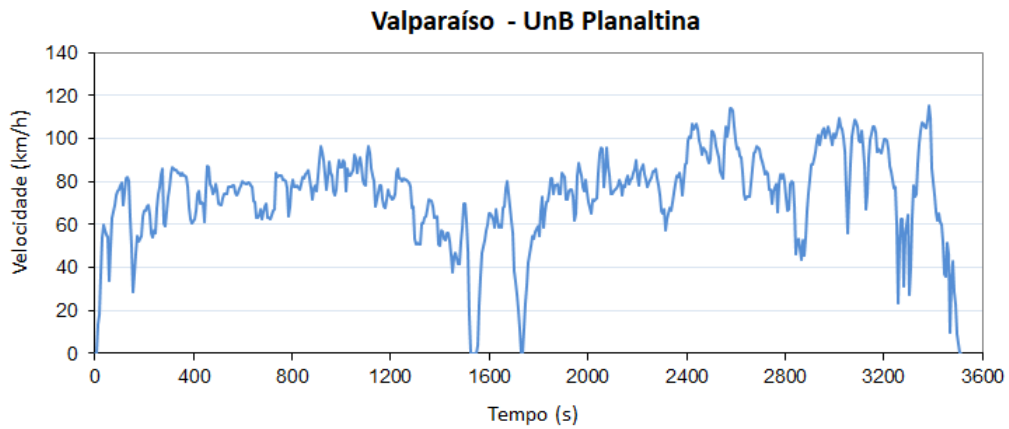


Fonte: Autoria Própria, 2021.

A Tabela 4.4 mostra as características gerais do percurso.

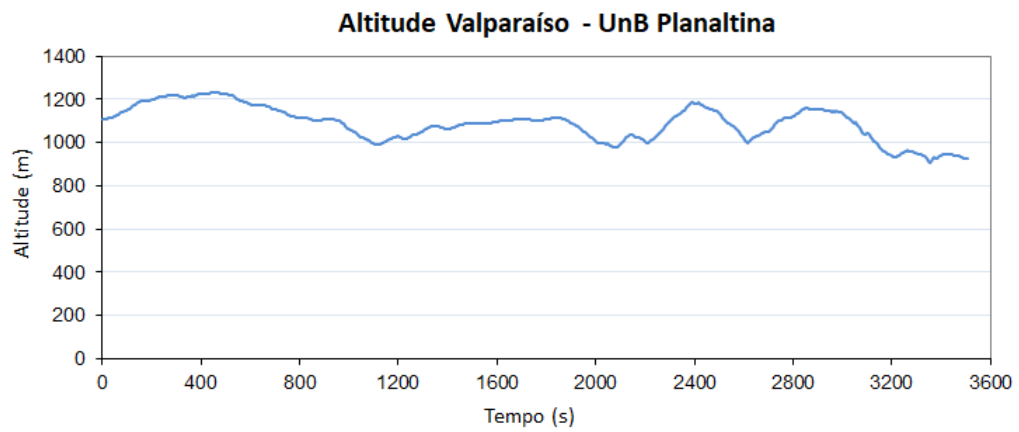


Figura 4.14 – Ciclo Valparaíso-GO - UnB Planaltina



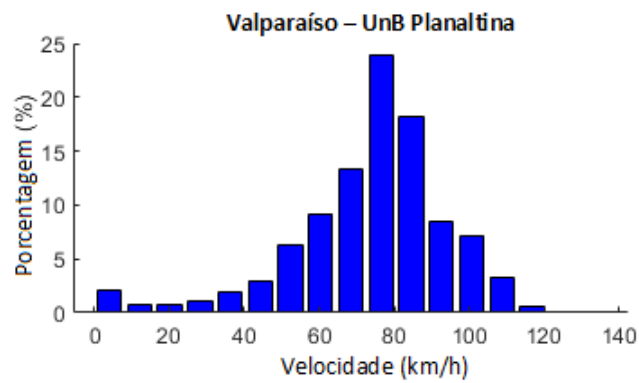
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.15 – Altitude do trajeto Valparaíso-GO - UnB Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.16 – Histograma de velocidades Valparaíso-GO - UnB Planaltina.



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para esse trajeto, as características gerais são mostradas na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Estatística ciclo Valparaíso-GO - UnB Planaltina

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>
Tempo	58,5 min
Distância	71,73 km
Velocidade Máxima	115,27 km/h
Velocidade Média	73,55 km/h
Aceleração Máxima	1,32 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração Máxima	-1,71 m/s <sup>2</sup>
Aceleração Média	0,25 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração Média	-0,24 m/s <sup>2</sup>
Tempo Parado	40 s
Número de Paradas	4

Fonte: Autoria Própria, 2021.

## **4.1.5 ANÁLISE COMPARATIVA**

### **4.1.5.1 NÚMERO DE PARADAS**

Para fins de contagem, foram consideradas as paradas ocorridas durante o trajeto, sendo excluídos seus pontos iniciais e finais. É influenciado, principalmente, pelas características dos trechos do percurso (urbanos ou rodoviários), número de semáforos em cada trecho, faixas de pedestres e condições de trânsito nos horários da realização dos trajetos, mostrados na Tabela 4.1.

Dentre os itinerários realizados, o trajeto UnB Darcy Ribeiro – UnB Ceilândia (FCE) destacou-se com a ocorrência de 14 paradas, sendo esse o de maior característica urbana. Além da grande quantidade de semáforos ao longo do trajeto, a realização de uma obra de grande extensão em um de seus trechos (construção do túnel de Taguatinga), também contribuiu para a contagem obtida. O tempo total parado desse percurso foi de 4 minutos e 22 segundos.

Nos demais trajetos, o número de paradas contabilizadas ficou em 2, devido às características predominantemente rodoviárias de seus trechos, além de baixo número de dispositivos de controle de tráfego como semáforos e faixas de pedestres. Em todos esses percursos, o tempo parado ficou abaixo de 1 minuto.

#### 4.1.5.2 VELOCIDADES MÉDIA E MÁXIMA

Foram avaliados fatores influenciados, principalmente, pelas características dos trechos do percurso (urbana ou rodoviária), velocidades máximas permitidas e condições de trânsito no horário da realização dos trajetos.

Ressalta-se que, mesmo com características rodoviárias, alguns dos trechos percorridos apresentaram maiores fluxos de tráfego, além de maiores quantidades de dispositivos como ondulações transversais (quebra-molas) e radares eletrônicos. Essas constatações foram observadas nas proximidades das regiões administrativas. Isso influenciou o perfil de velocidades desenvolvidas e, por consequência, as velocidades médias e máximas alcançadas foram afetadas.

Verificou-se que, nos trajetos com baixo número de paradas, as velocidades médias foram maiores, estando em um intervalo entre 54,79 e 73,55 km/h. Observa-se que os percursos de maior extensão (Valparaíso-GO - UnB Planaltina e UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama) também apresentaram velocidades médias maiores.

As maiores velocidades máximas registradas também foram observadas nos percursos de maior extensão. Isso se deve a fatores como maior quantidade de trechos rodoviários percorridos, condições favoráveis para o desenvolvimento de altas velocidades e ausência de dispositivos de controle de tráfego em alguns trechos.

#### 4.1.5.3 ACELERAÇÕES E DESACELERAÇÕES

Características influenciadas principalmente por ultrapassagens, reduções e retomadas de velocidade pela interação com dispositivos de controle de tráfego (semáforos, faixas de pedestres, lombadas e radares eletrônicos de velocidade) e condições de trânsito no horário da realização dos trajetos.

A aceleração máxima ocorreu no percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia, já que esse apresentou as maiores características urbanas dentre os trajetos realizados. Isso se relaciona ao maior número de paradas: ao partir do repouso, é exigido maior torque do motor do veículo. Esse torque é diretamente proporcional à aceleração angular experimentada pelas rodas do veículo, acarretando também em maior aceleração linear. Maiores variações de velocidade tendem a ocorrer nos instantes em que o veículo parte do repouso, ocorrendo com maior frequência nos trajetos de características urbanas.

A menor média verificada ocorreu no percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama, devido às menores variações de velocidade. Já a maior média ocorreu entre o campus UnB Darcy Ribeiro e Ceilândia, devido ao grande número de paradas.

Em se tratando das desacelerações, a máxima observada ocorreu entre UnB Darcy Ri-

beiro - UnB Gama, seguida do trajeto entre Valparaíso-GO - UnB Planaltina. Ambas as trajetórias são predominantemente rodoviárias, e fatores como condições de trânsito e estilo de direção do condutor, com reações de frenagens bruscas frente às situações ocorridas durante o percurso estão relacionados com esse resultado.

A maior média de desaceleração ocorreu entre UnB Darcy Ribeiro - Ceilândia. De forma análoga à aceleração média positiva, o fator de maior relevância para esse resultado se deve ao maior número de paradas, distribuídas ao longo do percurso. Já a menor média verificada foi no trajeto entre UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina e UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama.

#### 4.1.5.4 PERFIL DE ELEVAÇÕES

Os quatro percursos realizados apresentaram diferentes perfis de elevação. Os trajetos finalizados na UnB Planaltina apresentaram características predominantemente descendentes, enquanto os demais foram finalizados em pontos de altitude maior que a dos lugares de partida. Dentre esses, a subida mais elevada ocorreu no trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia, enquanto o itinerário UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama apresentou elevações mais próximas ao final do percurso.

## 4.2 VALIDAÇÃO DOS MODELOS SIMULADOS

Neste tópico, os modelos construídos serão comparados com suas versões de referência, com o objetivo de avaliar a acurácia da simulação nos parâmetros dinâmicos, autonomia e consumo de combustível e/ou energia elétrica (ciclo urbano e rodoviário). Os aspectos construtivos dos veículos considerados para simulação são mostrados na Tabela 4.6 (AUTO ESPORTE COLUNISTAS,2018; CAR INFO,2021; VOLKSWAGEN,2019; PRESSROM CHEVROLET,2020).



Tabela 4.6 – Características construtivas dos veículos

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Massa (kg)	1062	1125	1615	1616
Coef. Aerodinâmico (Cd)	0,35	0,286	0,275	0,308
Área Frontal (m <sup>2</sup> )	2,14	2,05	2,12	2,25
Dist. entre eixos ( <i>wheelbase</i> )	2,53	2,56	2,63	2,6
Bateria - Tecnologia	-	Li-ion	Li-ion	Li-ion
Bateria - Capacidade (kWh)	-	0,76	8,8	66
MCI - Potência (kW)	72,1 a 6.000 rpm	67 a 5.500 rpm	110 a 5.000 - 6000 rpm	-
MCI - Torque (N.m)	127 a 4.800 rpm	120 a 3.800 rpm	250 a 1.500 - 3.500 rpm	-
Maq. Elétrica - Tecnologia	-	PMSM	PMSM	PMSM
Maq. Elétrica - Potência (kW)	-	59	75	150
Maq. Elétrica - Torque (N.m)	-	141	330	330
Tração	Dianteira	Dianteira	Dianteira	Dianteira
Transmissão	Manual, 6 marchas	CVT	Automática, 6 marchas	Automática, 1 marcha
Pneus - Tipo	185/65 R15	185/65 R16	225/45 R17	215/50 R17
Pneus - Raio (m)	0,311	0,311	0,317	0,323

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para os veículos HEV, PHEV e BEV, o quesito aceleração será analisado considerando-se o tempo de zero até 60 milhas por hora (aproximadamente 96,6 km/h), uma vez que as referências obtidas utilizam essa unidade (MOTOR TREND,2020; EVO,2018; WHAT CAR,2021). As unidades de consumo de combustível utilizadas pelo FASTSim™ (*mppge - miles per gallon of gasoline equivalent*) e ADVISOR® (Litros por 100 km) são convertidas em Quilômetros por litro (km/l), unidade mais comum no Brasil, pelas seguintes equações:

$$Consumo(km/l) = \frac{mppge}{2,352} \quad (4.1)$$

$$Consumo(km/l) = \frac{100}{l/100km} \quad (4.2)$$

Para a conversão de milha para quilômetro, utiliza-se:

$$km = \frac{milhas}{0,6214} \quad (4.3)$$

Para os veículos BEV e PHEV em modo 100% elétrico, como não há consumo de combustíveis fósseis, utiliza-se uma equivalência em consumo de gasolina para possibilitar a comparação com os veículos convencionais e HEV. Assim, considerando que um litro de gasolina possui 8,9 kWh de energia (NRCAN,2021), o equivalente em litros da energia elétrica utilizada em um percurso é dado por:

$$Litros - equiv. = \frac{Consumo Energético (kWh)}{8,9} \quad (4.4)$$

O consumo equivalente, em km/l, é dado por:

$$Consumo(km/l) = \frac{Dist. \text{ percurso } (km)}{Litros - equiv.} \quad (4.5)$$

Substituindo 4.4 em 4.5, tem-se:

$$Consumo(km/l) = 8,9 \cdot \frac{Dist. \text{ percurso } (km)}{Consumo \text{ Energético } (kWh)} \quad (4.6)$$

#### 4.2.1 Veículo Convencional - Chevrolet Onix LT 1.4 2019

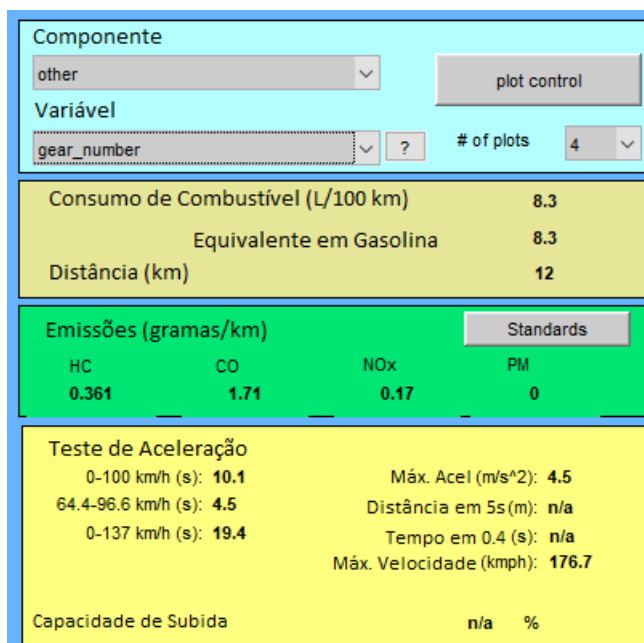
Para o veículo convencional, os resultados das simulações no FASTSim™ e ADVISOR® são mostrados nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19.

Figura 4.17 – FASTSim™ Chevrolet Onix LT 1.4

	A	C
212		
213	<b>Economia de Combustível Ajustada</b>	
214		Resultados
229	Cidade (mpgge)	34,0
230	Estrada (mpgge)	41,7
231	Combinação (mpgge)	37,1
243		
244	<b>Desempenho</b>	
245		Resultados
246	0-60 milhas por hora (s)	9,5
247	Autonomia para veículo PHEV (milhas)	
248	Autonomia (milhas)	523
249		

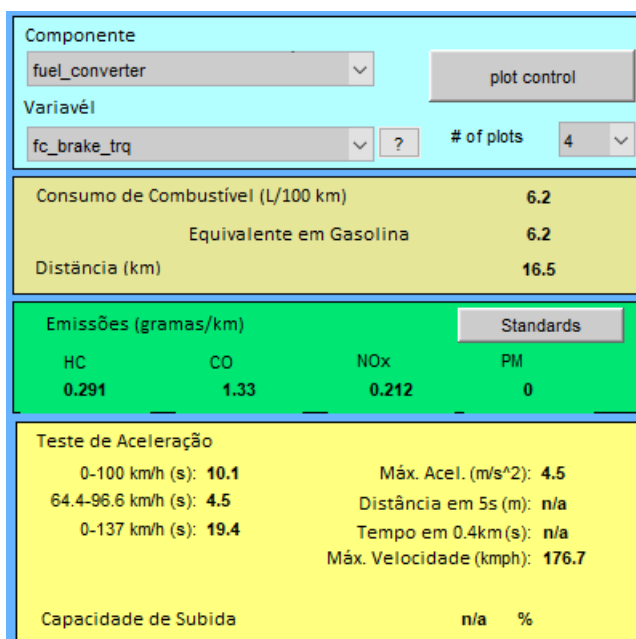
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.18 – ADVISOR® Ciclo Urbano Chevrolet Onix LT 1.4



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.19 – ADVISOR® Ciclo Rodoviário Chevrolet Onix LT 1.4



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A Tabela 4.7 mostra os resultados e erros de simulação obtidos para o veículo convencional.

Tabela 4.7 – Resultados da validação para o veículo convencional

Parâmetro	Referência	FASTSim™	Erro FASTSim™	ADVISOR®	Erro ADVISOR®
Aceleração 0-100 km/h (s)	10,5	9,5	9,52%	10,1	3,81%
Velocidade Máxima (km/h)	180	-	-	176,7	1,83%
Consumo Cidade (km/l)	12,4	14,45	16,53%	12,05	2,82%
Consumo Estrada (km/l)	14,9	17,72	18,92%	16,13	8,26%
Autonomia (km)	805	841,7	4,24%	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

#### 4.2.2 Veículo HEV - Toyota Yaris XP21

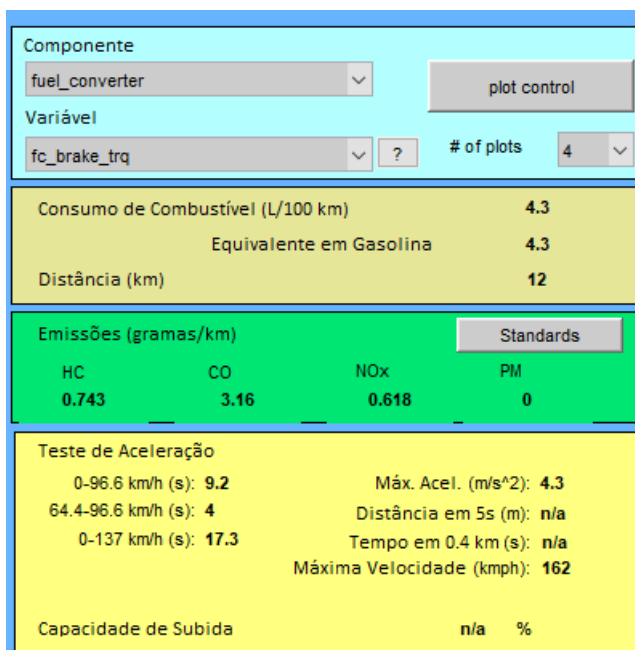
Os resultados da simulação para o veículo HEV são mostrados nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

Figura 4.20 – Validação FASTSim™ Toyota Yaris XP21

	A	C
212		
213	<b>Economia de Combustível Ajustada</b>	
214		Resultados
229	Cidade (mpgge)	49,3
230	Estrada (mpgge)	54,7
231	Combinação (mpgge)	51,6
243		
244	<b>Desempenho</b>	
245		Resultados
246	0-60 milhas por hora (s)	9,0
247	Autonomia para veículo PHEV (milhas)	
248	Autonomia (milhas)	515
249		

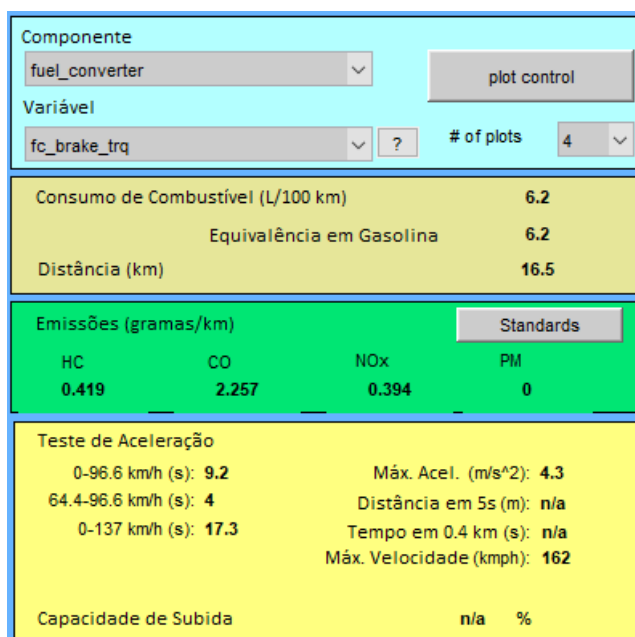
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.21 – ADVISOR® Ciclo Urbano Toyota Yaris XP21



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.22 – ADVISOR® Ciclo Rodoviário Toyota Yaris XP21



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultados da validação para o veículo HEV

Parâmetro	Referência	FASTSim™	Erro FASTSim™	ADVISOR®	Erro ADVISOR®
Aceleração 0-60 mph (s)	9,7	9	7,22%	9,2	5,15%
Velocidade Máxima (km/h)	175	-	-	162	7,43%
Consumo Cidade (km/l)	19,03	20,96	10,14%	23,25	22,18%
Consumo Estrada (km/l)	19,92	23,25	16,72%	16,13	19,03%
Autonomia Combinada (km)	1000	828,81	17,12%	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

### 4.2.3 Veículo PHEV - Volkswagen Golf GTE 1.4 2019

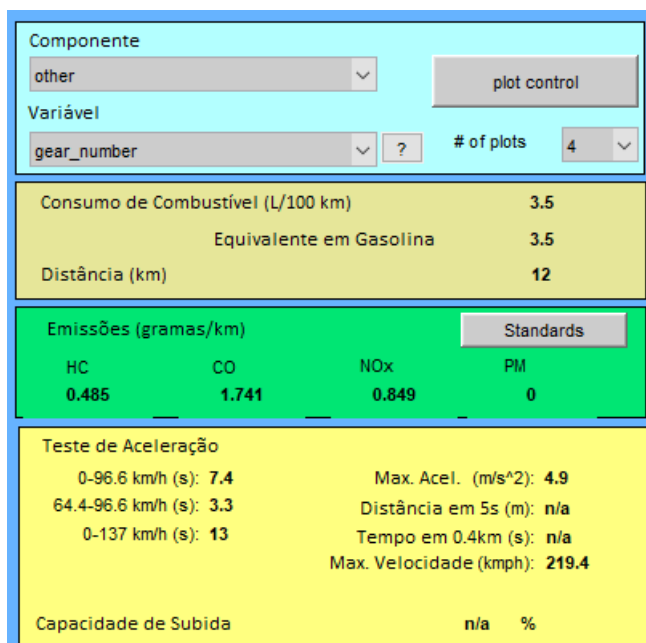
Para o veículo PHEV, os resultados da simulação são mostrados nas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25.

Figura 4.23 – Validação FASTSim™ Golf GTE 1.4

	A	C
212		
213	<b>Economia de Combustível Ajustada</b>	Resultados
229	Cidade (mpgge)	79,3
230	Estrada (mpgge)	92,9
231	Combinação (mpgge)	84,9
232		
244	<b>Desempenho</b>	Resultados
245		
246	0-60 milhas por hora (s)	7,4
247	Autonomia para veículo PHEV (milhas)	27,3
248	Autonomia (milhas)	475

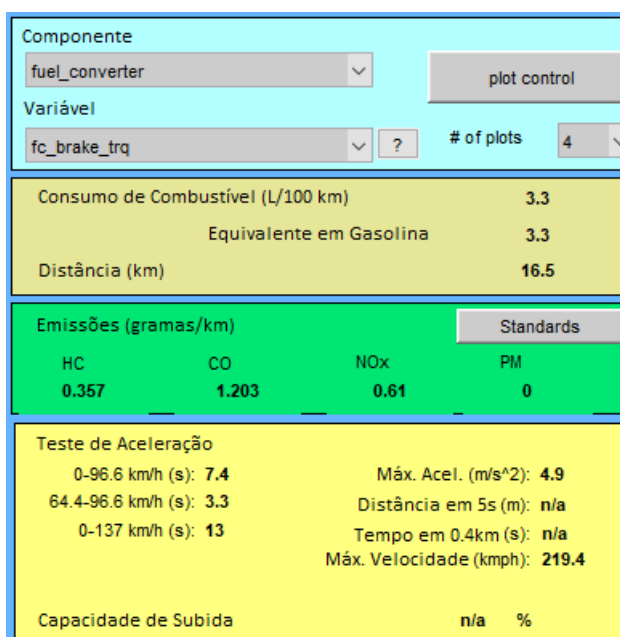
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.24 – ADVISOR® Ciclo Urbano Golf GTE 1.4



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.25 – ADVISOR® Ciclo Rodoviário Golf GTE 1.4



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A Tabela 4.9 mostra os valores obtidos na simulação do veículo PHEV.

Tabela 4.9 – Resultados da validação para veículo PHEV

Parâmetro	Referência	FASTSim™	Erro FASTSim™	ADVISOR®	Erro ADVISOR®
Aceleração 0-60 mph (s)	7,6	7,4	2,63%	7,4	2,63%
Velocidade Máxima (km/h)	222	-	-	219,4	1,17%
Consumo Cidade (km/l. equivalente)	30,3	33,71	11,25%	28,57	5,71%
Consumo Estrada (km/l. equivalente)	32,2	39,49	22,64%	30,3	5,90%
Autonomia Elétrica (km)	39,1	43,93	12,35%	-	-
Autonomia Combinada (km)	880	764,44	13,13%	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

#### 4.2.4 Veículo BEV - Chevrolet Bolt EV 2020

OS resultados das simulações para o veículo BEV são mostrados nas Figuras 4.26, 4.27 e 4.28.

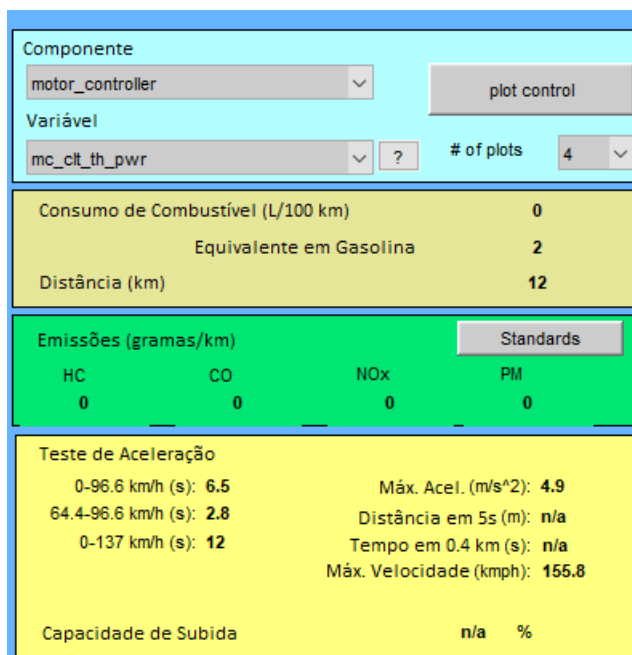
Figura 4.26 – Validação FASTSim™ Chevrolet Bolt EV

	A	C
212		
213	<b>Economia de Combustível Ajustada</b>	
214		Resultados
215	Autonomia - Cidade (milhas)	246,06
216	Autonomia - Estrada (milhas)	231,97
217		
240	Consumo de Energia - Cidade (kWh/km)	0,160
241	Consumo de Energia - Estrada (kWh/km)	0,169
242	Consumo de Energia - Combinado (kWh/km)	0,164
243		
244	<b>Desempenho</b>	
245		Resultados
246	0-60 milhas por hora (s)	6,6
247	Autonomia para veículo PHEV (milhas)	
248	Autonomia (milhas)	240
249		

Fonte: Autoria Própria, 2021.

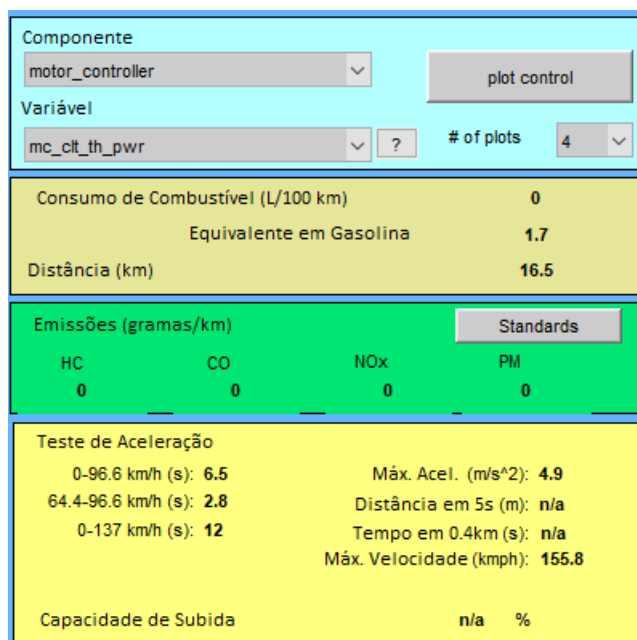


Figura 4.27 – ADVISOR® Ciclo Urbano Chevrolet Bolt EV



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.28 – ADVISOR® Ciclo Rodoviário Chevrolet Bolt EV



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Os parâmetros de validação obtidos nas simulações se encontram na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resultados validação veículo BEV

Parâmetro	Referência	FASTSim™	Erro FASTSim™	ADVISOR®	Erro ADVISOR®
Aceleração 0-60 mph (s)	6,3	6,6	4,76%	6,5	3,17%
Velocidade Máxima (km/h)	150	-	-	155,6	3,73%
Consumo Cidade (km/l equivalente)	54	57,54	6,56%	50	7,41%
Consumo Estrada (km/l equivalente)	45,92	48,08	4,70%	58,82	28,09%
Autonomia Elétrica (km)	416	410,38	1,35%	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Após a realização das simulações, verifica-se que, para os parâmetros dinâmicos avaliados, os modelos projetados no ADVISOR® apresentaram erros menores que 5%, com exceção do veículo PHEV (7,14 % de erro para velocidade máxima). Por outro lado, as modelagens do FASTSim™ possuíam erros menores que 10%, decrescentes à medida em que o nível de eletrificação dos veículos aumentou. Essa diferença de precisão se deve ao maior grau de detalhamento permitido pelo ADVISOR® em relação ao FASTSim™, sendo possível ajustar quantidades maiores de parâmetros dos sistemas elétricos (bateria e máquina elétrica) e mecânicos (transmissão manual, automática ou CVT e número de marchas) dos veículos modelados. Em ambos os simuladores, a modelagem do inversor é feita somente à nível de eficiência, já incorporada à da máquina elétrica. Assim, não é possível avaliar diferentes topologias e formas de controle para esse dispositivo.

Para os parâmetros de consumo de combustível, observam-se erros majoritariamente entre 2% e 8% no ADVISOR® e acima de 10% no FASTSim™, chegando ao máximo de 28%. O ciclo rodoviário apresenta erros maiores para três dos quatro veículos modelados nos dois simuladores. Erros dessas magnitudes foram também observados por Silva (2017) e Nassif (2019) em validações de modelos utilizando o ADVISOR®. Como esses parâmetros influenciam a análise econômica dos veículos nesses trajetos, os custos ocorridos nos trajetos serão obtidos nos dois simuladores.

### 4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO

Nessa seção, a operação dos veículos modelados será analisada nos trajetos obtidos. Para ambos os simuladores, as seguintes considerações foram feitas (BROOKER ET AL, 2015):

- Temperatura ambiente constante e igual à 25° C;
- Bateria com carga inicial em 100% nos veículos HEV, PHEV e BEV;
- Cargas auxiliares com potência de 700 W;
- Massa adicional de 136 kg, representando passageiros e outras cargas transportadas;

- Eficiência de 90% da frenagem regenerativa para velocidades acima de 20 km/h nos veículos HEV, PHEV e BEV.

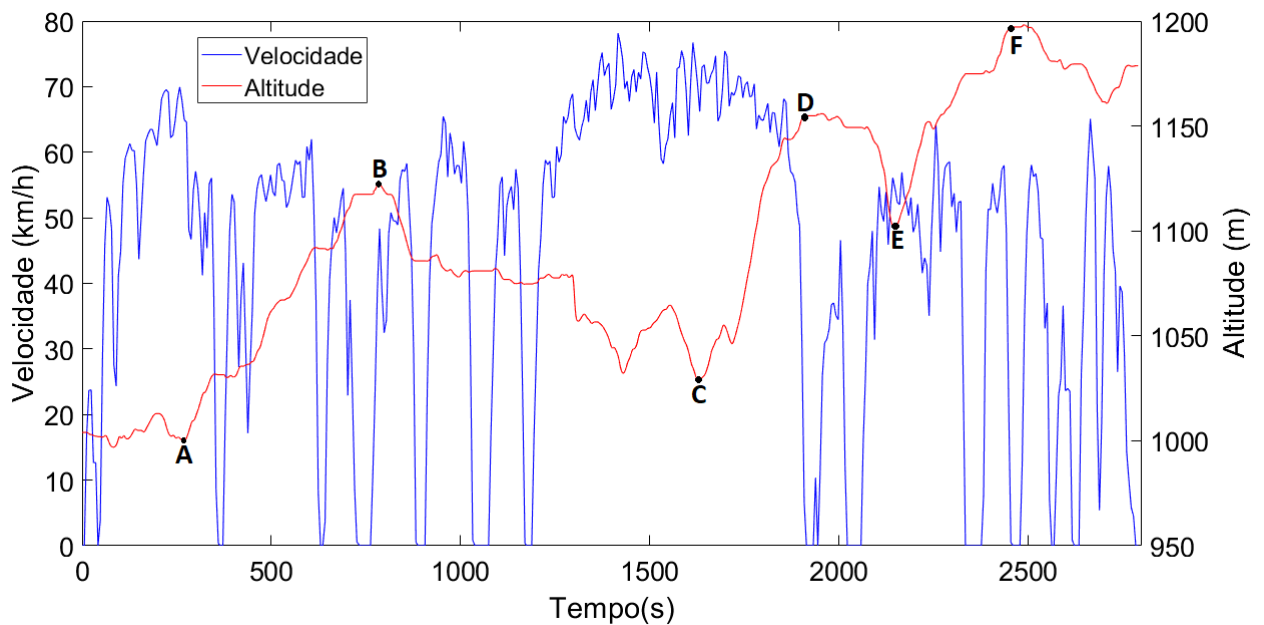
Após pesquisa no SLP e na tabela de preços da Neenergia Brasília, os valores de combustível e energia elétrica praticados durante o mês de setembro de 2021, em Brasília, foram:

- Gasolina Comum: R\$ 6,393/litro;
- Energia Elétrica: R\$ 0,856/kWh.

#### 4.3.1 UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia (FCE)

Para auxiliar as análises realizadas, o ciclo de condução e a altitude do trajeto foram agrupados na Figura 4.29.

Figura 4.29 – Ciclo de condução e altitude UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir dos pontos indicados, foram definidos três segmentos de referência: Trecho A-B, Trecho C-D e Trecho E-F. Suas coordenadas são mostradas na Tabela 4.11:

Tabela 4.11 – Pontos de referência de altitude UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia

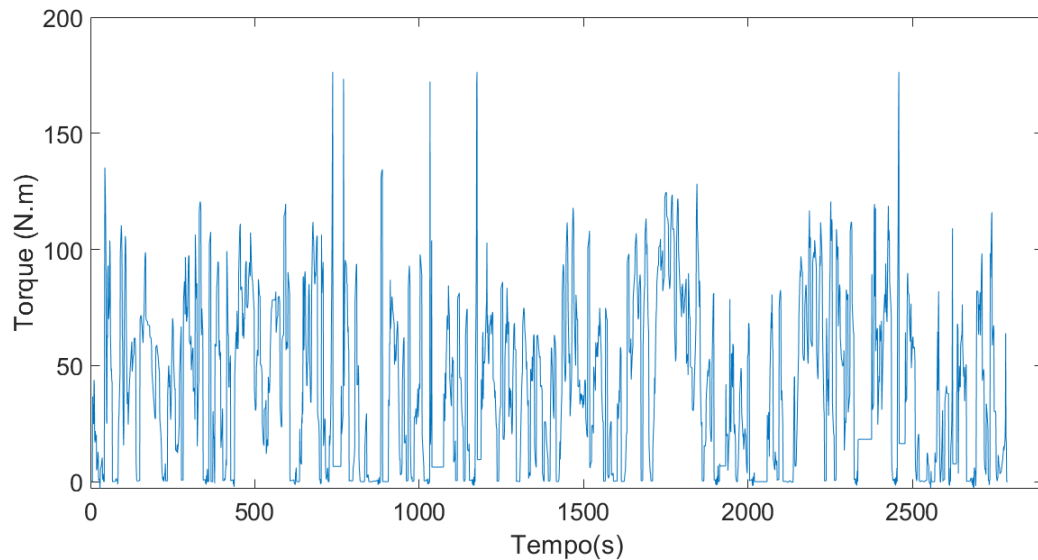
Ponto	Tempo (s)	Altitude (m)
A	273	1000
B	784	1123
C	1719	1046
D	1906	1155
E	2147	1102
F	2451	1197

Fonte: Autoria Própria, 2021.

#### 4.3.1.1 ADVISOR®

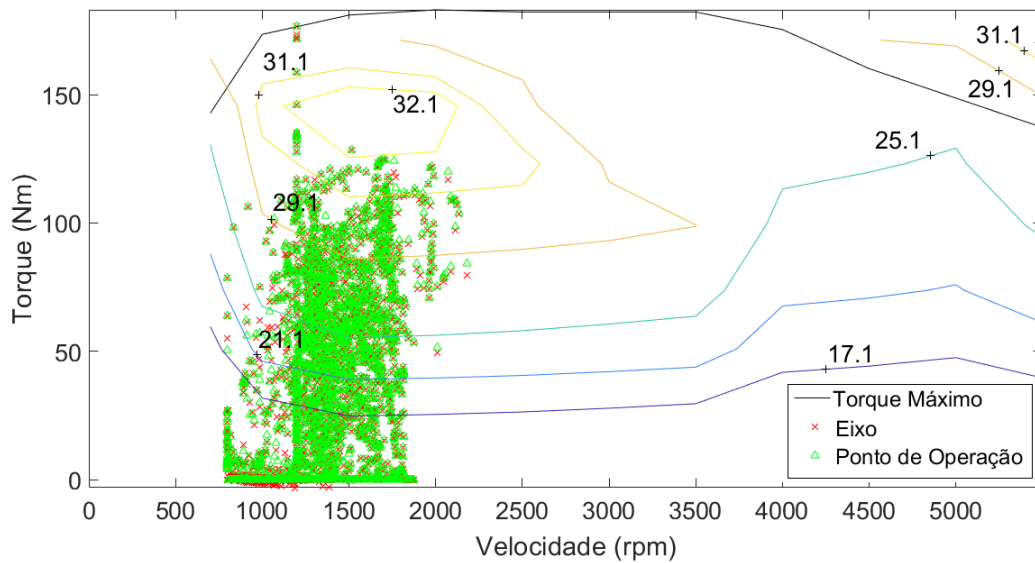
Após a simulação do trajeto, as curvas de torque obtidas para o veículo convencional são mostradas nas Figuras 4.30 e 4.31.

Figura 4.30 – Torques do trajeto para veículo convencional - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.31 – Curva de torque-velocidade MCI veículo convencional - Ceilândia (ADVISOR®)

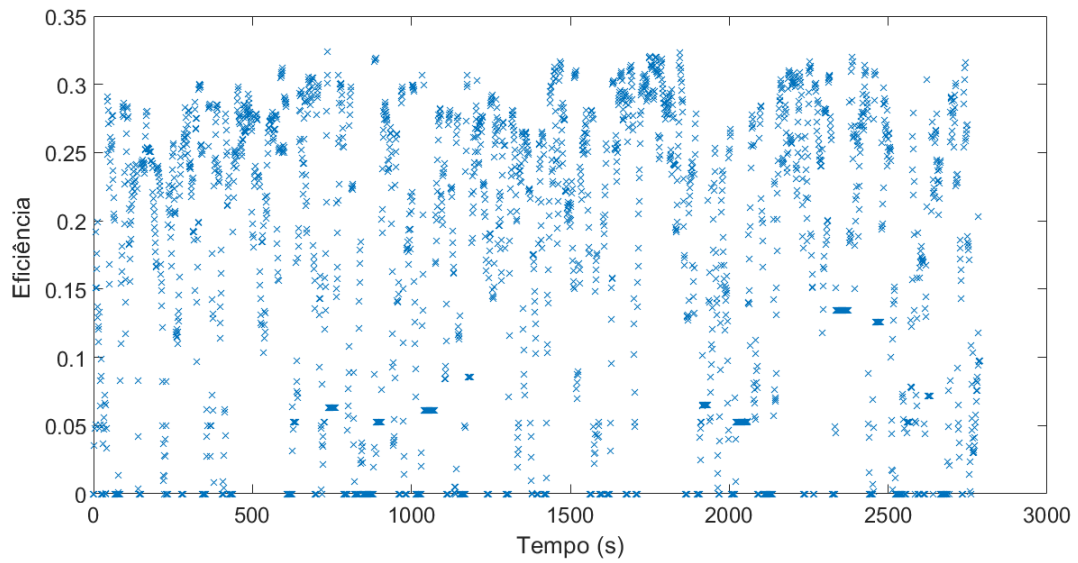


Fonte: Autoria Própria, 2021.

Na Figura 4.30, observa-se a ocorrência dos maiores valores de torque em três intervalos distintos: primeiro entre 500 e 1000 segundos, seguido do período entre 1000 e 1200 segundos e, por fim, próximo ao instante de 2500 segundos. Segundo a Figura 4.29, o primeiro intervalo corresponde ao Trecho A-B, que possui altas ocorrências de paradas e altitude crescente. O segundo período, apesar de possuir característica plana de altitude, também apresenta um trecho com alta incidência de paradas, assim como ocorre para o último pico de torque, verificado ao final do Trecho E-F.

Pela Figura 4.31, é possível verificar a predominância da operação do MCI em baixas rotações, estando seus pontos concentrados entre 1000 e 2000 rpm. As intensidades observadas de torque foram majoritariamente até 120 N.m, com poucos pontos isolados acima desse intervalo. A Figura 4.32 mostra os pontos de eficiência do MCI verificados ao longo do percurso.

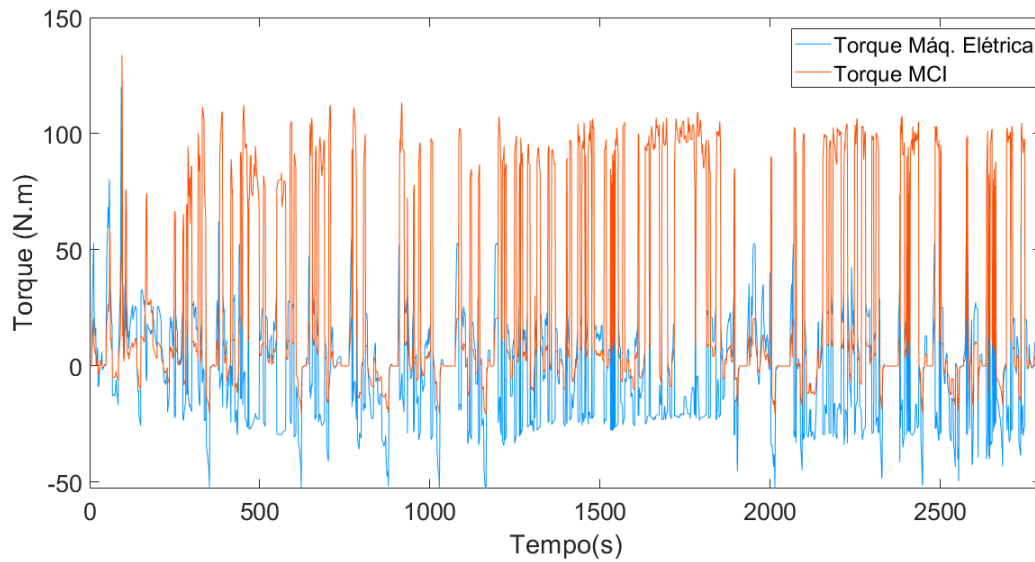
Figura 4.32 – Eficiência MCI veículo convencional - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

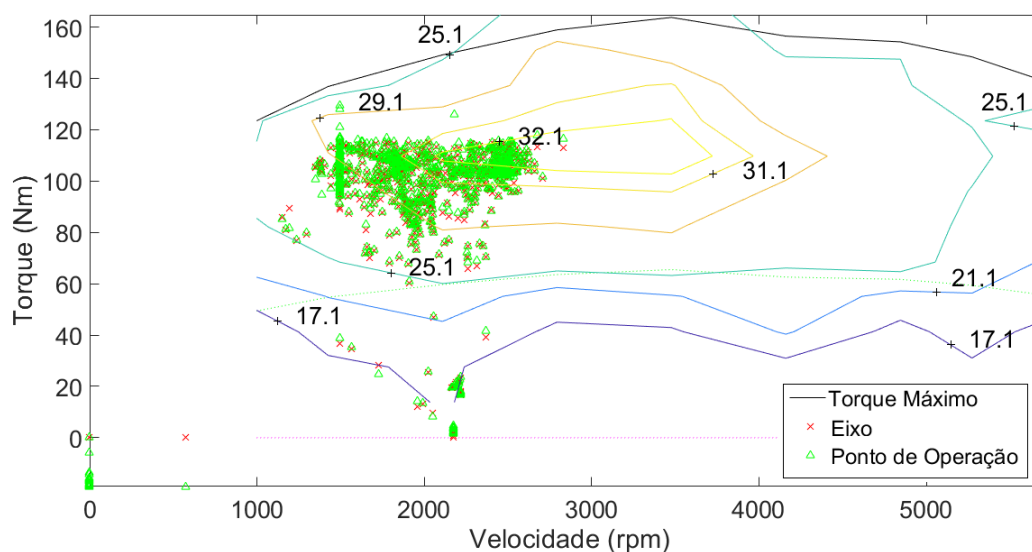
Para o veículo HEV, a operação conjunta dos sistemas de propulsão é mostrada nas Figuras 4.33, 4.34 e 4.35.

Figura 4.33 – Torques do trajeto para veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR®)



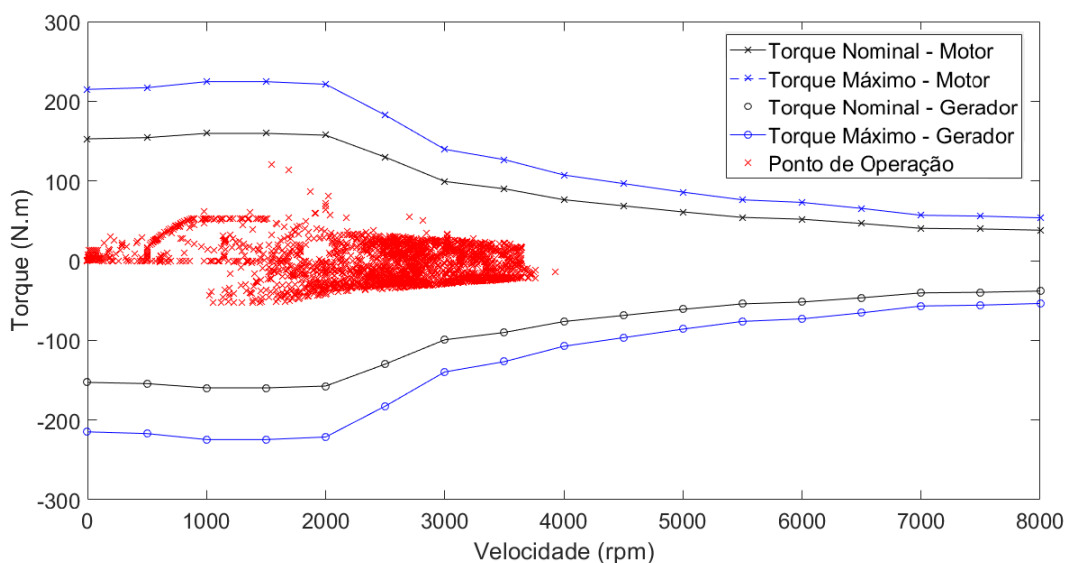
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.34 – Curva de torque-velocidade MCI veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.35 – Curva de torque-velocidade máquina elétrica HEV - Ceilândia (ADVISOR®)



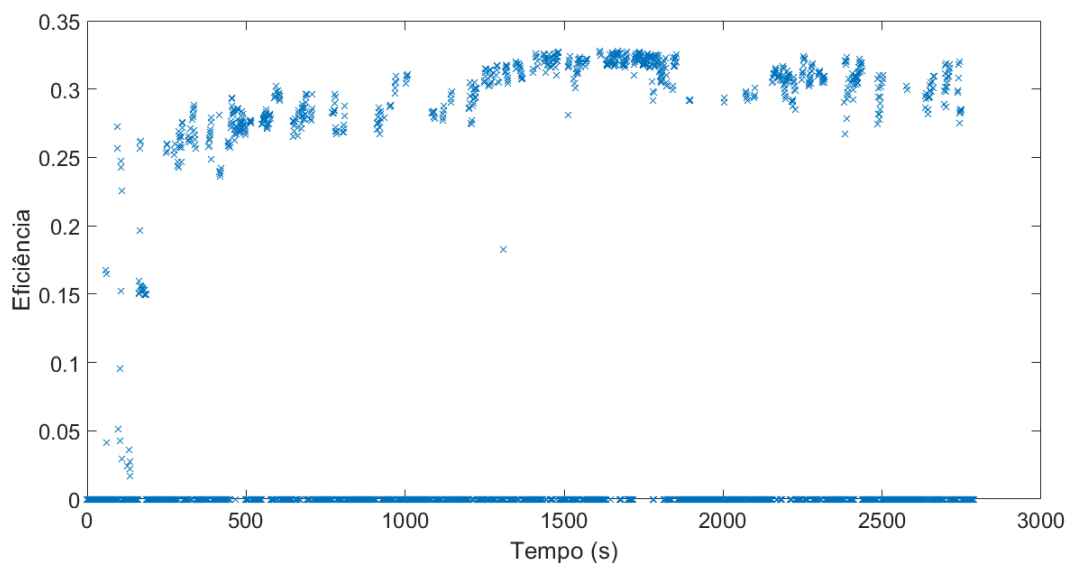
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Pela Figura 4.33, observa-se a atuação predominante do MCI na propulsão do veículo, enquanto que para a operação da máquina elétrica predomina o modo gerador. Em comparação ao automóvel convencional, os torques desenvolvidos foram menores e apresentaram maior uniformidade ao longo do trajeto, eliminando a ocorrência dos picos verificados anteriormente. Essa mudança é ocasionada pela atuação da máquina elétrica, que atua como motor nas partidas do veículo após as paradas e em trechos de menor demanda de torque. Por consequência, seus torques máximos diretos ocorreram após partidas do veículo, ao passo que os maiores valores reversos foram registrados em frenagens que antecederam as paradas

ocorridas.

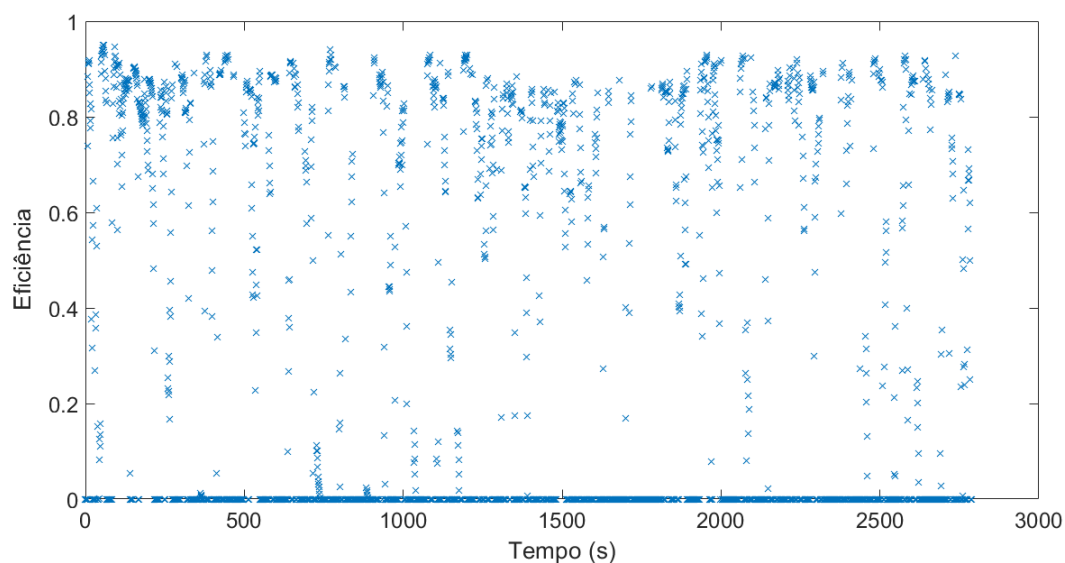
Na Figura 4.34, verifica-se o deslocamento dos pontos de operação do MCI, que passa a atuar na sua região de maior eficiência (entre 2000 a 3000 rpm). Por outro lado, observa-se que a máquina elétrica apresenta maior operação entre 2000 e 4000 rpm, com seus torques mais elevados ocorrendo em rotações de até 2000 rpm. Os pontos de eficiência do MCI e da máquina elétrica (motor) são mostrados nas Figuras 4.36 e 4.37:

Figura 4.36 – Eficiência MCI veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.37 – Eficiência máquina elétrica (motor) veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR®)



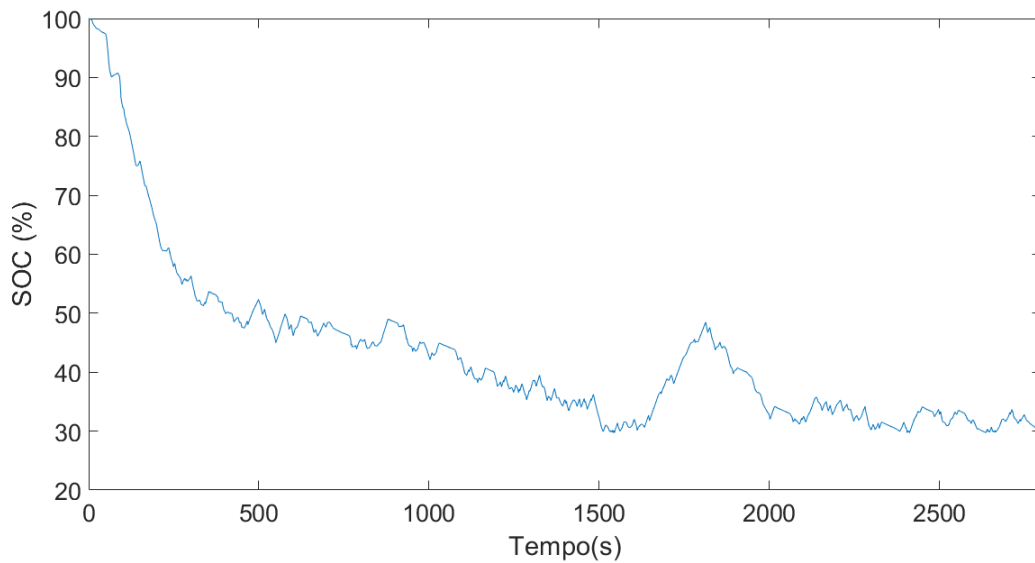
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Na Figura 4.37, os pontos de eficiência nula da máquina elétrica correspondem à opera-



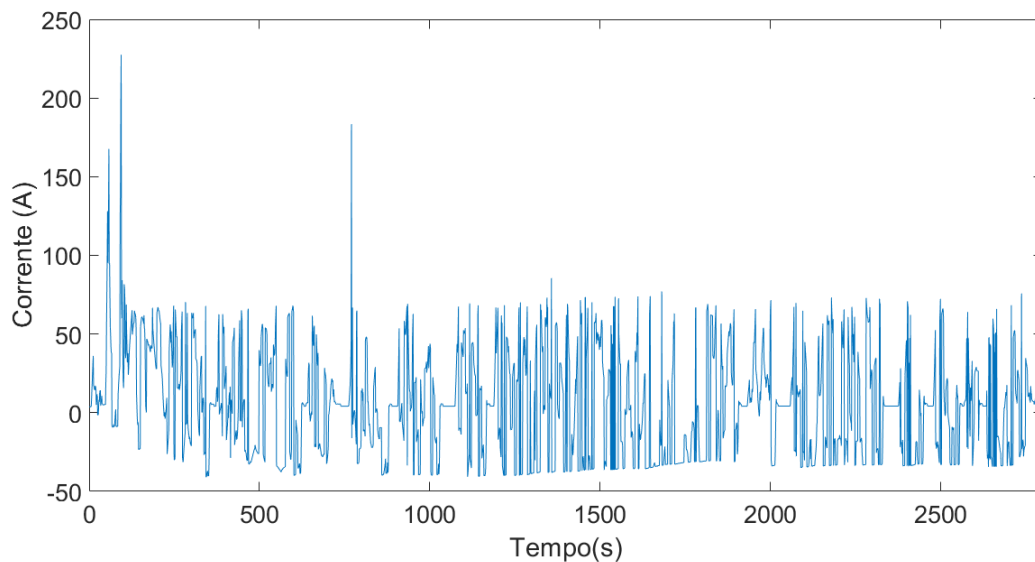
ção no modo gerador. A operação da bateria do veículo HEV é mostrada nas Figuras 4.38 e 4.39:

Figura 4.38 – Estado de carga do veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.39 – Corrente da bateria do veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR®)

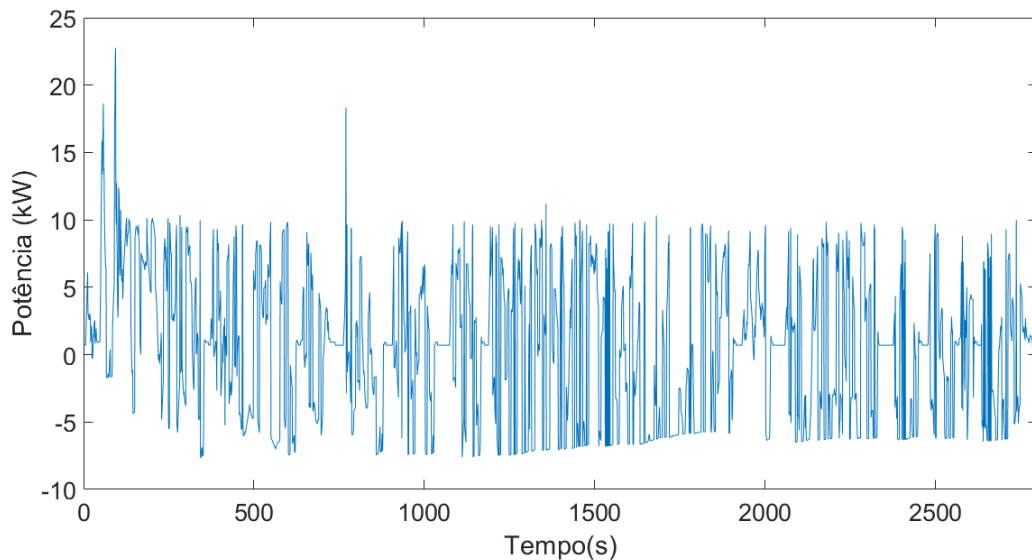


Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se o alto nível de descarga da bateria até, aproximadamente, o instante de 250 segundos, efeito esse representado pelos picos de corrente na Figura 4.39. Em seguida, são registradas descargas graduais e maiores ocorrências de recuperação de energia por frenagem regenerativa. O segundo pico de corrente, observado nos instantes finais do Trecho A-B (mostrado na Figura 4.29), se deve à partida do veículo após uma parada localizada

nesses instantes. As altas variações de carga entre 1500 e 2000 segundos ocorrem devido às condições dinâmicas do percurso: reduções acentuadas de velocidade (aumento de carga por frenagem regenerativa) e, em seguida, partida após repouso (descarga maior). Por fim, verifica-se a tendência de manutenção de carga em torno de 30% nos instantes finais do trajeto. A Figura 4.40 mostra o fluxo de potência da bateria nesse percurso.

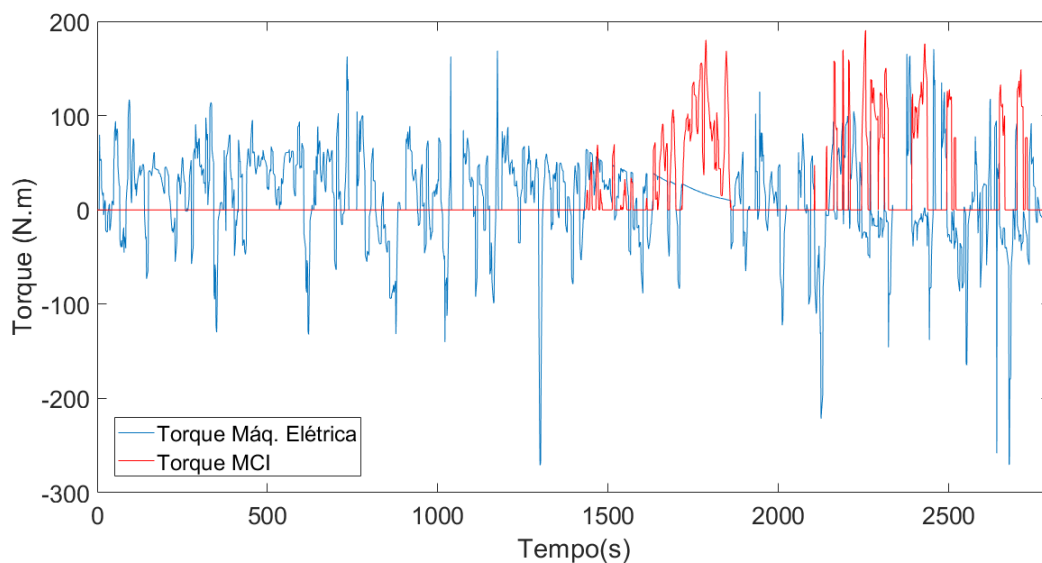
Figura 4.40 – Potência da bateria do veículo HEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

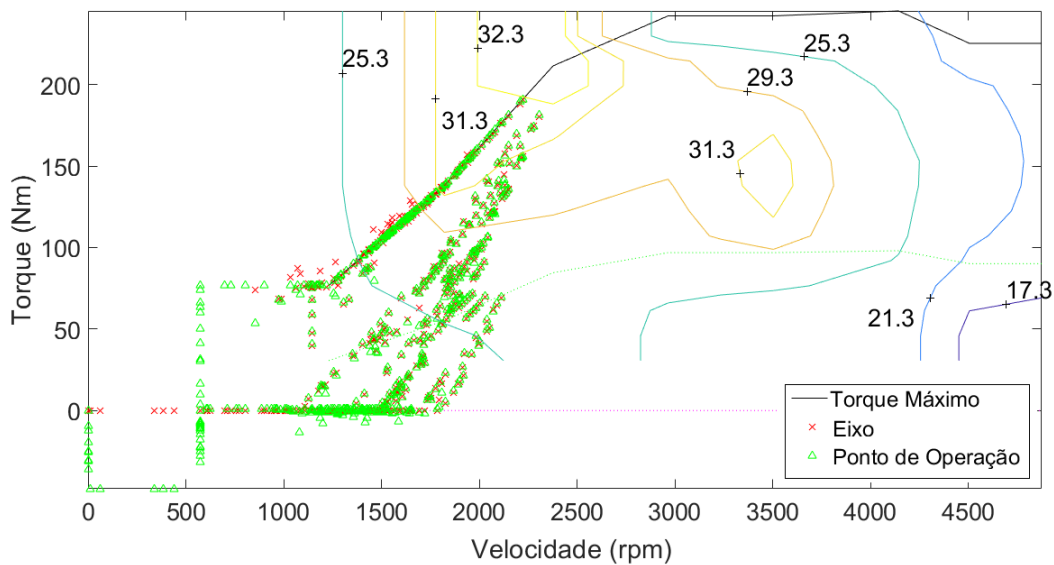
As curvas de torque obtidas para o veículo PHEV são mostradas nas Figuras 4.41, 4.42 e 4.43

Figura 4.41 – Torques do trajeto para veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR®)



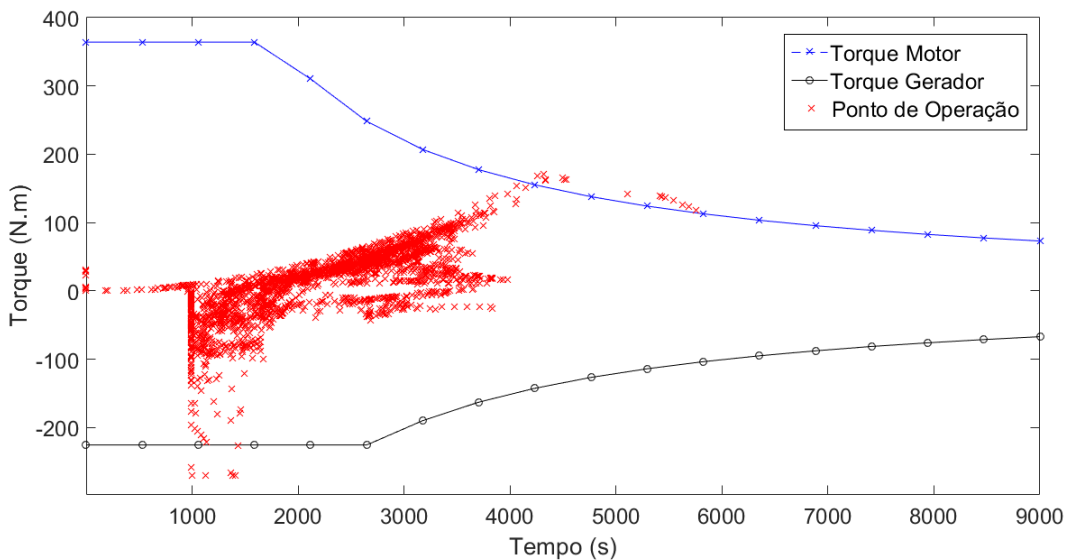
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.42 – Curva de torque-velocidade MCI veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.43 – Curva de torque-velocidade máquina elétrica veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

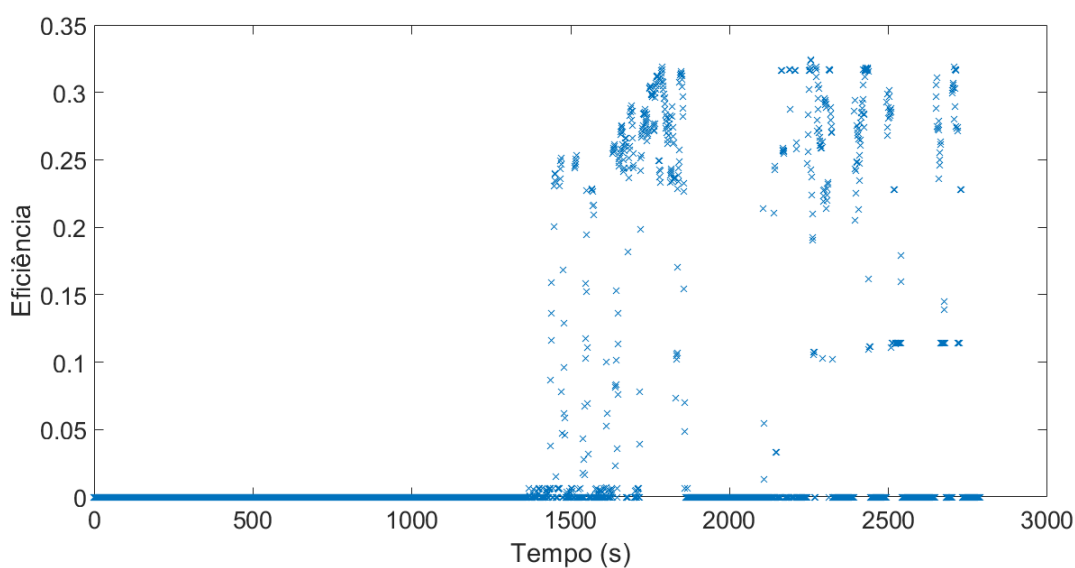
Verifica-se que a propulsão veicular predominante foi realizada pela máquina elétrica, evidenciando o modo elétrico de condução do veículo. Utilizando a Figura 4.29, os maiores torques desenvolvidos pela máquina elétrica ocorreram em ocasiões de partidas dos veículos, localizados entre os instantes 500 e 1500 segundos. A operação do MCI é verificada a partir do instante 1500 segundos, atuando como principal sistema de propulsão do veículo. Os maiores valores de torque do MCI foram registrados entre 1500 a 2000 segundos, período esse correspondente ao Trecho C-D da Figura 4.29 (referência de altitude do ciclo de condução),

e novamente em intervalos coincidentes com o Trecho E-F. A característica comum aos dois segmentos é o aumento de altitude, indicando que o MCI assumiu a propulsão majoritária do veículo nas elevações ocorridas ao final do percurso.

A Figura 4.43 mostra as amplas faixas de operação desenvolvidas pela máquina elétrica nesse trajeto. A sua atuação foi concentrada entre 1000 e 3000 rpm, tendo maior densidade de pontos a partir de 1500 rpm. Os maiores valores de torque foram verificados para as rotações mais elevadas, observando-se a ocorrência de pontos com torques acima dos valores nominais próximos a 4000 rpm.

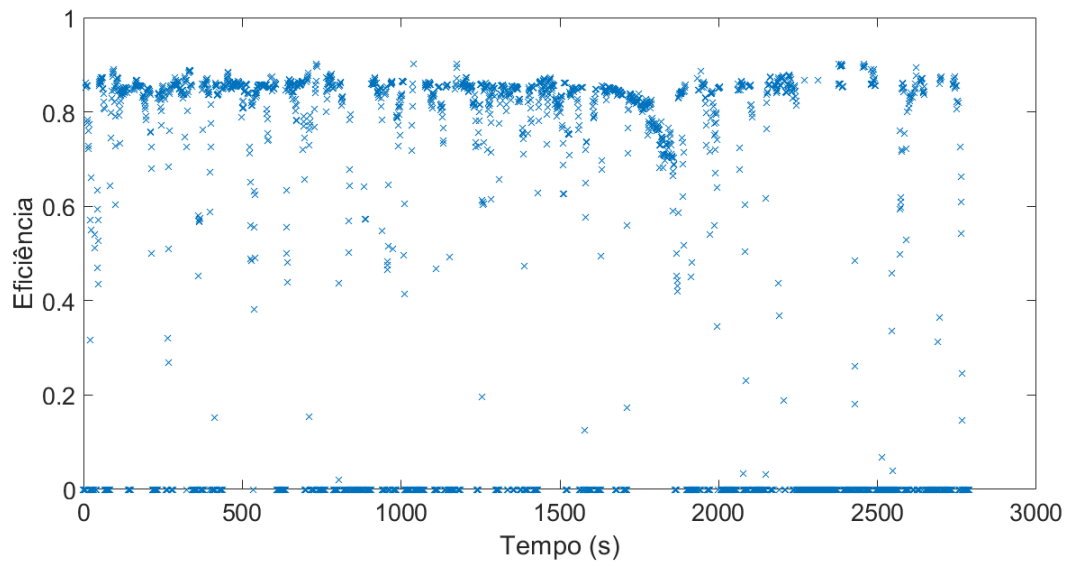
Para o MCI, verifica-se a ocorrência de torques de baixas intensidades, localizados em regiões de menor eficiência, com predominância da operação entre 1000 e 2000 rpm. Percebe-se a tendência dos pontos de operação em direção às regiões de maior eficiência à medida em que aumentam as rotações do MCI. Os pontos de torque nulo indicam a ausência de operação do MCI durante o modo elétrico de direção. As eficiências do MCI e da máquina elétrica como motor são mostradas nas Figuras 4.44 e 4.45, respectivamente.

Figura 4.44 – Eficiência MCI veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

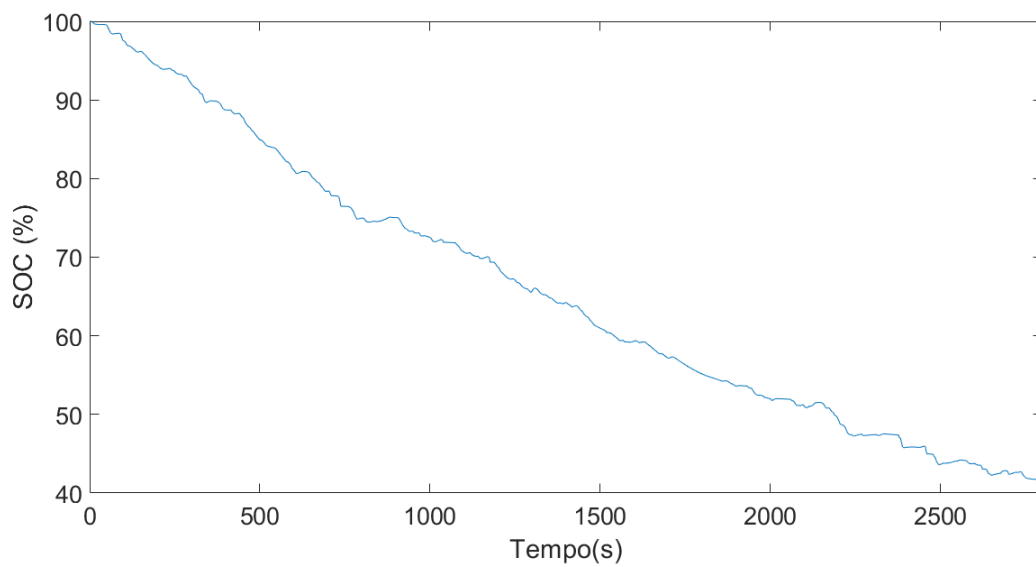
Figura 4.45 – Eficiência máquina elétrica (motor) veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

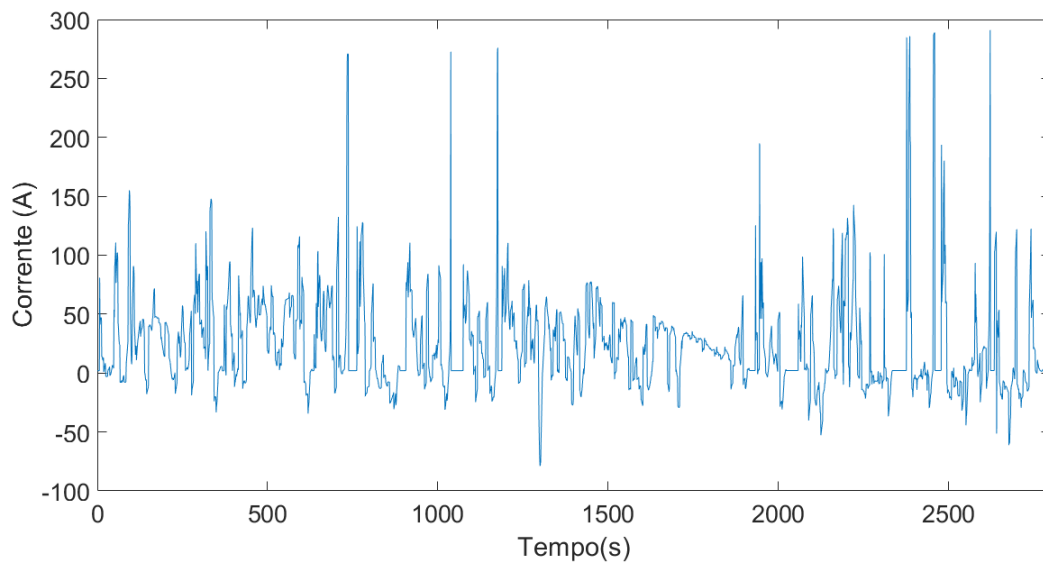
A operação da bateria desse veículo é mostrada pelas Figuras 4.46, 4.47 e 4.48:

Figura 4.46 – Estado de carga do veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.47 – Corrente da bateria do veículo PHEV - Ceilândia (ADVISOR®)

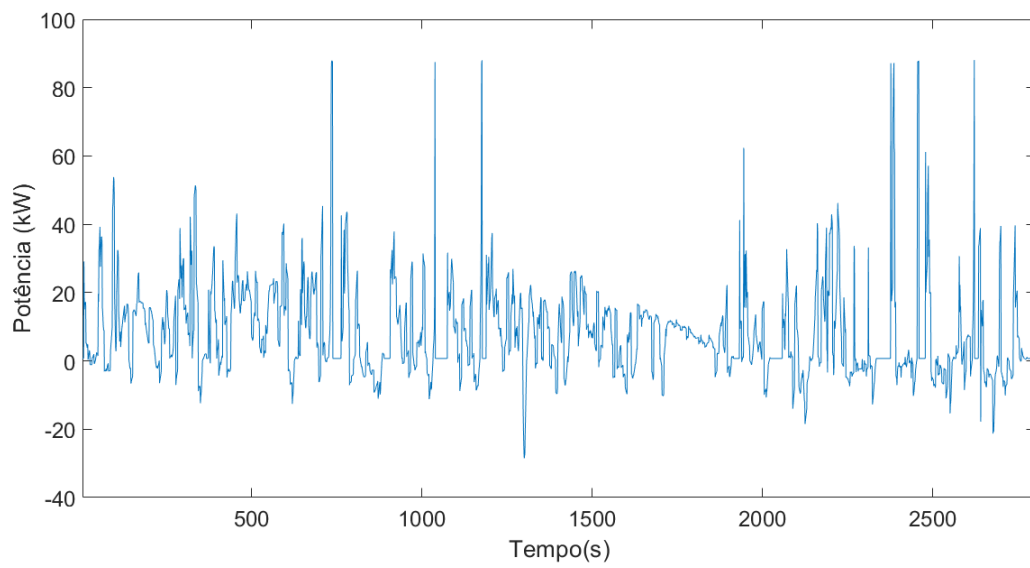


Fonte: Autoria Própria, 2021.

É possível verificar que o estado de carga diminui gradualmente ao longo do trajeto. Devido ao modo de condução elétrico, são observadas variações mais acentuadas até aproximadamente 80% do nível inicial, com descargas graduais a partir desse ponto. Mesmo após o início da operação do MCI, por volta de 1500 segundos e 60% de carga da bateria, a máquina elétrica continua atuando na propulsão do veículo, evidenciando assim seu modo híbrido de condução.

Para a curva de corrente, observa-se que essa apresenta valores maiores em comparação ao HEV ao longo da operação. Seus máximos positivos são registrados após as partidas do veículo, verificadas principalmente nas partes urbanas do trajeto e coincidentes também com os instantes de torques máximos da máquina elétrica. A máxima corrente reversa ocorre no trecho de característica rodoviária do percurso, observado a partir de 1200 segundos, e evidencia a maior atuação da frenagem regenerativa em velocidades mais altas. O fluxo de potência da bateria é mostrado na Figura 4.48.

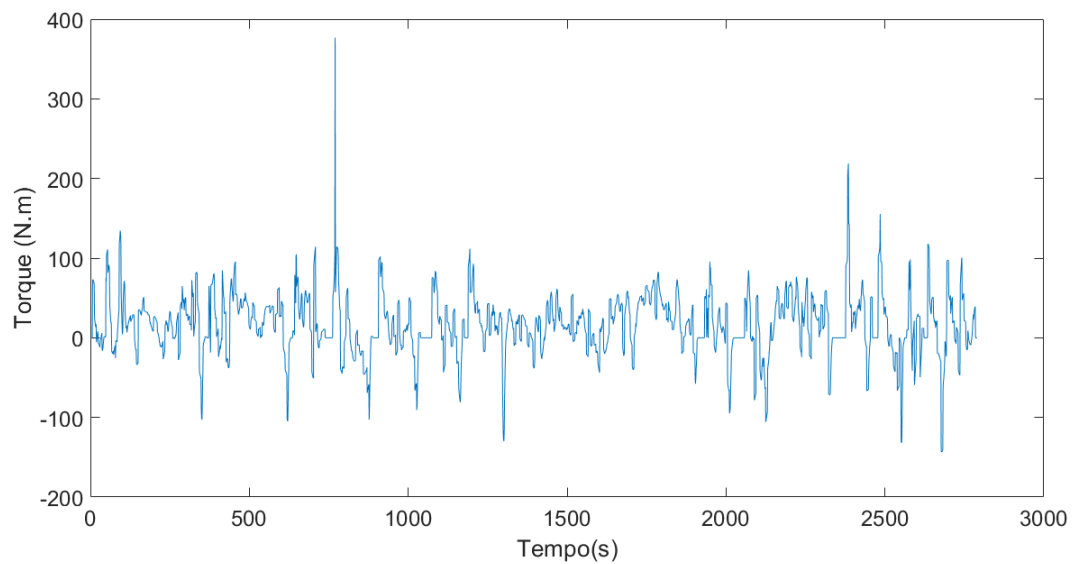
Figura 4.48 – Potência da bateria do veículo PHEV - Ceilândia ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

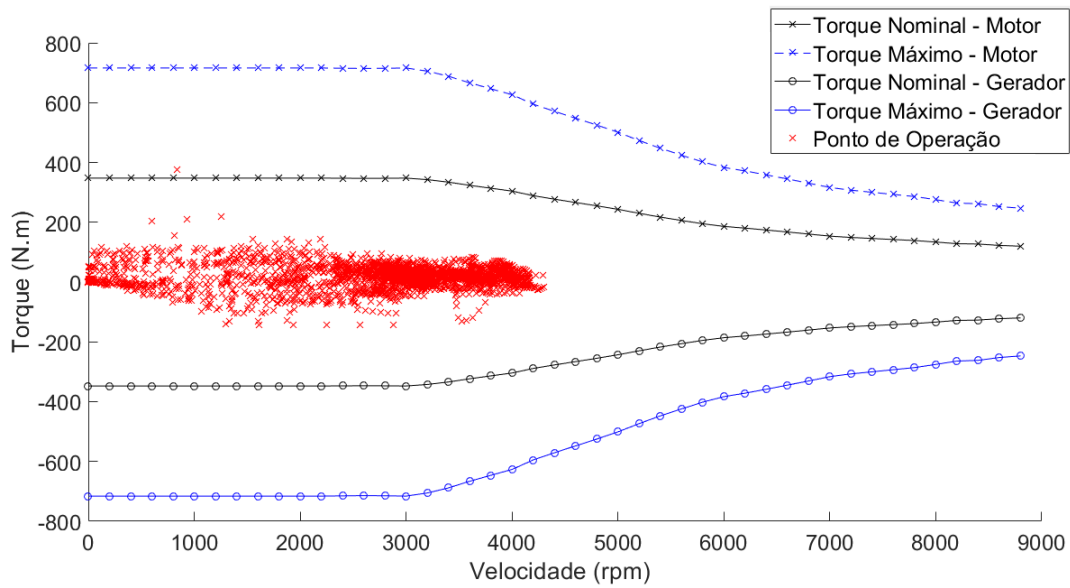
Para o veículo BEV, os torques do percurso e a operação da máquina elétrica são mostrados nas Figuras 4.49, 4.50 e 4.51.

Figura 4.49 – Torques do trajeto para veículo BEV - Ceilândia ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.50 – Curva de torque-velocidade máquina elétrica veículo BEV - Ceilândia ADVISOR<sup>®</sup>



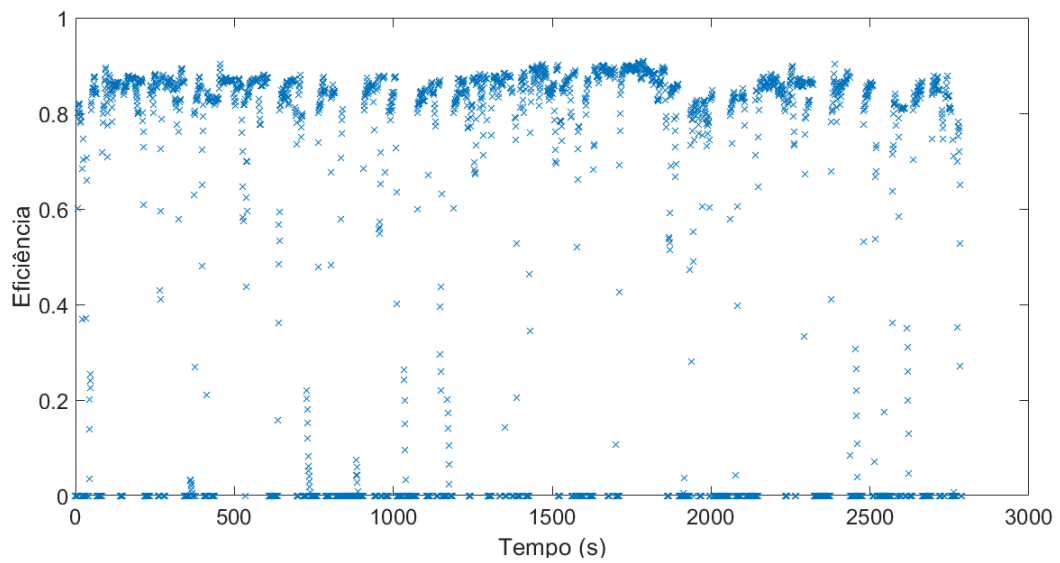
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se que os valores mais elevados ocorreram em trechos de características urbanas e com altitudes crescentes, conforme trechos A-B e E-F da Figura 4.29. É possível verificar também um grande número de ocorrências de torques reversos no trajeto, indicando a operação da máquina no modo gerador.

Pela Figura 4.50, a maior parte da operação da máquina elétrica ocorre na região de torque constante, que se estende até 3000 rpm. A operação nesse trajeto ocorreu dentro dos valores nominais da máquina elétrica, havendo apenas uma ocorrência acima desse limite. Os pontos de eficiência da máquina elétrica, no modo motor, são mostrados na Figura 4.51.



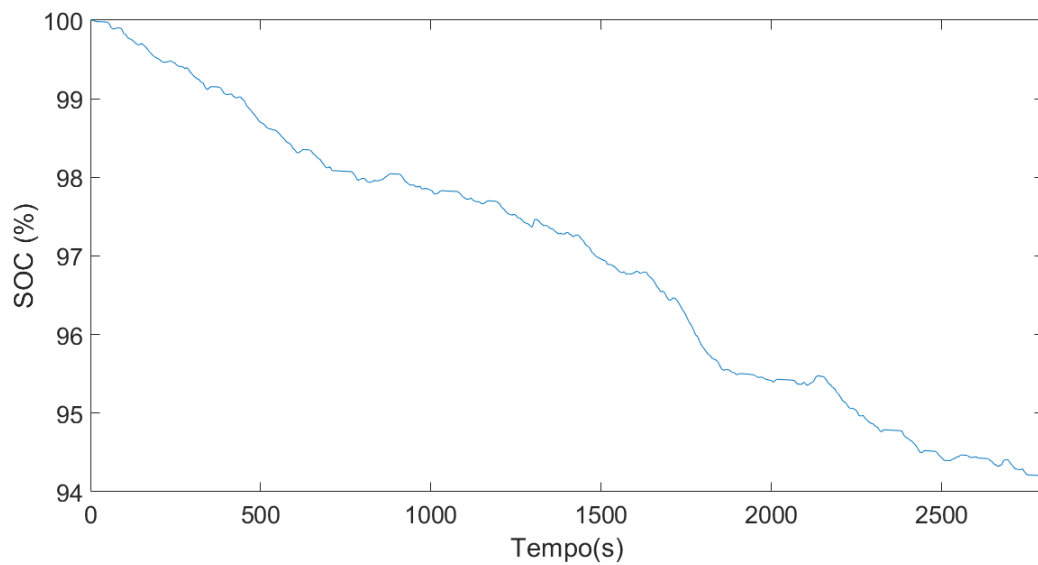
Figura 4.51 – Eficiência da máquina elétrica (motor) veículo BEV - Ceilândia ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

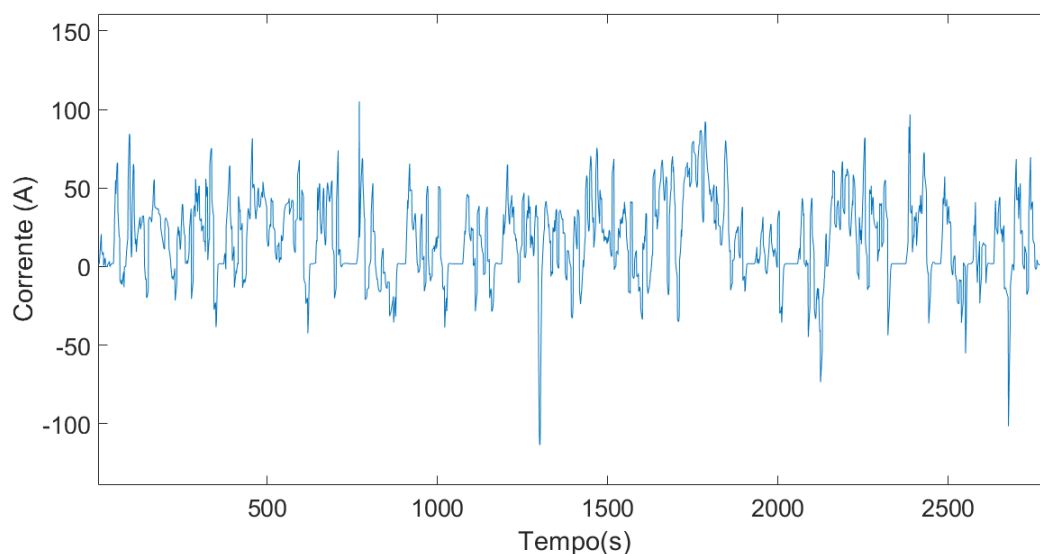
A operação da bateria do BEV é mostrada nas Figuras 4.52,4.53 e 4.54.

Figura 4.52 – Estado de carga do veículo BEV - Ceilândia (ADVISOR®)



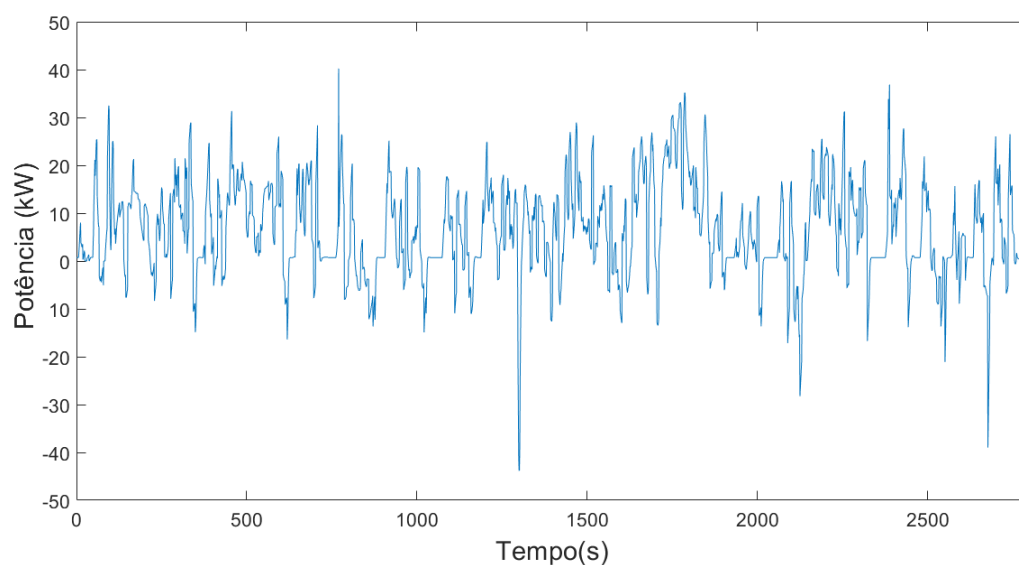
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.53 – Corrente da bateria do veículo BEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.54 – Potência da bateria do veículo BEV - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Pela análise do nível de carga da bateria, é possível verificar que a descarga mais acentuada ocorreu no intervalo de 1500 a 200 segundos. Esse período abrange o trecho C-D da Figura 4.29, que representa a elevação mais íngreme do percurso. Entretanto, os maiores valores de corrente são observados em outros intervalos: a corrente máxima de propulsão ocorreu próxima ao instante de 750 segundos, enquanto a máxima de regeneração foi registrada aproximadamente em 1250 segundos. Verifica-se que essa última ocorreu devido a uma descida acentuada, conforme observado na Figura 4.29.

As Tabelas 4.12 e 4.13 mostram, respectivamente, a operação geral dos sistemas de pro-

pulsão e baterias de todos os veículos nesse percurso.

Tabela 4.12 – Operação geral dos sistemas de propulsão - Ceilândia (ADVISOR®)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Torque Máximo Direto (N.m)	176,43	133,913 (MCI) 120,143 (ELE)	190,56 (MCI) 170, 43 (ELE)	373,79
Torque Máximo Reverso (N.m)	-3,054	-20,54 (MCI) -52,734 (ELE)	Nulo (MCI) -270,62 (ELE)	-143,29
Torque RMS (N.m)	53,53	50,38 (MCI) 21,8 (ELE)	39,49 (MCI) 49,323 (ELE)	41,53
Rotação Máxima (rpm)	2183	2829 (MCI) 3931 (ELE)	2304 (MCI) 5758 (ELE)	4299
Eficiência Média Motor Elétrico	-	79,74%	84,65%	86,21%
Eficiência Média Gerador	-	83,29%	76,21%	82,06%
Eficiência Média MCI	22,04%	29,92%	22,26%	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 4.13 – Operação geral das baterias - Ceilândia (ADVISOR®)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
SOC Inicial	-	100%	100%	100%
SOC Final	-	30,34%	41,7%	94,2%
Corrente Máxima Direta (A)	-	227,52	291	105,154
Corrente Máxima Reversa (A)	-	-40,92	-78,913	-113,522
Corrente RMS (A)	-	33,33	46,22	30,98
Potência RMS (kW)	-	5,28	15,59	11,86
Energia total recuperada Fren. Regen. (kWh)	-	1,554	0,925	0,977
Eficiência Bateria	-	80,35%	95,5%	98,58%

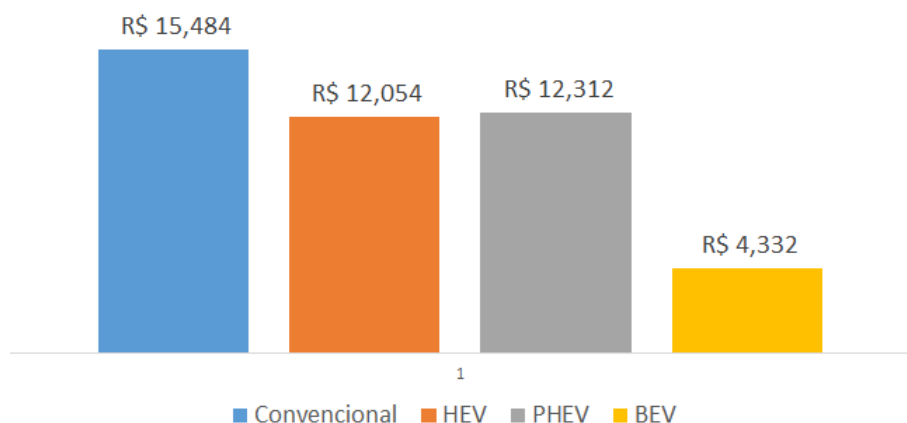
Fonte: Autoria Própria, 2021.

O consumo de energia e combustível é mostrado na Tabela 4.14 e Figura 4.55.

Tabela 4.14 – Custo total de combustível e energia - Ceilândia (ADVISOR®)

<b>Fonte de Energia</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Gasolina Comum (litros)	2,422	1,791	1,064	-
Bateria (kWh)	-	0,706	6,435	5,060
<b>Gasto total</b>	<b>R\$ 15,484</b>	<b>R\$ 12,054</b>	<b>R\$ 12,312</b>	<b>R\$ 4,332</b>

Figura 4.55 – Custo do trajeto por veículo - Ceilândia (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se que a diferença de custos pode ser concentrada em três grupos distintos: veículo convencional, híbridos e elétrico. Utilizando o convencional como referência, seu custo foi, aproximadamente, 28% maior que o do HEV e 25% em relação ao PHEV. Para o BEV, a diferença cresce para cerca de 357%. Entre os híbridos, tem-se um valor ligeiramente superior do PHEV em relação ao HEV, apesar de o primeiro ter percorrido boa parte do trajeto em modo elétrico. Isso se deve ao modelo de MCI utilizado nesse veículo, que apresentou baixa eficiência mesmo com o auxílio da propulsão elétrica, além da eficácia menor da sua bateria em comparação à do BEV.

#### 4.3.1.2 FASTSim™

A Tabela 4.15 mostra os resultados gerais obtidos para os sistemas de propulsão dos automóveis.

Tabela 4.15 – Operação geral sistemas de propulsão - Ceilândia (FASTSim™)

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Eficiência Média Motor Elétrico	-	83,35%	86,5%	90,66%
Eficiência Média Gerador	-	69,78%	79,79%	86,59%
Eficiência Média MCI	27,19%	36,57%	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para o MCI, verifica-se o aumento da eficiência na operação do veículo HEV em comparação ao veículo convencional. Para a máquina elétrica, tem-se o aumento da eficácia de forma proporcional à eletrificação dos veículos, tanto na atuação como motor quanto gerador. Ressalta-se que, nesse percurso, o veículo PHEV utilizou exclusivamente o modo de condução elétrico, não havendo atuação do MCI.

As informações relativas ao consumo de combustível e energia elétrica são mostradas na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Relações de consumo de energia e gasolina - Ceilândia (FASTSim™)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Razão Energia Elétrica/Combustível	0	0,0654	1	1
Economia de Combustível (km/l)	19,048	33,865	63,768	66,475
Litros de gasolina equivalentes	1,893	1,008	0,536	0,514
Consumo energético (kWh/km)	-	0,016	0,141	0,134

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Destaca-se que, no parâmetro razão energia elétrica-combustível, o valor nulo indica utilização somente do MCI para propulsão do veículo, enquanto o valor unitário representa o uso apenas da máquina elétrica. Assim, para o veículo HEV, verifica-se a ampla prevalência do MCI sobre a máquina elétrica no modo de condução, enquanto o HEV apresenta propulsão totalmente elétrica.

Os quesitos economia de combustível e litros de gasolina equivalentes permitem realizar comparações usando unidades já utilizadas pelos consumidores, e indicam amplo aumento de economia e redução de consumo com a eletrificação dos veículos. O parâmetro consumo energético por quilômetro está relacionado à utilização da bateria e apresenta maiores valores para os veículos HEV e BEV. A diferença entre esses dois últimos se deve à eficiência das baterias de ambos, sendo essa evidenciada em posterior análise de perdas ocorridas nos componentes.

A operação geral da bateria é mostrada na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Operação geral da bateria - Ceilândia (FASTSim™)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
SOC Inicial	-	100%	100%	100%
SOC Final	-	27,47%	44,7%	93,1%
Energia Média Frenagem Regenerativa por ciclo (kWh)	-	0,015	0,019	0,020
Ciclos de bateria por km	-	1,523	1,64	1,616
Potência Média Bateria - Propulsão (kW)	-	5,12	9,82	9,527
Potência Média Bateria - Regeneração (kW)	-	-4,38	-5,84	-6,23
Potência RMS (kW)	-	5,36	11,59	11,43

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se o aumento da energia recuperada por frenagem regenerativa de modo proporcional à eletrificação dos automóveis, apesar de o veículo PHEV possuir média de ciclos de bateria ligeiramente superior que a do BEV. Também são verificadas diferenças para as

potências médias de propulsão e regeneração, sendo essas crescentes proporcionalmente à utilização do modo elétrico de condução. A diferença de valores observada entre o PHEV e BEV está relacionada à maior capacidade e eficiência da bateria desse último.

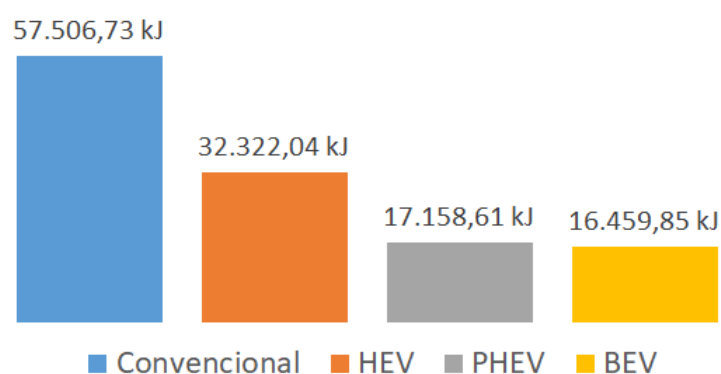
As perdas gerais nos sistemas dos veículos são mostradas na Tabela 4.18 e na Figura 4.56. A Figura 4.57 mostra o percentual de cada sistema nas perdas gerais.

Tabela 4.18 – Perdas por condições dinâmicas e componentes - Ceilândia (FASTSim™)

Perdas (kJ)	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Arraste	3.968,81	3.150,15	3.151,31	3.676,98
Subida	2.131,62	2.224,97	3.107,48	2.973,41
Pneus	2.944,68	3.073,63	4.292,76	4.107,54
Freios	3.952,74	489,51	704,03	656,75
Transmissão	684,1	338,84	458,51	445,74
Máquina Elétrica	0	1.774,01	2.838,56	2.273,2
Bateria	0	75,14	652,96	373,23
Cargas Auxiliares	1.953	1.953	1.953	1.953
MCI	41.871,78	19.242,80	0	0
<b>Total</b>	<b>57.506,73</b>	<b>32.322,04</b>	<b>17.158,61</b>	<b>16.459,85</b>

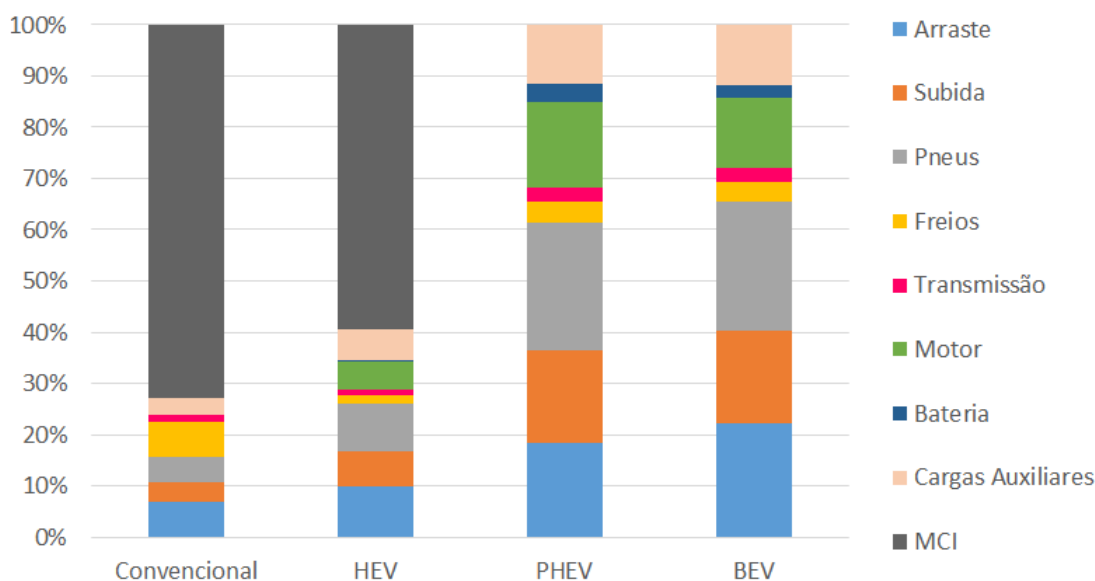
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.56 – Perdas totais (kJ) - Ceilândia (FASTSim™)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.57 – Perdas percentuais (kJ) - Ceilândia (FASTSim™)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para as perdas ocasionadas pelos fatores dinâmicos do percurso (arraste, rolamento e subida), observa-se que, devido às maiores massas, os veículos híbridos e elétrico apresentaram maiores valores nos quesitos subida e rolamento (pneus). A maior perda por arraste no veículo convencional está associada aos seus fatores construtivos, como maior área frontal e coeficiente de arraste aerodinâmico.

Para as perdas ocorridas nos componentes, destaca-se o valor percentual relativo ao MCI no veículo convencional, sendo esse responsável por mais de 70% das perdas totais. Outro sistema significativo é representado pelos freios, com cerca de 10% do valor total. Para o HEV, o MCI ainda é o componente com as maiores perdas, mas tem-se a redução dessas nos freios devido à utilização de frenagem regenerativa. Para os PHEV e BEV, a máquina elétrica e as cargas auxiliares são os componentes com maiores perdas percentuais. Ressalta-se também a diferença de perdas na bateria, sendo essas maiores para o veículo HEV em comparação ao BEV.

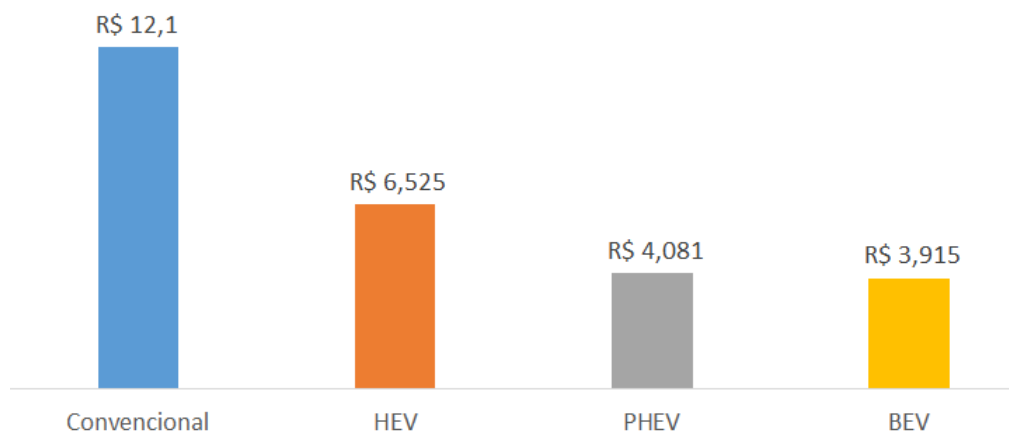
Assim, considerando as perdas ocorridas no percurso, o consumo total de combustível e energia, juntamente com os custos totais, são mostrados na Tabela 4.19 e na Figura 4.58.

Tabela 4.19 – Consumo total de combustível e energia - Ceilândia (FASTSim™)

Fonte de Energia	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Gasolina Comum (L)	1,893	0,947	-	-
Bateria (kWh)	-	0,551	4,766	4,572
<b>Gasto total</b>	<b>R\$ 12,1</b>	<b>R\$ 6,5</b>	<b>R\$ 3,861</b>	<b>R\$ 3,703</b>

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.58 – Custo do percurso por veículo - Ceilândia (FASTSim™)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

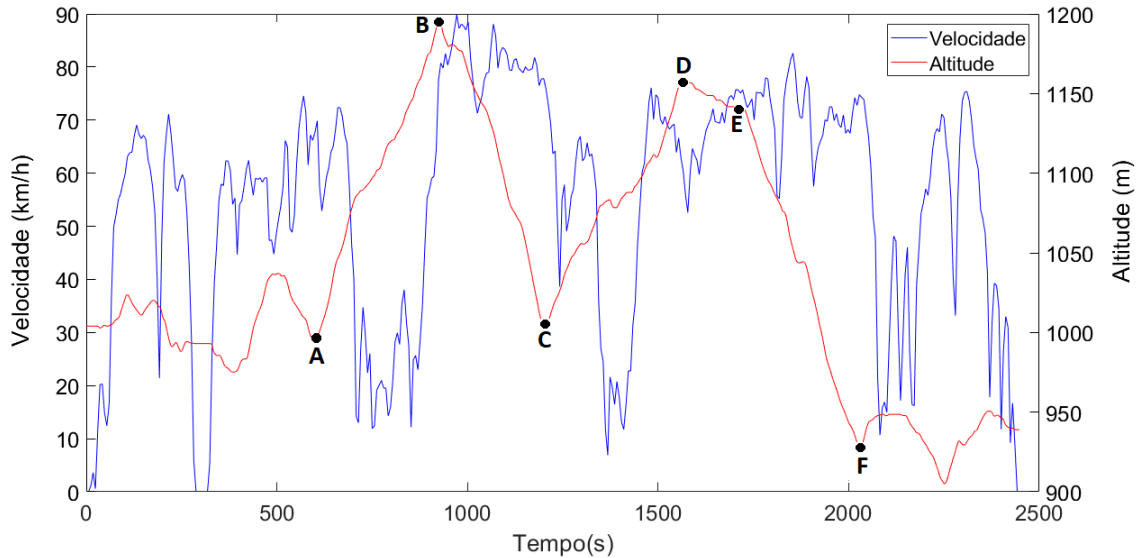
Verifica-se, assim, a diferença significativa de custos entre os veículos em um percurso com características urbanas e altitude crescente. Em comparação ao HEV, veículo com menor nível de eletrificação, o convencional apresentou um custo 86% superior, que salta para aproximadamente 327% em relação ao BEV. Dentre os elétricos, utilizando o BEV como referência, o HEV apresenta custo 75% maior, enquanto o PHEV, em modo elétrico de direção, possui gasto 4% superior.



### 4.3.2 UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina (FUP)

Para este trajeto, o ciclo de condução e a altitude do trajeto são mostrados na Figura 4.59.

Figura 4.59 – Custo do percurso por veículo - Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Dessa forma, foram definidos três segmentos de referência: Trecho A-B, Trecho B-C, Trecho C-D e Trecho E-F. Suas coordenadas são mostradas na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 – Pontos de referência altitude - Planaltina

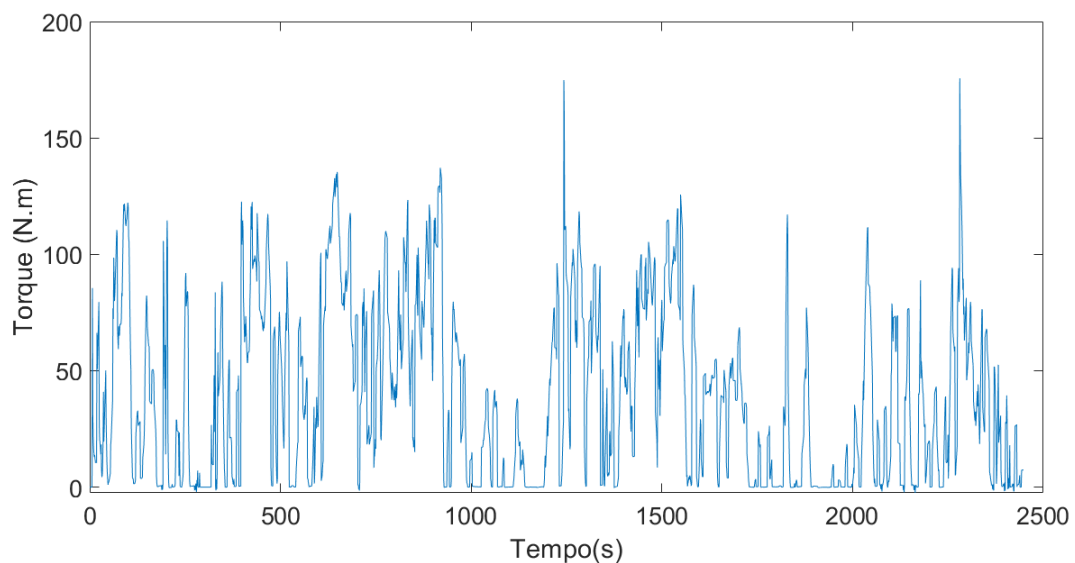
Ponto	Tempo (s)	Altitude (m)
A	601	995,2
B	928	1196
C	1206	1005
D	1570	1158
E	1715	1142
F	2030	927,4

Fonte: Autoria Própria, 2021.

#### 4.3.2.1 ADVISOR®

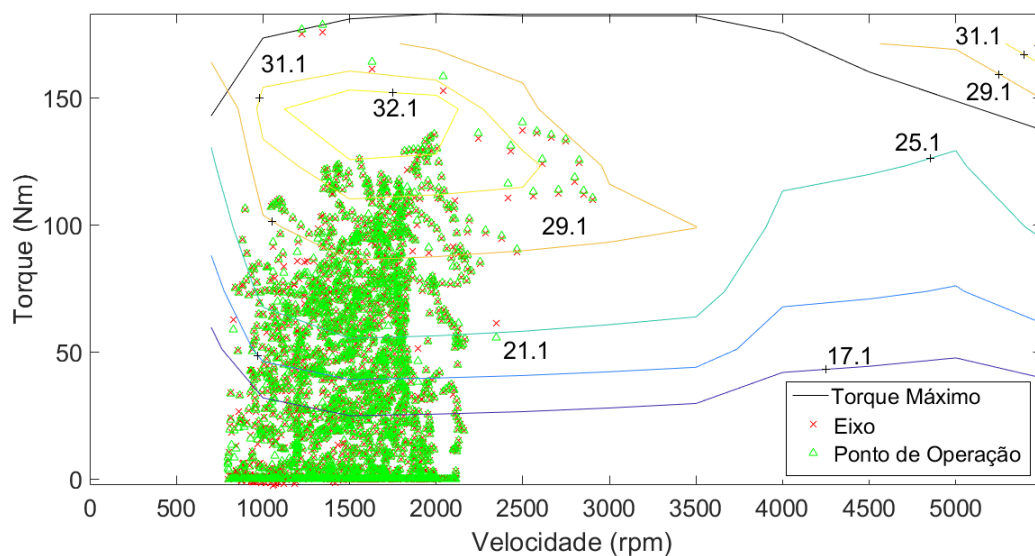
Para o veículo convencional, os torques do percurso e a operação do MCI são mostradas nas Figuras 4.60 e 4.61.

Figura 4.60 – Torques do trajeto para veículo convencional - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.61 – Curva de torque-velocidade MCI para veículo convencional - Planaltina (ADVISOR®)



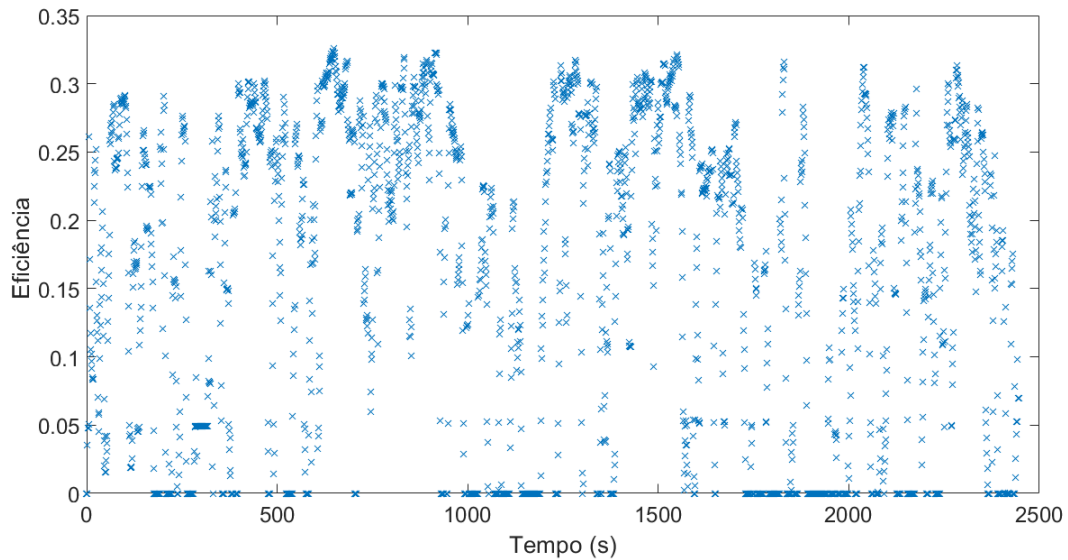
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para as curvas de torque obtidas, verifica-se que os maiores valores ocorreram entre os instantes 1000 e 1500 segundos (Trecho C-D) e novamente entre 2000 e 2500 segundos. Em ambos os casos, os valores foram registrados em decorrência de acelerações ocorridas em trechos de subida.

Em relação ao trajeto anterior analisado, verifica-se um deslocamento dos pontos de operação do MCI em direção às rotações mais altas, concentrada em torno de 750 e 2000 rpm. Isso ocorre devido às características rodoviárias do percurso, que requerem velocidades mai-

ores. Os torques assumidos se distribuem em amplo intervalo, com os maiores valores ocorrendo em rotações próximas à 3000 rpm. Observa-se, também, uma maior quantidade de pontos de operação nas regiões de maior eficácia do mapa do MCI, em comparação ao trajeto anterior. A Figura 4.62 mostra os pontos de eficiência do MCI ao longo da operação nesse trajeto.

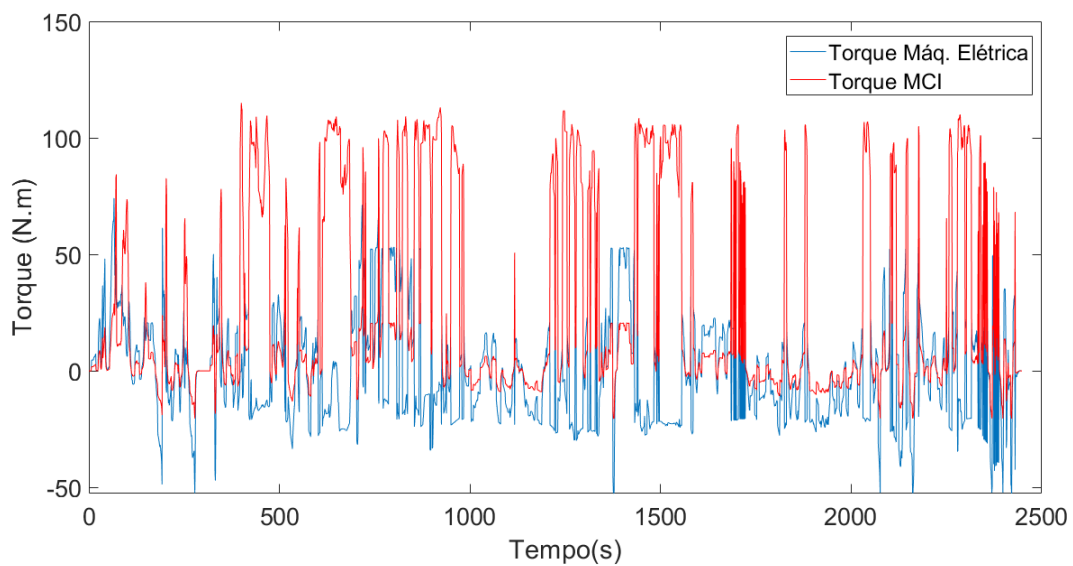
Figura 4.62 – Eficiência MCI veículo convencional - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

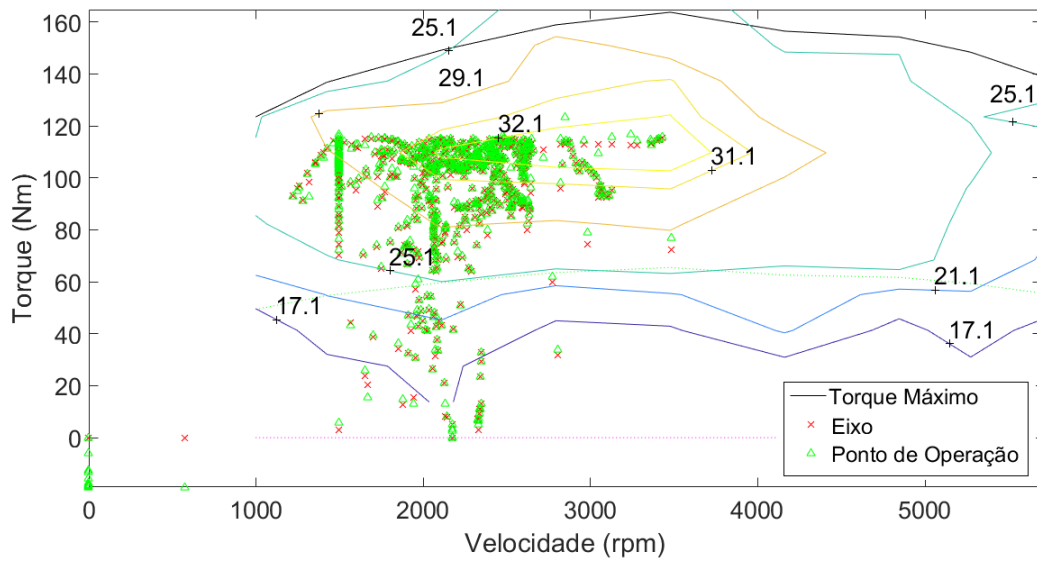
Para o veículo HEV, as curvas de torque e pontos de operação dos sistemas de propulsão são mostrados nas Figuras 4.63, 4.64 e 4.65.

Figura 4.63 – Torques do trajeto para veículo HEV - Planaltina (ADVISOR®)



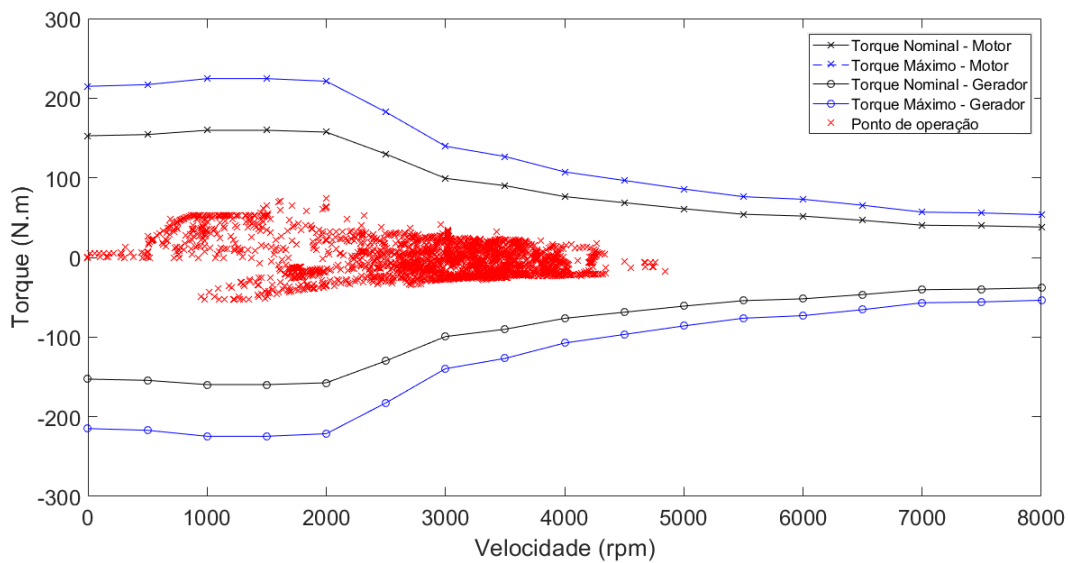
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.64 – Curva torque-velocidade MCI veículo HEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.65 – Curva torque-velocidade máquina elétrica veículo HEV - Planaltina (ADVISOR®)



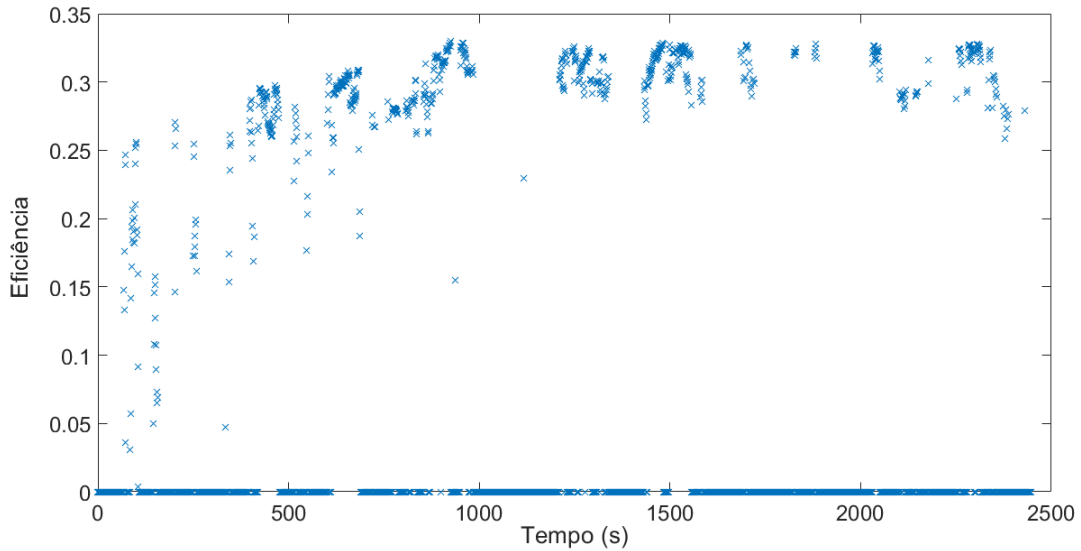
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Verifica-se, novamente, que a máquina elétrica opera majoritariamente no modo gerador, enquanto o MCI é responsável pela maior parte da propulsão do veículo. Assim como observado no trajeto anterior, os valores máximos de torque do MCI apresentaram uniformidade ao longo do percurso, enquanto que, para a máquina elétrica, os valores máximos diretos e reversos foram registrados entre os instantes 1000 e 1500 segundos (Trechos B-C e C-D).

Pela Figura 4.64, percebe-se a ampla operação do MCI nas regiões de eficiência mais altas, localizadas entre 2000 e 3000 rpm. Os torques desenvolvidos se distribuíram, majo-

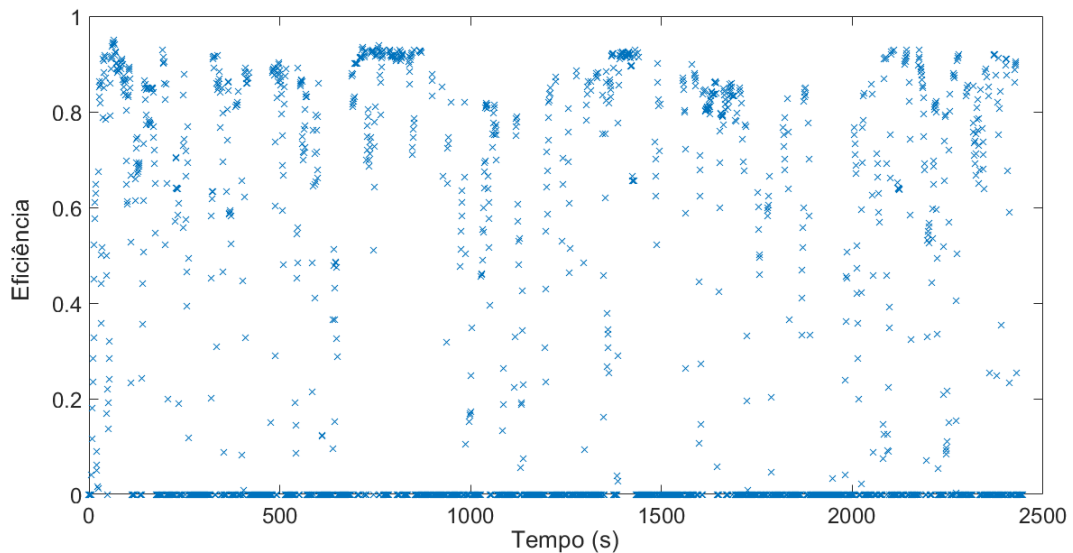
ritariamente, entre 60 e 120 N.m. Para a máquina elétrica, em relação ao percurso anterior, observa-se maior quantidade de pontos em rotação mais altas (acima de 4000 rpm) e torques desenvolvidos de menor valor. As eficiências do MCI e da máquina elétrica (modo motor) são mostradas, respectivamente, nas Figuras 4.66 e 4.67:

Figura 4.66 – Eficiência MCI veículo HEV - Planaltina ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

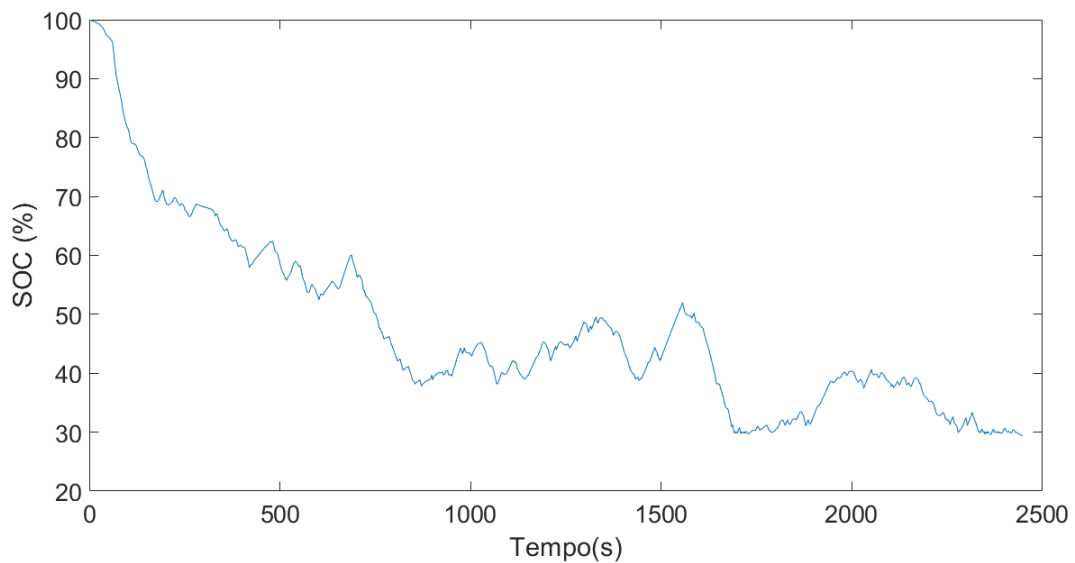
Figura 4.67 – Eficiência máquina elétrica (motor) veículo HEV - Planaltina ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

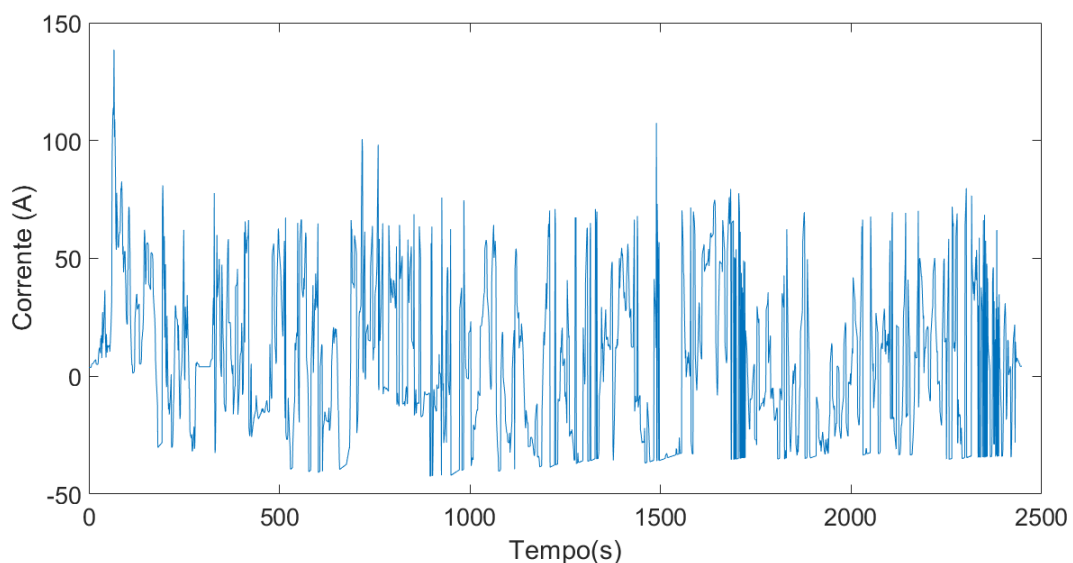
Na Figura 4.66, os pontos de eficiência nula indicam a propulsão elétrica do veículo. Para a eficiência da máquina elétrica, mostrada na Figura 4.67, eficiência nula representa a operação como gerador. A operação da bateria do HEV nesse percurso é mostrada nas Figuras 4.68 e 4.69:

Figura 4.68 – Estado de carga bateria veículo HEV - Planaltina ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.69 – Corrente da bateria do veículo HEV - Planaltina ADVISOR®



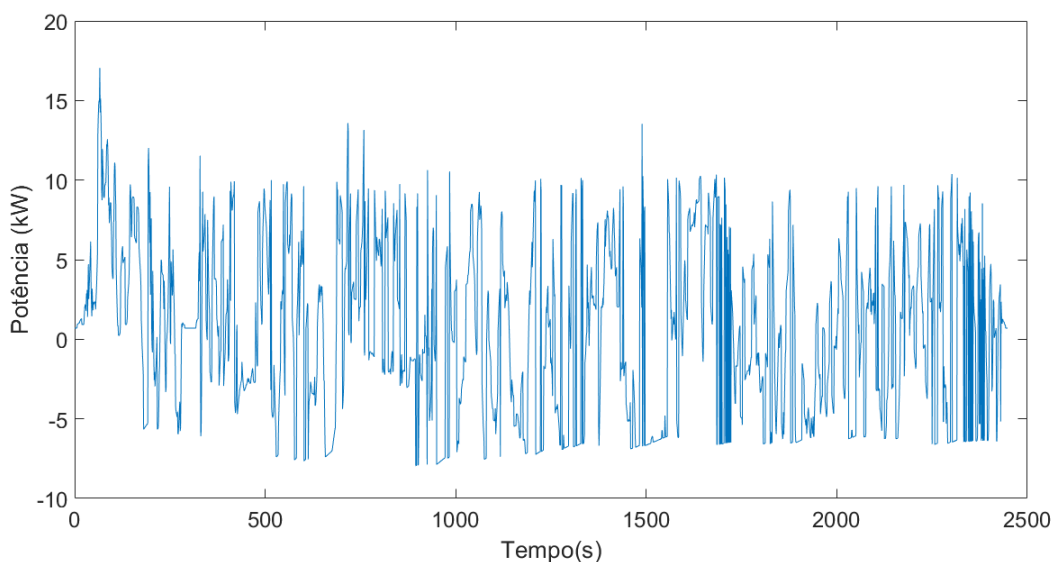
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para os níveis de carga da bateria, verifica-se, inicialmente, uma tendência de descarga acentuada, seguida posteriormente por operações recorrentes de carga e descarga. Em relação ao trajeto anterior, são observadas recuperações mais intensas de energia, representadas por aumentos maiores do nível de carga ao longo da operação. Essas ocorrências são verificadas, primeiramente, logo após o instante 500 segundos, e depois aproximadamente em 1500 segundos (final do Trecho C-D). Para esses intervalos, as condições verificadas foram de desacelerações em trechos de descida (primeiro aumento do nível) e trecho de subida (segundo aumento), em que a máquina elétrica apresentou operação prolongada no modo

gerador.

Seguindo o observado para os níveis de carga, as correntes apresentam valores que denotam a operação da máquina elétrica nos modos motor e gerador. Os valores máximos de descarga foram observados no início do percurso (antes de 500 segundos) e próximo de 1500 segundos, momentos em que os trechos de subida apresentaram acelerações maiores. Por outro lado, os maiores valores reversos foram observados entre 500 e 1000 segundos, intervalo esse caracterizado pela desaceleração acentuada ocorrida no Trecho A-B, apesar da elevação crescente do trecho. Por outro lado, os valores observados após o instante 2000 segundos (Trecho E-F) se devem às descidas ocorridas no trajeto. O fluxo de potência da bateria é mostrado na Figura 4.70.

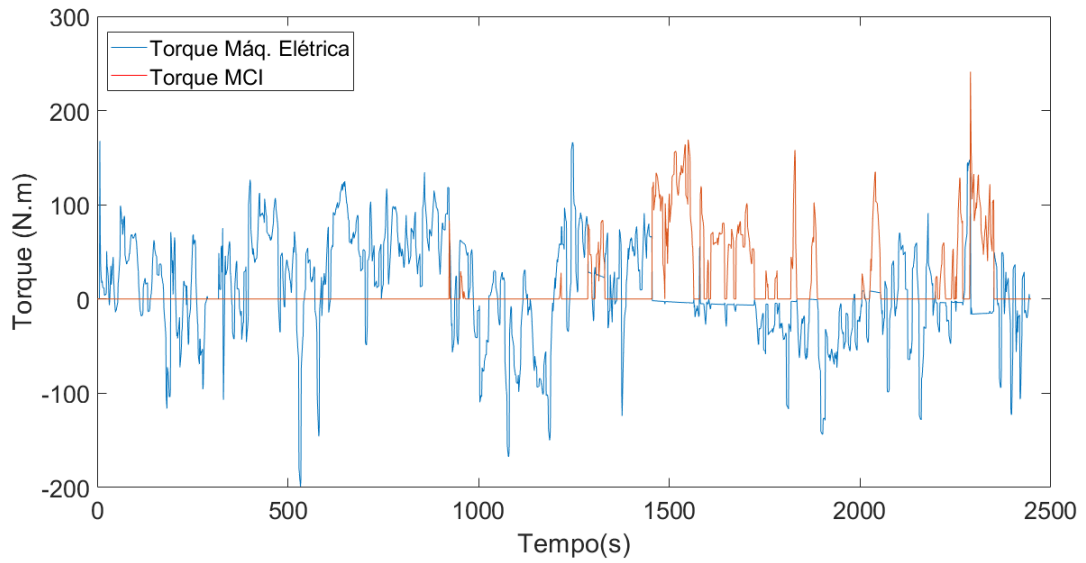
Figura 4.70 – Potência da bateria do veículo HEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

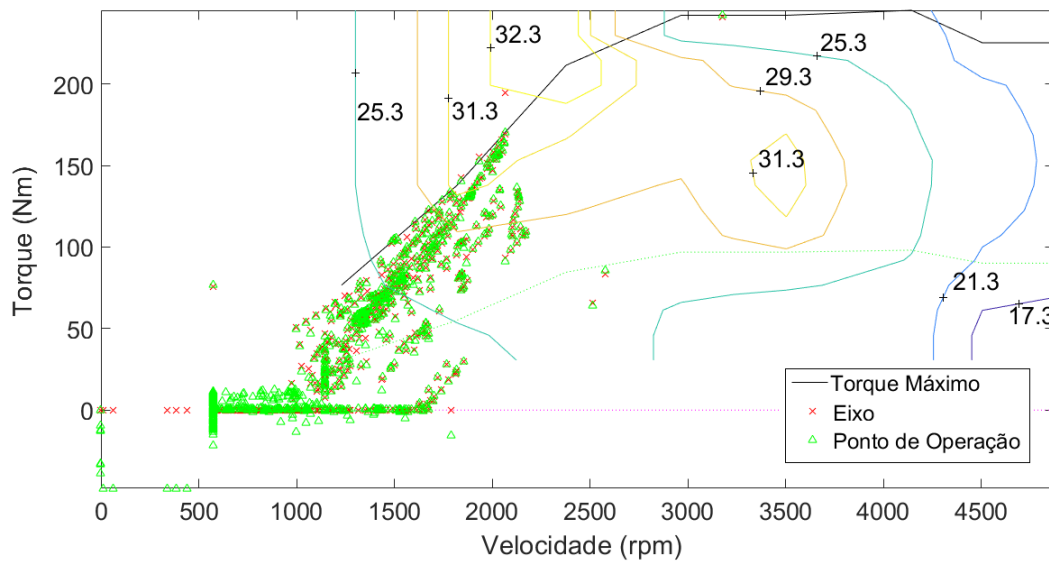
Para o veículo PHEV, as curvas de torque do percurso e dos sistemas de propulsão são mostradas nas Figuras 4.71, 4.72 e 4.73.

Figura 4.71 – Torques do percurso para veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

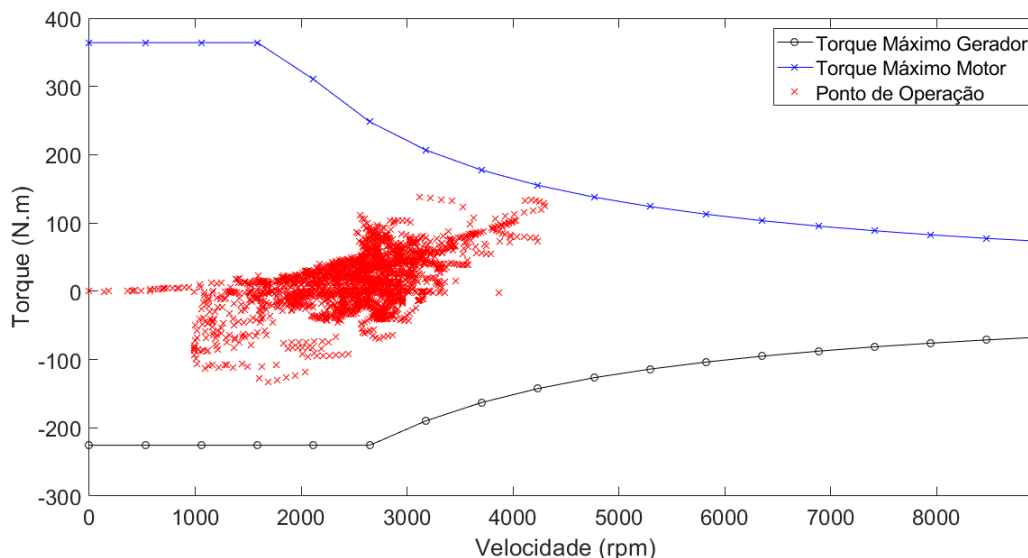
Figura 4.72 – Curva de torque-velocidade MCI veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.



Figura 4.73 – Curva de torque-velocidade máquina elétrica (motor) PHEV - Planaltina (ADVISOR®)

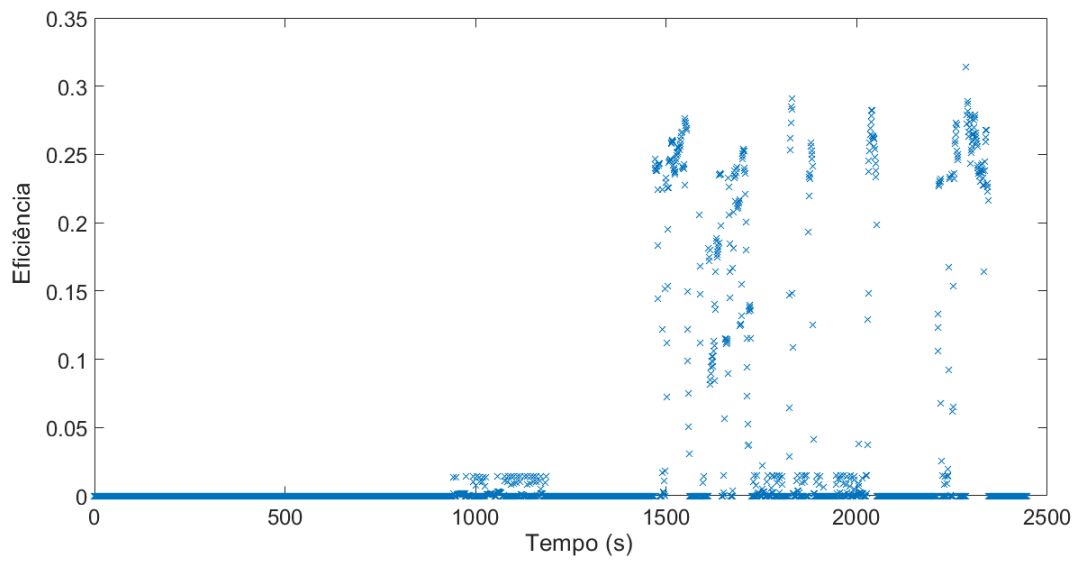


Fonte: Autoria Própria, 2021.

Os torques registrados no percurso evidenciam a operação predominante da máquina elétrica em relação ao MCI, evidenciando o modo de condução elétrico do veículo. Os valores máximos de torque nesse modo de condução foram registrados entre os instantes 1250 e 1500 segundos (Trecho C-D) e novamente entre 2000 e 2500 segundos. Em ambas as ocorrências, os trechos apresentaram acelerações acentuadas em condições de subida. O maior torque reverso ocorreu em decorrência de desaceleração em trecho de descida, próxima ao instante 500 segundos. Para o MCI, o maior valor de torque também foi registrado entre 2000 e 2500 segundos.

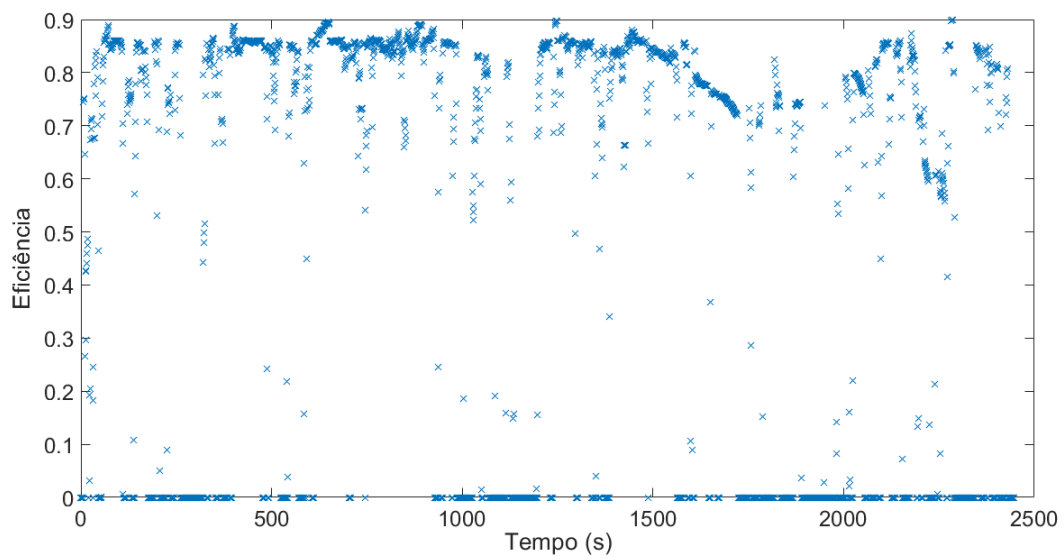
Pela Figura 4.72, observa-se que o MCI apresenta atuação concentrada entre 1000 e 2000 rpm, assumindo valores de torques majoritariamente até 150 N.m. A máquina elétrica, por sua vez, tem a maior parte da sua operação entre 2000 e 4000 rpm, com torques positivos mais elevados em altas rotações e reversos entre 1000 e 2000 rpm. As eficiências do MCI e da máquina elétrica (motor) são dadas pelas Figuras 4.74 e 4.75.

Figura 4.74 – Eficiência MCI veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

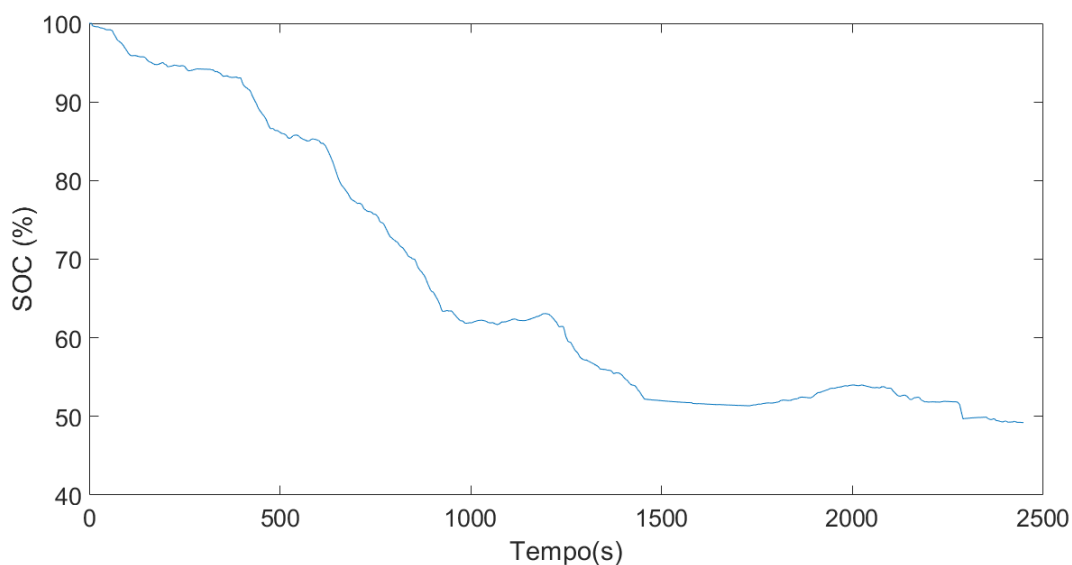
Figura 4.75 – Eficiência máquina elétrica veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

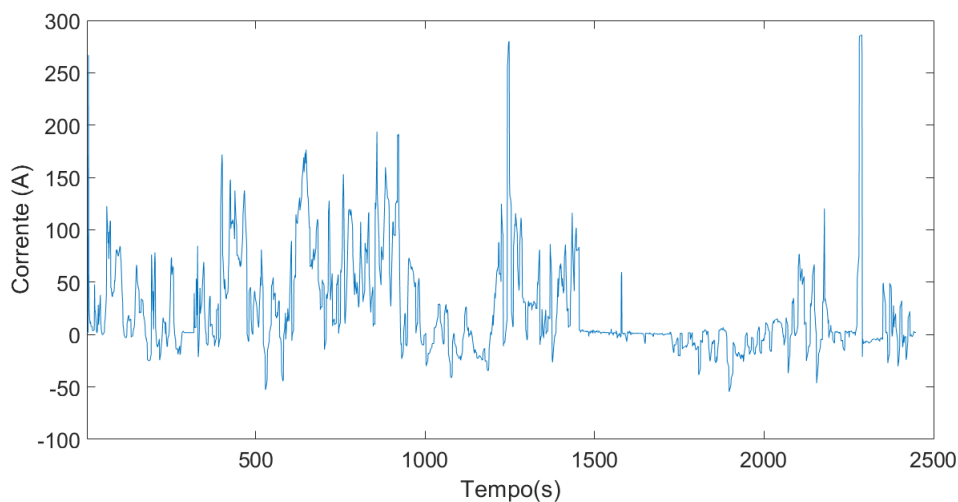
A operação da bateria do PHEV, nesse trajeto, é mostrada pelas Figuras 4.76 e 4.77.

Figura 4.76 – Estado de carga bateria do veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

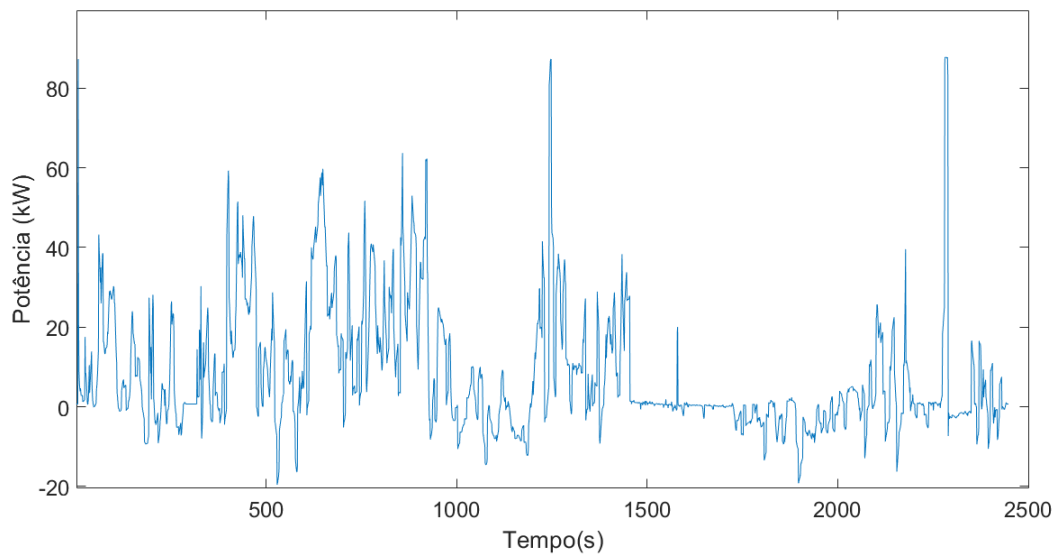
Figura 4.77 – Corrente da bateria do veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

São observados dois perfis de descarga ao longo do trajeto: queda acentuada até aproximadamente 1000 segundos, e, posteriormente, a tendência de manutenção do estado de carga em torno de 50%. Esses perfis se refletem nos valores assumidos pela corrente, que são maiores para o primeiro intervalo citado, apresentando redução gradual até atuar de forma equilibrada em operações de carga e descarga. Os valores máximos positivos correspondem aos picos observados para o torque da máquina elétrica. Os maiores valores reversos ocorrem em trechos de descida do percurso que apresentam desacelerações, e esses são registrados próximos aos instantes de 500 segundos e entre 1500 e 2000 segundos (Trecho E-F). O fluxo de potência da bateria é mostrado na Figura 4.78.

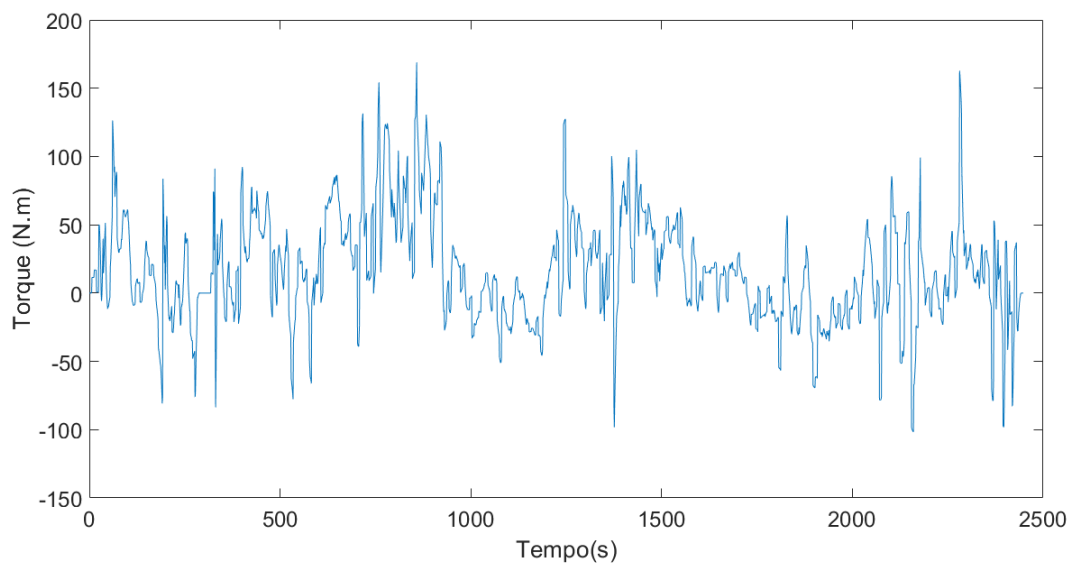
Figura 4.78 – Potência da bateria do veículo PHEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

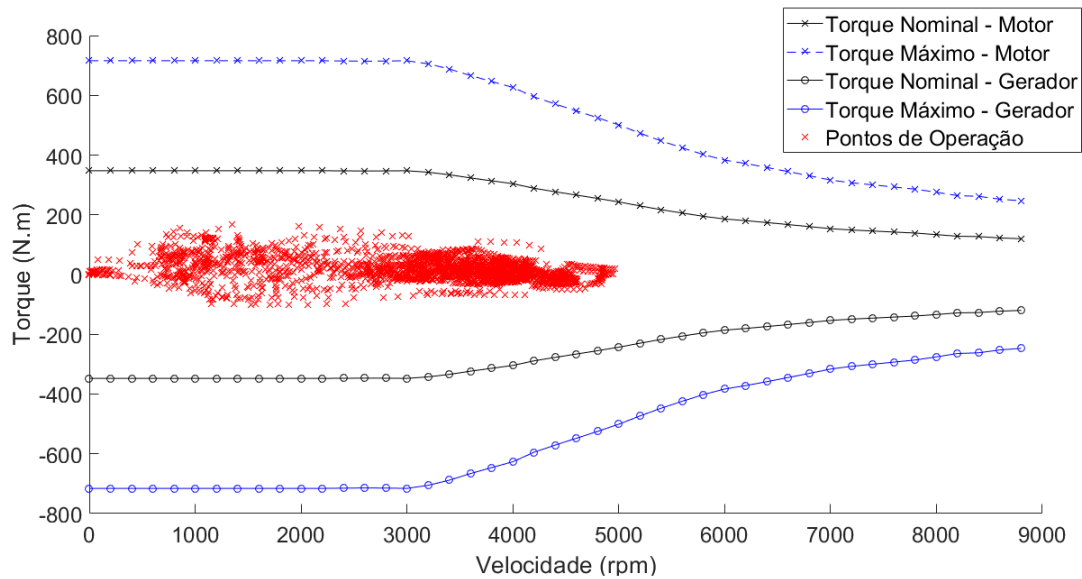
Para o veículo BEV, as curvas de torque do percurso e da máquina são mostrados nas Figuras 4.79 e 4.80.

Figura 4.79 – Torques do percurso veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.80 – Curva de torque-velocidade máquina elétrica veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®)

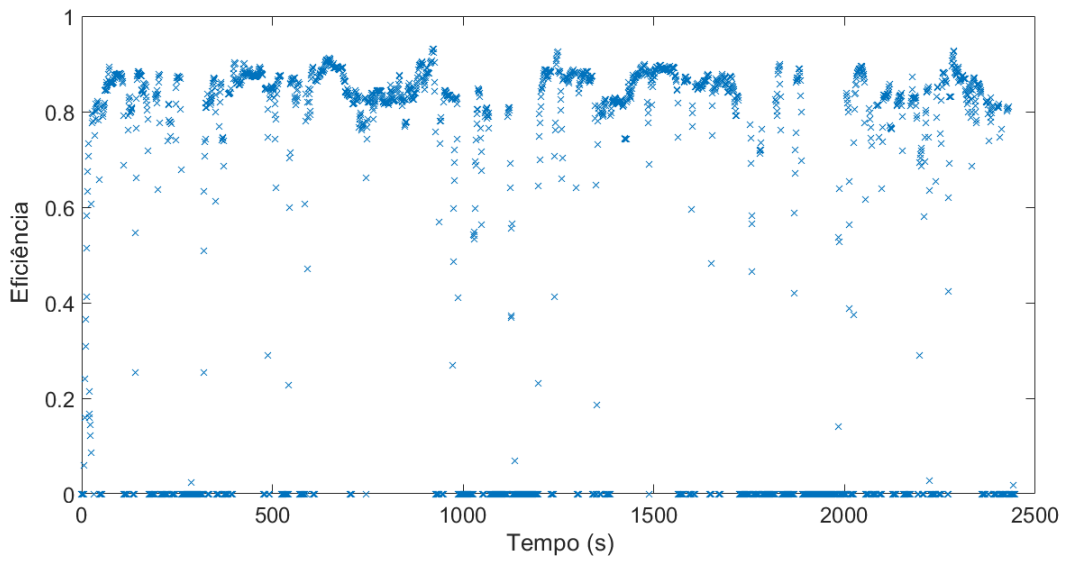


Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir da curva de torque desenvolvido no percurso, observa-se que os maiores valores foram registrados em dois intervalos: o primeiro entre os instantes de 500 e 1000 segundos (Trecho A-B), e novamente entre 2000 e 2500 segundos. Nesses períodos, verificam-se acelerações elevadas em trechos de subida, enquanto que os valores reversos máximos foram observados em trechos de descida do percurso (Trecho A-B) e desaceleração intensa próxima ao instante de 1500 segundos. Pela curva de torque-velocidade da Figura 4.80, verifica-se que a operação da máquina elétrica é predominante entre 2000 e 5000 rpm, com os maiores torques registrados para rotações de até 2000 rpm. Quando comparada ao trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia, a operação nesse trajeto apresenta rotações mais elevadas (próximas à 5000 rpm) e torques menores em baixas rotações.

As eficiências assumidas pela máquina elétrica, no modo propulsão, são mostradas na Figura 4.81.

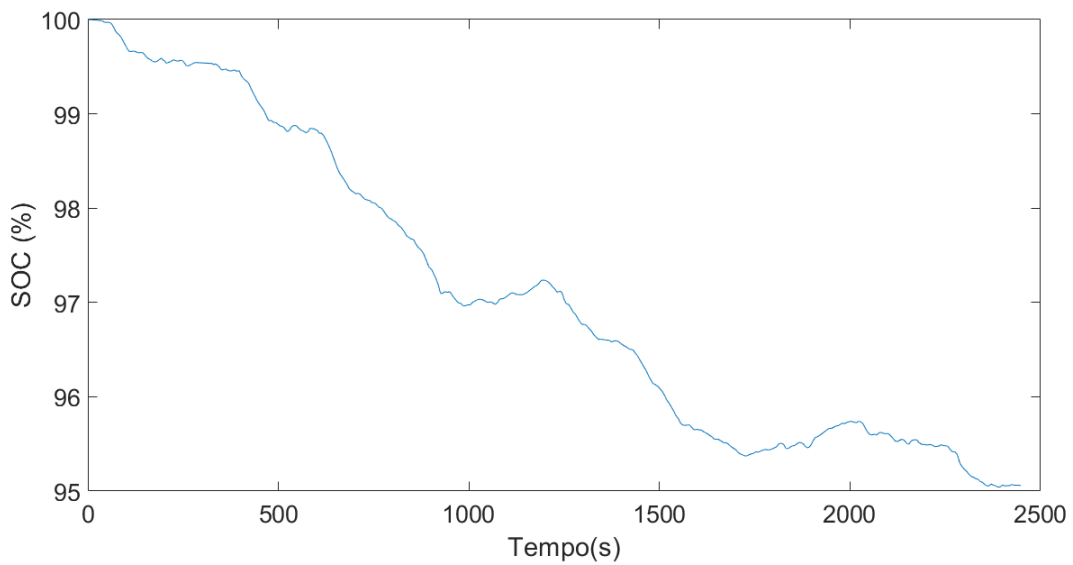
Figura 4.81 – Eficiência máquina elétrica (motor) veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

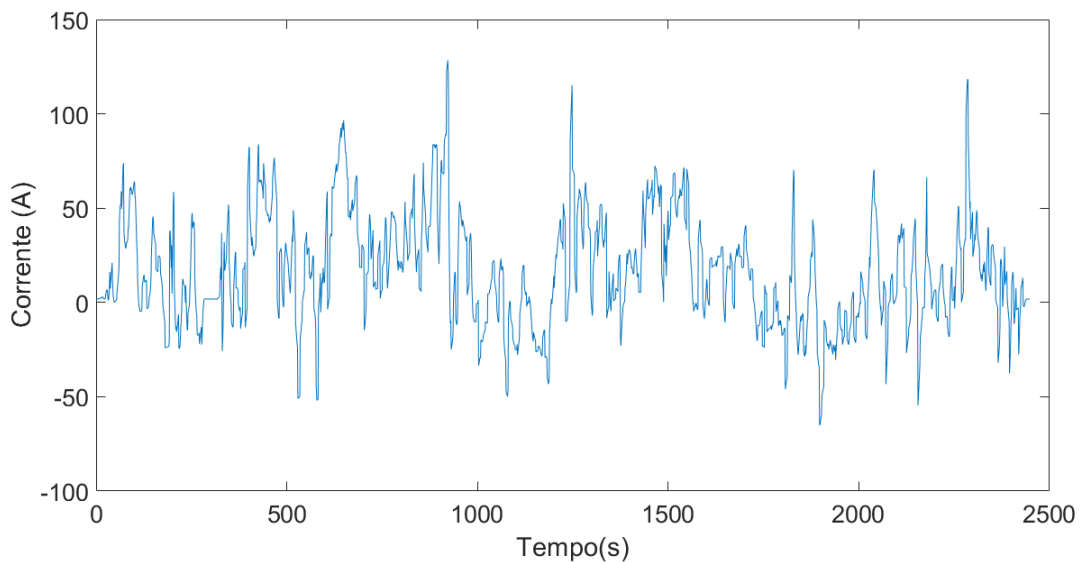
O estado de carga e as correntes da bateria nesse percurso são mostradas nas Figuras 4.82 e 4.83.

Figura 4.82 – Estado de carga bateria veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.83 – Corrente bateria veículo BEV - Planaltina (ADVISOR<sup>®</sup>)

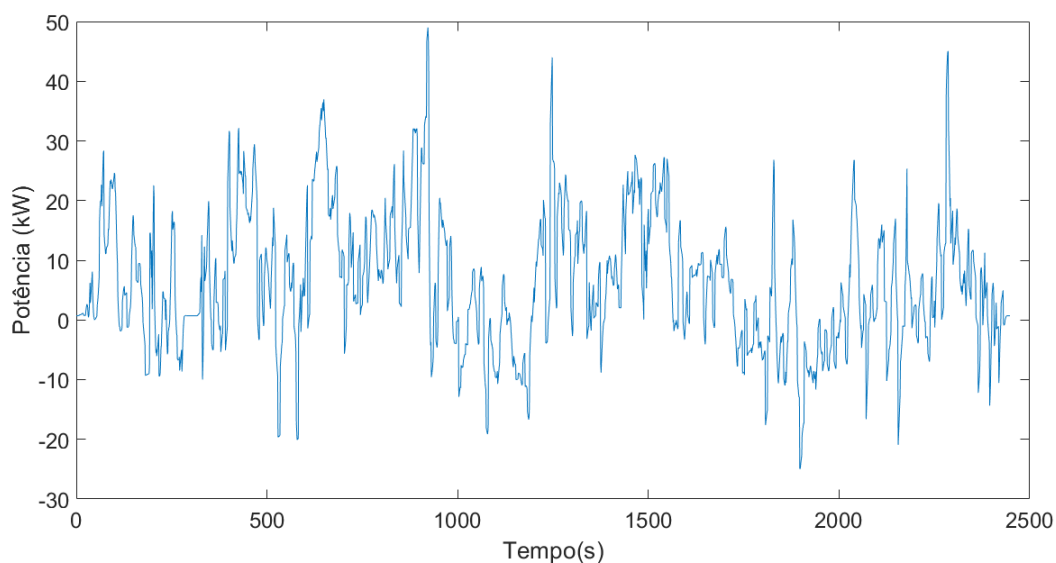


Fonte: Autoria Própria, 2021.

Verifica-se que o estado de carga apresenta diminuição gradual ao longo do percurso, com as descargas mais acentuadas ocorrendo no início do trajeto. Os maiores aumentos de nível foram registrados no intervalo de 1000 a 1500 segundos (Trecho B-C) e depois próximo ao instante de 2000 segundos (Trecho E-F). Como verificado anteriormente, esses períodos correspondem aos trechos de descida do percurso, que acarretam em maiores recuperações de energia por frenagem regenerativa. Essa análise é válida também para as correntes observadas, que têm seus valores máximos positivos registrados em trechos de queda mais acentuada do nível de carga, além dos máximos reversos ocorrendo em trechos de recuperação de energia mais significativa.

O fluxo de potência da bateria nessa operação é mostrada pela Figura 4.84.

Figura 4.84 – Potência da bateria do veículo BEV - Planaltina (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

As Tabelas 4.21 e 4.26 mostram a operação geral dos sistemas de propulsão e baterias de todos os veículos nesse percurso.

Tabela 4.21 – Operação geral dos sistemas de propulsão - Planaltina (ADVISOR®)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Torque Máximo Direto (N.m)	175,6	114,96 (MCI) 74,12 (ELE)	241,181 (MCI) 167,736 (ELE)	168,89
Torque Máximo Reverso (N.m)	-2,47	-20,49 (MCI) -52,63 (ELE)	Nulo (MCI) -198,863 (ELE)	-101,65
Torque RMS (N.m)	54	49,38 (MCI) 21,52 (ELE)	36,94 (MCI) 52,76 (ELE)	42,052
Rotação Máxima (rpm)	2903	3484 (MCI) 4841 (ELE)	3285 (MCI) 5670 (ELE)	4962
Eficiência Média Motor Elétrico	-	77,83%	85,77%	85,82%
Eficiência Média Gerador	-	78,92%	73,32%	81,72%
Eficiência Média MCI	21,92%	29,79%	17,95%	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.



Tabela 4.22 – Operação geral das baterias - Planaltina (ADVISOR®)

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
SOC Inicial	-	100%	100%	100%
SOC Final	-	29,41%	51,2%	95,1%
Corrente Máxima Direta (A)	-	138,58	214,46	128,38
Corrente Máxima Reversa (A)	-	-42,42	-55,88	-64,97
Corrente RMS (A)	-	32,99	51,57	33,48
Potência RMS (kW)	-	5,29	17,44	12,82
Energia total recuperada Fren. Regen. (kWh)	-	1,616	0,962	1,167
Eficiência Bateria	-	81,67%	94,88%	98,61%

Fonte: Autoria Própria, 2021.

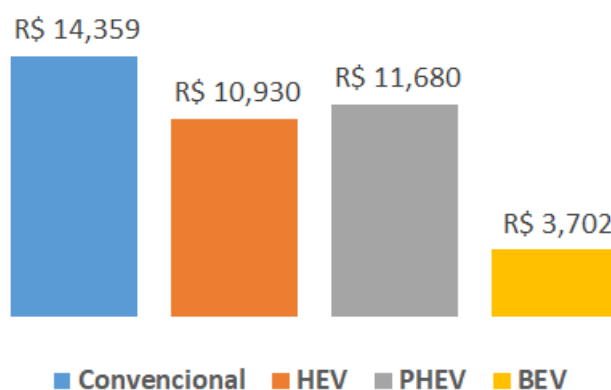
O consumo de energia e combustível para os modelos simulados é mostrado na Tabela 4.23 e Figura 4.85.

Tabela 4.23 – Custo total de combustível e energia - Planaltina ADVISOR®

Fonte de Energia	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Combustível (litro)	2,246	1,614	1,073	-
Bateria (kWh)	-	0,715	5,630	4,324
<b>Gasto total</b>	<b>R\$ 14,359</b>	<b>R\$ 10,930</b>	<b>R\$ 11,680</b>	<b>R\$ 3,702</b>

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.85 – Custo total do trajeto - Planaltina ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se que a diferença de custos segue o padrão do percurso anterior, com o veículo convencional apresentando os maiores valores, seguidos do PHEV, HEV e BEV. Utilizando o convencional como referência, tem-se que seu custo foi cerca de 31% superior ao do HEV,

23% em relação PHEV e 388% superior ao BEV. Entre os híbridos, observa-se um valor ligeiramente maior do PHEV em relação ao HEV, apesar de o primeiro ter percorrido boa parte do trajeto em modo elétrico em um trajeto rodoviário de altitude decrescente. Assim como observado no percurso anterior, isso se deve ao modelo de MCI utilizado nesse veículo, que apresentou baixa eficiência mesmo com o auxílio da propulsão elétrica, como também sua bateria ter apresentado rendimento menor em comparação à do BEV.

#### 4.3.2.2 FASTSim™

A operação dos sistemas de propulsão dos veículos é mostrada na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Operação geral dos sistemas de propulsão - Planaltina FASTSim™

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Eficiência Média Motor Elétrico	-	82,68%	87%	91,05%
Eficiência Média Gerador	-	70,22%	80,17%	86,97%
Eficiência Média MCI	27,60%	36,72%	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Considerando o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia, de característica urbana e altitude crescente, os resultados mostram o aumento da eficiência dos sistemas de propulsão de todos os veículos. De modo semelhante ao percurso anterior, verifica-se a maior eficiência do MCI do HEV em relação à do convencional e o aumento gradual de eficiência das máquinas elétricas de acordo com a eletrificação do veículo. O PHEV novamente percorre todo o trajeto em modo elétrico de condução.

Os parâmetros de consumo e economia de combustível e energia elétrica são mostrados na Tabela 4.25

Tabela 4.25 – Relações de consumo de energia e gasolina - Planaltina FASTSim™

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Razão Energia Elétrica/Combustível	0	0,048	1	1
Economia de Combustível (km/l)	23,129	40,763	80,513	84,041
Litros de gasolina equivalentes	1,614	0,915	0,463	0,444
Consumo energético (kWh/km)	-	0,010	0,111	0,106

Nesse trajeto, verifica-se que o veículo PHEV opera em modo exclusivamente elétrico, enquanto o HEV possui condução majoritária realizada pelo MCI. Uma vez que a característica rodoviária é predominante neste percurso, observam-se os aumentos de economia de combustível em todos os veículos e redução do consumo energético para o HEV, PHEV e

BEV. Esses efeitos decorrem diretamente da operação mais eficiente dos sistemas de propulsão em comparação ao trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia.

A operação geral da bateria nesse trajeto é mostrada pela Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Operação geral da bateria - Planaltina FASTSim™

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
SOC Inicial	-	100%	100%	100%
SOC Final	-	48,7%	52,6%	94,02%
Energia Média Frenagem Regenerativa por ciclo (kWh)	-	0,0275	0,044	0,046
Ciclos de bateria por km	-	1,180	1,207	1,180
Potência Média Bateria - Propulsão (kW)	-	6,394	11,24	10,977
Potência Média Bateria - Regeneração (kW)	-	-4,260	-6,48	-6,658
Potência RMS (kW)	-	4,8	12,56	12,36

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se que os níveis finais de carga de todos os veículos eletrificados foram superiores aos verificados no percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia. Verifica-se que o número de ciclos do HEV e BEV são iguais e menores que o do PHEV, ao passo que a energia média recuperada por frenagem regenerativa é crescente com a maior eletrificação dos veículos. Esse quesito, por sua vez, também é diretamente proporcional às potências médias de propulsão e regeneração da bateria, observando-se a diferença de eficiência de carga e descarga das baterias do PHEV e BEV.

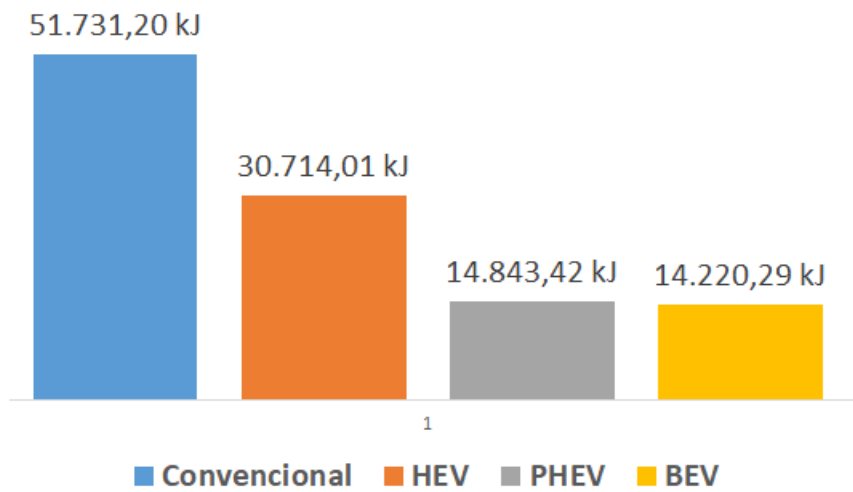
As perdas absolutas ocorridas no percurso são mostradas na Tabela 4.27 e Figura 4.86. A Figura 4.87 ilustra as perdas percentuais.

Tabela 4.27 – Perdas por condições dinâmicas e componentes - Planaltina FASTSim™

<b>Perdas (kJ)</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Arraste	5.585,59	4.433,42	4.435,06	5.174,87
Subida	-641,66	-669,76	-894,54	-895,06
Pneus	3.216,18	3.357,01	4.483,70	4.486,26
Freios	4.231,1	528,54	766,06	735,01
Transmissão	652,17	335,58	440,98	444,19
Máquina Elétrica	0	1.896,17	3.279,86	2.199,07
Bateria	0	71,87	618,70	362,35
Cargas Auxiliares	1.713,6	1713,6	1.713,6	1.713,6
MCI	36.974,23	19.047,59	0	0
<b>Total</b>	<b>51.731,2</b>	<b>30.714,01</b>	<b>14.843,42</b>	<b>14.220,29</b>

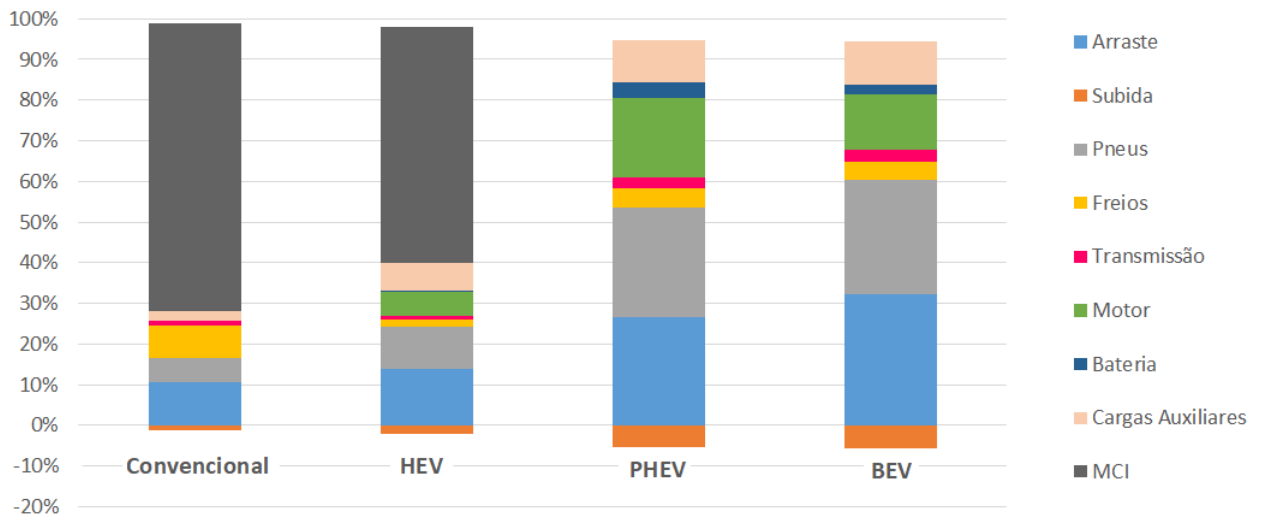
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.86 – Perdas totais - Planaltina FASTSim™



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.87 – Perdas percentuais - Planaltina FASTSim™



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para todos os veículos, a maior perda por fatores dinâmicos é decorrente do arraste aerodinâmico, seguida pela resistência ao rolamento nos pneus. Ressalta-se que, devido à característica de altitude decrescente do percurso, as perdas associadas à subida foram negativas e proporcionais às massas dos veículos.

Os sistemas de propulsão se destacam como os componentes de maiores perdas em todos os veículos. Para o convencional e HEV, o MCI representa, respectivamente, cerca de 70% e 60% das perdas totais, enquanto a máquina elétrica é responsável por 6% no caso do HEV. Verificam-se também perdas significativas nos freios do veículo convencional, que são

reduzidas em comparação aos veículos eletrificados pelo uso da frenagem regenerativa, que é mais utilizada devido à altitude decrescente e maiores velocidades nesse percurso. Para os veículos PHEV e BEV, depois do sistema de propulsão, as cargas auxiliares apresentam a segunda maior causa de perdas.

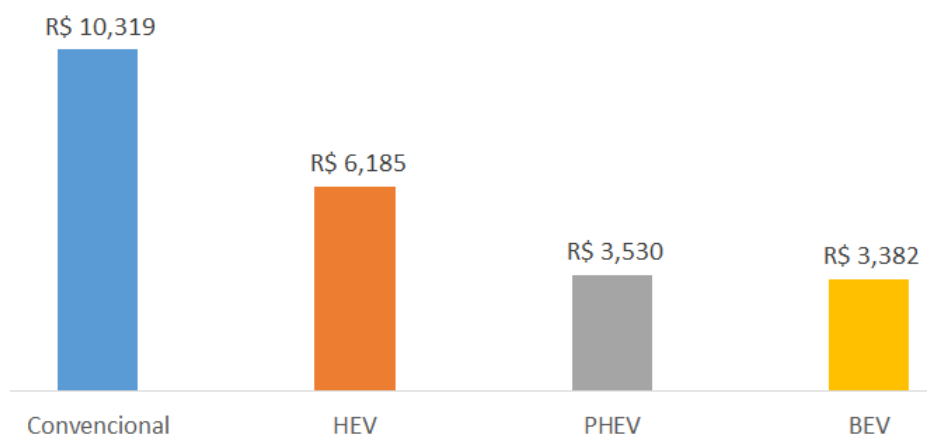
A partir do consumo energético ocorrido no percurso e nos componentes dos veículos, são definidas as quantidades necessárias de combustível e energia da bateria. Seus valores são mostrados na Tabela 4.28 e na Figura 4.88.

Tabela 4.28 – Consumo total de combustível e energia - Planaltina FASTSim™

<b>Fonte de Energia</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Gasolina Comum (litros)	1,614	0,915	-	-
Bateria (kWh)	-	0,390	4,123	3,950
<b>Gasto total</b>	<b>R\$ 10,319</b>	<b>R\$ 6,185</b>	<b>R\$ 3,530</b>	<b>R\$ 3,382</b>

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.88 – Custos totais - Planaltina FASTSim™



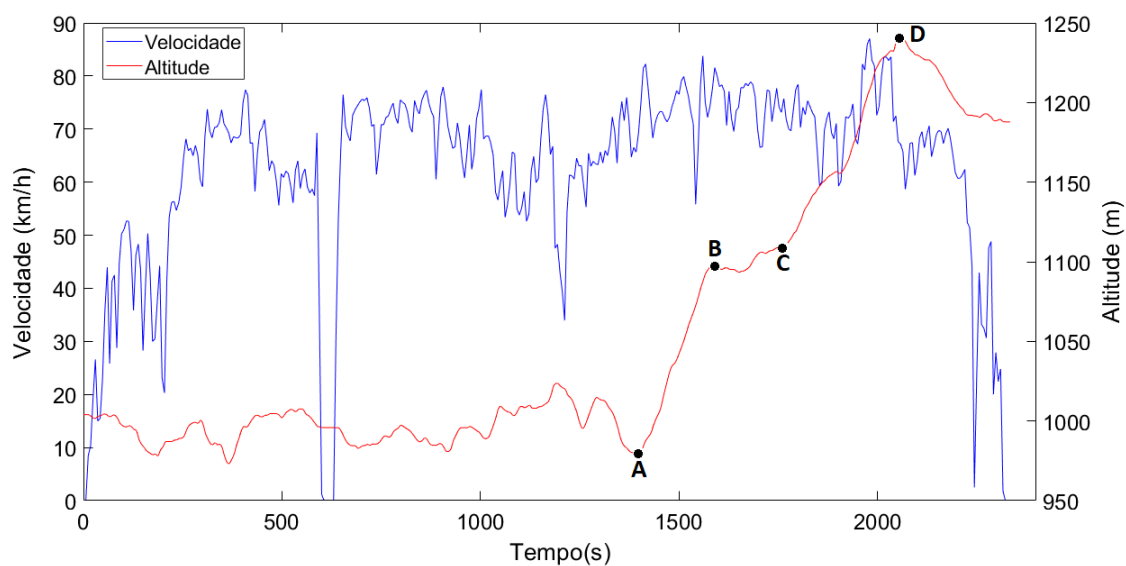
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Assim, observam-se os custos dos veículos após a realização de um percurso com perfil rodoviário e altitude decrescente. O veículo convencional apresentou o maior gasto, sendo esse 67% superior ao do HEV e aumentando até 305% em relação aos custos do BEV. Para os eletrificados, considerando o HEV como referência, a diferença para o PHEV é cerca de 75% maior, chegando próxima a 83% em relação ao BEV. Entre o PHEV e BEV, o custo é aproximadamente 4% superior.

### 4.3.3 UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama (FGA)

Para este percurso, o ciclo de condução e a altitude são agupados na Figura 4.89:

Figura 4.89 – Ciclo de condução e altitude - Gama



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Assim, foram definidos três segmentos de referência: Trecho A-B e Trecho C-D. Suas coordenadas são mostradas na Tabela 4.29.

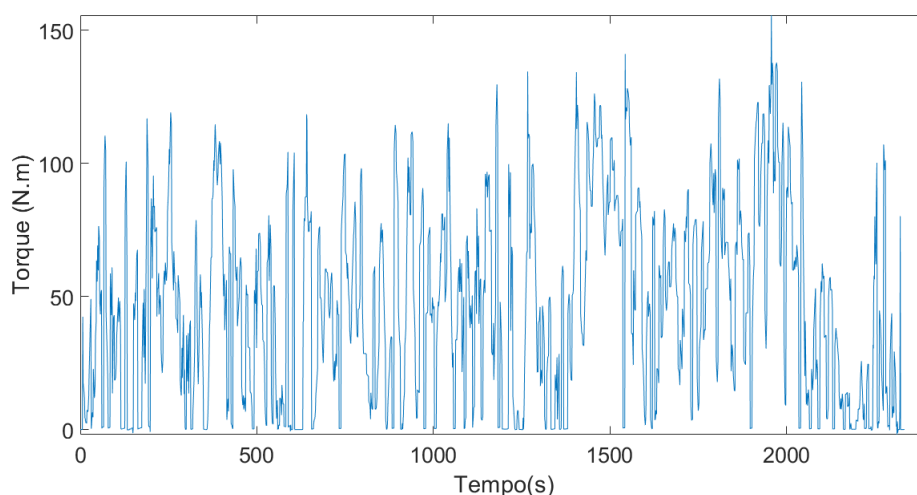
Tabela 4.29 – Pontos de referência altitude - Gama

Ponto	Tempo (s)	Altitude (m)
A	1398	978,3
B	1587	1099
C	1759	1108
D	2055	1242

#### 4.3.3.1 ADVISOR®

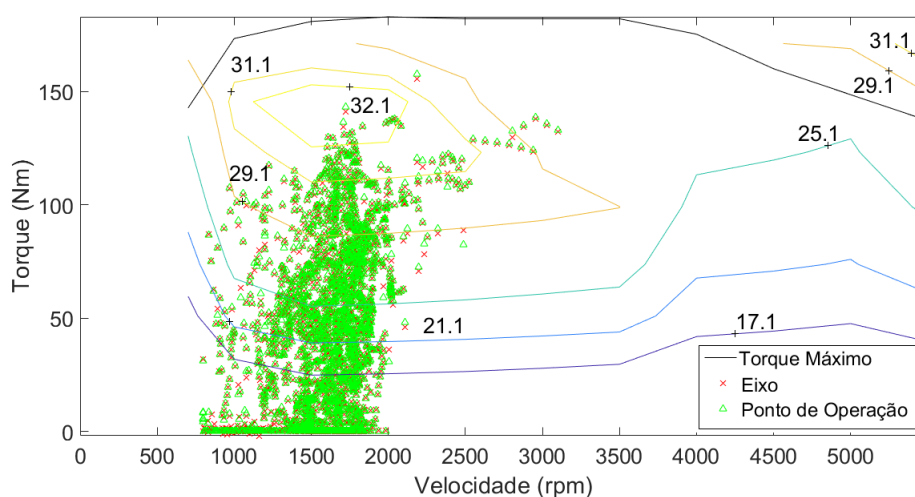
Para o veículo convencional, os torques do trajeto e a operação do MCI são mostradas nas Figuras 4.90 e 4.91.

Figura 4.90 – Torques do trajeto para veículo convencional - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.91 – Curva de torque-velocidade MCI veículo convencional - Gama ADVISOR®

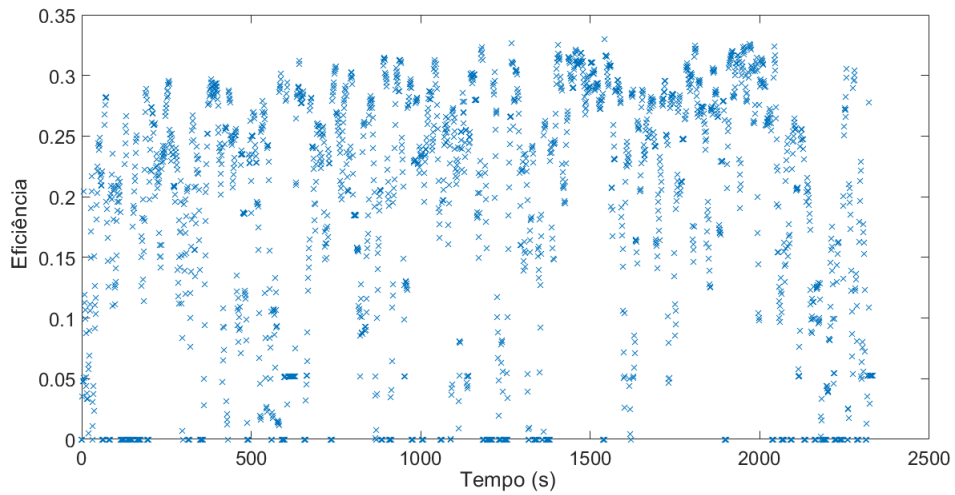


Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se que, para a curva de torque obtida neste percurso, os maiores valores foram registrados entre 1000 e 1500 segundos (final do Trecho A-B) e novamente entre 1500 e 2000 segundos (Trecho C-D). As condições verificadas nesses trechos são variações acentuadas de velocidade ocorridas em elevação crescente.

Pela Figura 4.91, é possível perceber que a atuação do MCI está mais concentrada entre as rotações de 1500 a 2000 segundos, assumindo majoritariamente valores de torque de até 140 N.m. Uma vez que a velocidade média desse percurso supera a do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, também de característica rodoviária, verifica-se maior operação em rotações acima de 2500 rpm, mas com menor número de pontos acima de 140 N.m. A Figura 4.92 mostra os pontos de eficiência do MCI ao longo desse trajeto:

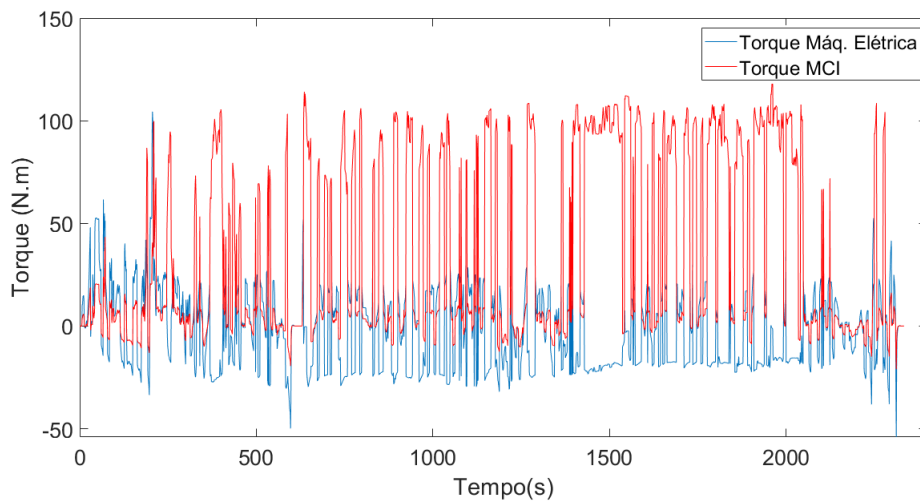
Figura 4.92 – Eficiência do MCI do veículo convencional - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para o veículo HEV, as curvas de torque e pontos de operação dos sistemas de propulsão são mostrados nas Figuras 4.93, 4.94 e 4.95.

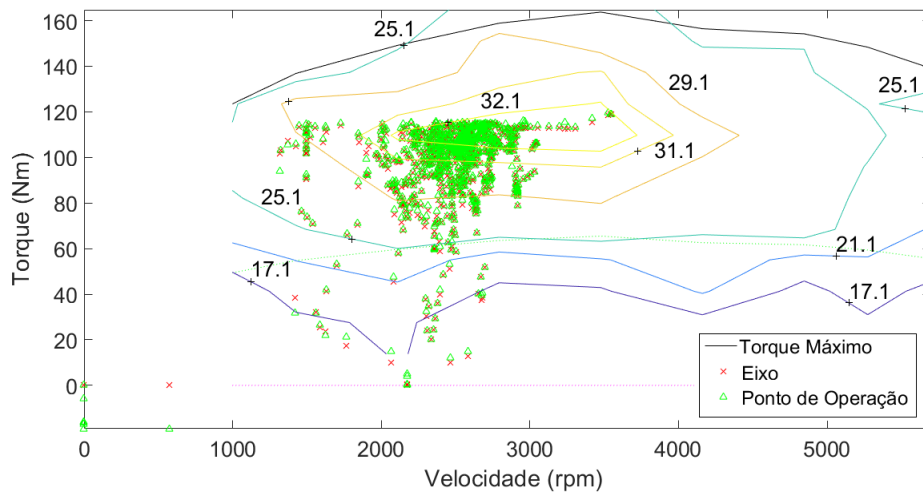
Figura 4.93 – Torques do trajeto para veículo HEV - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

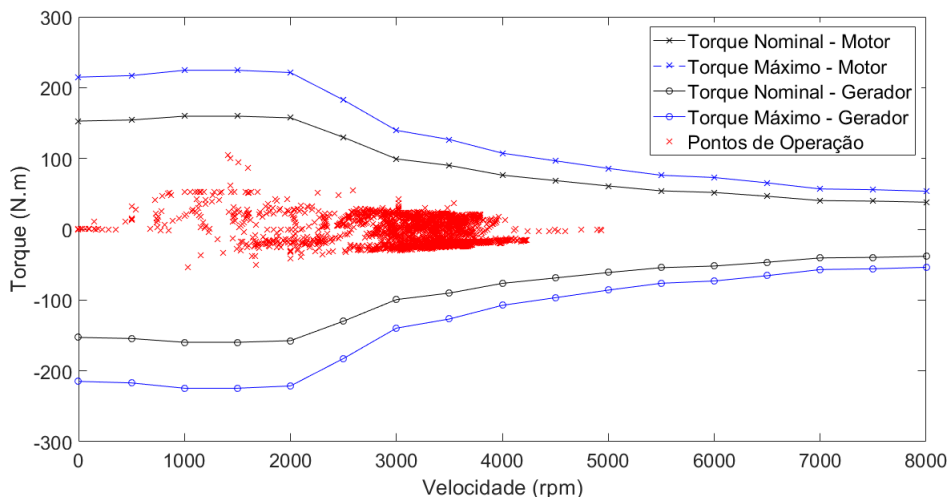


Figura 4.94 – Curva de torque-velocidade MCI veículo HEV - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.95 – Curva torque-velocidade máquina elétrica veículo HEV - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

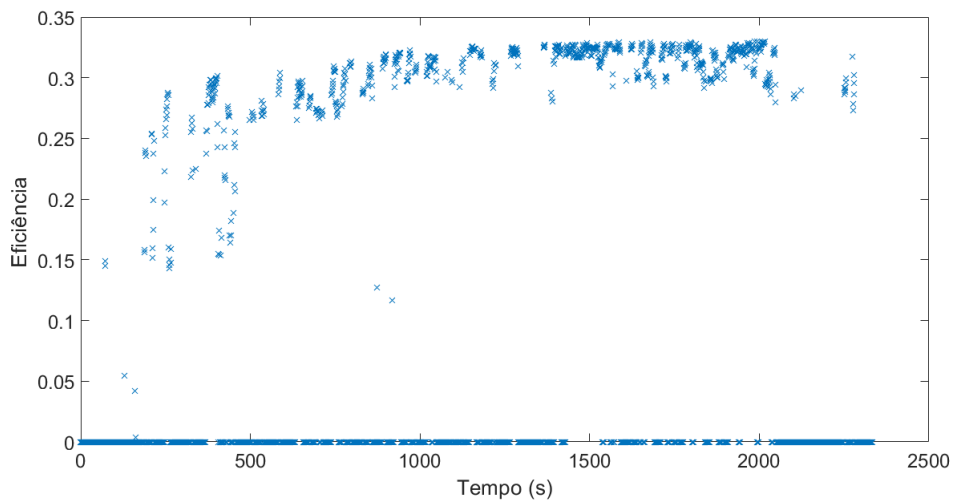
Verifica-se a operação predominante da máquina elétrica no modo gerador, ficando o MCI responsável pela maior parte da propulsão do veículo. Em relação ao trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, ocorre a diminuição da quantidade de trechos com baixos torques, observando-se uma maior uniformidade dessa grandeza ao longo do percurso. Para o MCI, os valores máximos foram registrados próximos ao instante de 600 segundos, após a partida do veículo na única parada ocorrida no trajeto, e depois em torno de 2000 segundos (Trecho C-D), devido a uma aceleração em trecho de subida. Para a máquina elétrica, o torque máximo reverso foi observado próximo ao instante de 600 segundos, decorrente da frenagem anterior à parada do veículo.

Pela Figura 4.94, verifica-se a concentração dos pontos de operação do MCI entre 2000 e

3000 rpm, assumindo, em sua maioria, valores de torque a partir de 70 N.m. Para a máquina elétrica, tem-se que sua operação foi mais concentrada entre 3000 e 4000 rpm, com valores de torques de 50 N.m em média. Quando comparada ao trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, verifica-se, para ambos os sistemas de propulsão, uma concentração maior dos pontos de operação em torno de rotações mais altas.

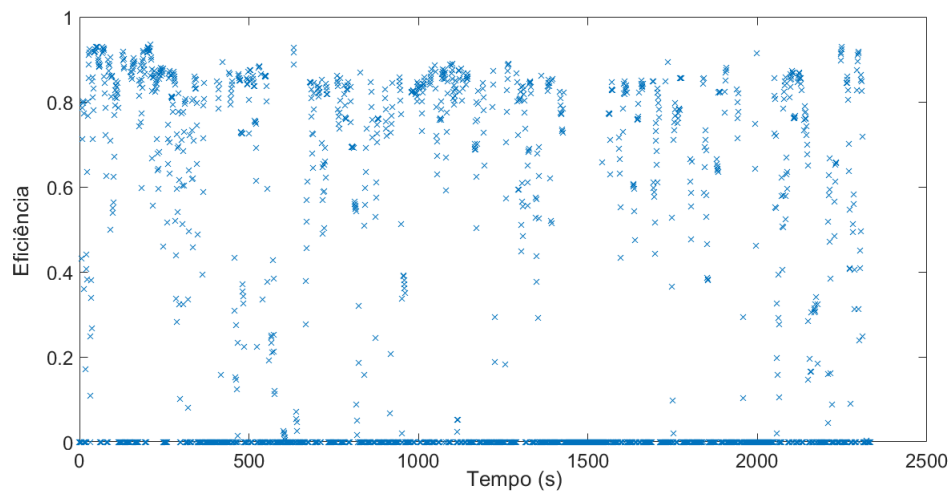
As curvas de eficiência do MCI e da máquina elétrica (modo motor) são mostradas nas Figuras 4.96 e 4.97.

Figura 4.96 – Eficiência do MCI para veículo HEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

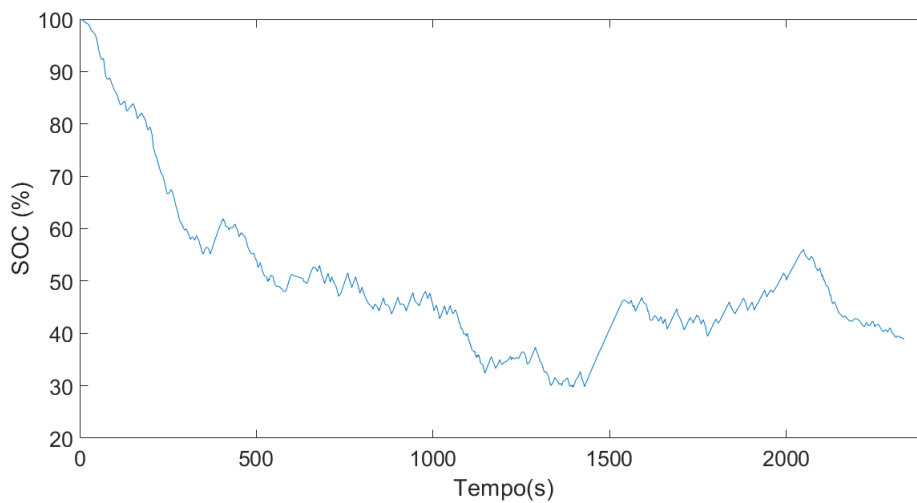
Figura 4.97 – Eficiência da máquina elétrica (motor) veículo HEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

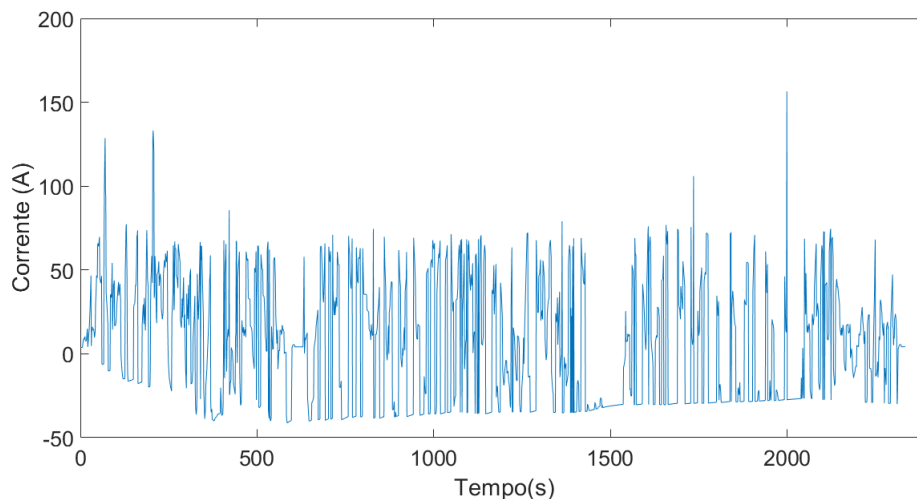
A operação da bateria do HEV nesse percurso é mostrada nas Figuras 4.98 e 4.99.

Figura 4.98 – Estado de carga bateria veículo HEV - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

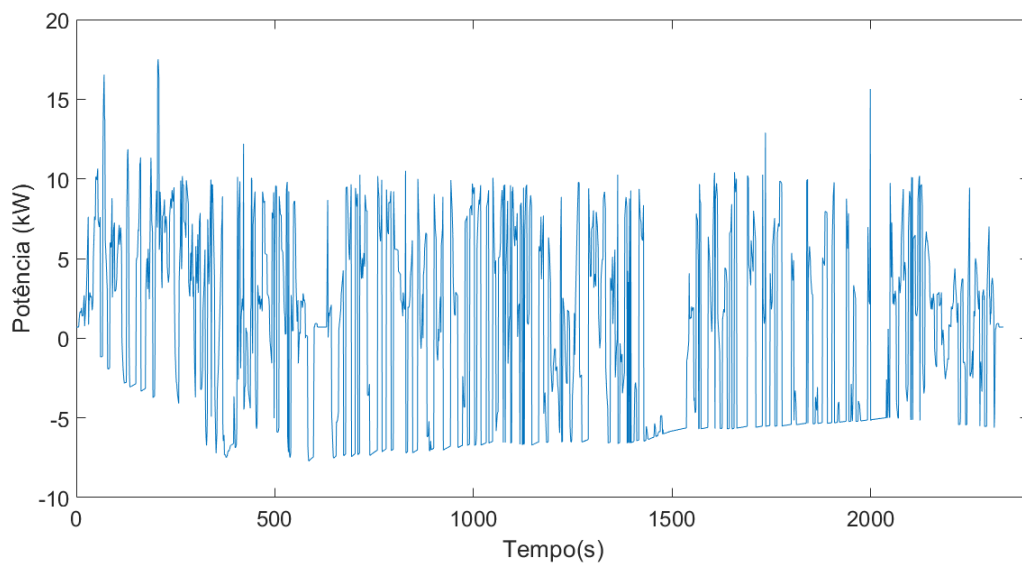
Figura 4.99 – Corrente bateria veículo HEV - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Verifica-se que, aproximadamente até o instante de 1500 segundos, a curva de descarga da bateria assume predominantemente um perfil de descarga, atingindo seu menor nível em torno de 30%. Em seguida, ocorre um aumento acentuado de carga próximo de 1500 segundos e depois em 2000 segundos, devido à atuação prolongada da máquina elétrica como gerador nos trechos de subida, mostrados nos segmentos A-B e C-D da Figura 4.89. Por fim, observa-se uma tendência de manutenção de carga entre 40% e 50%. As correntes experimentadas pela bateria apresentam seus valores máximos positivos em acelerações ocorridas no início e final do percurso, enquanto os valores máximos negativos foram registrados próximos ao instante 1500 segundos, no mesmo período em que houve o aumento mais acentuado dos níveis de carga. O fluxo de potência da bateria é ilustrado na Figura 4.100.

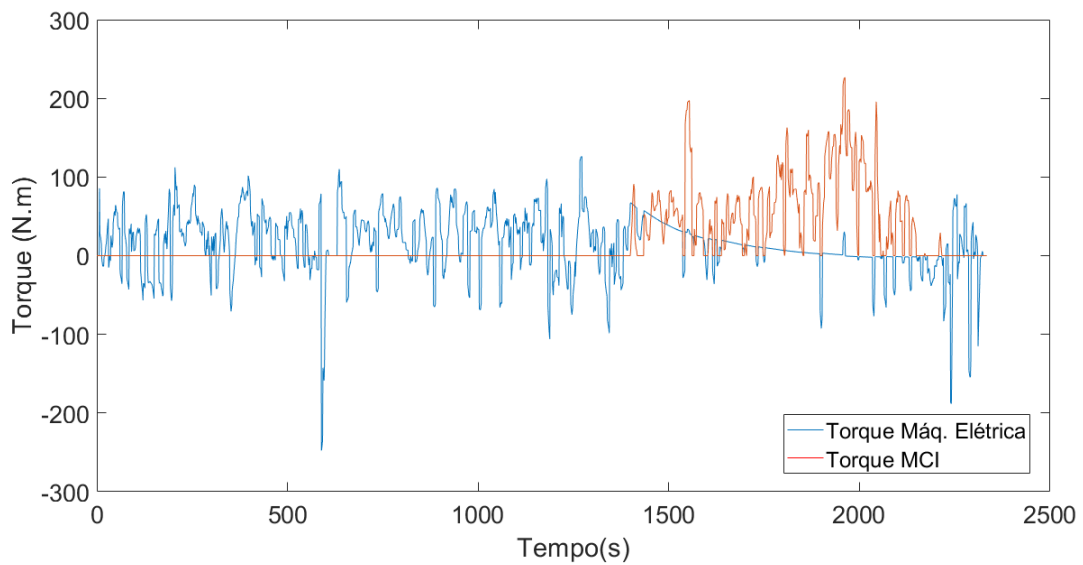
Figura 4.100 – Potência bateria veículo HEV - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

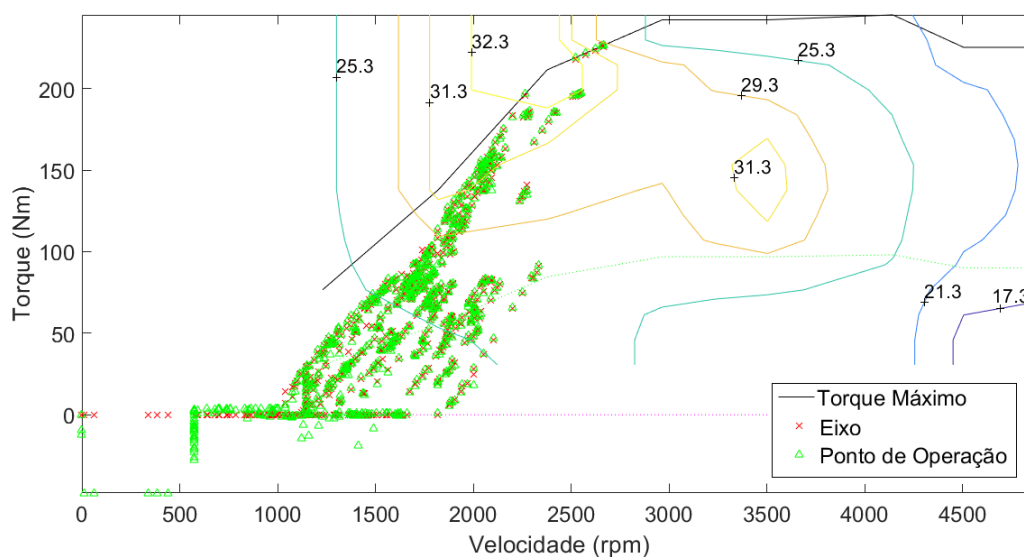
Para o veículo PHEV, as curvas de torque e pontos de operação dos sistemas de propulsão são mostradas nas Figuras 4.101, 4.102 e 4.103.

Figura 4.101 – Torques do trajeto para veículo PHEV - Gama (ADVISOR®)



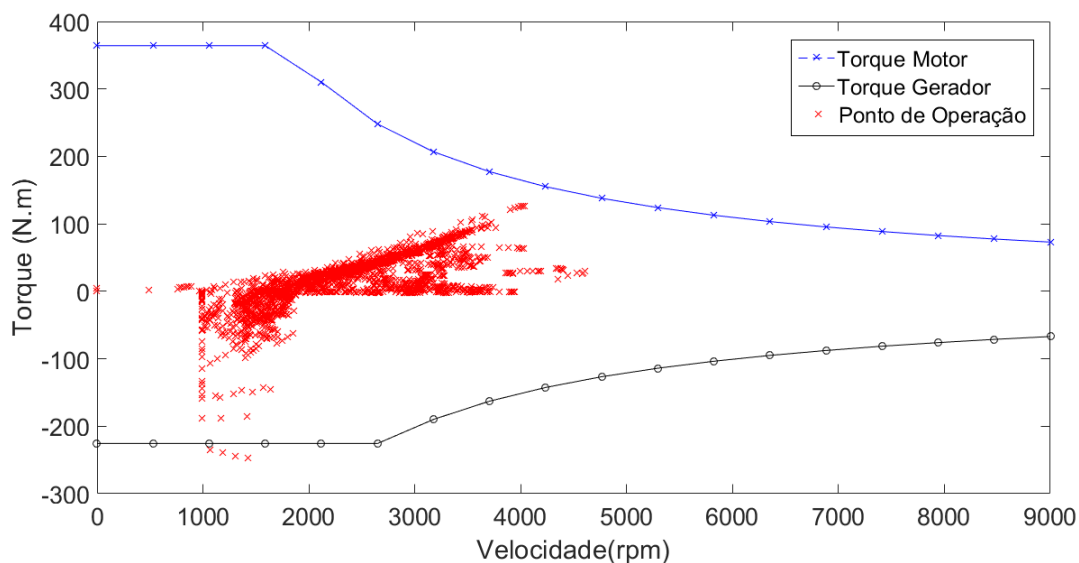
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.102 – Curva de torque-velocidade MCI do veículo PHEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.103 – Curva de torque-velocidade da máquina elétrica veículo PHEV - Gama (ADVISOR®)



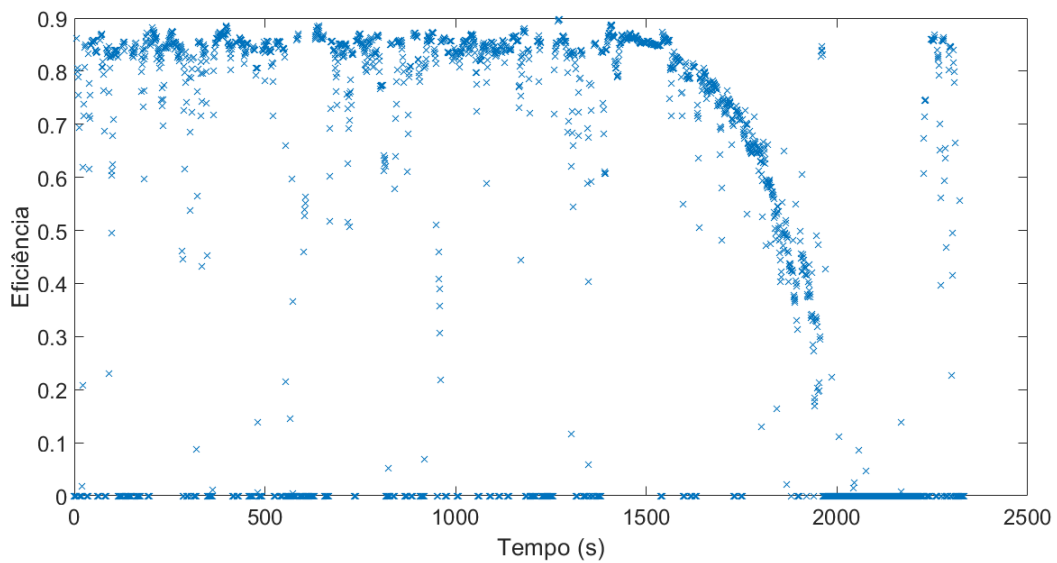
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se, novamente, a predominância da propulsão elétrica ao longo do percurso, evidenciando o modo elétrico de condução do veículo. Os torques positivos máximos desenvolvidos pela máquina elétrica ocorreram devido às acelerações do veículo, registradas no instante de partida após a parada e no intervalo de 1000 a 1500 segundos (início do Trecho A-B). Os maiores torques reversos ocorreram em decorrência de frenagens mais intensas, ocorrendo essas próximas à parada total do veículo próximo ao instante de 500 segundos e ao final do percurso. O MCI passa a operar pouco antes da elevação de altitude mostrada

no Trecho A-B, período esse equivalente à redução gradual da operação da máquina elétrica como motor. Os torques máximos do MCI são registrados para acelerações ocorridas em trechos de alta velocidade de altitude crescente, próximas ao instante de 2000 segundos.

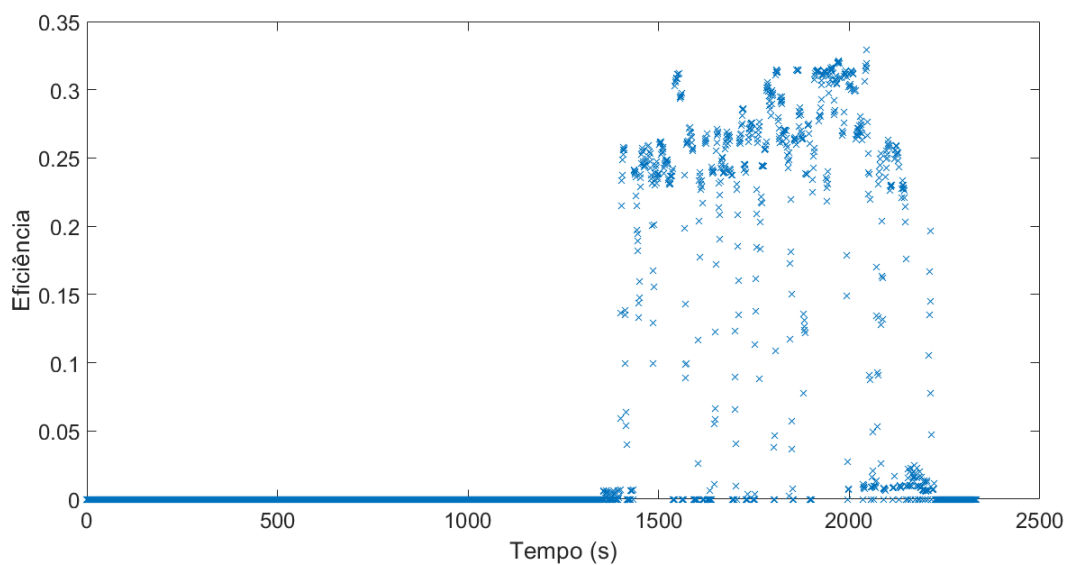
Pela Figura 4.102, é possível perceber que a operação do MCI se concentrou entre 1000 e 2500 rpm, apresentando seus pontos de maior torque em rotações mais altas. Para a máquina elétrica, verifica-se sua atuação concentrada na região de potência constante, a partir de 1500 rpm, assumindo torques maiores em altas rotações. Em comparação ao trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, a operação da máquina elétrica apresentou maiores torques em baixas rotações, ao passo que, em rotações mais altas, houve a redução dos valores observados dessa grandeza. O MCI, por sua vez, possui mais pontos de operação acima de 2000 rpm, assim como seus torques são mais elevados do que aqueles observados no trajeto anterior. As curvas de eficiência do MCI e da máquina elétrica (motor) são mostradas nas Figuras 4.104 e 4.105.

Figura 4.104 – Eficiência da máquina elétrica (motor) para veículo PHEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

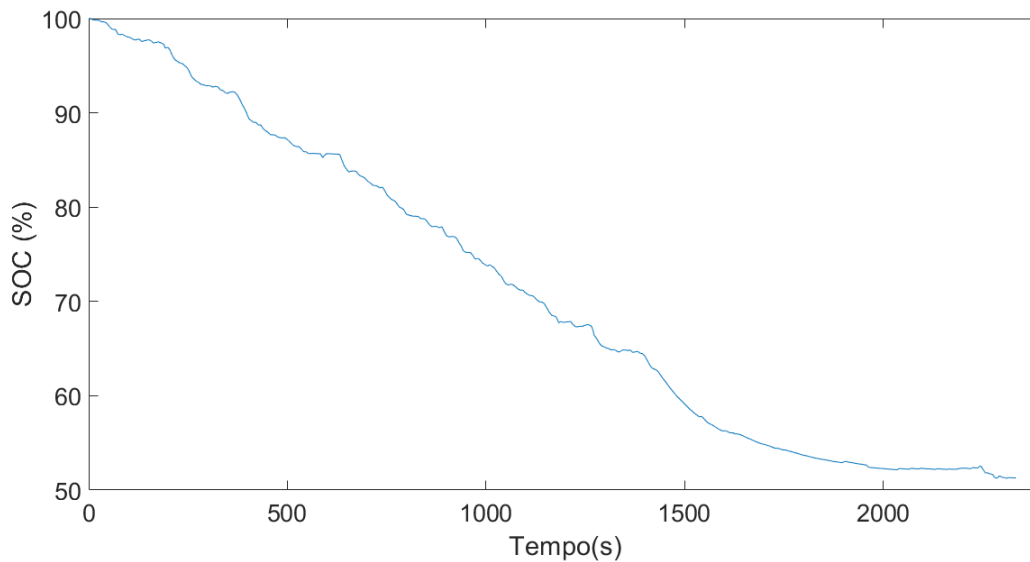
Figura 4.105 – Eficiência MCI veículo PHEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

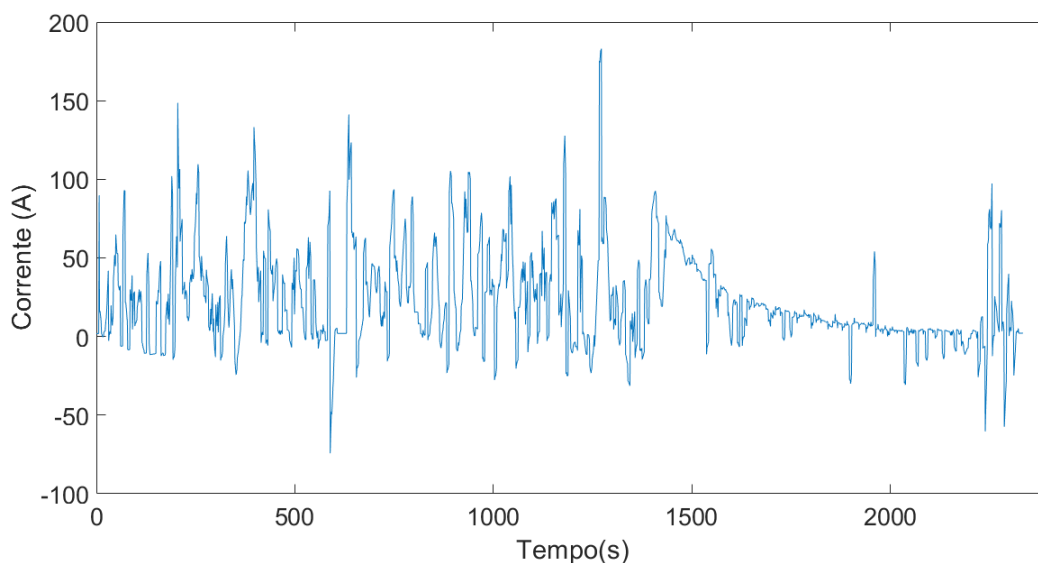
O estado de carga e as correntes da bateria para esse trajeto são ilustradas nas Figuras 4.106 e 4.107 do PHEV.

Figura 4.106 – Estado de carga da bateria do veículo PHEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.107 – Corrente da bateria do veículo PHEV - Gama (ADVISOR®)

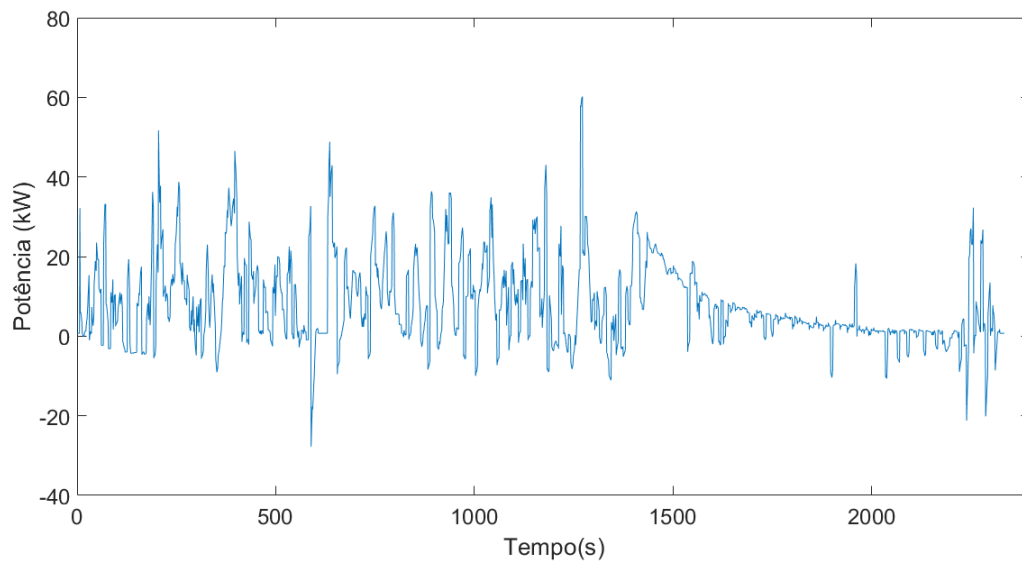


Fonte: Autoria Própria, 2021.

Uma vez que o veículo atua no modo de condução elétrico na maior parte do percurso, verifica-se a predominância de descarga da bateria até aproximadamente 50%, apresentando uma tendência de manutenção de carga mais próxima ao final do trajeto. Como o trajeto possui apenas uma parada e variações baixas de velocidade, não são observados aumentos acentuados de carga ao longo da operação. A curva de corrente apresenta seu valor máximo na condição de aceleração e subida, ocorrida próxima entre 1000 e 1500 segundos (Trecho A-B), e seu valor máximo reverso na ocasião da frenagem que antecede a única parada ocorrida no trajeto. Por ocasião da operação do MCI e redução gradual da operação da máquina elétrica como motor, entre os instantes 1500 e 2000 segundos tem-se uma redução das correntes, voltando a aumentar próximo ao final do trajeto. O fluxo de potência da bateria do PHEV é mostrada na Figura 4.108.



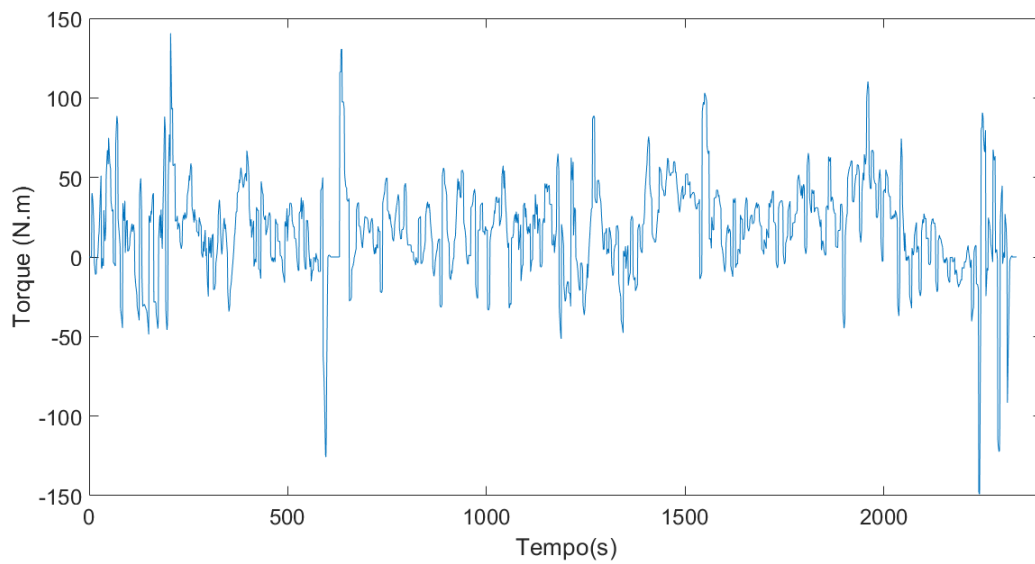
Figura 4.108 – Potência da bateria do veículo PHEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

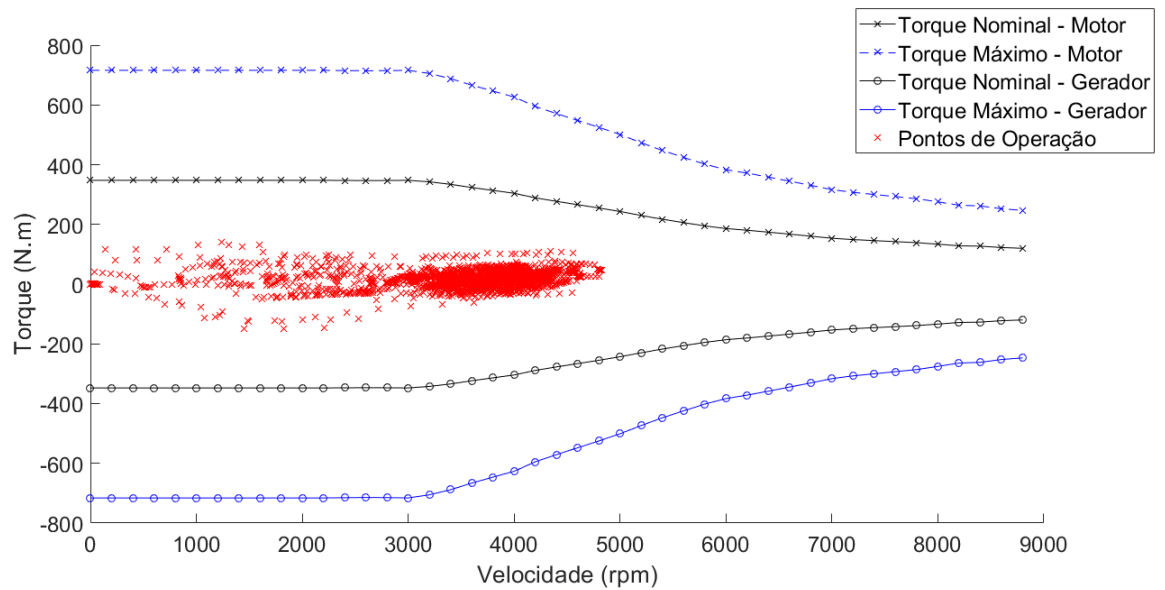
Para o veículo BEV, as curvas de torque e pontos de operação da máquina elétrica são mostradas nas Figuras 4.109 e 4.110.

Figura 4.109 – Torques do trajeto para veículo BEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.110 – Curva de torque-velocidade da máquina elétrica veículo BEV - Gama (ADVISOR®)



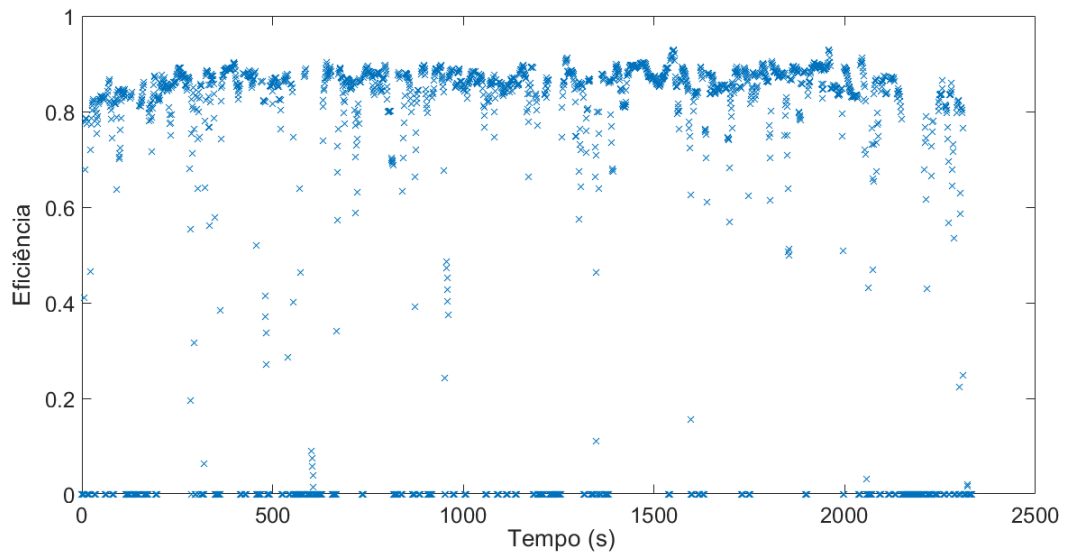
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Verifica-se que os maiores valores de torque ocorreram próximos aos instantes 250 e 500 segundos, sendo ocasionados pelas acelerações ocorridas nesses instantes. O maior valor reverso ocorreu em decorrência da frenagem ocorrida antes da parada do veículo.

Pela Figura 4.110, observa-se a máquina elétrica atuou predominantemente entre 3000 e 5000 rpm. Em rotações menores, tem-se uma baixa concentração de pontos de operação, mas que possuem os maiores torques registrados na operação. Em comparação ao trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, é possível perceber o aumento das rotações de operação, ao passo que são registrados menores valores de torque em rotações mais baixas.

A eficiência da máquina elétrica, ao longo desse percurso, é mostrada na Figura 4.111.

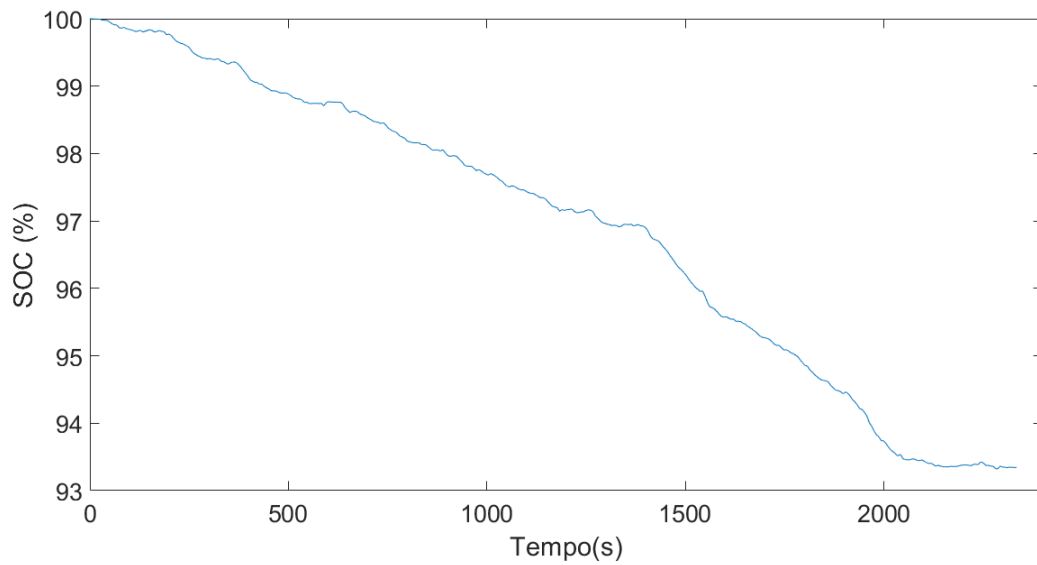
Figura 4.111 – Eficiência da máquina elétrica para veículo BEV - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

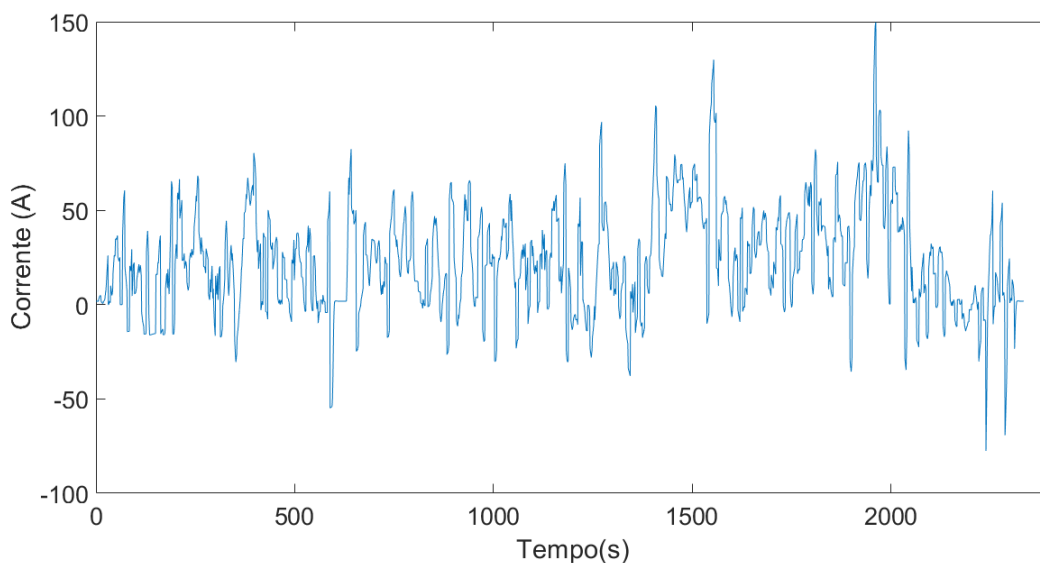
Para a bateria do veículo BEV, o estado de carga e o perfil de correntes são mostrados, respectivamente, nas Figuras 4.112 e 4.113.

Figura 4.112 – Estado de carga bateria veículo BEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

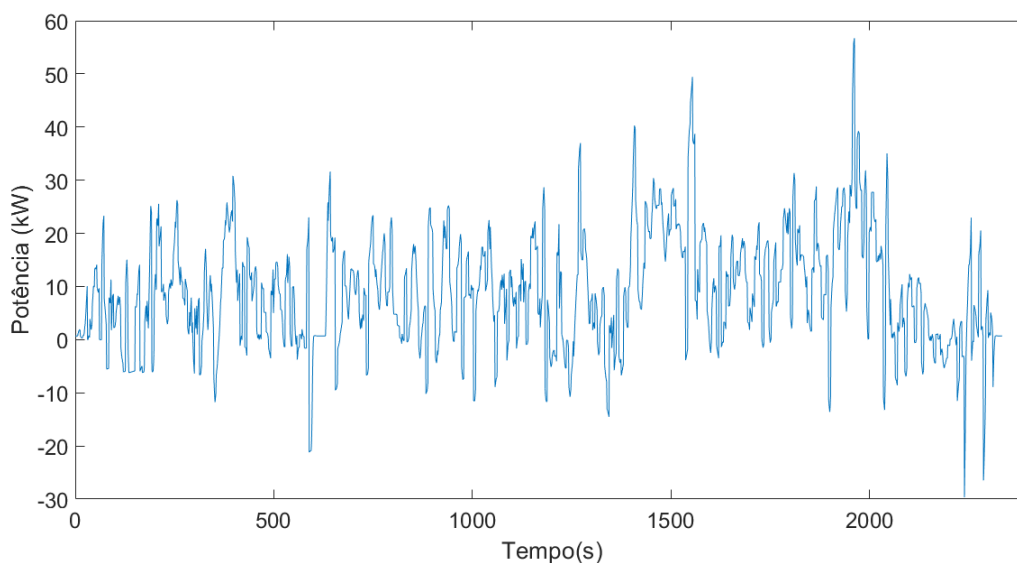
Figura 4.113 – Corrente da bateria do veículo BEV - Gama (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se, pela Figura 4.112, a redução gradual do nível de carga da bateria. As descargas mais acentuadas se iniciam próximas ao instante 1500 segundos, em decorrência de elevação existente no percurso, se estendendo até perto do instante 2000 segundos. Após isso, verifica-se uma tendência de manutenção de carga até o final do trajeto. Para as correntes, percebe-se que seus valores máximos ocorreram na parte final do percurso, entre os instantes 1500 e 2000 segundos (Trecho C-D). Os trechos correspondentes a este intervalo apresentam variações de velocidade do veículo e altitude crescente. A potência da bateria é ilustrada na Figura 4.114:

Figura 4.114 – Potência da bateria do veículo BEV - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

As Tabelas 4.30 e 4.31 mostram, respectivamente, a operação geral dos sistemas de propulsão e baterias nesse trajeto.

Tabela 4.30 – Operação geral dos sistemas de propulsão - Gama (ADVISOR®)

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Torque Máximo Direto (N.m)	155,69	104,37 (MCI) 118,4 (ELE)	226,37 (MCI) 126,08 (ELE)	140,55
Torque Máximo Reverso (N.m)	-1,91	-21,07 (MCI) -54,09 (ELE)	Nulo (MCI) -247,61 (ELE)	-149,02
Torque RMS (N.m)	58,95	55,85 (MCI) 18,76 (ELE)	46,14 (MCI) 41,28 (ELE)	34,43
Rotação Máxima (rpm)	3098	2668 (MCI) 4605 (ELE)	2667 (MCI) 4605 (ELE)	4831
Eficiência Média Motor Elétrico	-	76,26%	83,12%	86,86%
Eficiência Média Gerador	-	83,22%	74,78%	81,28%
Eficiência Média MCI	23,91%	30,61%	23,88%	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 4.31 – Operação geral das baterias - Gama (ADVISOR®)

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
SOC Inicial	-	100%	100%	100%
SOC Final	-	38,95%	51,28%	93,34%
Corrente Máxima Direta (A)	-	156,43	183,03	149,69
Corrente Máxima Reversa (A)	-	-41,18	-74,26	-77,52
Corrente RMS (A)	-	35,58	38,59	36,49
Potência RMS (kW)	-	5,73	13,46	13,95
Energia total recuperada Fren. Regen. (kWh)	-	1,523	0,549	0,713
Eficiência Bateria	-	80,76%	96,17%	98,73%

Fonte: Autoria Própria, 2021.

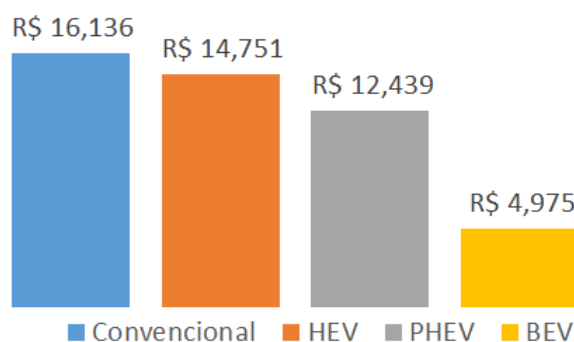
Fonte: Autoria Própria, 2021.

O consumo de combustível e energia é mostrado na Tabela 4.32 e Figura 4.115:

Tabela 4.32 – Custo total de combustível e energia - Gama (ADVISOR®)

Fonte de Energia	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Gasolina Comum (litros)	2,524	2,223	1,225	-
Bateria (kWh)	-	0,630	5,382	5,810
<b>Gasto total</b>	<b>R\$ 16,136</b>	<b>R\$ 14,751</b>	<b>R\$ 12,439</b>	<b>R\$ 4,975</b>

Figura 4.115 – Custo total do percurso - Gama ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Dentre os trajetos *intercampi*, verifica-se que esse percurso possui os maiores custos para todos os veículos. No entanto, o automóvel PHEV apresenta gasto menor que o do HEV (redução próxima de 16%), indicando uma menor operação no modo elétrico desse último nesse trajeto. O veículo convencional, com os custos mais elevados do percurso, superou em 9% os valores do HEV, 30% os do PHEV e 324% os do BEV. Dentre os elétricos, utilizando o BEV como referência, o custo do HEV supera em 296% o seu valor, enquanto que o PHEV apresenta custos maiores em cerca de 250%.

#### 4.3.3.2 FASTSim™

A operação dos sistemas de propulsão obtidos no percurso são mostrados na Tabela 4.33.

Tabela 4.33 – Operação geral sistemas de propulsão - Gama FASTSim™

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Eficiência Média Motor Elétrico	-	82,57%	87,1%	91,21%
Eficiência Média Gerador	-	70,50%	80,27%	87,10%
Eficiência Média MCI	28,82%	36,70%	-	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

De forma geral, os resultados de eficiência obtidos mostram ligeiro aumento de eficiência da máquina elétrica em comparação com o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina. A exceção ocorre para a atuação como motor da máquina do veículo HEV. Para o MCI, verifica-se um aumento de rendimento para o veículo convencional, enquanto que o HEV apresentou ínfima redução. Novamente, o veículo PHEV atuou no modo de condução elétrica durante todo o percurso.

Os parâmetros de consumo e economia de combustível e energia elétrica do trajeto são mostrados na Tabela 4.34.

Tabela 4.34 – Relações de consumo de energia e gasolina - Gama (FASTSim™)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Razão Energia Elétrica/Combustível	0	0,014	1	1
Economia de Combustível (km/l)	22,367	31,832	64,181	68,238
Litros de gasolina equivalentes	1,806	1,269	0,627	0,590
Consumo energético (kWh/km)	-	0,004	0,138	0,130

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Em comparação aos dois trajetos anteriores, pela menor razão energia elétrica-combustível apresentada, verifica-se a redução da operação da máquina elétrica na propulsão do HEV. Uma vez que o percurso apresenta característica rodoviária com aumento crescente de altitude, percebe-se uma redução da economia de combustível e litros de gasolina equivalente em comparação ao trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, que possui altitude decrescente. Por outro lado, esses parâmetros superam os do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia, de característica urbana. Para o consumo energético, observa-se seu aumento para os veículos PHEV e BEV em relação ao trajeto anterior, havendo redução para o HEV devido à menor parcela de propulsão elétrica no trajeto.

A operação geral da bateria nesse trajeto é mostrada pela Tabela 4.35:

Tabela 4.35 – Operação geral da bateria - Gama (FASTSim™)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
SOC Inicial	-	100%	100%	100%
SOC Final	-	79,2%	35,9%	92,05%
Energia Média Frenagem Regenerativa por ciclo (kWh)	-	0,009304	0,012615	0,015
Ciclos de bateria por km	-	1,115	1,164	1,318
Potência Média da Bateria - Propulsão (kW)	-	4,647	11,49	11,901
Potência Média da Bateria - Regeneração (kW)	-	-3,297	-4,84	-5,44125
Potência RMS (kW)	-	3,77	13,51	13,39

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Em relação aos dois trajetos anteriores, verifica-se que os níveis finais de carga dos veículos PHEV e BEV foram menores, ao passo que o do HEV apresentou significativo aumento, terminando com o maior nível de carga dentre esses percursos. Também são registrados os menores valores de energia média de frenagem regenerativa e ciclos de bateria. A excessão nesse último quesito é o veículo BEV, que apresenta valor maior que o observado no percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, mas inferior ao observado entre UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia. Em se tratando da potência média de propulsão, são verificados os maiores

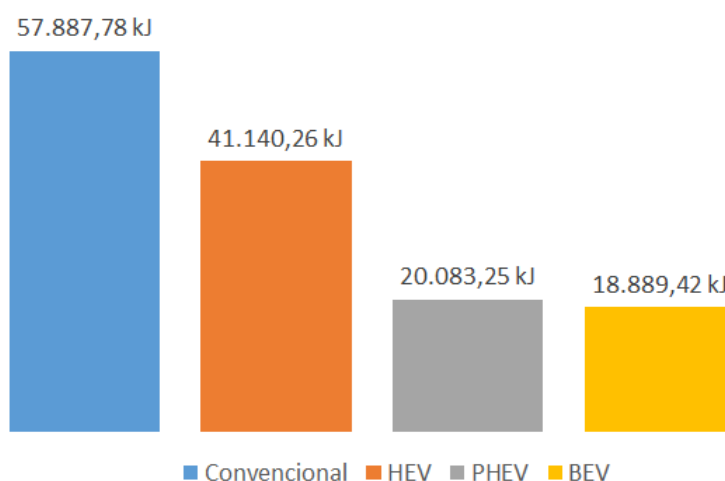
valores para os veículos PHEV e BEV e o menor para o HEV, enquanto a potência média de regeneração apresenta seus menores valores para os três veículos elétricos.

As perdas absolutas ocorridas no percurso são mostradas na Tabela 4.36 e Figura 4.116, enquanto a Figura 4.116 ilustra as perdas percentuais.

Tabela 4.36 – Perdas por condições dinâmicas e componentes - Gama (FASTSim™)

<b>Perdas (kJ)</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Arraste	6.479,81	5.142,97	5.144,87	6.003,33
Subida	2.131,25	2.258,8	3.016,9	2.972,89
Pneus	3.483,47	3.634,88	4.854,83	4.859,1
Freios	2.643,4	503,19	1.305,51	432,3
Transmissão	775,68	336,9	415,79	444,11
Máquina Elétrica	0	1.387,39	3.094,16	2.171,22
Bateria	0	35,77	617,4	372,67
Cargas Auxiliares	1.633,8	2.100,6	1.633,8	1.633,8
MCI	40.740,37	26.206,57	0	0
<b>Total</b>	<b>57.887,78</b>	<b>41.140,26</b>	<b>20.083,25</b>	<b>18.889,42</b>

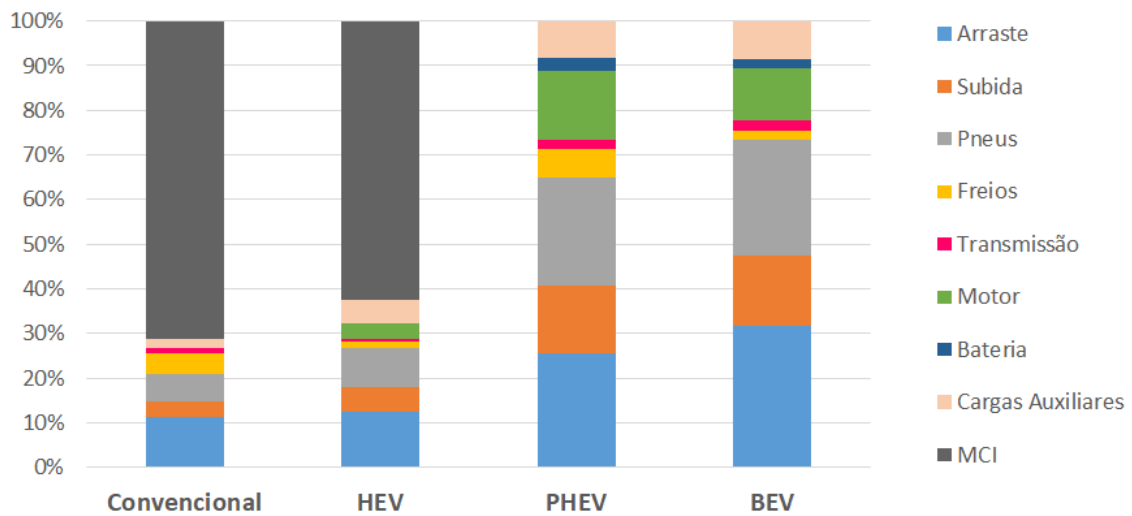
Figura 4.116 – Perdas totais - Gama (FASTSim™)



Fonte: Autoria Própria, 2021.



Figura 4.117 – Perdas percentuais - Gama FASTSim™



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Repetindo o observado nos dois percursos anteriores, a maior perda por fatores dinâmicos, para todos os veículos, decorre do arraste aerodinâmico, seguida pela resistência ao rolamento nos pneus. Destaca-se o aumento das perdas aerodinâmicas observadas, sendo essas maiores em termos absolutos e percentuais em comparação aos trajetos anteriores. Para as perdas de subida, interessante verificar que essas foram semelhantes às ocorridas no percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia, evidenciando perfis semelhantes de elevação desses trajetos.

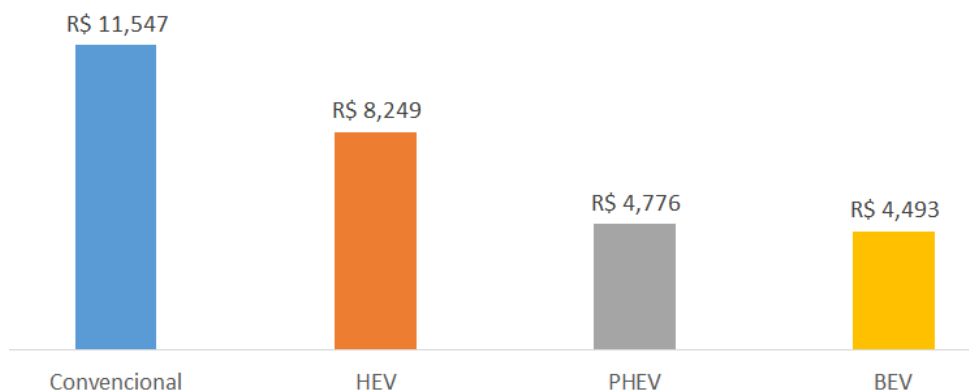
Dentre os componentes dos veículos, os sistemas de propulsão se destacam como os componentes de maiores perdas absolutas e percentuais em todos os veículos. Para o veículo convencional, o MCI apresenta o segundo maior valor verificado nos percursos, enquanto que o HEV registra a maior perda ocorrida. A máquina elétrica, nessa operação, representou aproximadamente 15% e 11% das perdas totais do PHEV e BEV, respectivamente. Nota-se também uma redução das perdas na bateria do HEV em relação aos demais percursos, redução essa decorrente da menor parcela de propulsão elétrica. As perdas nos freios do veículo convencional são as menores observadas nos três trajetos realizados, enquanto é maior registrada para o veículo PHEV. Entretanto, repetindo o padrão observado nos trajetos anteriores, as cargas auxiliares apresentam a segunda maior causa de perdas nos veículos PHEV e BEV.

Na Tabela 4.37 e Figura 4.118, são mostrados os custos desse trajeto.

Tabela 4.37 – Custo do trajeto por veículo - Gama (FASTSim™)

Fonte de Energia	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Gasolina Comum (litros)	1,806	1,269	-	-
Bateria (kWh)	-	0,158	5,579	5,247
<b>Gasto total</b>	<b>R\$ 11,547</b>	<b>R\$ 8,249</b>	<b>R\$ 4,776</b>	<b>R\$ 4,493</b>

Figura 4.118 – Custos totais - Gama FASTSim™



Fonte: Autoria Própria, 2021.

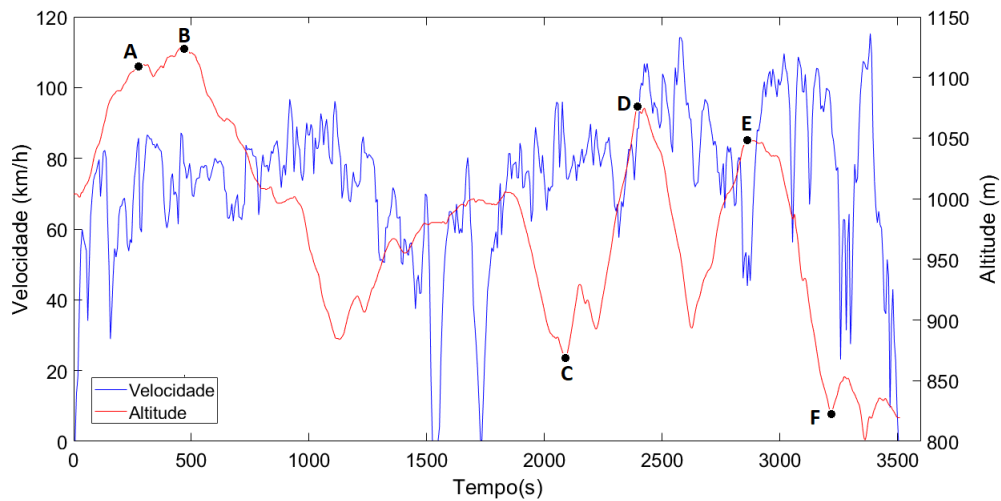
Fonte: Autoria Própria, 2021.

De modo similar aos dois percursos analisados anteriormente, o veículo convencional apresentou o maior gasto, mas com menor diferença percentual. Em relação ao HEV, seu custo foi 39% superior, enquanto que, para o BEV, o gasto foi 257% maior. Dentre os elétricos, considerando o HEV como referência, a diferença para o PHEV foi maior em cerca de 72%, superando em 83% os custos do BEV. Entre o PHEV e BEV, o custo do primeiro é aproximadamente 6% superior.

#### 4.3.4 Valparaíso-GO - UnB Planaltina (FUP)

Para auxiliar as análises realizadas, o ciclo de condução e a altitude deste trajeto foram agrupados na Figura 4.119.

Figura 4.119 – Ciclo de condução e altitude - Valparaíso-GO



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Assim, foram definidos três segmentos de referência: Trecho A-B, Trecho C-D e Trecho E-F. Suas coordenadas são mostradas na Tabela 4.10.

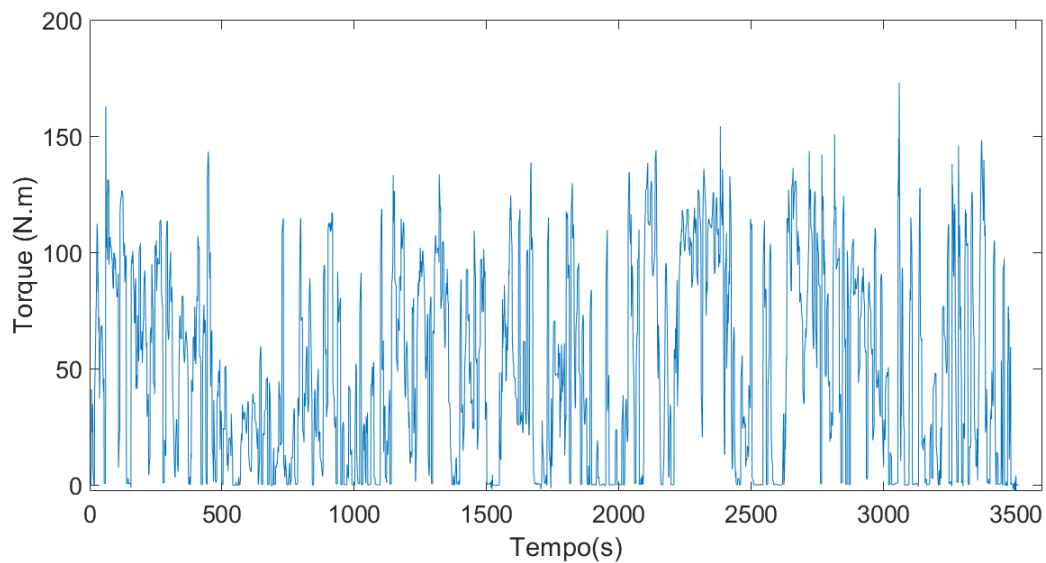
Tabela 4.38 – Pontos de referência altitude - Valparaíso-GO

Ponto	Tempo (s)	Altitude (m)
A	275	1111
B	470	1126
C	2090	870
D	2396	1078
E	2864	1050
F	3217	822,9

#### 4.3.4.1 ADVISOR®

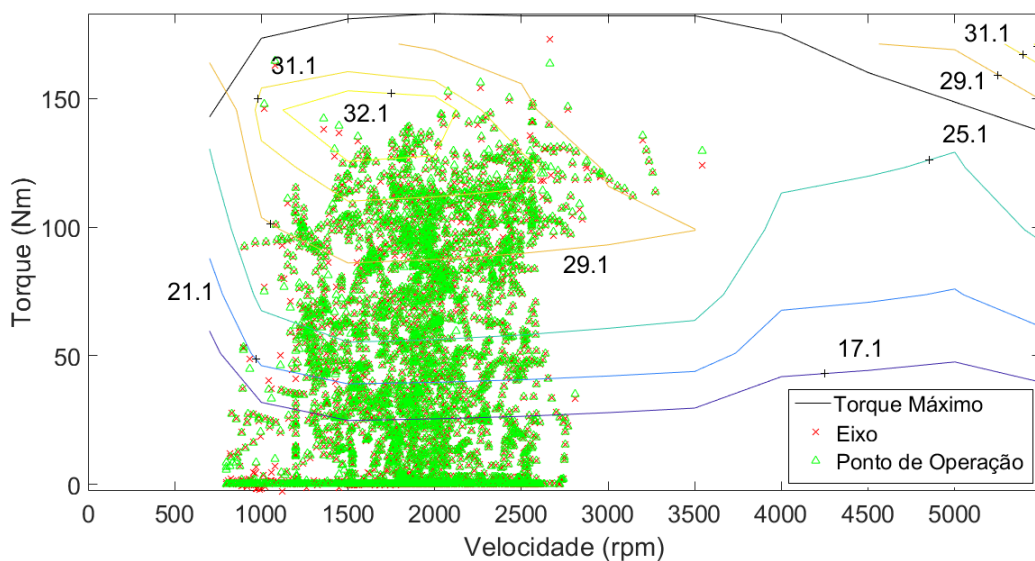
Para o veículo convencional, as curvas de torque são mostradas pelas Figuras 4.120 e 4.121.

Figura 4.120 – Torques do trajeto para veículo convencional - Valparaíso-GO ADVISOR®



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.121 – Curva torque-velocidade MCI veículo convencional - Valparaíso-GO (ADVISOR®)

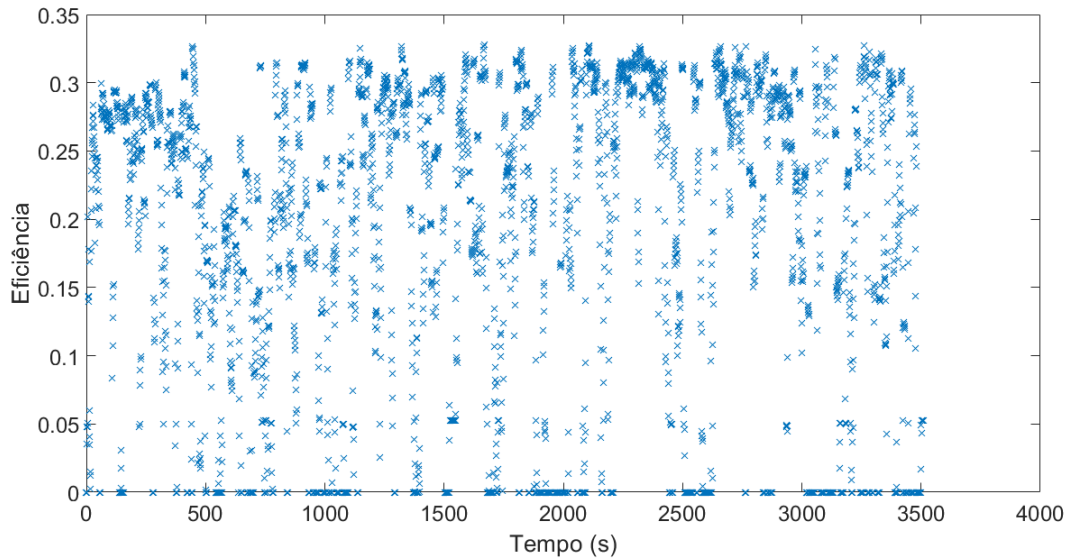


Fonte: Autoria Própria, 2021.

É possível verificar que os maiores valores de torque foram registrados no intervalo de tempo anterior ao do Trecho A-B e próximo instante de 3000 segundos. Em ambos os casos, esses picos foram ocasionados por variações acentuadas de velocidade de modo independente da elevação dos trechos, que possuíam subida no primeiro máximo e descida no segundo. Pela Figura 4.121, observa-se que a operação do MCI ocorreu em ampla faixa de rotações, com maior densidade de pontos entre 1250 e 2500 rpm. Os valores de torque desenvolvidos foram predominantemente de até 140 N.m, com as maiores ocorrências regis-

tradas em rotações acima de 2500 rpm. Em relação aos trajetos *intercampi*, devido à maior extensão e velocidades mais elevadas desse percurso, foram verificados maiores valores de torque e operações em rotações mais altas. Os pontos de eficácia do MCI são mostrados na Figura 4.122.

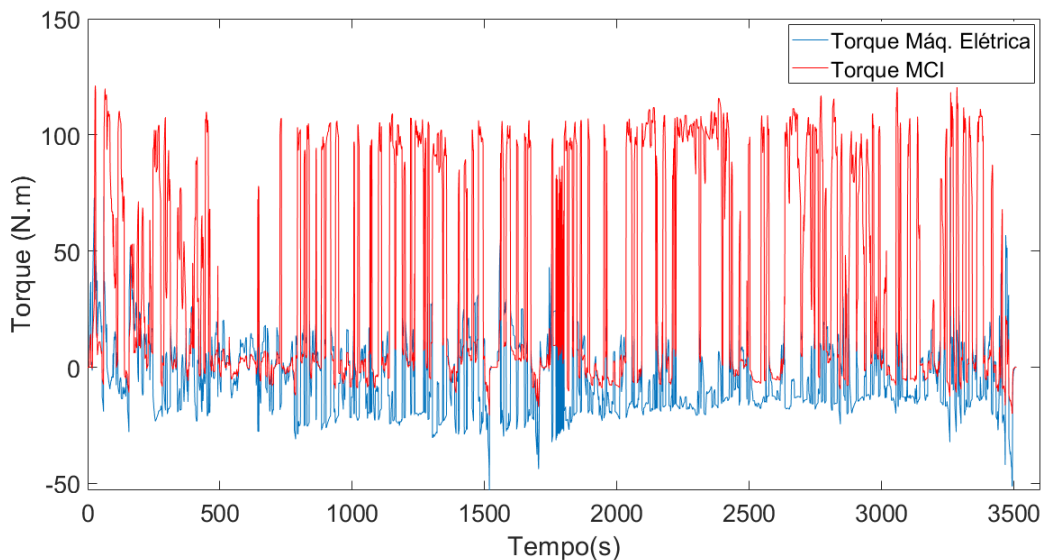
Figura 4.122 – Eficiência do MCI para veículo convencional - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

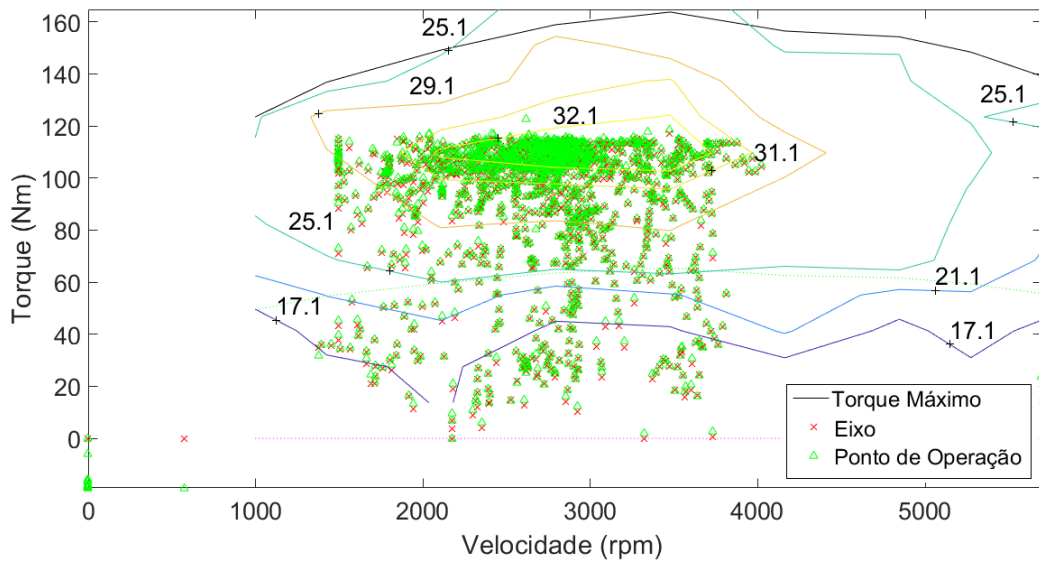
Para o veículo HEV, as curvas de torque são mostradas nas Figuras 4.123, 4.124 e 4.125.

Figura 4.123 – Torques do trajeto para veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



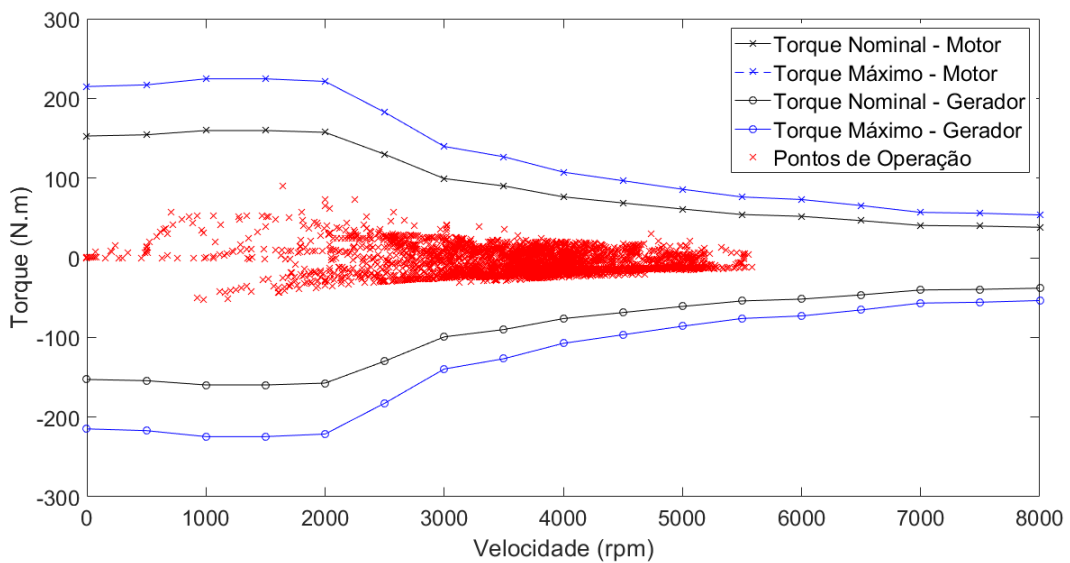
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.124 – Curva de torque-velocidade MCI do veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.125 – Curva de torque-velocidade máquina elétrica do veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

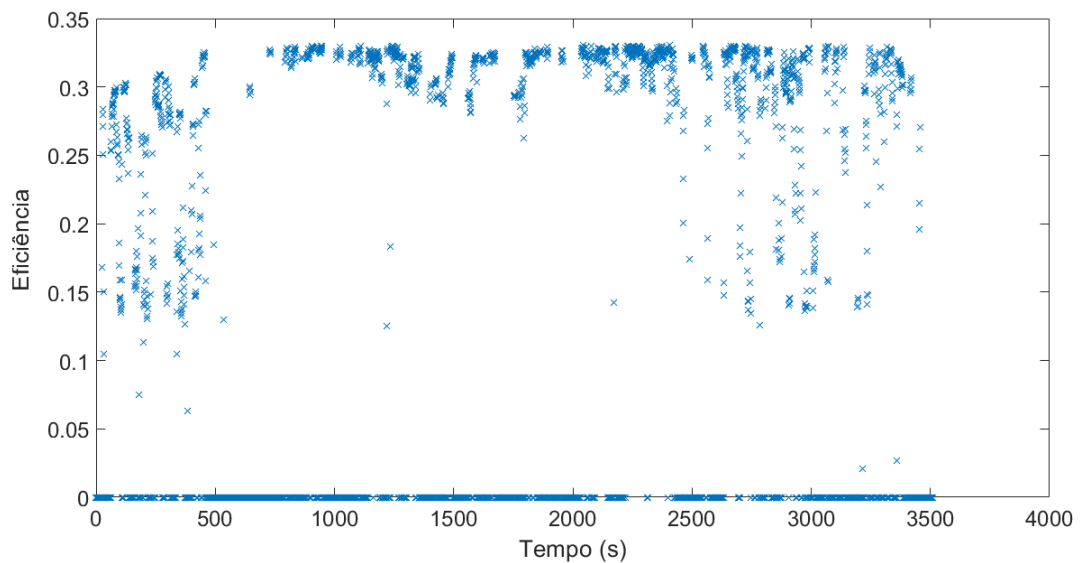
Observa-se que, nesse percurso, a propulsão majoritária do veículo foi realizada pelo MCI, com atuação predominante da máquina elétrica no modo gerador. Conforme também verificado nos percursos *intercampi*, o torque do MCI apresentou uniformidade de valores ao longo do trajeto, tendo seus pontos máximos registrados em torno de 120 N.m. Por sua vez, a máquina elétrica registrou valores máximos de propulsão próximo ao instante 1500 segundos e depois entre 3000 e 3500 segundos, relativo ao Trecho E-F. A primeira ocorrência se deve

à partida do veículo após a parada, enquanto a segunda ocorre por variação acentuada de velocidade em trecho de subida. Como gerador, seu torque máximo ocorreu em decorrência da frenagem anterior à primeira parada, também em torno de 1500 segundos.

Pela Figura 4.124, observa-se que a operação do MCI se concentrou entre 2000 e 3000 rpm. Entretanto, devido às altas velocidades do percurso, tem-se também uma atuação significativa de até 4000 rpm. A uniformidade de torques desenvolvidos pelo MCI, verificada anteriormente, é mostrada pela concentração de pontos em torno do intervalo de 80 a 120 N.m. Para a máquina elétrica, tem-se que a sua atuação predominante ocorre entre 3000 a 5000 rpm, com maiores valores de torque de propulsão e regeneração registrados para rotações de até 2000 rpm. Em relação aos trajetos *intercampi*, têm-se os maiores torques e rotações observados do MCI, enquanto que a máquina elétrica possui seus menores valores de torques e rotações mais elevadas.

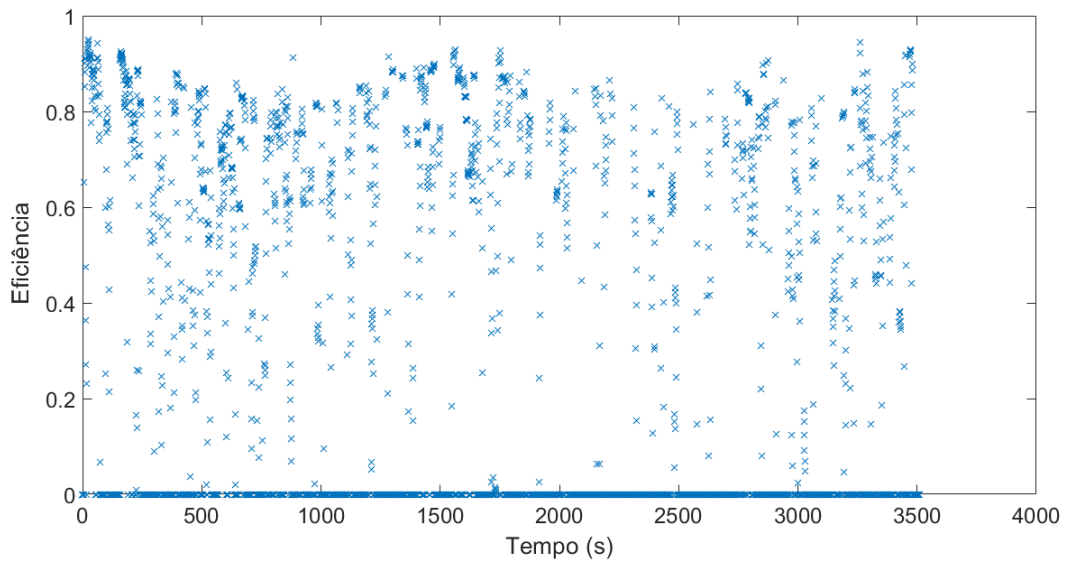
As eficiências do MCI e da máquina elétrica, em modo motor, são mostradas nas Figuras 4.126 e 4.127:

Figura 4.126 – Eficiência do MCI para veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

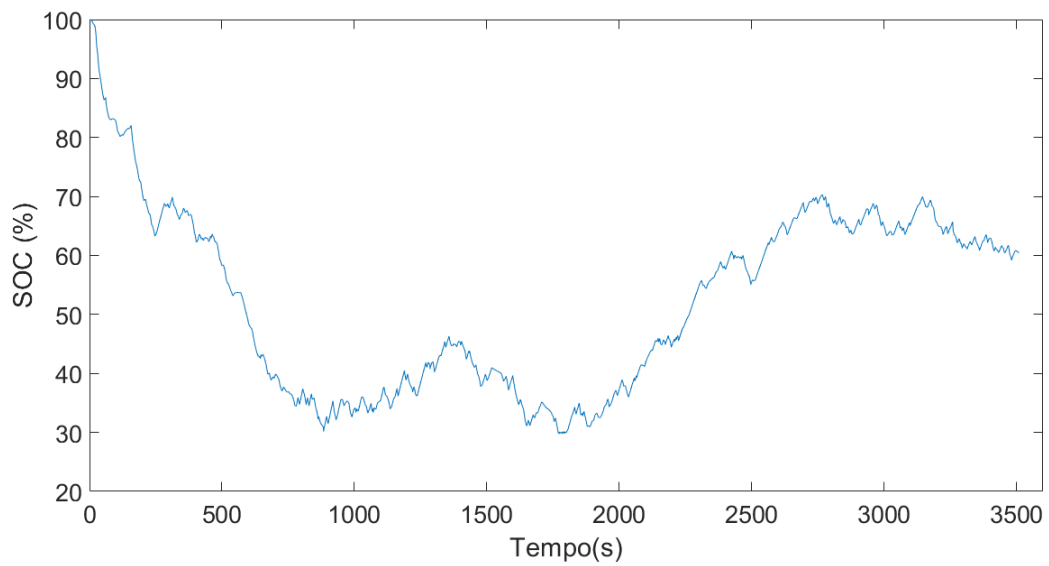
Figura 4.127 – Eficiência da máquina elétrica (motor) veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A operação da bateria do HEV é mostrada nas Figuras 4.128 e 4.129:

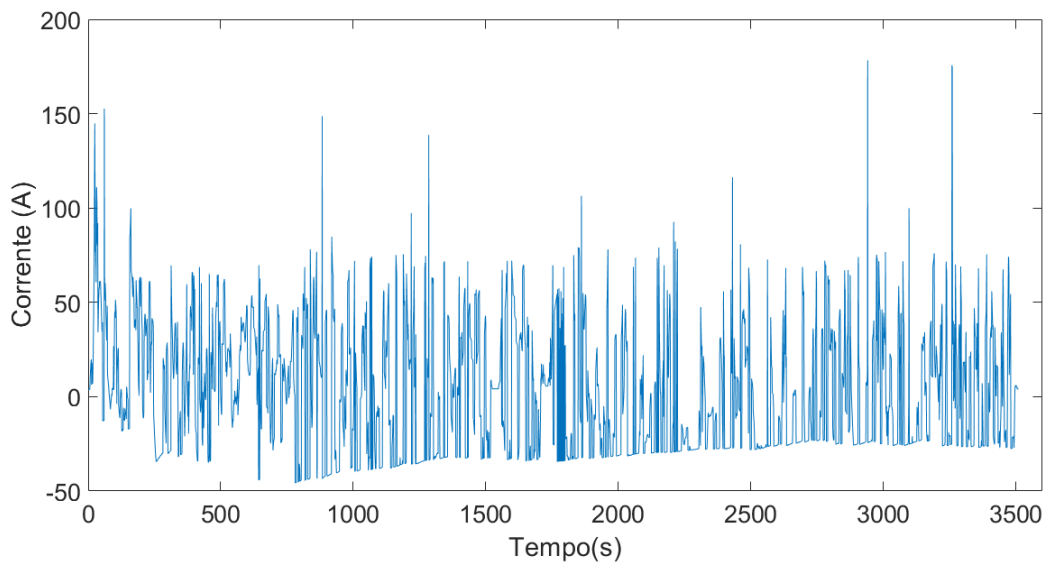
Figura 4.128 – Estado de carga da bateria veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.



Figura 4.129 – Corrente da bateria do veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)

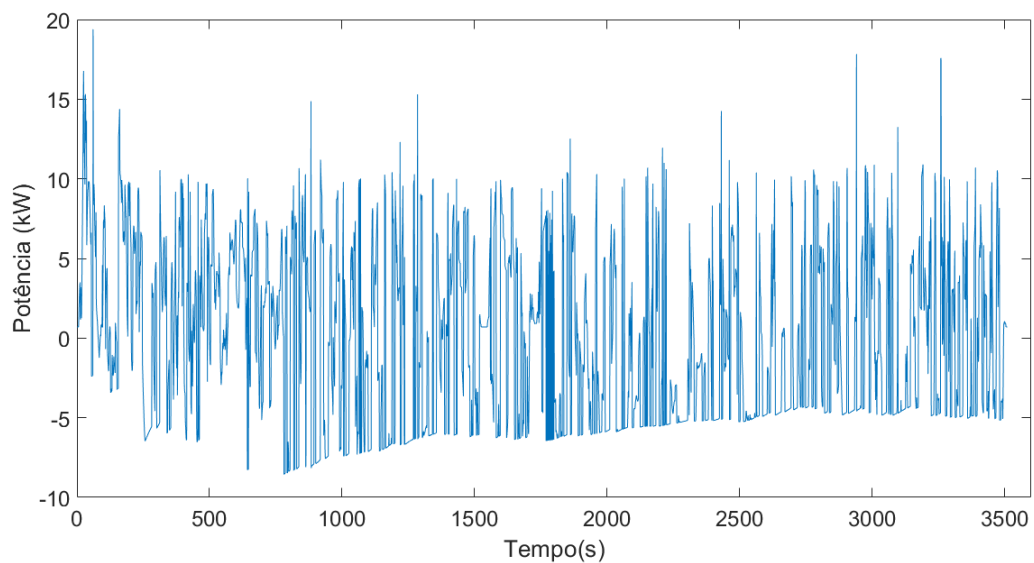


Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir da análise do estado de carga, verificam-se as tendências distintas assumidas durante a operação. Próximo ao instante de 1000 segundos, em intervalo relativo ao Trecho A-B, tem-se uma queda acentuada do nível de carga, seguida de cargas e descargas sucessivas entre 1500 e 2000 segundos. Por fim, ocorre uma forte recuperação de carga até o final do percurso, finalizando em torno de 60%.

Para as correntes, observam-se inicialmente valores positivos mais elevados, ao passo que, ao longo do trajeto, a atuação predominante em modo gerador da máquina elétrica seja refletida na forma de correntes negativas, indicando o carregamento da bateria. Os valores máximos positivos ocorridos na operação foram registrados em trechos de subida com acelerações mais elevadas, ao passo que as maiores correntes negativas aconteceram em trechos de descida que apresentaram frenagens acentuadas, entre 500 e 1000 segundos (Trecho A-B). O fluxo de potência é mostrado na Figura 4.130.

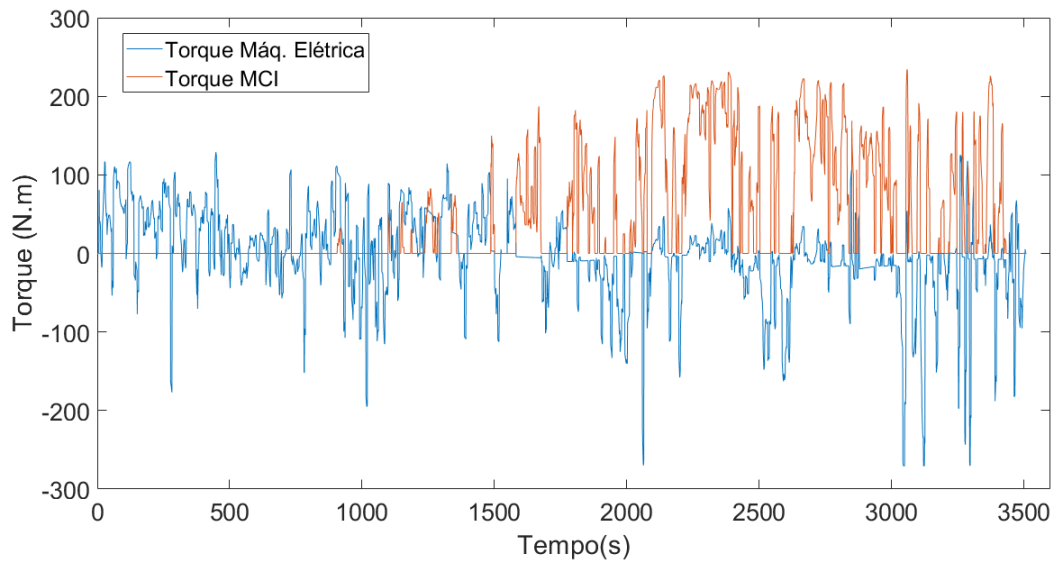
Figura 4.130 – Potência da bateria do veículo HEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

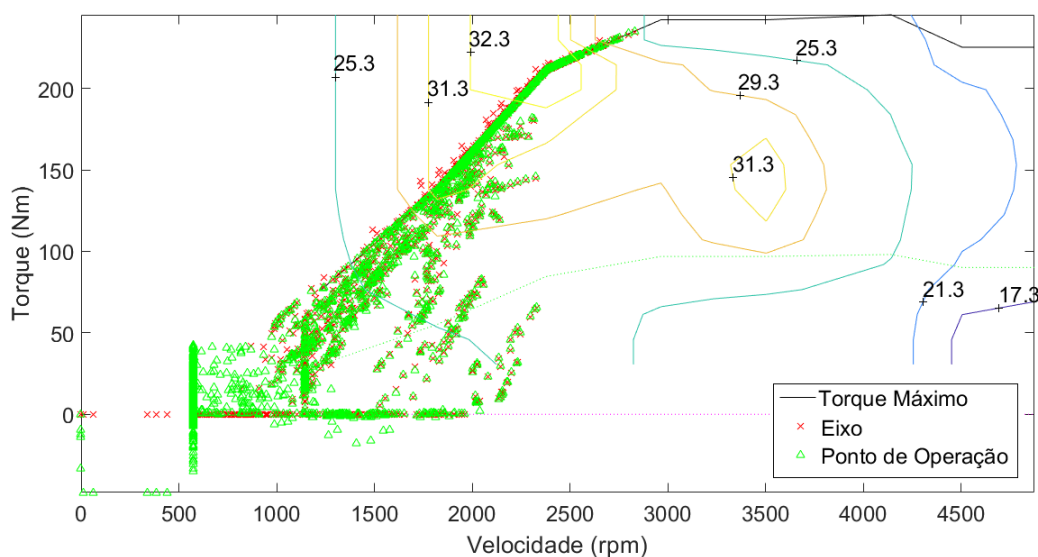
As curvas de torque do veículo PHEV ao longo do percurso são mostradas nas Figuras 4.131, 4.132 e 4.133.

Figura 4.131 – Torques do trajeto para veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



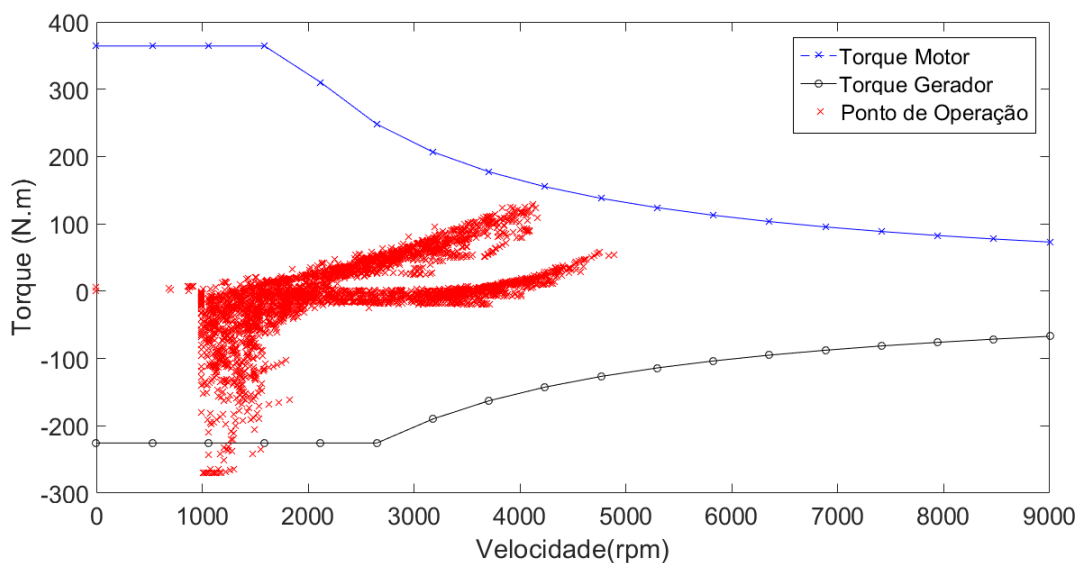
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.132 – Curva torque-velocidade MCI veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.133 – Curva torque-velocidade máquina elétrica veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



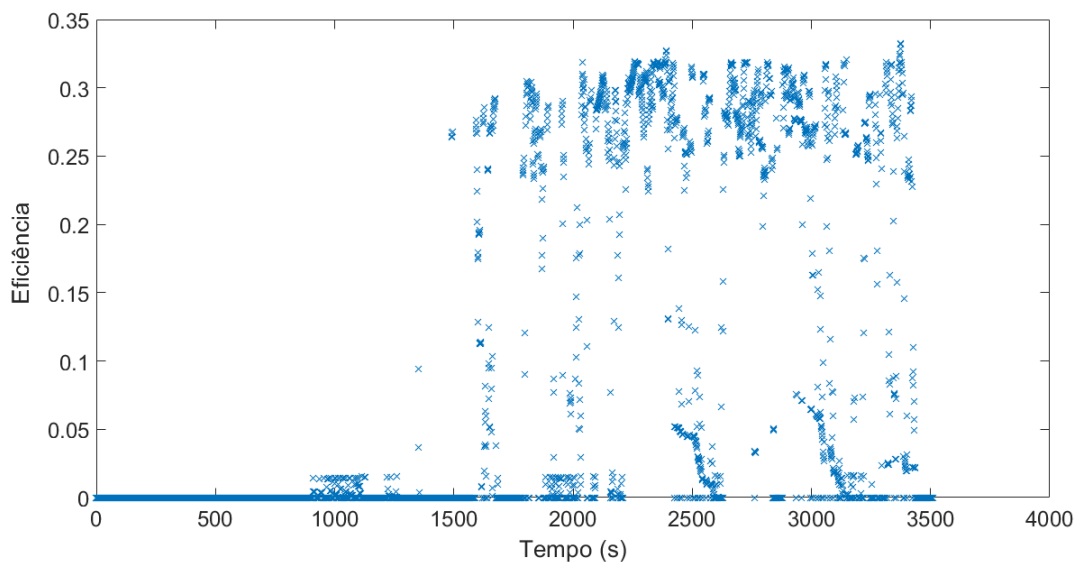
Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir das curvas de torque desse percurso, observa-se que a propulsão elétrica foi predominante até aproximadamente o instante 1500 segundos, momento na qual o MCI assume gradativamente a propulsão do veículo até o final do trajeto. Os valores positivos máximos de torque da máquina elétrica ocorreram em decorrência de acelerações em trechos de subidas, estando esses próximos ao instante de 500 segundos (Trecho A-B) e entre 3000 e 3500 segundos (Trecho E-F). Os valores máximos reversos foram registrados após o instante de 3000 segundos, correspondendo aos trechos de descidas que apresentam desacelerações mais

acentuadas. Para o MCI, os valores mais altos de torque ocorreram próximos aos instantes 2500 e 3000 segundos, em que também são registradas variações acentuadas de velocidade em trechos de subida.

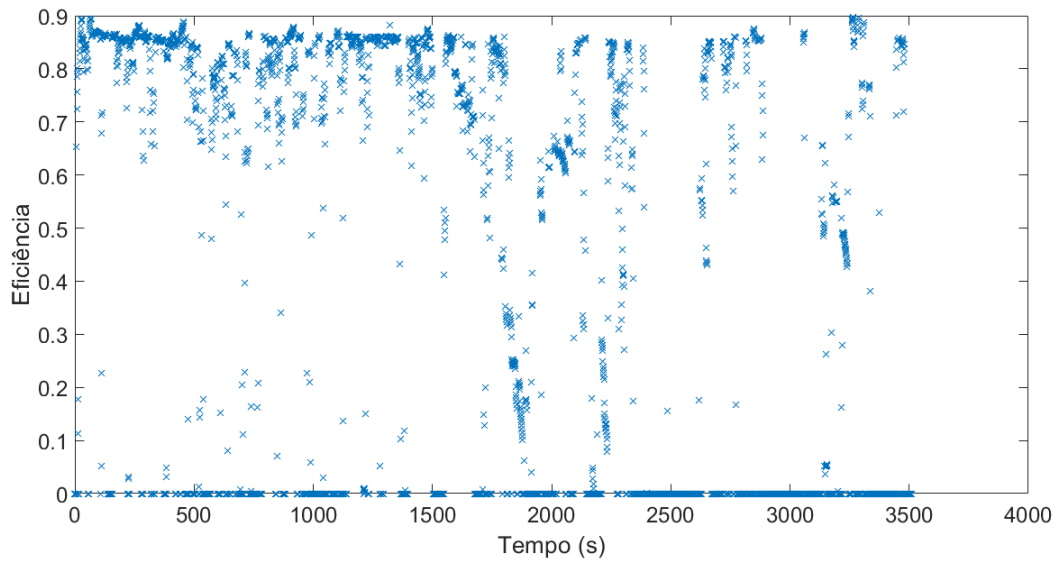
Pela Figura 4.132, é possível observar que a operação do MCI ocorreu predominantemente entre 1000 e 2500 rpm, com torques de maior valor para rotações mais altas. A máquina elétrica, por sua vez, possui maior atuação entre 2000 e 4000 rpm, apresentando seus torques de propulsão mais elevados em rotações mais altas e maiores torques de regeneração, em sua maioria, nas rotações de até 2000 rpm. Em comparação aos trajetos *intercampi*, verificam-se os maiores valores de torque do MCI e da máquina elétrica, apesar de os sistemas de propulsão não apresentarem as maiores rotações nesse percurso. As eficiências do MCI e da máquina elétrica, em modo motor, são mostradas nas Figuras 4.134 e 4.135.

Figura 4.134 – Eficiência do MCI do veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

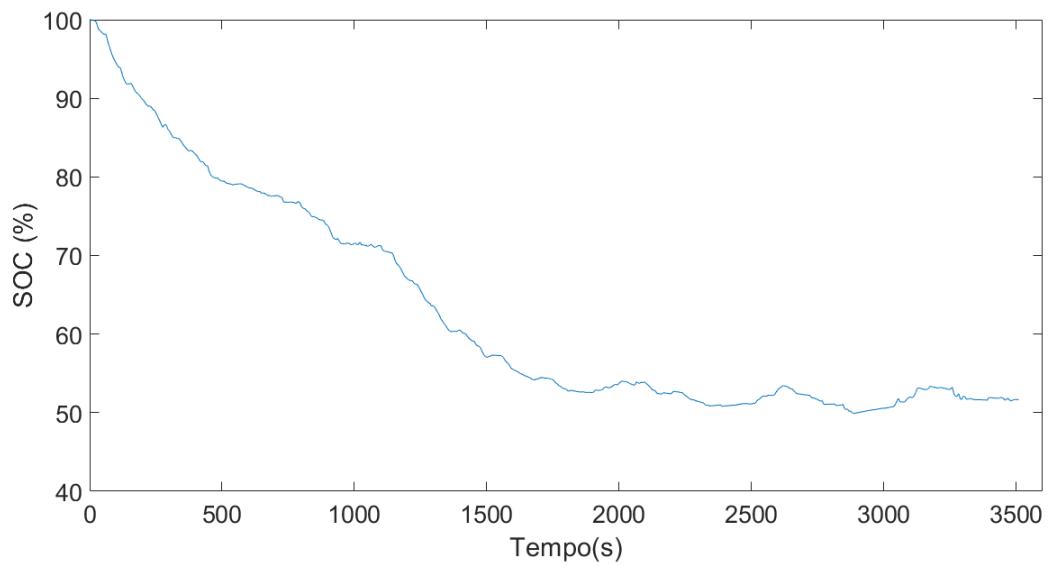
Figura 4.135 – Eficiência da máquina elétrica (motor) do veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

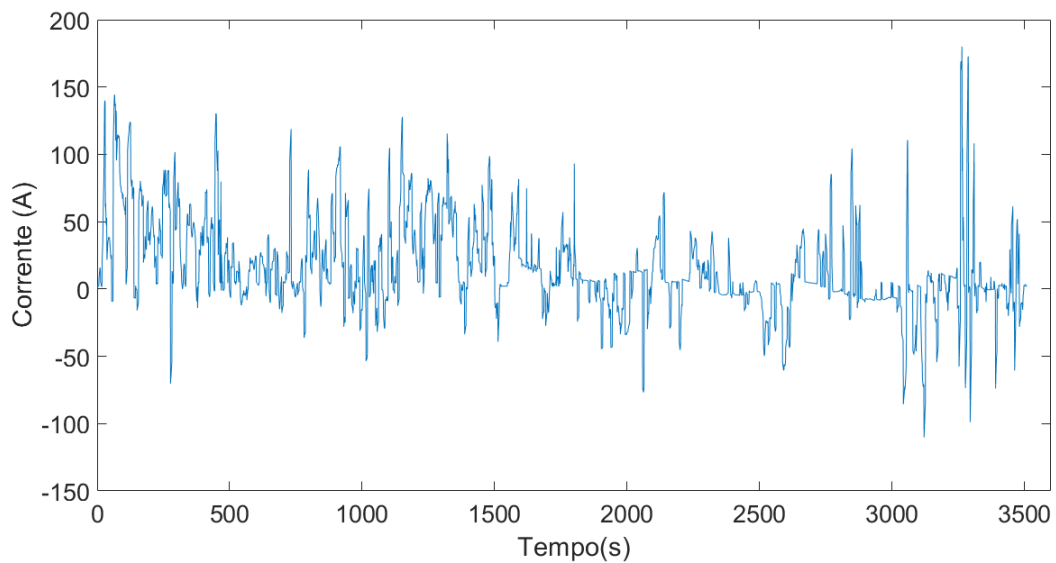
A operação da bateria do PHEV, nesse trajeto, é mostrada nas Figuras 4.136 e 4.137.

Figura 4.136 – Estado de carga da bateria do veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.137 – Corrente da bateria do veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)

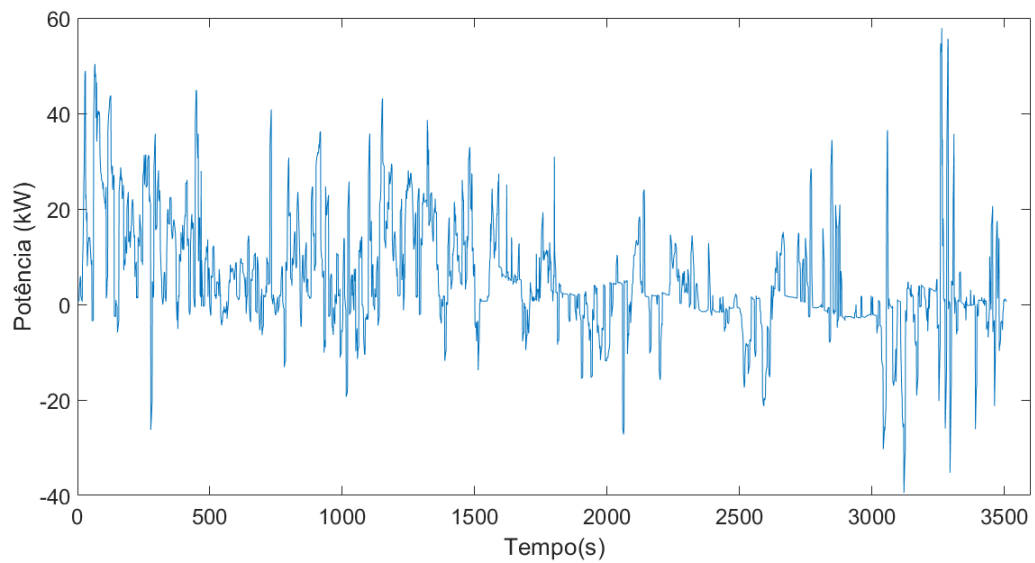


Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observam-se dois perfis de descarga para a bateria nesse trajeto: o primeiro, mais acentuado, corresponde ao modo elétrico de condução e ocorre aproximadamente até o instante 1500 segundos. O segundo, por sua vez, representa a manutenção de carga, que se estende até o final do percurso e estabiliza em torno de 50%.

Para as correntes, verifica-se que os valores máximos positivos ocorreram próximos ao instante de 500 segundos e depois entre 3000 e 3500 segundos (Trecho E-F). Esses registros são decorrentes de acelerações acentuadas ocorridas em trechos de subida. As correntes máximas reversas, por outro lado, foram registradas entre 200 e 500 segundos (Trecho A-B) e novamente após 3000 segundos. Suas causas principais são frenagens acentuadas ocorridas em trechos de descida. A potência da bateria do PHEV é ilustrada na Figura 4.138.

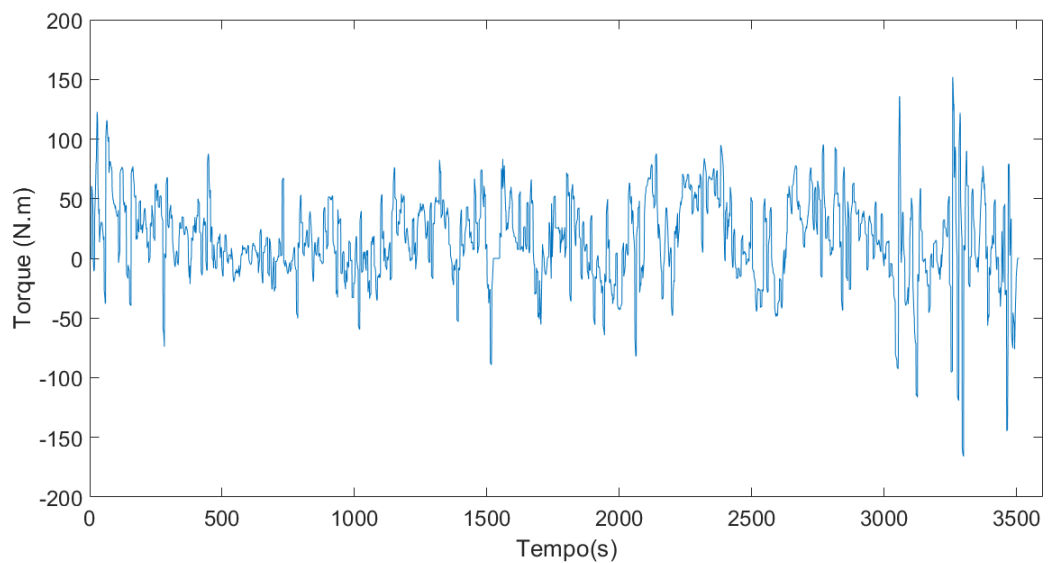
Figura 4.138 – Potência da bateria para veículo PHEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

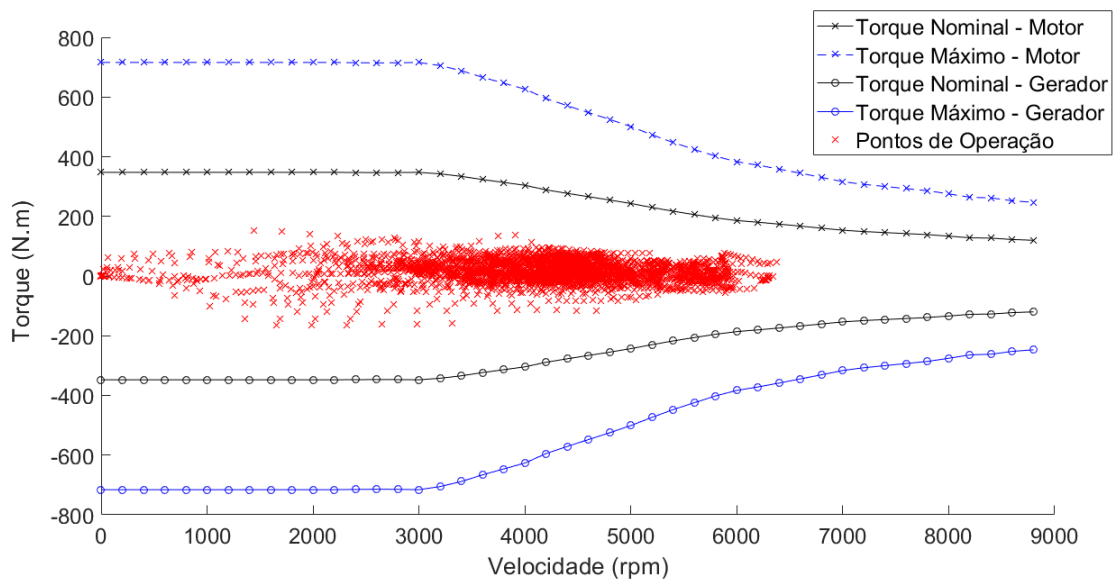
Para o veículo BEV, as curvas de torque para esse percurso são mostradas nas Figuras 4.139.

Figura 4.139 – Torques do trajeto para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.140 – Curva de torque-velocidade veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



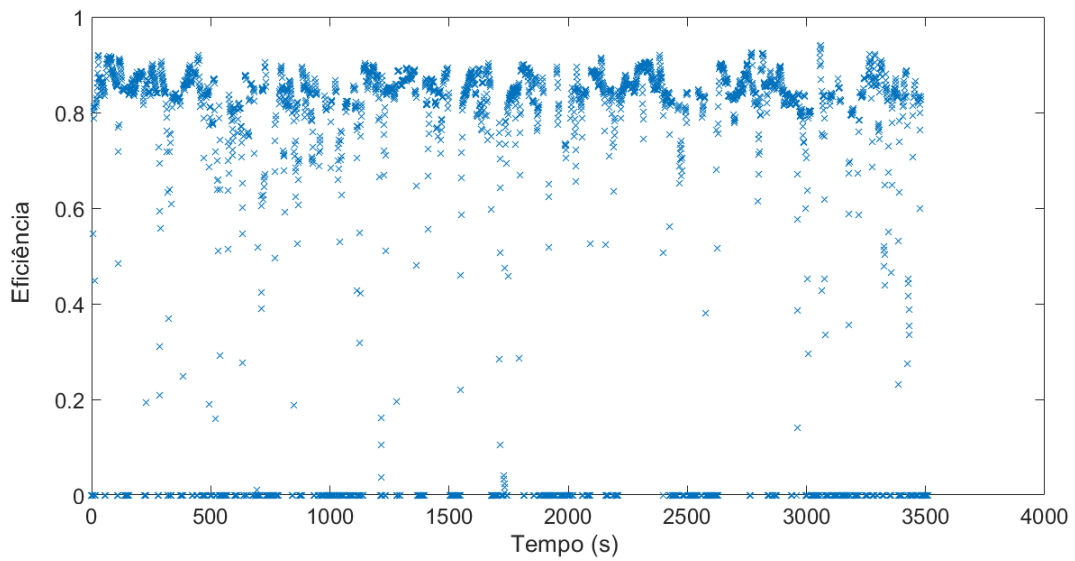
Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir da Figura 4.139, verifica-se que os maiores valores de torque registrados ocorreram após o instante de 3000 segundos (Trecho E-F), em partes do percurso caracterizadas pelas altas variações de velocidade e com altitude decrescente.

Pela Figura 4.140, observa-se que a operação da máquina elétrica apresenta maiores rotações quando comparadas às dos trajetos *intercampi*, possuindo concentrações majoritárias entre 3000 e 6000 rpm. Os torques mais elevados, tanto de propulsão quanto regeneração, foram registrados em rotações de até 2000 rpm. Os pontos de eficiência da máquina elétrica são mostrados na Figura 4.141.



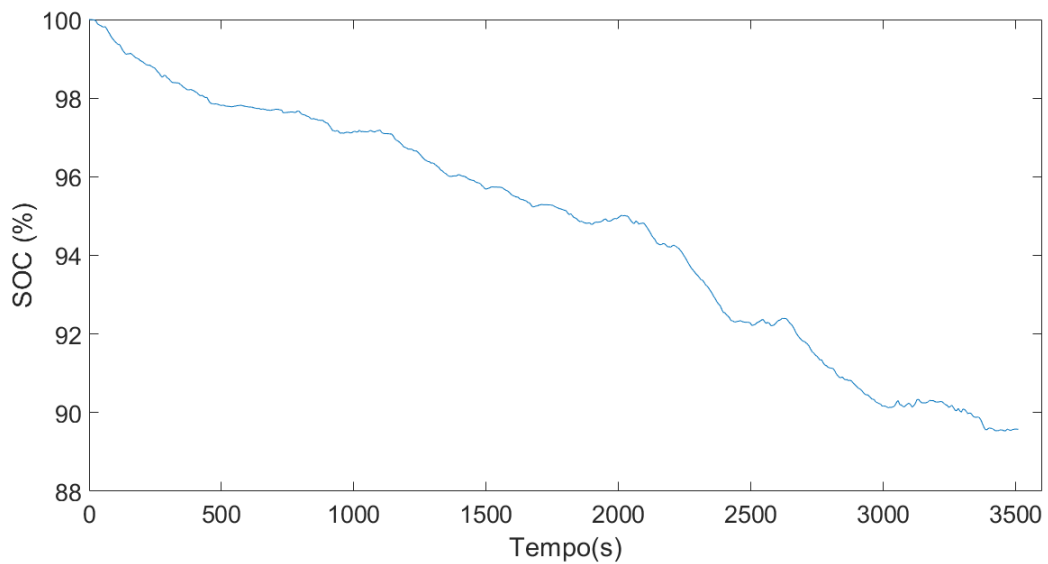
Figura 4.141 – Eficiência da máquina elétrica (motor) para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

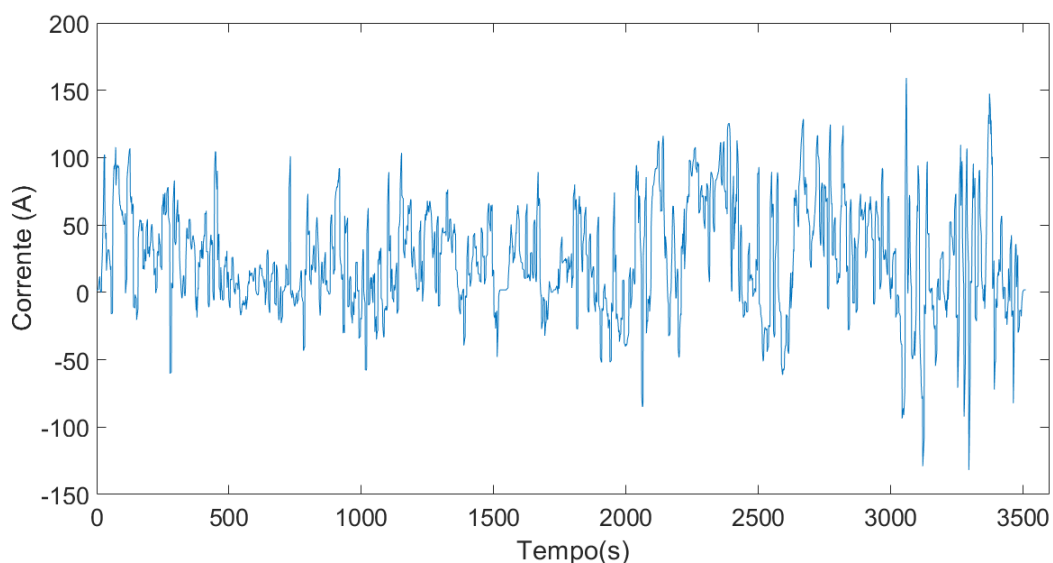
O estado de carga e as correntes da bateria são ilustradas nas Figuras 4.142 e 4.143:

Figura 4.142 – Estado de carga bateria para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

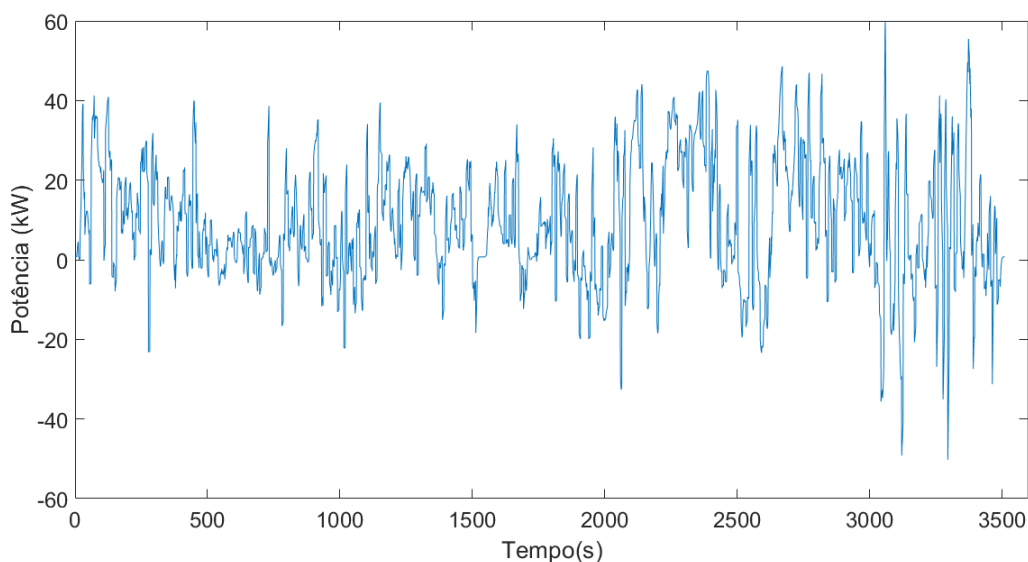
Figura 4.143 – Corrente da bateria para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

O estado de carga da bateria possui perfil gradual de descarga, apresentando a queda mais acentuada entre os instantes 2000 e 2500 segundos (Trecho C-D). Verifica-se a manutenção de carga em torno de 90% após o instante 3000 segundos, sendo observados também os maiores valores de corrente nos fluxos direto e reverso de potência. Esses picos são registrados em trechos do percurso que possuem elevadas acelerações e desacelerações, além da altitude decrescente. O fluxo de potência da bateria é mostrado na Figura 4.144:

Figura 4.144 – Potência da bateria para veículo BEV - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

As operações gerais dos sistemas de propulsão e baterias nesse percurso são mostradas, respectivamente, nas Tabelas 4.39 e 4.40.

Tabela 4.39 – Operação geral dos sistemas de propulsão - Valparaíso-GO (ADVISOR®)

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Torque Máximo Direto (N.m)	172,85	121,31(MCI) 90,33 (ELE)	234,42(MCI) 128,84 (ELE)	151,96
Torque Máximo Reverso (N.m)	-2,56	-20,61 (MCI) -52,92 (ELE)	Nulo (MCI) -270,52 (ELE)	-166,02
Torque RMS (N.m)	64,51	58,84 (MCI) 16,38 (ELE)	82,58 (MCI) 55,76 (ELE)	39,33
Rotação Máxima (rpm)	3541	4021 (MCI) 5643 (ELE)	2829(MCI) 4884 (ELE)	6373
Eficiência Média Motor Elétrico	-	70,62%	84,35%	85,88%
Eficiência Média Gerador	-	77,92%	74,15%	80,93%
Eficiência Média MCI	24,82%	30,02%	26,49%	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 4.40 – Operação geral das baterias - Valparaíso-GO (ADVISOR®)

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
SOC Inicial	-	100%	100%	100%
SOC Final	-	60,48%	50,94%	89,58%
Corrente Máxima Direta (A)	-	178,24	190,81	159,14
Corrente Máxima Reversa (A)	-	-45,71	-80,5	-131,81
Corrente RMS (A)	-	33,06	42,12	47,15
Potência RMS (kW)	-	5,33	14,47	17,94
Energia total recuperada Fren. Regen. (kWh)	-	2,31	1,89	2,13
Eficiência Bateria	-	81,09%	95,29%	98,48%

Fonte: Autoria Própria, 2021.

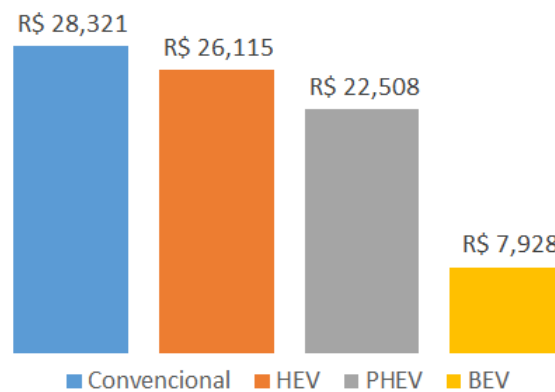
O consumo ocorrido no percurso e os gastos totais são mostrados na Tabela 4.41 e na Figura 4.145.

Tabela 4.41 – Consumo de combustível e energia elétrica - Valparaíso-GO ADVISOR®

Fonte de Energia	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Gasolina Comum (litro)	4,430	4,030	2,800	-
Bateria (kWh)	-	0,410	5,420	9,260
<b>Gasto total</b>	<b>R\$ 28,321</b>	<b>R\$ 26,115</b>	<b>R\$ 22,508</b>	<b>R\$ 7,928</b>

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.145 – Gastos totais do percurso - Valparaíso-GO (ADVISOR®)



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Verifica-se que, em decorrência da maior extensão do percurso, houve o aumento dos custos para todos os veículos em relação aos trajetos *intercampi*. O veículo convencional, mais uma vez, apresentou os maiores valores, superando em cerca de 8% o HEV, 26% o PHEV e 357% o BEV. Dentre os elétricos, os custos foram decrescentes com a eletrificação dos veículos. Utilizando o HEV como referência, seu custo foi superior em 16% em relação ao PHEV e 329% ao BEV. Entre o PHEV e o BEV, o custo do primeiro foi maior que o do segundo em torno de 284%.

#### 4.3.4.2 FASTSim™

Para este percurso, a operação dos sistemas de propulsão é mostrada na Tabela 4.42:

Tabela 4.42 – Operação geral dos sistemas de propulsão - Valparaíso-GO (FASTSim™)

Parâmetro	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Eficiência Média Motor Elétrico	-	85,43%	88,0%	92,08%
Eficiência Média Gerador	-	69,61%	80,23%	87,41%
Eficiência Média MCI	29,50%	36,83%	34,81%	-

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Em relação aos percursos analisados anteriormente, os resultados de eficiência mostram a operação mais eficiente do MCI do veículo convencional e do HEV, além de registrar a primeira atuação desse sistema de propulsão para o veículo PHEV. Verifica-se também a maior eficiência geral da máquina elétrica do BEV e da atuação como motor para o HEV e PHEV, sendo registrada a segunda maior eficiência para o modo gerador do PHEV e o menor valor desse modo para o HEV.

Os parâmetros de consumo e economia de combustível e energia elétrica do trajeto são

mostrados na Tabela 4.43.

Tabela 4.43 – Relações de consumo de energia e gasolina - Valparaíso-GO (FASTSim™)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Razão Energia Elétrica/Combustível	0	0,008	2,109	1
Economia de Combustível (km/l)	21,917	35,077	60,186	76,622
Litros de gasolina equivalentes	3,274	2,062	1,192	0,936
Consumo energético (kWh/km)	-	0,002	0,1	0,116

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Em relação aos trajetos anteriores, observa-se o menor valor de razão energia elétrica-combustível para o veículo HEV, indicando sua atuação mais próxima à do veículo convencional. Por outro lado, para o veículo PHEV, esse parâmetro indica a atuação predominante do sistema de propulsão elétrica, já que é maior que uma unidade.

Em relação à economia de combustível, os valores apresentados são os menores dentre os percursos de característica rodoviária, sendo superiores apenas aos registrados no trajeto de característica urbana UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia. Devido à extensão desse trajeto, têm-se os maiores valores de litros de gasolina equivalente. Para o consumo energético por quilômetro, verificam-se os menores valores para o HEV e BEV, além do segundo maior valor para o PHEV.

A operação das baterias, nesse trajeto, é mostrada na Tabela 4.44.

Tabela 4.44 – Operação geral das baterias - Valparaíso-GO (FASTSim™)

<b>Parâmetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
SOC Inicial	-	100%	100%	100%
SOC Final	-	79,8%	17,3%	87,37%
Energia Média Fren. Regen. por ciclo de bateria (kWh)	-	0,019	0,031	0,029
Ciclos de bateria por km	-	1,046	1,119	1,115
Potência Média Bateria - Propulsão (kW)	-	7,22	14,59	15,27
Potência Média Bateria - Regeneração (kW)	-	-5,69	-7,92	-7,88
Potência RMS (kW)	-	6,13	15,71	16,78

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para os veículos PHEV e BEV, que utilizam em boa parte ou completamente propulsão elétrica, são verificados os menores níveis finais de carga em relação aos demais percursos. Para o HEV, uma vez que sua máquina elétrica atua majoritariamente no modo gerador, tem-se que seu nível final é o maior registrado.

Para todos os veículos elétricos, as energias médias por frenagem regenerativa foram inferiores somente às observadas no trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, ao passo em

que são verificadas as menores quantidades de ciclo de baterias entre os percursos analisados. Em se tratando das potências médias de propulsão e regeneração, são observados os maiores valores em ambas as direções de fluxo em todos os veículos elétricos.

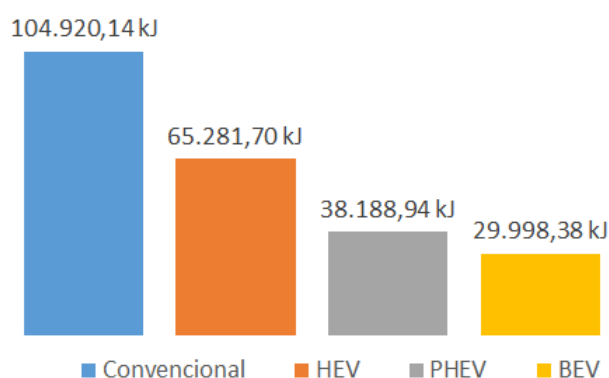
As perdas absolutas ocorridas no percurso são mostradas na Tabela 4.45 e Figura 4.146, enquanto a Figura 4.147 ilustra as perdas percentuais.

Tabela 4.45 – Perdas por condições dinâmicas e componentes - Valparaíso-GO (FASTSim™)

<b>Perdas (kJ)</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
Arraste	16.293,33	12.932,43	12.937,21	15.095,24
Subida	-1.916,42	-2.000,34	-2.671,69	-2.673,22
Pneus	6.186,54	6.457,45	8.624,71	8.629,64
Freios	6.505,5	843,03	1.432,16	1.150,8
Transmissão	1.424,68	660,66	846,29	864,43
Máquina Elétrica	0	2.426,59	5.445,01	3.772,73
Bateria	0	109,28	1.109,71	701,76
Cargas Auxiliares	2.457	2.457	2.457	2.457
MCI	73.969,49	41.395,61	8.008,55	0
<b>Total</b>	<b>104.920,14</b>	<b>65.281,70</b>	<b>38.188,94</b>	<b>29.998,38</b>

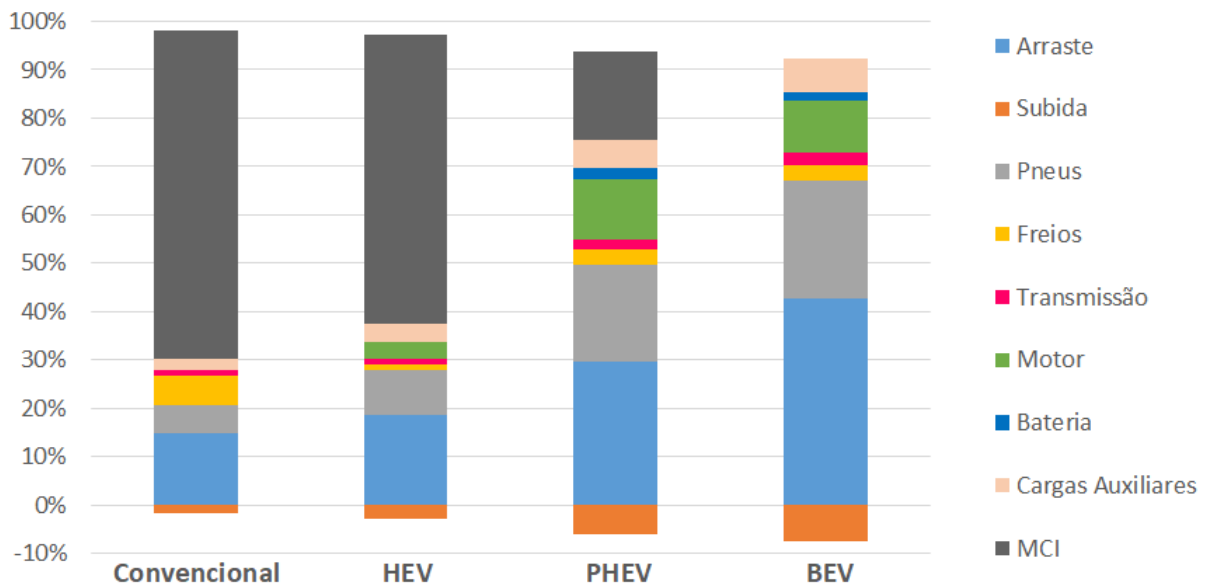
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.146 – Perdas totais - Valparaíso-GO FASTSim™



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.147 – Perdas percentuais - Valparaíso-GO FASTSim™



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Em todos os veículos, para os fatores dinâmicos, verifica-se o aumento absoluto e percentual das perdas por arraste aerodinâmico em relação aos demais trajetos, assim como são registrados os maiores valores absolutos para as perdas nos pneus. Uma vez que o trajeto apresenta altitude decrescente, observam-se valores negativos para as perdas por subida, superando também os verificados para o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina.

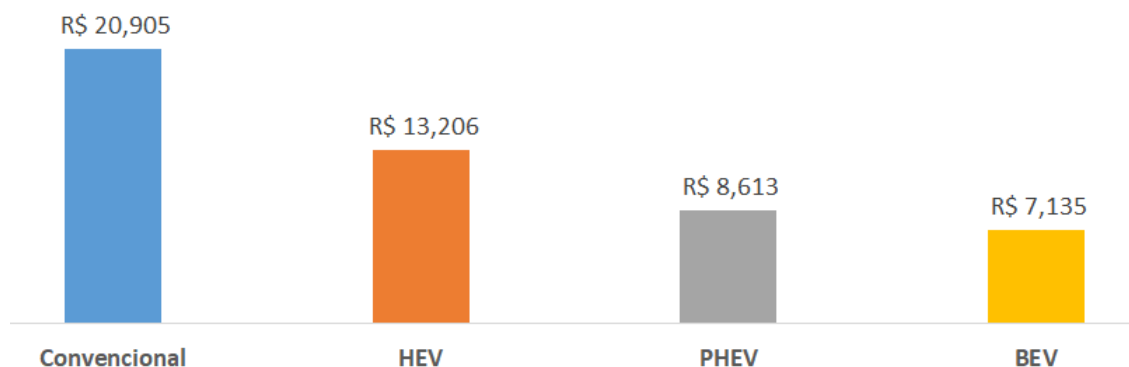
Para as perdas nos componentes, repete-se a tendência dos maiores valores absolutos e percentuais sendo registrados para os sistemas de propulsão. Devido ao trajeto ser mais extenso que os demais e possuir características rodoviárias, observa-se o aumento das perdas em todos os componentes, como freios, baterias e transmissão. A diferença observada, nesse percurso, é a utilização do MCI pelo veículo PHEV, havendo assim perdas devido a esse componente.

A partir do consumo energético ocorrido no percurso e nos componentes dos veículos, as quantidades necessárias de combustível e energia da bateria são definidas. Seus valores são mostrados na Tabela 4.46 e Figura 4.148.

Tabela 4.46 – Custo do trajeto por veículo - Valparaíso-GO FASTSim™

Fonte de Energia	Convencional	HEV	PHEV	BEV
Gasolina Comum (litro)	3,27	2,045	0,383	-
Bateria (kWh)	-	0,154	7,196	8,333
<b>Gasto total</b>	<b>R\$ 20,905</b>	<b>R\$ 13,206</b>	<b>R\$ 8,613</b>	<b>R\$ 7,135</b>

Figura 4.148 – Custo total - Valparaíso-GO (FASTSim™)



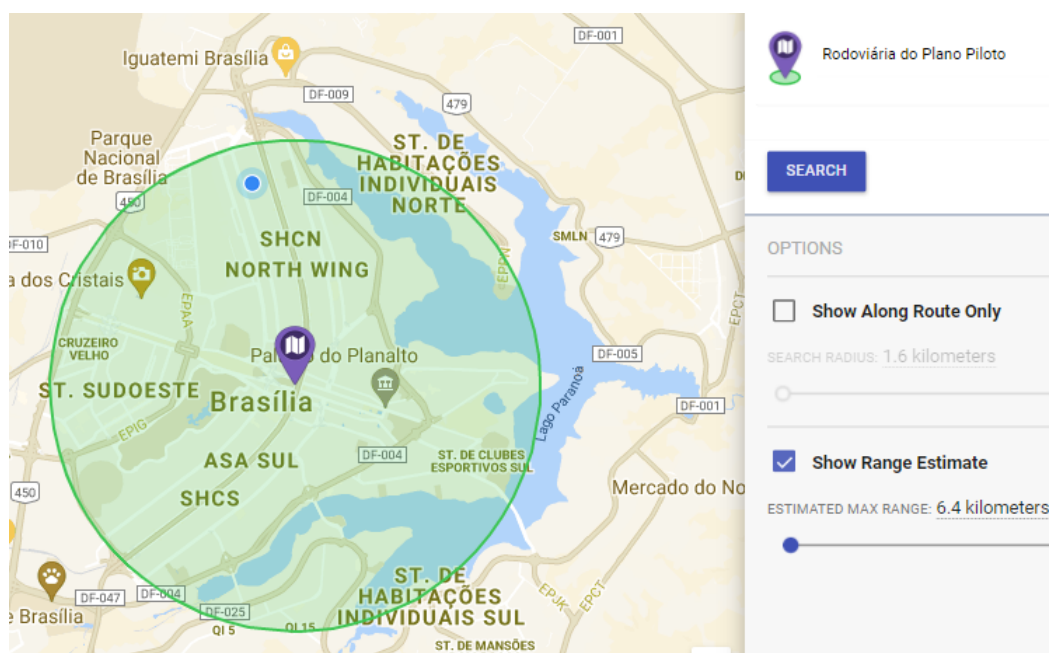
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Uma vez que o trajeto apresenta a maior extensão dentre os percursos analisados, verifica-se um aumento geral dos custos de todos os veículos. Entretanto, o padrão de gastos observados se manteve, com o veículo convencional apresentando maiores valores em relação aos demais automóveis. Nesse caso, seu custo superou em 58% os valores observados para o HEV e em 293% o do BEV, sendo esses percentuais menores que os verificados nos percursos UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia e UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina. Para os veículos elétricos, utilizando o HEV como referência, tem-se um valor 53% superior em relação ao PHEV e 185% maior que o custo do BEV. Entre o PHEV e BEV, devido à utilização do modo híbrido de condução pelo primeiro, observa-se um aumento da diferença de custos entre esses em relação aos demais trajetos, sendo essa estimada em 21%.



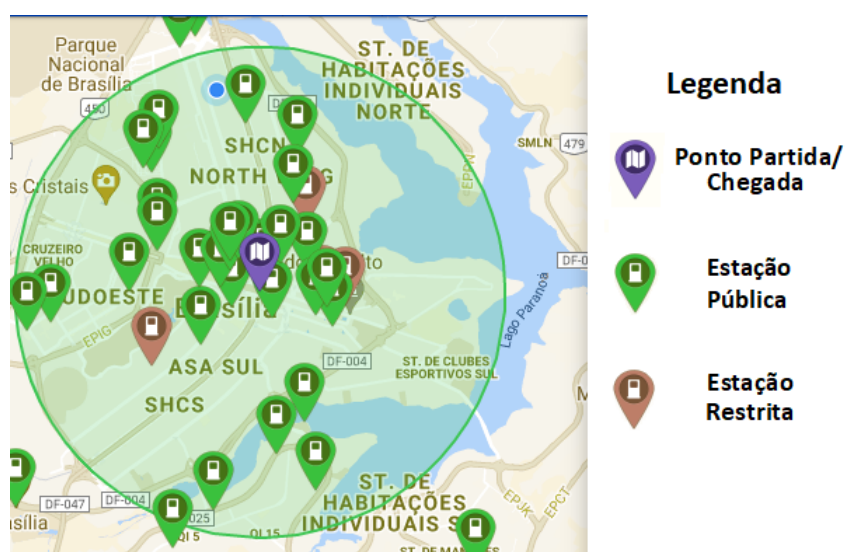


Figura 4.150 – Raio de 6,4 km da Rodoviária do Plano Piloto



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado.

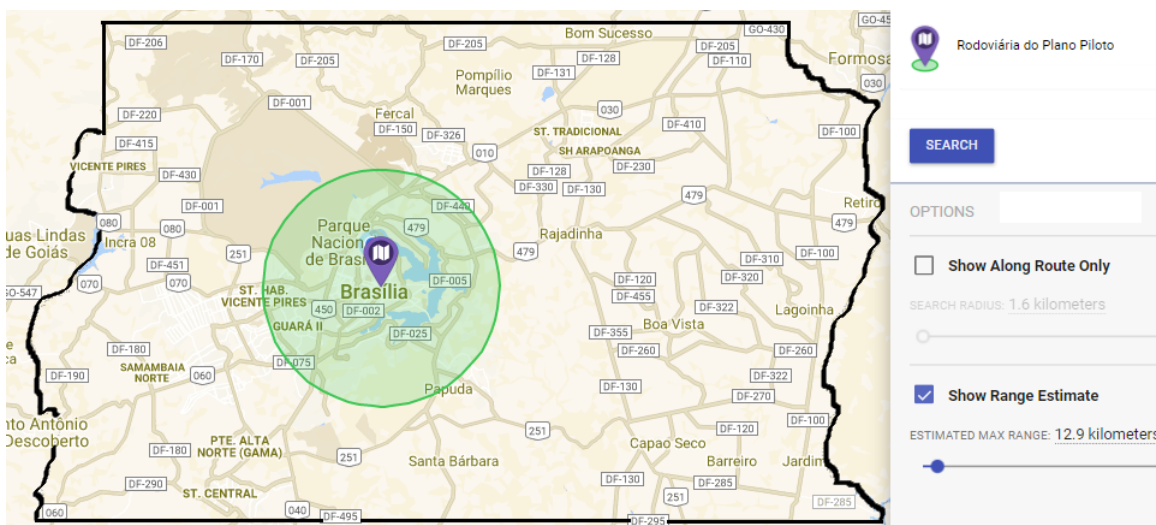
Figura 4.151 – Estações de recarga em raio de 6,4 km



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado.

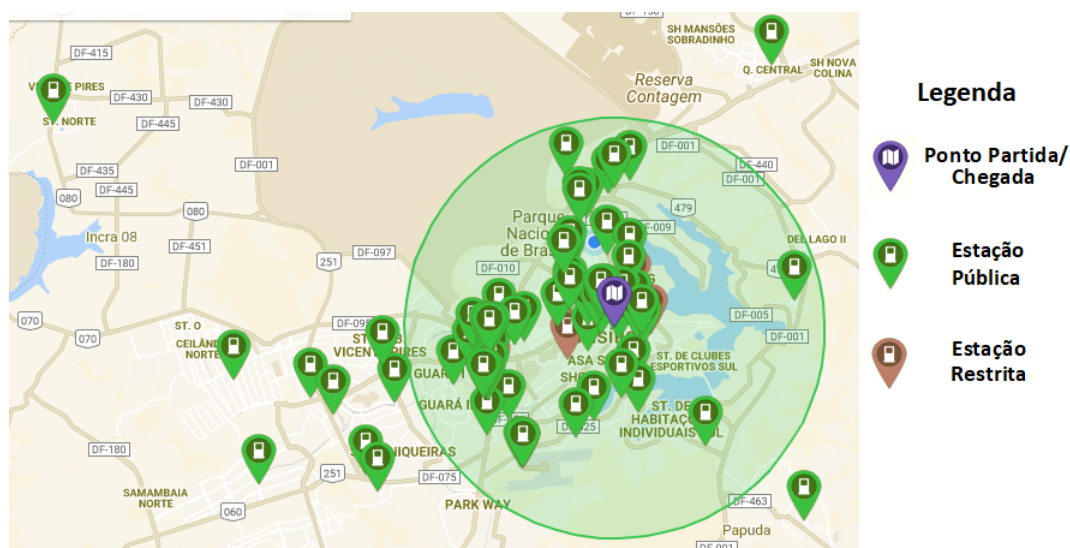
A partir desse levantamento, verificou-se que 33 estações foram circunscritas, sendo quatro de uso restrito e 29 de uso público. Aumentando-se o raio para 12,9 km, têm-se os resultados nas Figuras 4.152 e 4.153.

Figura 4.152 – Raio de 12,9 km da Rodoviária do Plano Piloto



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado.

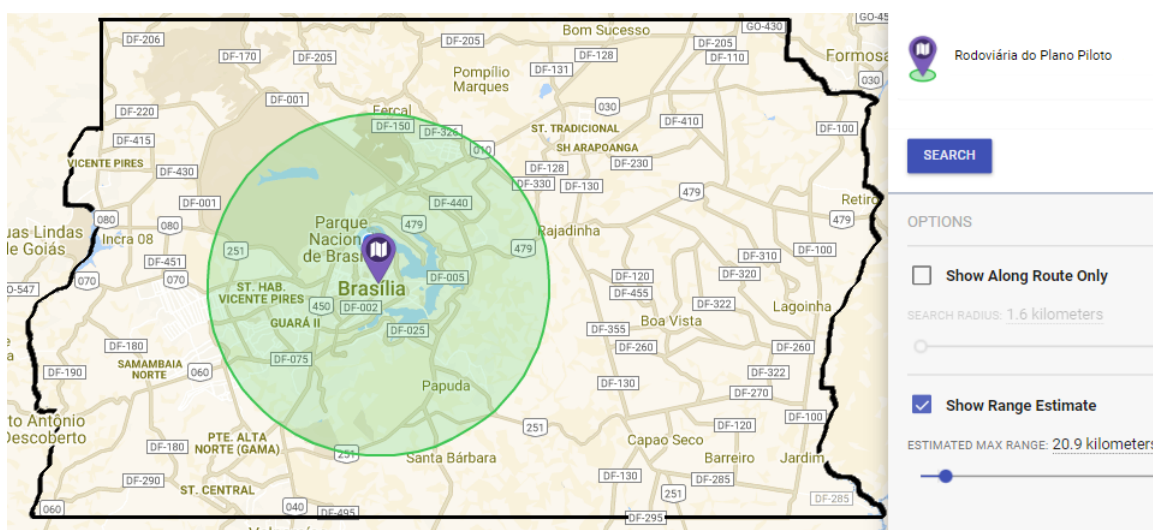
Figura 4.153 – Estações de recarga em raio de 12,9 km



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado.

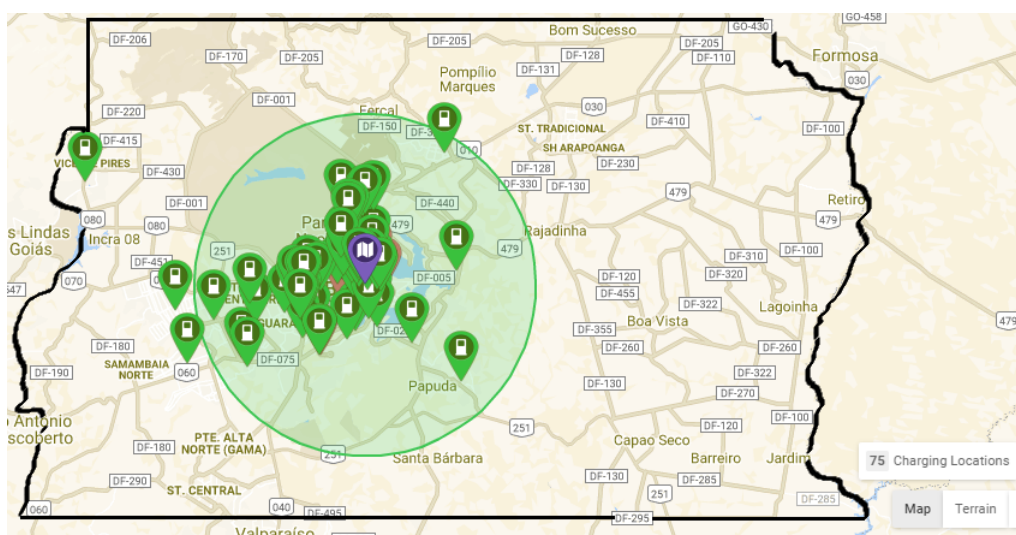
Para essa distância, apenas 11 estações não estão localizadas no interior da circunferência, o que totaliza 64 estações abrangidas. Dessas, sete são privadas e 57 públicas. Por fim, tomando-se um raio de 20,9 km.

Figura 4.154 – Raio de 20,9 km do centro de Brasília



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado.

Figura 4.155 – Estações de recarga em raio de 20,9 km do centro de Brasília



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado.

Observa-se que apenas três estações não estão incluídas na circunferência, totalizando assim 73 estações abrangidas. A Tabela 4.47 mostra o quantitativo de estações em cada raio e as porcentagens relativas.

Tabela 4.47 – Quantidade de estações e porcentagem

Raio (km)	Quantidade de Estações	Porcentagem
6,4	33	44%
12,9	64	85,33%
20,9	72	96%

Fonte: Autoria Própria, 2021.

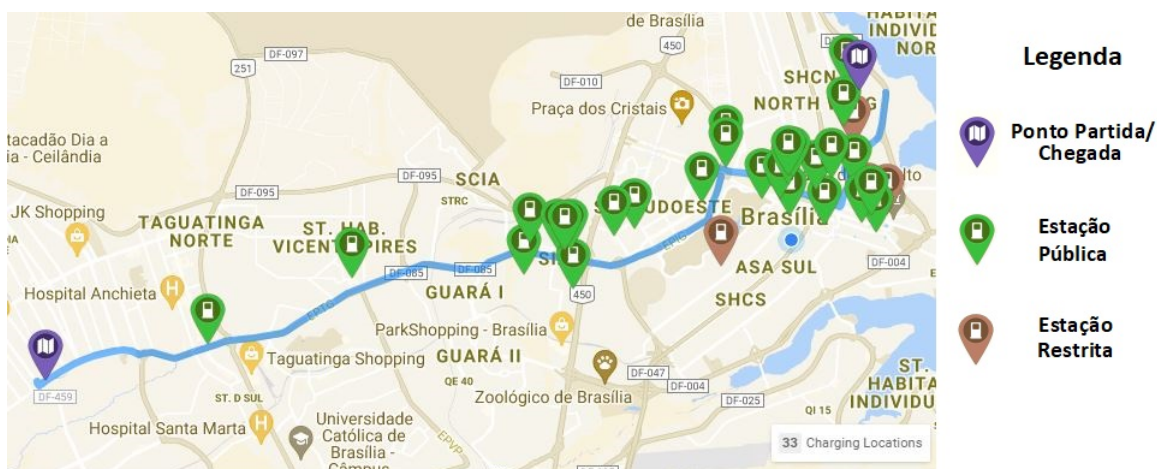
Assim, conclui-se que a distribuição atual das estações de recarga em Brasília apresenta maior concentração em áreas próximas à região central da cidade. Aproximadamente metade dessas se encontra em um raio de 6,4 km da Rodoviária do Plano Piloto, enquanto 31 estações estão dispostas entre 6,4 km e 12,9 km desse ponto de referência. Isso indica uma tendência de descentralização dessas estações, mas ainda dentro de distâncias curtas quando comparadas às aquelas dos trajetos analisados neste trabalho.

#### 4.4.2 DISTRIBUIÇÃO NOS PERCURSOS

O PlugShare™ disponibiliza uma ferramenta de planejamento de viagem (*Trip Planner*) que permite avaliar as estações disponíveis ao longo de um determinado percurso, sendo possível configurar a proximidade dessas do trajeto.

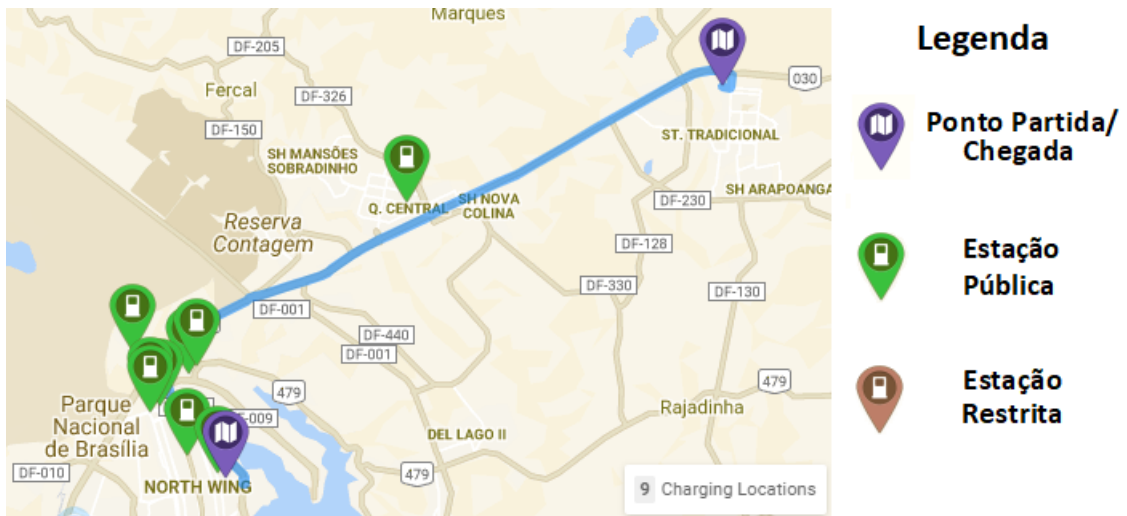
Assim, os percursos de referência foram avaliados considerando estações mais próximas dos pontos do trajeto (distantes de até 1,6 km). As Figuras 4.156, 4.157, 4.158 e 4.172 mostram a distribuição das estações nesses caminhos.

Figura 4.156 – Estações de recarga para o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia



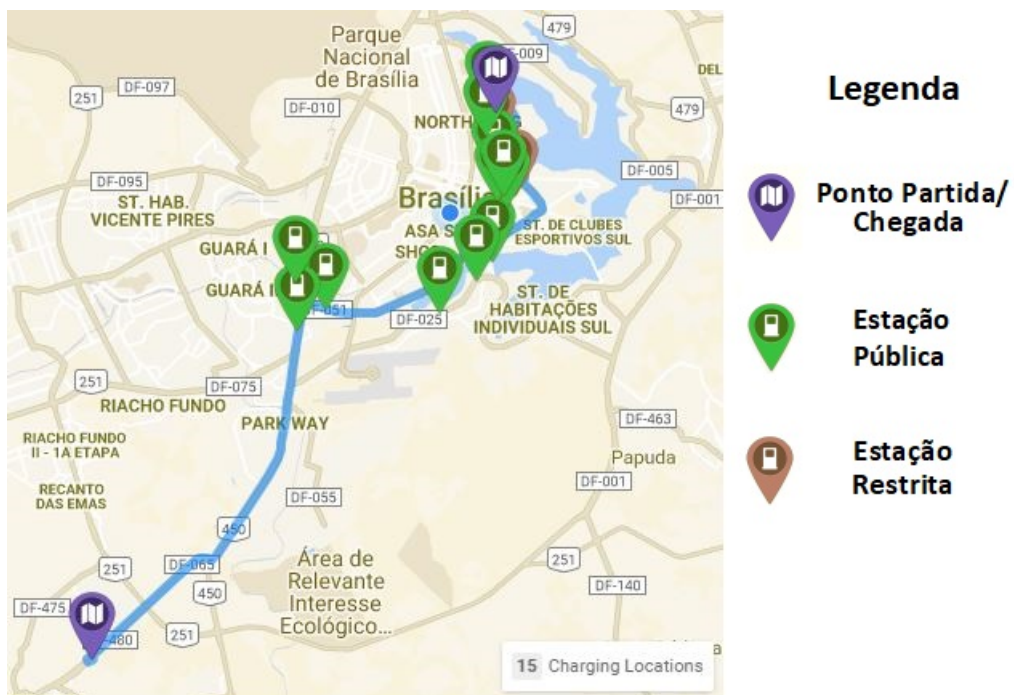
Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado

Figura 4.157 – Estações de recarga para o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina



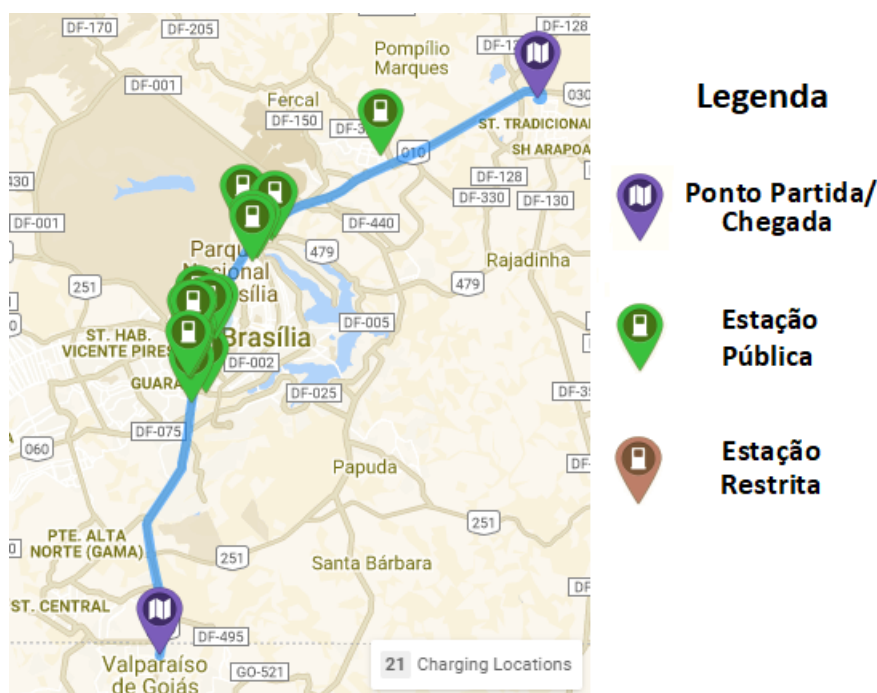
Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado

Figura 4.158 – Estações de recarga para o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado

Figura 4.159 – Estações de recarga para o trajeto Valparaíso-GO - UnB Planaltina



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado

As informações relativas à quantidade de estações nos trajetos são mostradas na Tabela 4.48.

Tabela 4.48 – Número de estações e médias nos percursos

Trajeto	Nº Estações	Extensão (km)	Média (estação/km)
UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia	33	34,14	0,967
UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina	9	37,27	0,241
UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama	15	40,38	0,371
Valparaíso-GO - UnB Planaltina	21	71,73	0,293

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para as trajetórias iniciadas no campus UnB Darcy Ribeiro (que também possui estação de recarga), as maiores concentrações de estação são observadas nas áreas próximas ao ponto de partida. Entretanto, em comparação com os trajetos em direção à parte sul (UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama) e oeste (UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia) do DF, fica evidenciada a menor concentração dos pontos de recarga na região norte de Brasília, uma vez que o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina possui a menor quantidade de estações e média por quilômetro.

Por outro lado, uma vez que o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia engloba o maior número de trechos que passam pela região central de Brasília, a quantidade de estações

e média por quilômetro foi maior que a dos demais percursos.

Para a trajetória Valparaíso-GO - UnB Planaltina, verifica-se a segunda maior quantidade de estações. Isso se deve ao fato de o percurso possuir trechos próximos aos *shoppings centers* e concessionárias localizadas no SIA (Setor de Indústrias e Abastecimento), locais esses com grande número de estações. Assim, apesar da maior extensão, sua média ainda supera a do trecho UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina.

#### 4.4.3 ASPECTOS GERAIS DAS ESTAÇÕES

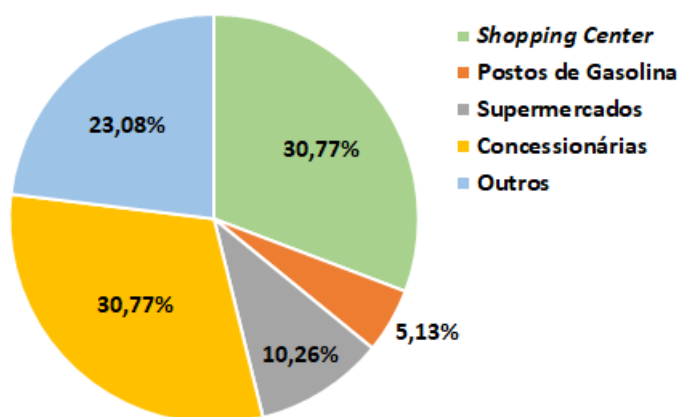
Dentre as localidades em que as estações de recarga se encontram, a distribuição majoritária ocorreu em estabelecimentos comerciais, como *shoppings centers*, supermercados, concessionárias de automóveis e outros (hotéis, condomínios de escritórios, estandes de vendas imobiliárias). Dessas 39 estações, três são privadas. A Tabela 4.49 e a Figura 4.160 mostram a quantidade e percentual de estações nesses estabelecimentos.

Tabela 4.49 – Estações em estabelecimentos comerciais

Estabelecimento Comercial	Estações
<i>Shopping Center</i>	12
Postos de Combustível	2
Supermercados	4
Concessionárias	12
Outros	9

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.160 – Estações em estabelecimentos comerciais



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado.

Destacam-se também os edifícios públicos, tanto relativos ao governo distrital (adminis-



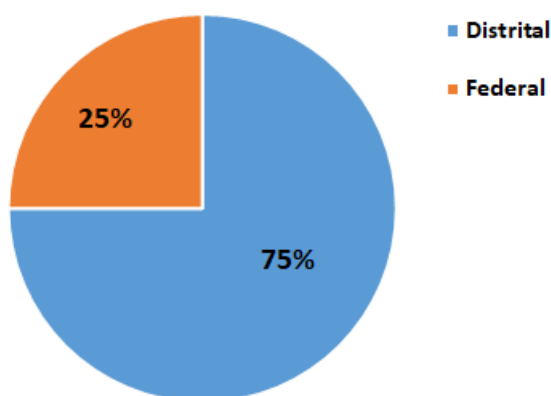
trações regionais, parques e secretarias) quanto ao governo federal (ministérios, tribunais e Congresso Nacional). Somados, contabilizam 36 estações de recargas, das quais quatro são de uso privativo. A Tabela 4.50 e a Figura 4.161 mostram a distribuição das estações nessas duas categorias.

Tabela 4.50 – Estações em estabelecimentos públicos

<b>Estabelecimento Público</b>	<b>Estações</b>
Distrital	27
Federal	9

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 4.161 – Estações em edifícios públicos



Fonte: PlugShare™, 2021 - Adaptado.

Em se tratando do tipo de carregamento, todas as estações listadas no PlugShare™ realizam recargas em corrente alternada, não havendo estações alimentadas em CC instaladas atualmente em Brasília. Para os *plugs* presentes nas estações, a Tabela 4.51 mostra a disponibilidade de diferentes conectores:

Tabela 4.51 – Conectores disponíveis nas estações de recarga

<b>Tipo de Conector</b>	<b>Quantidade</b>
Tipo 1	2
Tipo 2	71
Tipo 1 e Tipo 2	2

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Observa-se a predominância majoritária dos *plugs* Tipo 2 nas 75 estações disponíveis. Destaca-se que, entre as estações que possuem os *plugs* Tipo 1, duas delas os disponibilizam

de forma exclusiva (concessionárias da montadora japonesa Nissan), enquanto as demais ofertam também *plugs* do Tipo 2.

Em termos qualitativos da potência das carregadores, os pontos relativos aos edifícios públicos possuem 32 estações da fabricante WEG, modelo WEMOB, com 22 kW de potência. As excessões são as estações localizadas na UnB (fabricante BYD, com potência de 40 kW) e em três dos quatro pontos privados, com fabricantes e potências não informadas. Nos estabelecimentos comerciais, as estações possuem diferentes fabricantes, sendo identificadas as seguintes marcas e respectivas potências.

Tabela 4.52 – Fabricantes de estações de recarga em estabelecimentos comerciais

<b>Fabricante</b>	<b>Potência</b>
BMW	7,4 kW
Schneider Electric	22 kW
Porsche	11 kW e 22 kW
BYD	40 kW
Volvo	3,7 kW
WEG	7,4 kW

Fonte: Autoria Própria, 2021.

#### 4.4.4 ANÁLISE DE AUTONOMIA

Um dos fatores que mais impactam a aquisição de veículos puramente elétricos é o *range anxiety* (GRAHN,2014). Esse efeito consiste na apreensão de que bateria descarregue completamente sem que um determinado trajeto seja finalizado, sendo potencializado pela percepção de poucas estações disponíveis para recarga.

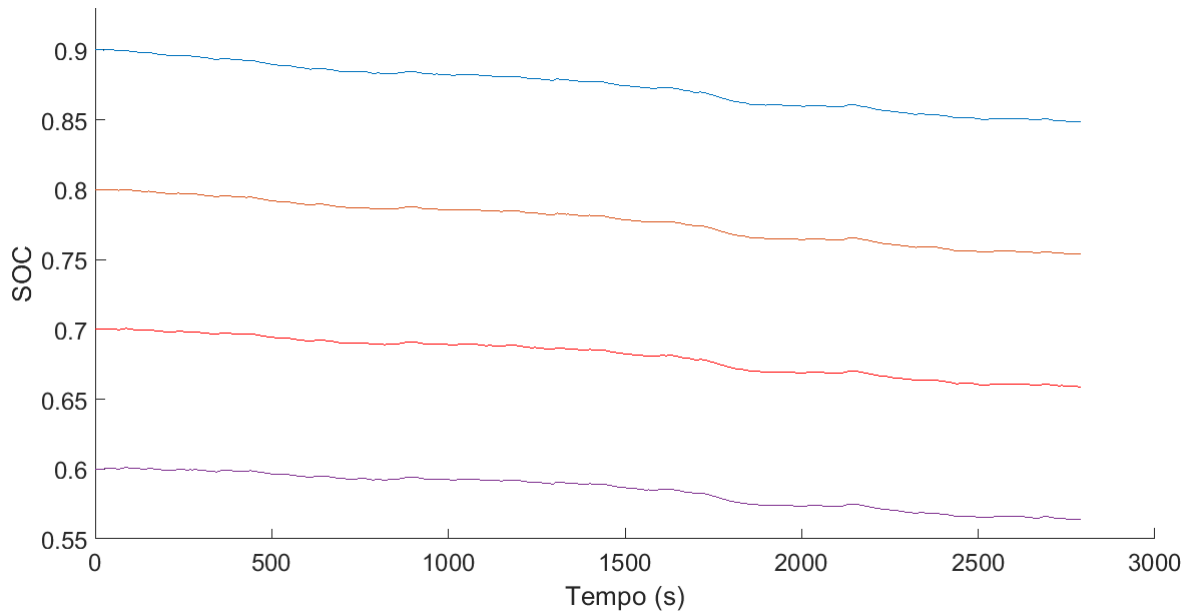
Assim, afim de avaliar a autonomia nos percursos realizados em Brasília, foram considerados diferentes níveis de carga iniciais para o veículo BEV, permitindo a análise da operação do seu sistema de bateria (tensão nos terminais, corrente e perfil de descarga) em diferentes ciclos de condução e altitude. Os veículos híbridos não foram avaliados nesse quesito, pois atuam movidos pelo MCI quando o nível de carga atinge os valores mínimos determinados pelas fabricantes, operando de forma semelhante aos veículos convencionais.

Para refletir condições mais hostis de operação, foi considerada uma temperatura ambiente de 35° C, já que essa acarreta em maiores níveis de descarga da bateria (PLETT,2015). As temperaturas iniciais consideradas para o veículo (interior, máquina elétrica e bateria) foram de 20° C.

Em todos os trajetos simulados, os diferentes níveis de carga foram agrupados de acordo com as similaridades verificadas nas curvas de descarga. Assim, para o trajeto UnB Darcy

Ribeiro - UnB Ceilândia, os níveis entre 90% e 60% apresentaram o mesmo padrão de descarga, conforme mostra a Figura 4.162.

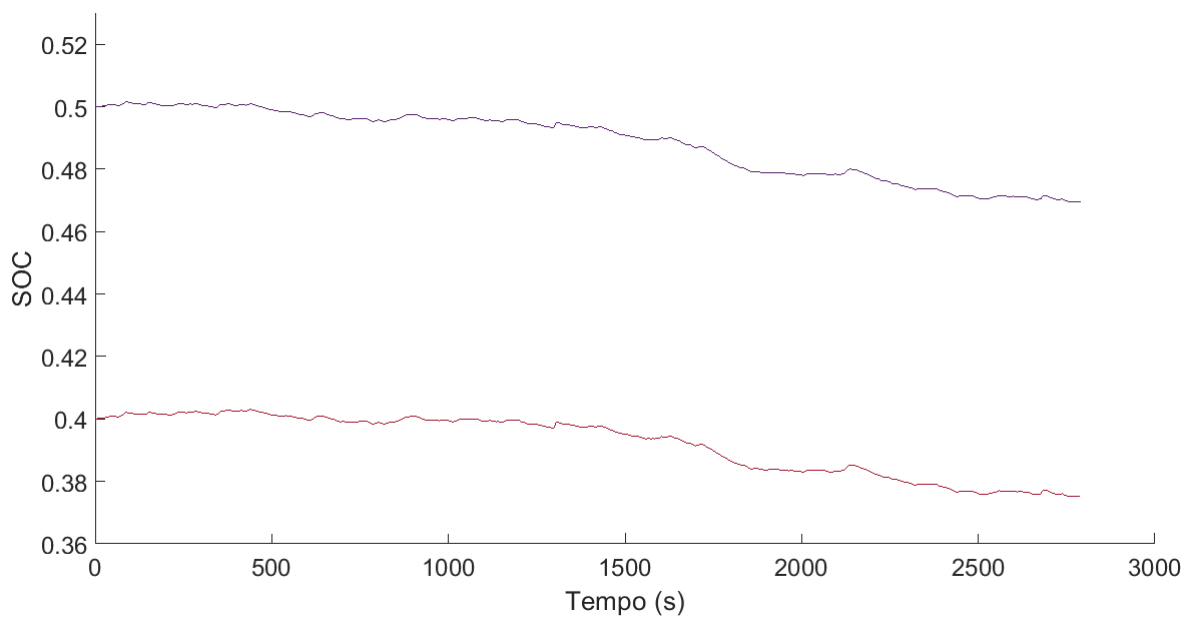
Figura 4.162 – SOC 90% - 60% UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir dos níveis entre 50% e 40%, verifica-se uma mudança de curva entre os instantes  $t_0 = 0$  e  $t_1 = 500$  s, trecho esse que apresentou ligeiro aumento de carga, seguido de posterior descarga.

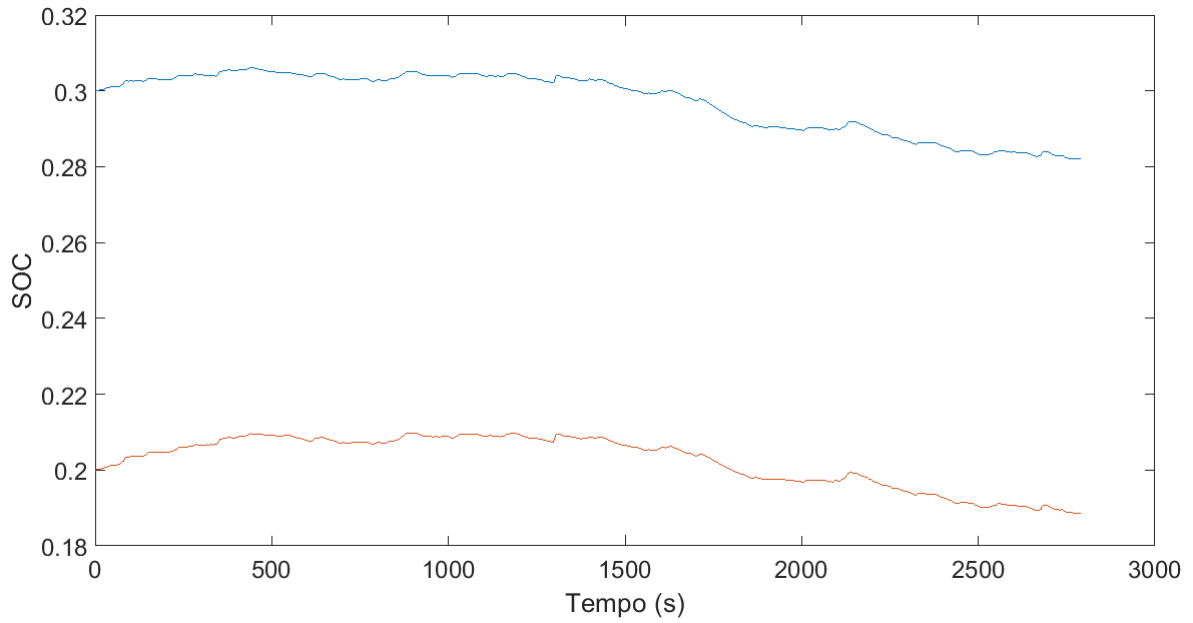
Figura 4.163 – SOC 50% - 40% UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para os níveis entre 30% e 20%, a tendência de aumento nos instantes iniciais verificada no caso anterior foi acentuada, efeito esse mostrado na Figura 4.164:

Figura 4.164 – SOC 30% - 20% UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Os detalhes da operação da bateria nas condições simuladas são mostradas nas Tabela 4.53.

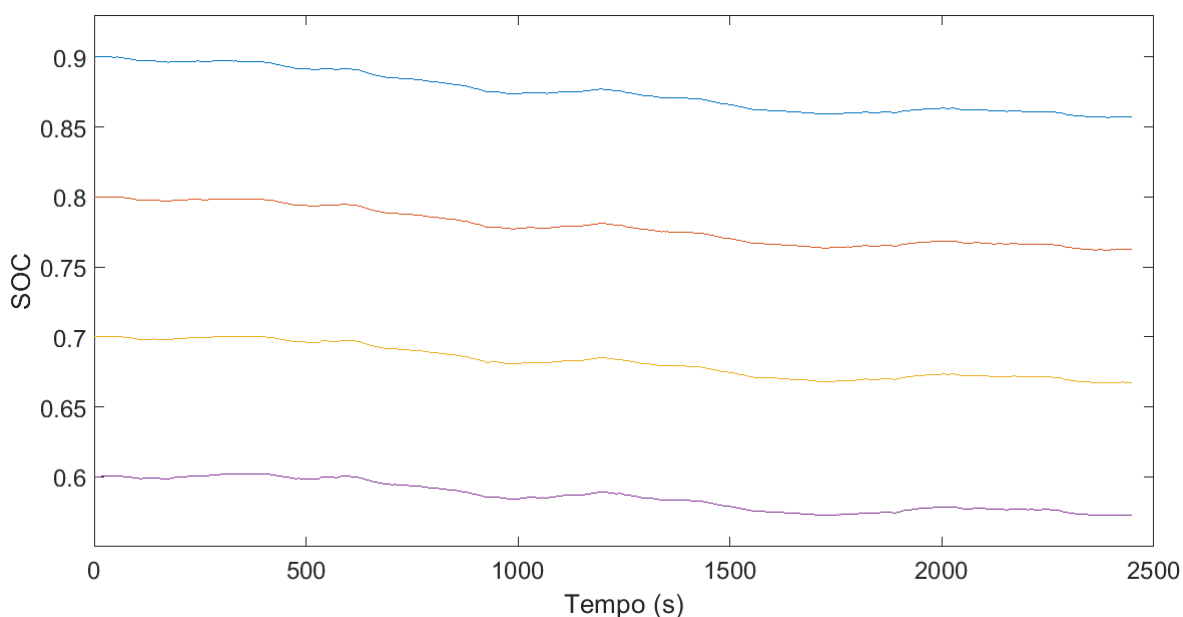
Tabela 4.53 – Operação geral da bateria UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia

SOC Inicial	SOC Final	$\Delta$ SOC	Tensão Média (V)	Corrente Média Propulsão (A)	Corrente Média Regen. (A)
90%	84,87%	5,13%	376,650	25,963	-16,633
80%	75,38%	4,62%	369,861	26,440	-16,936
70%	65,90%	4,10%	363,362	26,947	-17,240
60%	56,41%	3,59%	357,170	27,380	-17,538
50%	46,96%	3,04%	352,572	27,738	-17,765
40%	37,52%	2,48%	348,011	28,103	-17,996
30%	28,20%	1,80%	343,900	28,450	-18,201
20%	18,85%	1,15%	339,712	28,811	-18,416

Fonte: Autoria Própria, 2021.

No trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, de forma semelhante ao percurso anterior, os níveis entre 90% e 60% apresentaram o mesmo padrão de descarga, conforme ilustra a Figura 4.165.

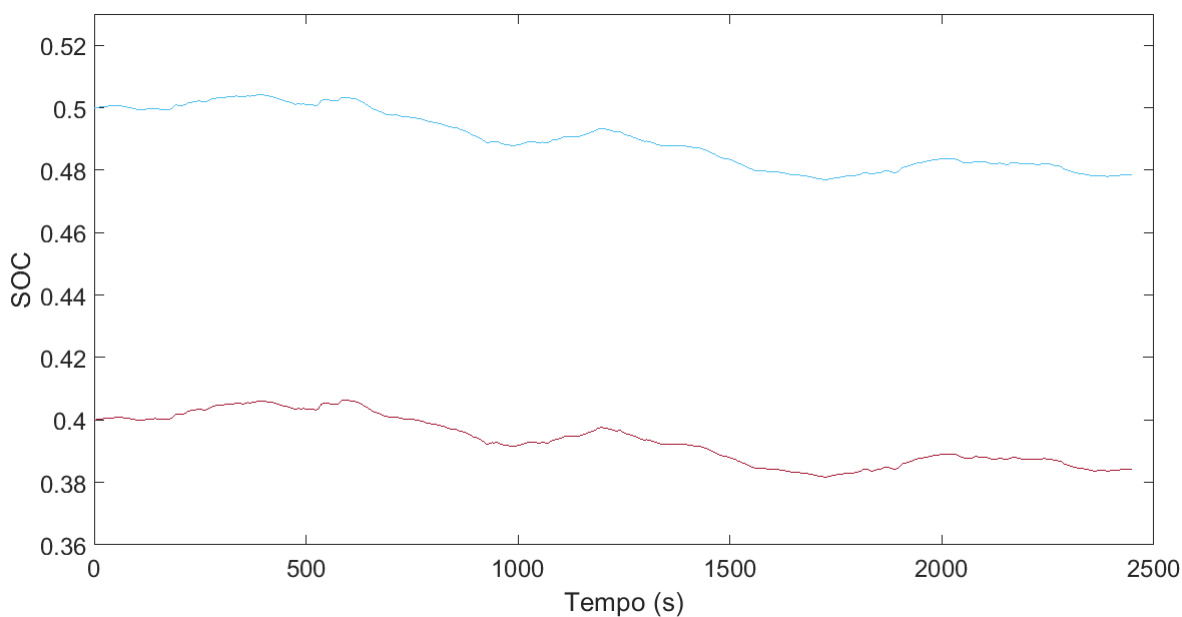
Figura 4.165 – SOC 90% - 60% UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir dos níveis entre 50% e 60%, verifica-se um aumento de carga até o instante  $t_0 = 500$  s, com posterior descarga.

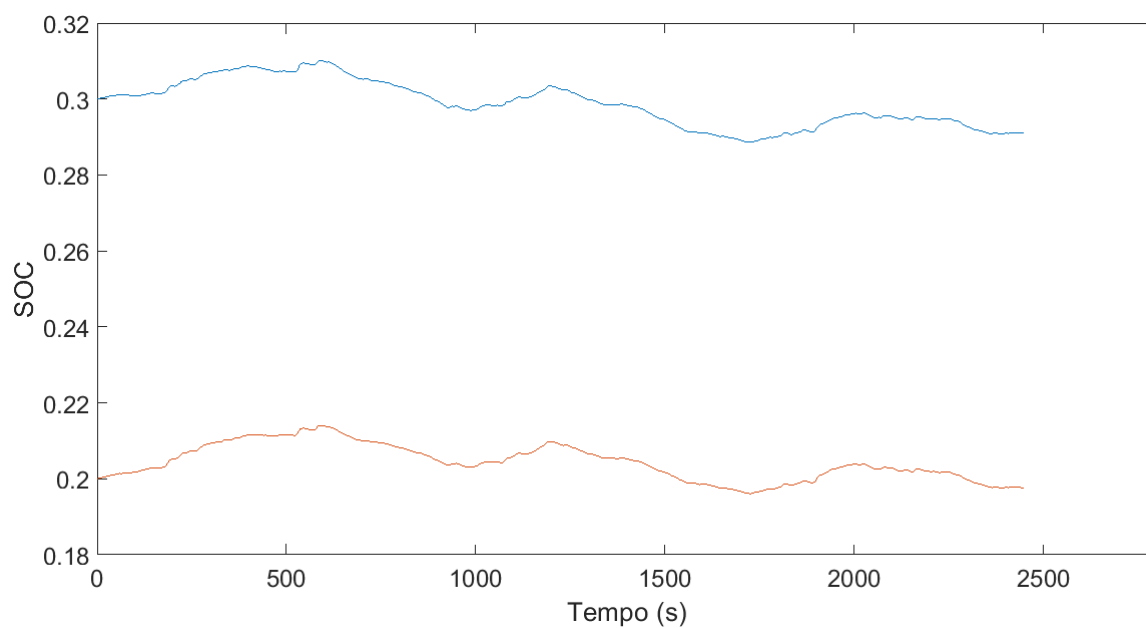
Figura 4.166 – SOC 50% - 40% UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para os níveis entre 30% a 20% de carga, o aumento de carga no início do trajeto ocorre de forma mais significativa, se estendendo no tempo em relação ao caso anterior. Para o nível inicial de 20%, esse aumento chega próximo de 2% entre  $t_0 = 0$  e  $t_1 = 500$  s, conforme mostra a Figura 4.167.

Figura 4.167 – SOC 30% - 20% UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A operação geral da bateria, nesse trajeto, é mostrada na Tabela 4.54.

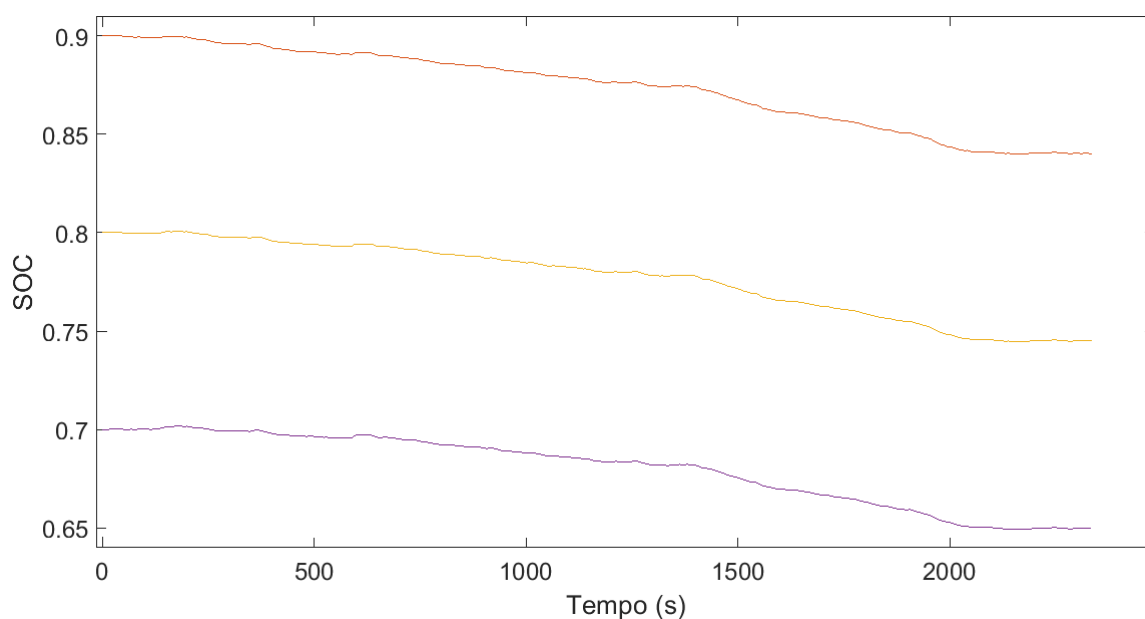
Tabela 4.54 – Operação geral da bateria UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina

SOC Inicial	SOC Final	$\Delta$ SOC	Tensão Média (V)	Corrente Média Propulsão (A)	Corrente Média Regen. (A)
90%	85,71%	4,29%	376,762	30,475	-15,487
80%	76,23%	3,77%	369,971	31,037	-15,769
70%	66,76%	3,24%	363,473	31,592	-16,051
60%	57,28%	2,72%	357,257	32,146	-16,328
50%	47,84%	2,16%	352,6601	32,567	-16,540
40%	38,41%	1,59%	348,102	32,998	-16,754
30%	29,1%	0,9%	344	33,408	-16,945
20%	19,76%	0,24%	339,893	33,828	-17,141

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Seguindo um padrão diferente em relação aos casos anteriores, o trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama apresenta o mesmo perfil de descarga para níveis iniciais entre 90% e 70%, conforme ilustra a Figura 4.168.

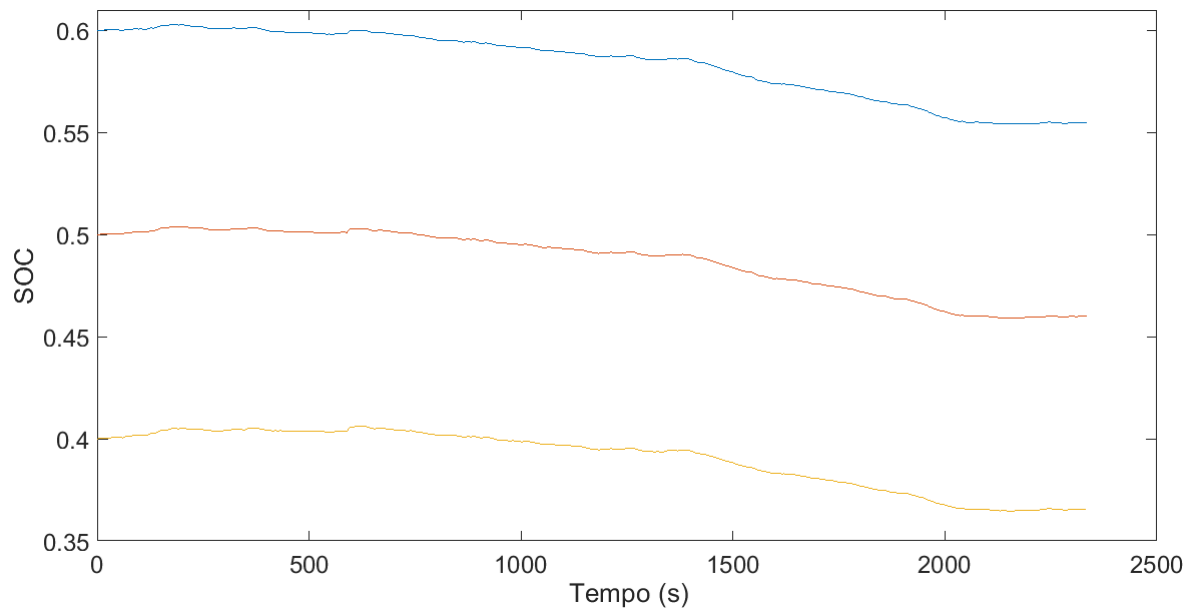
Figura 4.168 – SOC 90% - 70% UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir dos níveis entre 60% e 40%, verifica-se uma ligeira tendência de aumento da carga nos instantes iniciais, com posterior retomada do padrão de descarga. A Figura 4.168 mostra esse comportamento.

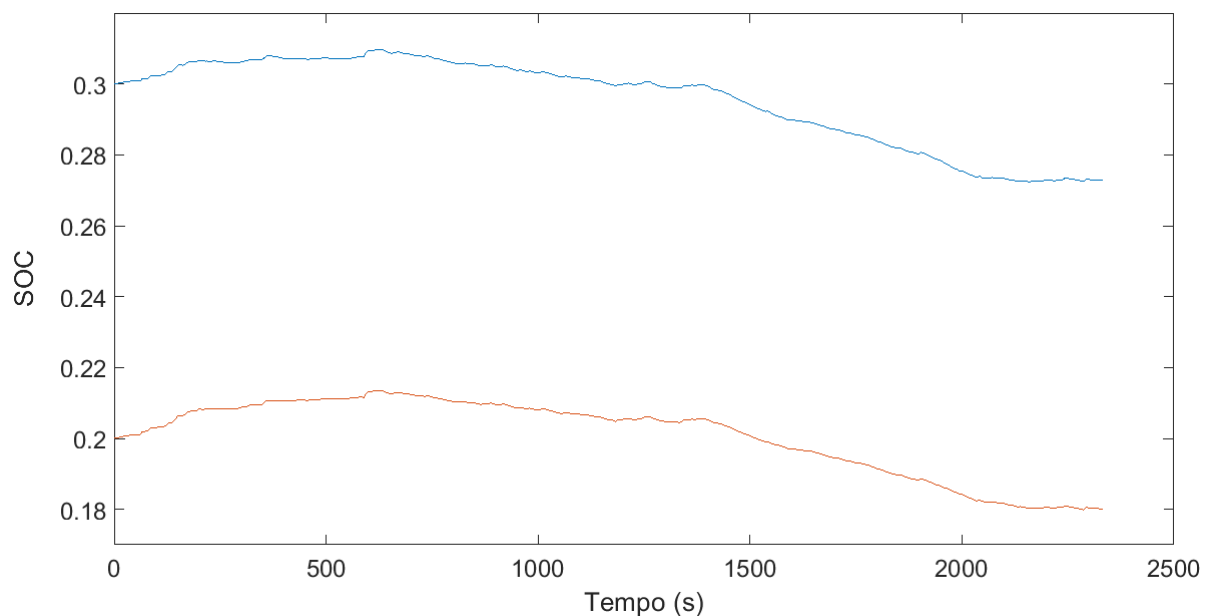
Figura 4.169 – SOC 60% - 40% UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para os níveis entre 30% - 20%, tem-se o aumento mais acentuado dos níveis de carga nos instantes iniciais, com posterior tendência de queda.

Figura 4.170 – SOC 30% - 20% UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama



Fonte: Autoria Própria, 2021.

As informações gerais à respeito da operação da bateria nesse trajeto se encontram na Tabela 4.55:



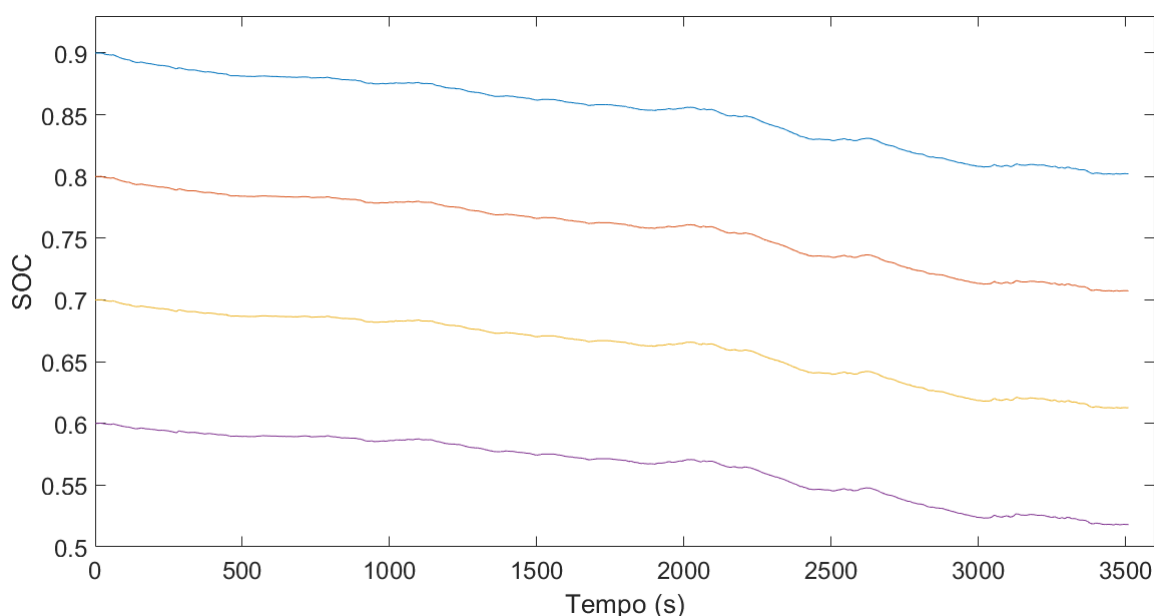
Tabela 4.55 – Operação geral da bateria UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama

SOC Inicial	SOC Final	$\Delta$ SOC	Tensão Média (V)	Corrente Média Propulsão (A)	Corrente Média Regen. (A)
90%	84,02%	5,98%	376,494	32,480	-14,308
80%	74,50%	5,50%	369,675	33,077	-14,572
70%	64,98%	5,02%	363,168	33,670	-14,834
60%	55,47%	4,53%	356,992	34,249	-15,092
50%	45,99%	4,01%	352,375	34,698	-15,289
40%	36,55%	3,45%	347,809	35,156	-15,487
30%	27,29%	2,71%	343,668	35,592	-15,666
20%	18,00%	2,00%	339,365	36,058	-15,856

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Por fim, para o trajeto Valparaíso-GO - UnB Planaltina, as curvas de descarga apresentaram o mesmo padrão para os níveis iniciais entre 90% - 60%.

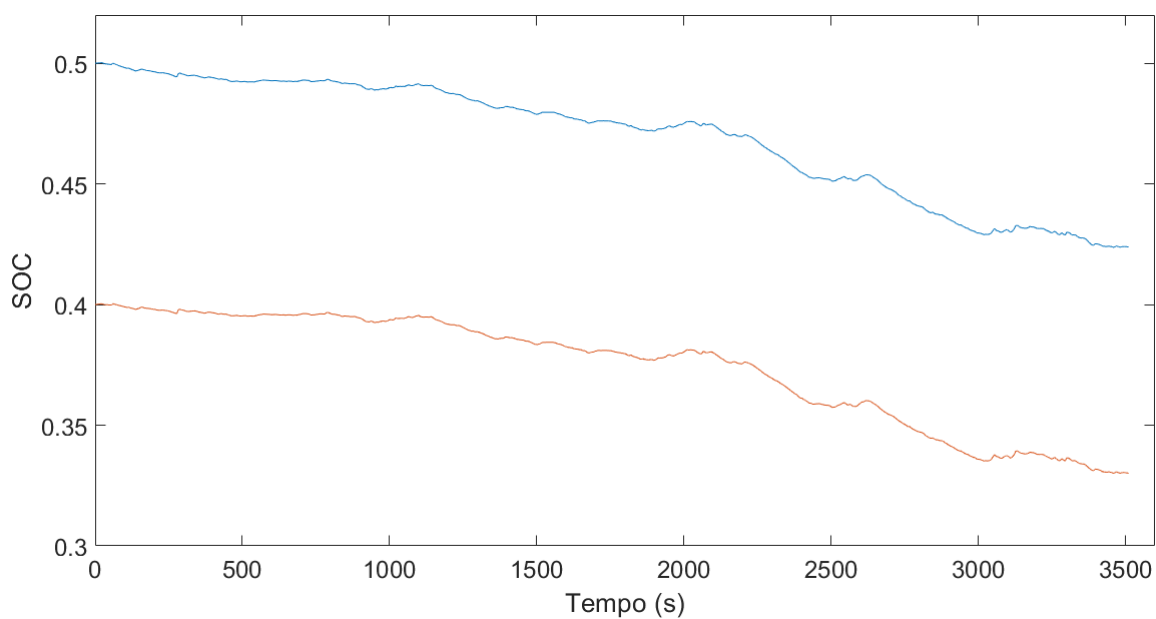
Figura 4.171 – SOC 90% - 60% Valparaíso-GO - UnB Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Diferentemente dos demais trajetos, para os níveis entre 50% - 40%, houve primeiramente uma tendência de manutenção de carga até o instante  $t = 1000$  s, com posterior descarga no restante do percurso.

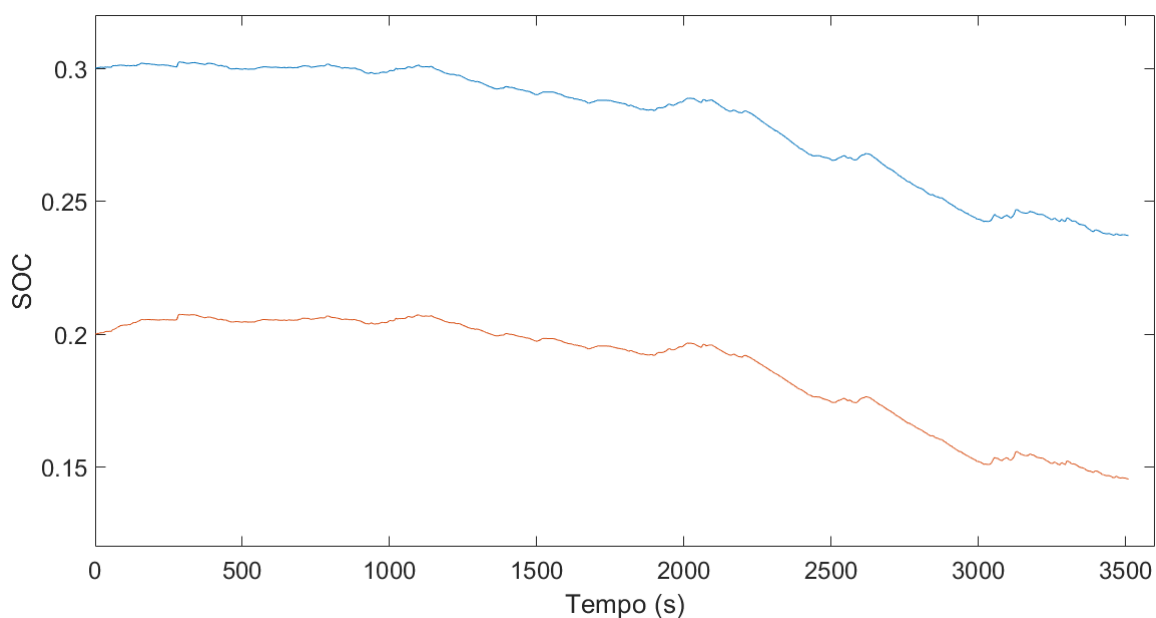
Figura 4.172 – SOC 50% - 40% Valparaíso-GO - UnB Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para os níveis entre 30% - 20%, repete-se o comportamento verificado nos trajetos anteriores, com tendência inicial de aumento de carga seguida de queda.

Figura 4.173 – SOC 30% - 20% Valparaíso-GO - UnB Planaltina



Fonte: Autoria Própria, 2021.

A Tabela 4.56 mostra a operação da bateria nesse trajeto.

Tabela 4.56 – Operação geral da bateria Valparaíso-GO - UnB Planaltina

SOC Inicial	SOC Final	$\Delta$ SOC	Tensão Média (V)	Corrente Média Propulsão (A)	Corrente Média Regen. (A)
90%	79,87%	10,13%	375,105	42,540	-21,720
80%	70,23%	9,77%	368,432	43,309	-22,108
70%	61,26%	8,74%	361,949	44,086	-22,503
60%	51,81%	8,19%	356,187	44,793	-22,848
50%	42,39%	7,61%	351,635	45,373	-23,139
40%	33,01%	6,99%	347,175	45,962	-23,424
30%	23,70%	6,3%	343,061	46,539	-23,689
20%	14,54%	5,46%	338,388	47,229	-24,014

Fonte: Autoria Própria, 2021.

A partir das simulações realizadas, verifica-se que:

- Em todos os percursos simulados, houve a diminuição da tensão média nos terminais da bateria à medida em que as cargas iniciais foram reduzidas. Esse efeito já era esperado, uma vez que, para o modelo de bateria utilizado, a tensão de circuito aberto é função do SOC;
- Em contrapartida, tanto as correntes médias de propulsão quanto as de regeneração apresentaram aumentos gradativos. Para ambos os casos, tais efeitos estão relacionados ao fato de o fluxo de potência ser independente do SOC ao longo do trajeto, acarretando assim em correntes crescentes para compensar as quedas de tensão;
- Para as diferenças dos níveis iniciais e finais de carga ( $\Delta$  SOC), são observadas reduções gradativas com a diminuição das cargas iniciais. Em partes, isso se relaciona com a estratégia de utilização do sistema de frenagem para recuperação de energia por frenagem regenerativa. À medida em que a carga inicial é reduzida, maiores fluxos de potência reversa são permitidos pelo sistema de armazenamento de energia;
- Com excessão do trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama, observou-se que, até 60% de carga inicial, o padrão das descargas apresenta diminuição gradual ao longo do trajeto. Porém, a partir de níveis entre 40% - 20%, foi observado um aumento de carga nos instantes iniciais do percurso, sendo essa acentuada à medida em que ocorre a redução da carga inicial. Esse efeito é incoerente com as condições dinâmicas dos trajetos percorridos, pois representa recuperação de energia em instantes em que há necessidade de torques e correntes mais altos para iniciar o movimento do veículo e variar sua velocidade.

Os últimos dois pontos estão relacionados ao modelo de bateria utilizado, já que esse possui parâmetros dependentes da temperatura e nível de carga (resistências internas de carga, descarga e tensão de circuito aberto). Em se tratando da recuperação por frenagem regenerativa, o efeito verificado é representado por uma resistência interna de carregamento que diminui conforme o estado de carga reduz.

Para as curvas de descarga, os resultados mostram as limitações da simulação para baixos níveis iniciais de carga, comprometendo assim a precisão das análises de autonomia. Nessas condições, para avaliações conclusivas, é necessária a utilização de modelos distintos de bateria e ampliação do intervalo considerado de temperaturas ambientes. Dessa forma, situações mais amplas de operação podem ser analisadas, permitindo uma investigação mais abrangente dos perfis de descarga da bateria, refletindo com maior fidelidade as diferentes condições ambientais de Brasília ao longo de um ano.

## 4.5 CONCLUSÕES

A partir das simulações realizadas, foi possível analisar, em variados níveis de detalhamento, a operação dos sistemas de propulsão, baterias e custos de diferentes veículos nos trajetos de referência.

Para os sistemas de propulsão, a eficiência foi o parâmetro comum aos dois simuladores utilizados. Nesse ponto, destaca-se a modelagem desses sistemas em cada programa: no FASTSim™, o MCI e a máquina elétrica têm suas eficiências dadas em função das potências transmitidas, ao passo que o ADVISOR® utiliza curvas de torque-velocidade em conjunto com mapas de eficiência, requerendo uma análise mais detalhada da operação.

De modo geral, os trajetos que envolvem potências mais altas apresentaram eficiências maiores. Assim, no FASTSim™, o percurso Valparaíso-GO - UnB Planaltina apresentou as maiores eficiências para todos os veículos. Entre os trajetos *intercampi*, o percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama registrou as operações mais eficientes. Os valores verificados no ADVISOR®, apesar de serem menores, também seguem essa tendência na maioria dos trajetos.

Analisando-se os torques e velocidades dos sistemas de propulsão nos percursos com o ADVISOR®, registraram-se as rotações mais elevadas do MCI e máquina elétrica nos trajetos de característica rodoviária. Nesses também foram verificados os valores RMS mais elevados de torque do MCI dos veículos convencional, HEV e PHEV. Para a máquina elétrica, os torques RMS do HEV e BEV diminuíram nos trajetos de maior velocidade, ao passo que o do PHEV aumentou.

Em se tratando da operação das baterias, o estado de carga e a potência RMS foram os parâmetros comuns aos dois simuladores. No primeiro, em todos os percursos, a menor diferença de valores é observada para o veículo BEV, variando nos híbridos de acordo com o trajeto. O percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia apresentou os resultados mais convergentes, enquanto a maior diferença foi verificada no percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama. Para a potência RMS, verifica-se que os valores obtidos nos dois simuladores apresentam poucas diferenças e, à excessão do HEV, aumentam nos trajetos de maior característica rodoviária.

No FASTSim™, em todos os veículos híbridos e elétricos, as maiores quantidades de ciclos por quilômetro foram verificadas no trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia, de característica predominantemente urbana. Entretanto, isso não se traduziu em maior energia recuperada por frenagem regenerativa, que teve seus maiores valores registrados no percurso UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina, de característica rodoviária e altitude decrescente. Devido à maior extensão e potência, o trajeto Valparaíso-GO - UnB Planaltina registrou os menores níveis finais de carga para os veículos PHEV e BEV.

No ADVISOR®, as maiores energias recuperadas ocorreram nos trajetos rodoviários de altitude decrescente (Valparaíso-GO - UnB Planaltina e UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina). Para as médias quadráticas (RMS) de corrente e potência, os veículos híbridos possuem valores com alto nível de especificidade que dependem, principalmente, do modo de operação predominante em cada trajeto, sendo necessário um aprofundamento maior nos modos de coordenação dos sistemas de propulsão. Para o BEV, os valores RMS de potência e corrente aumentaram de acordo com as velocidades médias dos trajetos. Em todos os trajetos, tem-se o aumento da eficiência da bateria proporcionalmente ao grau de eletrificação dos veículos.

Para as perdas nos trajetos, os valores absolutos por arraste aerodinâmico foram proporcionais às velocidades registradas, ao passo que as ocorridas por resistência ao rolamento e subida se deram em função da massa dos veículos e topologia dos trajetos. Dentre os componentes, destacam-se os sistemas de propulsão, em especial o MCI. Nos automóveis convencional e HEV, esse foi responsável por cerca de 70% e 60% das perdas ocorridas nesses, respectivamente. Ressaltam-se ainda as perdas dos freios, que apresentaram maiores valores absolutos no trajeto UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia devido ao maior número de paradas. Nos veículos híbridos e elétrico, teve-se a redução dessas devido à frenagem regenerativa.

Em se tratando dos custos por trajeto, em todos os veículos verificou-se que os valores obtidos pelo ADVISOR® foram superiores àqueles do FASTSim™. No primeiro, destaca-se que o custo do PHEV foi superior ao do HEV em dois trajetos (UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia e UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina), ao passo que no segundo os custos foram decrescentes com a maior eletrificação dos veículos. Destaca-se que o modo de condução do

PHEV foi diferente em cada simulador, acarretando em operações e gastos distintos.

Para as estações de recarga, verificam-se altas concentrações dessas no centro de Brasília, estando quase metade em um raio de 6,4 km de distância da Rodoviária do Plano Piloto. Observa-se a predominância do conector Tipo 2, com poucas ocorrências de carregadores Tipo 1, além de ainda não haver estações de recarga alimentadas em CC na cidade. Dentre os estabelecimentos que possuem estações, destacam-se empreendimentos comerciais como *shoppings centers* e concessionárias de automóveis, apesar de também haver grandes quantidades de pontos de recarga disponíveis em prédios públicos. Por fim, verifica-se a diversidade de fabricantes e potências de estações disponíveis para utilização pelos usuários.

Analisando a autonomia do veículo BEV, observou-se a diminuição da descarga de modo proporcional à redução da carga inicial da bateria. Em todos os trajetos, houve inicialmente a tendência de queda dos níveis de bateria, sendo essa mantida até cargas iniciais entre 50% e 40%. Abaixo disso, ocorreram aumentos notáveis de carga nos instantes iniciais dos percursos. Tais registros são incoerentes, já que no início de cada percurso foram observados os maiores torques da máquina elétrica e, por consequência, as maiores correntes da bateria, o que deveria acarretar na queda do estado de carga. Assim, mesmo sendo possível finalizar todos os trajetos independente do nível de carga inicial, faz-se necessária uma abordagem detalhada dos parâmetros da bateria utilizada e também a variação das diferentes condições iniciais consideradas na simulação.

# 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

---

Este trabalho teve como objetivo analisar, em diferentes condições de trânsito em Brasília, o desempenho de baterias e sistemas de propulsão de veículos elétricos e convencionais, observando-se os custos envolvidos na operação desses. Além disso, foram avaliados aspectos diversos das estações de recarga já instaladas na cidade e a autonomia do veículo elétrico para diferentes níveis de carga inicial.

Uma vez verificada a tendência global em direção à mobilidade elétrica, faz-se necessário o entendimento de como os veículos híbridos e elétricos podem ser modelados em diferentes níveis de detalhamento e avaliados em situações variadas de tráfego. Dessa forma, compreende-se a operação de cada componente em ambiente automotivo, possibilitando a adaptação das tecnologias existentes e o desenvolvimento de novas soluções, ressaltando assim a relevância deste trabalho.

Considerando diferentes ciclos de condução e suas topologias, em simulações de menor complexidade, foi possível obter uma visão geral do desempenho dos veículos analisando-se os valores médios da operação dos sistemas de propulsão e baterias, além das perdas devido aos fatores dinâmicos e componentes do automóvel. Assim, tem-se um maior entendimento sobre as causas do consumo de combustível e energia da bateria e, conseqüentemente, sobre os custos envolvidos na realização de um determinado trajeto. Dentre os resultados obtidos com essas análises, destacam-se o maior número de ciclos da bateria no trajeto de característica urbana e maiores recuperações de energia por frenagem regenerativa em percursos com altitude decrescente.

Em níveis mais detalhados de simulação, observa-se que o desempenho dos veículos depende também de um conjunto de fatores além do perfil de velocidades e topologia de um dado trajeto. Dentre esses, destacam-se as diferentes curvas de torque-velocidade dos sistemas de propulsão e os parâmetros internos da bateria. Conseqüentemente, é possível verificar com maior profundidade a operação desses sistemas e, assim, propor diferentes soluções que considerem as especificidades únicas de cada veículo.

Analisando-se o cenário das estações de recarga em Brasília, foi possível ter um entendimento qualitativo e quantitativo dessas na cidade. Questões como distribuição, tipos de carregadores e estabelecimentos com pontos de recarga foram abordadas, verificando-se as altas concentrações próximas ao centro da cidade, predominância do *plug* Tipo 2 e a maior disponibilidade em estabelecimentos comerciais, contando também com grande participação do poder público. A análise dos estabelecimentos mostra a mudança de paradigma em relação ao abastecimento dos veículos convencionais, já que é possível realizar a recarga em

ampla variedade de lugares.

Isso, aliado ao estudo da autonomia do veículo elétrico que mostrou a capacidade de completar diferentes trajetos com níveis próximos à metade da carga inicial, mostra como o *range anxiety* não deve ser uma questão impeditiva para a aquisição de um veículo elétrico. Assim, com a mobilidade elétrica em seus estágios iniciais em Brasília, uma compreensão ampla desse cenário tem o poder de auxiliar a tomada de decisão de consumidores incertos sobre investir nessas novas tecnologias.

Dada a amplitude dos temas abordados nesse trabalho, sugere-se para pesquisas futuras:

- Realizar a modelagem dos conversores de potência dos veículos híbridos e elétricos, considerando aspectos como potência máxima, estratégias de controle e limite de temperatura de operação;
- Utilizar diferentes estratégias de acionamento dos sistemas de propulsão dos veículos híbridos, permitindo comparar os desempenhos dos modos distintos de condução desses automóveis;
- Modelar e simular veículos híbridos e elétricos classificados nas categorias sedã e SUV, de modo a refletir com maior fidelidade a diversificação dos veículos de passeio;
- Em nível macro, realizar estudos de eletrificação da frota veicular, de modo a mensurar o impacto nas redes de distribuição para diferentes taxas de penetração de veículos elétricos;
- Analisar a influência da variação de temperatura ambiente no perfil de descarga das baterias, considerando diferentes níveis iniciais de carga;
- Realizar simulações utilizando diferentes tecnologias e modelos de bateria, de modo a refletir seu comportamento dinâmico;
- Para identificação de oportunidades de investimento, pesquisar diferentes modelos de negócios de estações de recarga já praticados em mercados mais avançados em mobilidade elétrica.



# 6

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABB (org.). **EV Charging Solutions**. Disponível em: <<https://new.abb.com/ev-charging>>. Acesso em: 16 de jul. de 2021.

ABNT. NBR 7024: **Veículos rodoviários automotores leves - Medição do consumo de combustível - Método de ensaio (Versão Corrigida)**. Rio de Janeiro, 2017.

ABNT. NBR 16567: **Veículos rodoviários híbridos elétricos leves - Medição de emissão de escapamento e consumo de combustível e energia - Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

AGÊNCIA BRASÍLIA (org.). **Brasília rumo à certificação de cidade inteligente**. 28 nov. 2019. Disponível em <<https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2019/11/28/brasilia-rumo-a-certificacao-de-cidade-inteligente/>>. Acesso em: 15 jun. 2021.

ANEEL (org.). **Resolução Normativa nº 819**. c2018. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2018819.pdf>> Acesso em: 17 de out. de 2020.

ANP (org.). **Sistema de Levantamento de Preços: Resumos Mensal – Resumo II**. Disponível em <[https://preco.anp.gov.br/include/Resumo\\_Mensal\\_Index.asp](https://preco.anp.gov.br/include/Resumo_Mensal_Index.asp)>. Acesso em: 27 set. 2021.

AUTO ESPORTE MERCADO (org.). **Os 50 carros mais vendidos de 2020**. 05 jan. 2021. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/mercado/noticia/2021/01/os-50-carros-mais-vendidos-de-2020.ghtml>>. Acesso em: 12 jul. 2021.

AUTO ESPORTE COLUNISTAS (org.). **Teste: Chevrolet Onix 2019 é boa opção entre compactos, mas deveria ser mais seguro e econômico**. 25 mai. 2018. Disponível em <<https://autoesporte.globo.com/carros/colunistas/post-coluna/2018/05/chevrolet-onix-2019-e-boua-opcao-entre-compactos-mas-deveria-ser-mais-seguro-e-economico.ghtml>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

BAUER, P. et al.: **Electric Cars: Technology [MOOC]**. 2018. EdX: <<https://www.edx.org/course/electric-cars-technology>>. Acesso em: 10 out. 2020.

BCG (org.). **Who Will Drive Electric Cars to the Tipping Point?**. Disponível em <<https://www.bcg.com/publications/2020/drive-electric-cars-to-the-tipping-point>>. Acesso em: 21 jun. 2021.

BWM PRESS (org.). **Technical specifications of the BMW i3 (120 Ah) and the BMW i3s (120 Ah), valid from 11/2018**. 02 out. 2018. Disponível em: <<https://www.press.bmwgr>>

oup.com/global/article/detail/T0285608EN/technical-specifications-of-the-bmw-i3-120-ah-and-the-bmw-i3s-120-ah-valid-from-11/2018?language=en>. Acesso em: 14 jun. 2021.

BROOKER, A. et al.: **FASTSim: A Model To Estimate Vehicle Efficiency, Cost, and Performance**. SAE Technical Paper 2015-01-0973, 2015,

CAR INFO (org.). **Toyota Yaris Hybrid 1.5 VVT-iE 116hp, 2020 generation XP21 (2020 - present)**. c2021. Disponível em <<https://www.car.info/en-se/toyota/yaris/yaris-5-door-15-2020-19958675/specs>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

CHADEMO ASSOCIATION (org.). **CHAdEMO releases the latest version of the protocol enabling up to 400 kW**. Disponível em <<https://www.chademo.com/chademo-releases-the-latest-version-of-the-protocol-enabling-up-to-400kw/>> Acesso em: 05 jul. 2021.

CHENG, M. et al.: **Advanced Electrical Machines and Machine-Based Systems for Electric and Hybrid Vehicles**. Energies 2015; 8, no.9:9541-9564.

CPFL. **Mobilidade Elétrica: Mobilidade na CPFL**, c2017. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

DER-DF(org.). **Sistema Rodoviário do Distrito Federal 2020**. c2020. Disponível em <<https://www.der.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/11/SRDF-2020.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2021.

EHSANI, M. et al.: **Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles**. 3ª edição. Taylor & Rancis Group: CRC Press, 2018.

ÉPOCA NEGÓCIOS (org.). **Carro elétrico no Brasil: do zero aos bilhões em 10 anos**. Disponível em <<https://epocanegocios.globo.com/Tecnologia/noticia/2019/09/carro-eletrico-no-brasil-do-zero-aos-bilhoes-em-10-anos.html>> Acesso em: 23 jun. 2021.

EVO (org.). **Volkswagen Golf review - the ultimate family hatchback? - Performance and 0-60 time**. 18 jul.2018. Disponível em <<https://www.evo.co.uk/volkswagen/golf/page/0/1>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

FONTARAS, G. et al.: **The difference between reported and real-world CO 2 emissions: How much improvement can be expected by WLTP introduction?**. World Conference on Transport Research, Shanghai, China. Julho 2016.

GILLESPIE,T.D.: **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 1ª Edição. SAE International, 1992.

GRAHN, P.: **Electric Vehicle Charging Modeling**. 2014. 96 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, *School Of Electrical Engineering*, Royal Institute Of Technology, Estolcomo, 2014.

IEC. IEC 61851-1: **Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General**

requirements. 2017.

IEC. 61851-24: **Electric vehicle conductive charging system - Part 24: Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging.** 2014.

IEC. IEC 62196-1: **Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements.** 2014.

IEC. IEC 62196-2: **Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories.** 2016.

KARKI, A. et al.: **Status of Pure Electric Vehicle Power Train Technology and Future Prospects.** Applied System Innovation, 2020, 3, 35, doi:10.3390/asi3030035.

KBB (org.). **Brasileiros rodam em média 12,9 mil km no primeiro ano de uso de um veículo.** 08 abr. 2019. Disponível em: <<https://www.kbb.com.br/detalhes-noticia/quanto-brasileiro-roda-carro-ano/?ID=1830>>. Acesso em: 14 jun. 2021.

KONGJEEN, Y. et al.: **Impact of Plug-in Electric Vehicles Integrated into Power Distribution System Based on Voltage-Dependent Power Flow Analysis.** Energies 2018; 11, no. 6:1571. <<https://doi.org/10.3390/en110615717>>

LIU, K. et al.: **A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles.** Front. Mech. Eng. 14, 2019, p. 47–64.

MOTOR TREND (org.). **2020 Chevrolet Bolt Review: Checking in With Our Former Car of the Year.** 11 fev. 2021. Disponível em <<https://www.motortrend.com/reviews/2020-chevrolet-bolt-first-test-review/>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

NASSIF, G.G.: **Análise da performance e custos de diferentes configurações de power-train de um veículo a célula a combustível: O Hyundai Nexu.** 2019. 177 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

NRCAN (org.). **Buying an Electric Vehicle: Understanding the tables.** c2021. Disponível em <<https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/transportation-alternative-fuels/personal-vehicles/choosing-right-vehicle/buying-electric-vehicle/understanding-the-tables/21383>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

OMS Engenharia (org.). **Estação de recarga de veículos elétricos: instalação segura.** Disponível em < <https://omsengenharia.com.br/blog/estacao-de-recarga-de-veiculos-eletricos/> > Acesso em: 17 de out. de 2020.

ORRICO, M. V. M.: **Otimização do dimensionamento de um sistema de motor elétrico e bateria para veículo elétrico.** 2013. 123 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia

Mecatrônica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

PISTOIA, G.: **Battery Operated Devices and Systems: From Portable Electronics to Industrial Products**. 1ª edição. Oxford: Elsevier Science, 2009.

PLETT, G.L.: **Battery Management Systems Volume I: Battery Modeling**. 1ª edição. Norwood: Artech House, 2015.

PRESSROOM CHEVROLET (org.). **CHEVROLET BOLT EV - 2020**. c2020. <<https://media.chevrolet.com/media/us/en/chevrolet/vehicles/bolt-ev/2020.tab1.html>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

RONANKI, D. et al.: **Extreme Fast Charging Technology—Prospects to Enhance Sustainable Electric Transportation**. *Energies* 2019; 12, no. 19: 3721.

SAE. **SAE J1772: Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler**. 2017

SCHNEIDER ELECTRIC (org.). **Estação de Carregamento EVLink: Família de Produtos**. Disponível em <<https://www.se.com/br/pt/product-subcategory/80408-esta%C3%A7%C3%A3o-de-carregamento-evlink/>>. Acesso em: 14 de jul. de 2021.

SHAFIEI, A. et al.: **Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles**. In: ABU-RUB, H. et al.: **Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications**. 1ª edição. IEEE Press: Wiley Sons, 2014, cap. 13, p. 387-421.

SILVA, R.A.: **Avaliação da hibridização de um veículo nacional compacto utilizando arquitetura de eixos separados**. 2017. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SIMPSON, A.: **Cost-Benefit Analysis of Plug-In Hybrid Electric Vehicle Technology**. 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS-22), Yokohama, Japão. Outubro 2006.

SINDIPEÇAS (org.). **Relatório Balança Comercial do Setor de Autopeças. Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores**. Disponível em <[https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2019/RelatorioFrotaCirculante\\_Maio\\_2019.pdf](https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2019/RelatorioFrotaCirculante_Maio_2019.pdf)>. Acesso em: 04 jul. 2021.

TSIAKMAKIS, S. ET AL: **From NEDC to WLTP: effect on the type-approval CO2 emissions of light-duty vehicles**. EUR 28724 EN, Publications Office of the European Union, Luxemburgo, 2017.

VOLKSWAGEN (org.). **Manual de Instruções GOLF GTE**. c2019. Disponível em <[https://www.vw.com.br/idhub/content/dam/onehub\\_pkw/importers/br/literatura-de-bordo/manual-golf-gte/5G1.012.766.AK%20-%20Manual%20de%20instru%C3%A7%C3%B5es](https://www.vw.com.br/idhub/content/dam/onehub_pkw/importers/br/literatura-de-bordo/manual-golf-gte/5G1.012.766.AK%20-%20Manual%20de%20instru%C3%A7%C3%B5es)>.

pdf>. Acesso em: 12 ago. 2021.

WEG (org.). **Estação de Recarga para Veículos Elétricos (2ª Geração)**. Disponível em <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt>>. Acesso em: 10 de jul. 2021.

WHAT CAR ? (org.). **Car of the Year Awards 2021: True MPG Award**. c2021. Disponível em <<https://www.whatcar.com/news/car-of-the-year-awards-2021-true-mpg-award/n22442>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

ZERAOULIA, M. et al.: **Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study**. IEEE VPPC'05, Setembro de 2005, Chicago, Estados Unidos. pp.280-287.

# APÊNDICES

# A COMPOSIÇÃO DE TRECHOS *DRIVE CYCLES*

Neste apêndice, se encontram as informações relativas aos ciclos de condução utilizados neste trabalho. São mostrados os pontos iniciais, finais e composição de trechos de cada trajeto.

## • UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia (FCE)

Tabela A.1 – Coordenadas geográficas UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia

Trajeto	Latitude	Longitude
Início	-15.76177	-47.87411
Final	-15.84302	-48.10258

Tabela A.2 – Composição de trechos UnB Darcy Ribeiro - UnB Ceilândia

Trecho (em ordem de percurso)	Extensão no percurso (km)	Circunscrição	Velocidade Máxima Permitida
Avenida L3 Norte	2,8	Detran - DF	60 km/h
DF - 008 (EPUB)	0,8	Detran - DF	50 km/h
Avenida L2 Norte	1	DER - DF	60 km/h
Eixo Monumental (Via N1)	4,2	DER - DF	60 km/h
Eixo Monumental (Via S1)	0,29	DER - DF	60 km/h
DF - 011 (EPIG)	5,5	DNIT	60 km/h
DF - 085 (EPTG)	11,6	Detran - DF	80 km/h
Avenida Central Taguatinga	1	Detran - DF	60 km/h
Avenida Elmo Serejo (sentido Ceilândia)	5	Detran - DF	60 km/h
Rua QNN 26 Conjunto H	0,35	Detran - DF	50 km/h
DF-459	1,1	DER - DF	70 km/h
Avenida Elmo Serejo (sentido Taguatinga)	0,17	Detran - DF	60 km/h
<b>Total</b>	<b>33,81</b>	-	-
<b>Erro</b>	<b>-0,97%</b>	-	-

## • UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina (FUP)

Tabela A.3 – Coordenadas geográficas UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina

Trajeto	Latitude	Longitude
Início	-15.76177	-47.87411
Final	-15.60145	-47.65885

Tabela A.4 – Composição de trechos UnB Darcy Ribeiro - UnB Planaltina

Trecho (em ordem de percurso)	Extensão no percurso (km)	Circunscriçã}	Velocidade Máxima Permitida
Avenida L3 Norte	2	Detran - DF	60 km/h
Avenida L2 Norte	1,5	Detran - DF	60 km/h
DF - 004 (EPNA)	0,85	DER - DF	60 km/h
Marginal DF - 007 (EPTT)	2,3	DER - DF	60 km/h
DF - 003 (EPIA)	4,8	DER - DF	80 km/h
BR-020 / BR-010	24,4	DNIT	80 km/h
Avenida Independência	0,75	Detran - DF	60 km/h
Rua Residencial	0,5	Detran - DF	30 km/h
<b>Total</b>	<b>37,1</b>	-	-
<b>Erro</b>	<b>-0,456%</b>	-	-

• **UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama (FGA)**

Tabela A.5 – Coordenadas geográficas UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama

Trajeto	Latitude	Longitude
Início	-15.76177	-47.87411
Final	-15.98812	-48.04354

Tabela A.6 – Composição de trechos UnB Darcy Ribeiro - UnB Gama

Trecho (em ordem de percurso)	Extensão no percurso (km)	Circunscrição	Velocidade Máxima Permitida
Avenida L3 Norte	0,11	Detran - DF	60 km/h
Pistas Internas UnB	1,6	Detran - DF	40 km/h
DF - 004 (EPNA)	14,5	DER - DF	80 km/h
DF - 051 (EPGU)	3,2	DER - DF	70 km/h
DF - 003 (EPIA)	12,9	DER - DF	80 km/h
DF - 065 (EPIP)	4	DER - DF	80 km/h
DF - 480	3,3	DER - DF	60 km/h
Marginais DF-480	0,65	DER - DF	30 km/h
VC-361	0,13	DER - DF	30 km/h
<b>Total</b>	<b>40,39</b>	-	-
<b>Erro</b>	<b>0,025%</b>	-	-

• **Valparaíso - UnB Planaltina (FUP)**

Tabela A.7 – Coordenadas geográficas Valparaíso - UnB Planaltina

Trajeto	Latitude	Longitude
Início	-16.06005	-47.98280
Final	-15.60145	-47.65885



Tabela A.8 – Composição de trechos Valparaíso - UnB Planaltina

Trecho (em ordem de percurso)	Extensão no percurso (km)	Circunscrição	Velocidade Máxima Permitida
BR-040	9,4	Via 040	80 km/h
DF-003 (EPIA)	36,9	DER - DF	80 km/h
BR-020 / BR-010	24,4	DNIT	80 km/h
Avenida Independência	0,75	Detran - DF	60 km/h
Rua Residencial	0,5	Detran - DF	30 km/h
<b>Total</b>	<b>71,95</b>	-	-
<b>Erro</b>	<b>0,307%</b>	-	-

# B ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO - ADVISOR®

---

Neste apêndice, se encontram os arquivos (.m) MATLAB® utilizados para as simulações realizadas no ADVISOR®. Para utilização no simulador, os arquivos aqui mostrados deverão ser exportados para a pasta *saved\_vehicles*, encontrada no diretório principal do arquivo de instalação *advisor-2003-00-r0116/advisor*.

- Veículo Convencional - Chevrolet Onix 1.4 LT (2019)

```
global vinf

vinf.name='Conv_Chevrolet_Onix_2019_2_in';
vinf.drivetrain.name='conventional';
vinf.fuel_converter.name='FC_SI63_emis';
vinf.fuel_converter.ver='ic';
vinf.fuel_converter.type='si';
vinf.transmission.name='TX_5SPD_SI';
vinf.transmission.ver='man';
vinf.transmission.type='man';
vinf.wheel_axle.name='WH_SMCAR';
vinf.wheel_axle.ver='Crr';
vinf.wheel_axle.type='Crr';
vinf.vehicle.name='VEH_subcompact';
vinf.exhaust_aftertreat.name='EX_SI';
vinf.powertrain_control.name='PTC_CONV';
vinf.powertrain_control.ver='conv';
vinf.powertrain_control.type='man';
vinf.accessory.name='ACC_CONV';
vinf.accessory.ver='Const';
vinf.accessory.type='Const';
vinf.variables.name{1}='veh_CD';
vinf.variables.value(1)=0.35;
vinf.variables.default(1)=0.38;
vinf.variables.name{2}='veh_FA';
vinf.variables.value(2)=2.14;
vinf.variables.default(2)=2;
vinf.variables.name{3}='veh_wheelbase';
```

```

vinf.variables.value(3)=2.528;
vinf.variables.default(3)=2.57;
vinf.variables.name{4}='veh_cg_height';
vinf.variables.value(4)=0.53;
vinf.variables.default(4)=0.5;
vinf.variables.name{5}='veh_mass';
vinf.variables.value(5)=1120;
vinf.variables.default(5)=1319;
vinf.variables.name{6}='wh_1st_rrc';
vinf.variables.value(6)=0.007;
vinf.variables.default(6)=0.009;
vinf.variables.name{7}='wh_radius';
vinf.variables.value(7)=0.311;
vinf.variables.default(7)=0.282;
vinf.variables.name{8}='fc_trq_scale';
vinf.variables.value(8)=1.2606;
vinf.variables.default(8)=1;
vinf.variables.name{9}='fc_eff_scale';
vinf.variables.value(9)=0.97059;
vinf.variables.default(9)=1;
vinf.variables.name{10}='veh_front_wt_frac';
vinf.variables.value(10)=0.55;
vinf.variables.default(10)=0.6;
vinf.variables.name{11}='gb_eff_scale';
vinf.variables.value(11)=0.9;
vinf.variables.default(11)=1;

```

- Veículo HEV - Toyota Yaris XP21 (2020)

```
global vinf
```

```

vinf.name='HEV_Toyota_Yaris_2020_CVT_in';
vinf.drivetrain.name='parallel';
vinf.fuel_converter.name='FC_SI41_emis';
vinf.fuel_converter.ver='ic';
vinf.fuel_converter.type='si';
vinf.torque_coupling.name='TC_DUMMY';
vinf.motor_controller.name='MC_PM32evs';
vinf.energy_storage.name='ESS_LI7_temp';

```

```

vinf.energy_storage.ver='rint';
vinf.energy_storage.type='li';
vinf.transmission.name='TX_CVT50_SUBARU';
vinf.transmission.ver='cvt';
vinf.transmission.type='cvt';
vinf.wheel_axle.name='WH_SMCAR_REGEN';
vinf.wheel_axle.ver='Crr';
vinf.wheel_axle.type='Crr';
vinf.vehicle.name='VEH_SMCAR';
vinf.exhaust_aftertreat.name='EX_SI';
vinf.powertrain_control.name='PTC_PAR_CVT';
vinf.powertrain_control.ver='par';
vinf.powertrain_control.type='cvt';
vinf.accessory.name='ACC_HYBRID';
vinf.accessory.ver='Const';
vinf.accessory.type='Const';
vinf.variables.name{1}='fc_trq_scale';
vinf.variables.value(1)=2.024;
vinf.variables.default(1)=1;
vinf.variables.name{2}='mc_area_scale';
vinf.variables.value(2)=1.8642;
vinf.variables.default(2)=0.63906;
vinf.variables.name{3}='wh_1st_rrc';
vinf.variables.value(3)=0.007;
vinf.variables.default(3)=0.009;
vinf.variables.name{4}='wh_radius';
vinf.variables.value(4)=0.311;
vinf.variables.default(4)=0.282;
vinf.variables.name{5}='ess_module_num';
vinf.variables.value(5)=16;
vinf.variables.default(5)=0;
vinf.variables.name{6}='ess_cap_scale';
vinf.variables.value(6)=0.741;
vinf.variables.default(6)=1;
vinf.variables.name{7}='veh_CD';
vinf.variables.value(7)=0.29;
vinf.variables.default(7)=0.335;
vinf.variables.name{8}='veh_FA';
vinf.variables.value(8)=2.05;

```

```
vinf.variables.default(8)=2;
vinf.variables.name{9}='veh_wheelbase';
vinf.variables.value(9)=2.56;
vinf.variables.default(9)=2.6;
vinf.variables.name{10}='veh_mass';
vinf.variables.value(10)=1155;
vinf.variables.default(10)=1171;
vinf.variables.name{11}='veh_cg_height';
vinf.variables.value(11)=0.55;
vinf.variables.default(11)=0.5;
vinf.variables.name{12}='mc_trq_scale';
vinf.variables.value(12)=1.7379;
vinf.variables.default(12)=1;
vinf.variables.name{13}='cs_lo_soc';
vinf.variables.value(13)=0.3;
vinf.variables.default(13)=0.5;
vinf.variables.name{14}='vc_idle_spd';
vinf.variables.value(14)=60;
vinf.variables.default(14)=0;
vinf.variables.name{15}='mc_overtrq_factor';
vinf.variables.value(15)=1.1;
vinf.variables.default(15)=1.4063;
vinf.variables.name{16}='cs_off_trq_frac';
vinf.variables.value(16)=0;
vinf.variables.default(16)=0.2;
vinf.variables.name{17}='cs_electric_launch_spd_lo';
vinf.variables.value(17)=0;
vinf.variables.default(17)=2;
vinf.variables.name{18}='cs_electric_launch_spd_hi';
vinf.variables.value(18)=10;
vinf.variables.default(18)=2;
vinf.variables.name{19}='cs_fc_max_pwr_frac';
vinf.variables.value(19)=0.9;
vinf.variables.default(19)=0.8;
vinf.variables.name{20}='veh_front_wt_frac';
vinf.variables.value(20)=0.53;
vinf.variables.default(20)=0.6;
vinf.variables.name{21}='gb_eff_scale';
vinf.variables.value(21)=1.0316;
```

```

vinf.variables.default(21)=1;
vinf.variables.name{22}='cs_fc_min_pwr_frac';
vinf.variables.value(22)=0.1;
vinf.variables.default(22)=0.2;
vinf.variables.name{23}='fc_eff_scale';
vinf.variables.value(23)=0.97059;
vinf.variables.default(23)=1;

```

- Veículo PHEV Volkswagen Golf GTE 1.4 Híbrido (2019);

```
global vinf
```

```

vinf.name='PHEV_Golf_GTE_Hybrid_2_2_in';
vinf.drivetrain.name='parallel';
vinf.fuel_converter.name='FC_SI102_emis';
vinf.fuel_converter.ver='ic';
vinf.fuel_converter.type='si';
vinf.torque_coupling.name='TC_DUMMY';
vinf.motor_controller.name='MC_PM49';
vinf.energy_storage.name='ESS_LI7_temp';
vinf.energy_storage.ver='rint';
vinf.energy_storage.type='li';
vinf.transmission.name='TX_5SPD_SI';
vinf.transmission.ver='man';
vinf.transmission.type='man';
vinf.wheel_axle.name='WH_SMCAR_REGEN';
vinf.wheel_axle.ver='Crr';
vinf.wheel_axle.type='Crr';
vinf.vehicle.name='VEH_subcompact';
vinf.exhaust_aftertreat.name='EX_SI';
vinf.powertrain_control.name='PTC_PHEV_mv';
vinf.powertrain_control.ver='par';
vinf.powertrain_control.type='man';
vinf.accessory.name='ACC_HYBRID';
vinf.accessory.ver='Const';
vinf.accessory.type='Const';
vinf.variables.name{1}='fc_trq_scale';
vinf.variables.value(1)=1.1303;
vinf.variables.default(1)=1;

```

```
vinf.variables.name{2}='fc_eff_scale';
vinf.variables.value(2)=1.1379;
vinf.variables.default(2)=1;
vinf.variables.name{3}='fc_mass';
vinf.variables.value(3)=150;
vinf.variables.default(3)=325.5765;
vinf.variables.name{4}='ess_module_num';
vinf.variables.value(4)=32;
vinf.variables.default(4)=0;
vinf.variables.name{5}='ess_cap_scale';
vinf.variables.value(5)=4.2521;
vinf.variables.default(5)=1;
vinf.variables.name{6}='mc_trq_scale';
vinf.variables.value(6)=1.5926;
vinf.variables.default(6)=1;
vinf.variables.name{7}='veh_CD';
vinf.variables.value(7)=0.29;
vinf.variables.default(7)=0.38;
vinf.variables.name{8}='veh_FA';
vinf.variables.value(8)=2.124;
vinf.variables.default(8)=2;
vinf.variables.name{9}='veh_wheelbase';
vinf.variables.value(9)=2.631;
vinf.variables.default(9)=2.57;
vinf.variables.name{10}='veh_mass';
vinf.variables.value(10)=1695;
vinf.variables.default(10)=1806;
vinf.variables.name{11}='veh_cg_height';
vinf.variables.value(11)=0.53;
vinf.variables.default(11)=0.5;
vinf.variables.name{12}='wh_1st_rrc';
vinf.variables.value(12)=0.007;
vinf.variables.default(12)=0.009;
vinf.variables.name{13}='wh_radius';
vinf.variables.value(13)=0.317;
vinf.variables.default(13)=0.282;
vinf.variables.name{14}='fc_acc_mass';
vinf.variables.value(14)=30;
vinf.variables.default(14)=81.3941;
```

```

vinf.variables.name{15}='fc_base_mass';
vinf.variables.value(15)=60;
vinf.variables.default(15)=183.1368;
vinf.variables.name{16}='mc_eff_scale';
vinf.variables.value(16)=0.9375;
vinf.variables.default(16)=1;
vinf.variables.name{17}='cs_electric_launch_spd_hi';
vinf.variables.value(17)=19;
vinf.variables.default(17)=0;
vinf.variables.name{18}='cs_electric_launch_spd_lo';
vinf.variables.value(18)=15;
vinf.variables.default(18)=0;
vinf.variables.name{19}='cs_charge_trq';
vinf.variables.value(19)=0;
vinf.variables.default(19)=1000;
vinf.variables.name{20}='cs_electric_decel_spd';
vinf.variables.value(20)=0;
vinf.variables.default(20)=9;
vinf.variables.name{21}='acc_elec_eff';
vinf.variables.value(21)=0.98;
vinf.variables.default(21)=1;
vinf.variables.name{22}='acc_dc_dc_eff';
vinf.variables.value(22)=0.98;
vinf.variables.default(22)=1;
vinf.variables.name{23}='cs_hi_soc';
vinf.variables.value(23)=0.9;
vinf.variables.default(23)=0.8;

```

- **Veículo Chevrolet Bolt EV (2020)**

```
global vinf
```

```

vinf.name='EV_Chevrolet_Bolt_2020_2_in';
vinf.drivetrain.name='ev';
vinf.motor_controller.name='MC_PM100_UQM';
vinf.energy_storage.name='ESS_LI7_temp';
vinf.energy_storage.ver='rint';
vinf.energy_storage.type='li';
vinf.transmission.name='TX_1SPD_IDEAL';

```



```
vinf.transmission.ver='man';
vinf.transmission.type='man';
vinf.wheel_axle.name='WH_SMCAR_REGEN';
vinf.wheel_axle.ver='Crr';
vinf.wheel_axle.type='Crr';
vinf.vehicle.name='VEH_subcompact';
vinf.powertrain_control.name='PTC_EV';
vinf.powertrain_control.ver='ev';
vinf.powertrain_control.type='man';
vinf.accessory.name='ACC_PRIUS_JPN';
vinf.accessory.ver='Const';
vinf.accessory.type='Const';
vinf.variables.name{1}='veh_mass';
vinf.variables.value(1)=1752;
vinf.variables.default(1)=1168;
vinf.variables.name{2}='veh_CD';
vinf.variables.value(2)=0.308;
vinf.variables.default(2)=0.38;
vinf.variables.name{3}='veh_FA';
vinf.variables.value(3)=2.253;
vinf.variables.default(3)=2;
vinf.variables.name{4}='veh_wheelbase';
vinf.variables.value(4)=2.601;
vinf.variables.default(4)=2.57;
vinf.variables.name{5}='veh_cg_height';
vinf.variables.value(5)=0.53;
vinf.variables.default(5)=0.5;
vinf.variables.name{6}='ess_cap_scale';
vinf.variables.value(6)=32;
vinf.variables.default(6)=1;
vinf.variables.name{7}='ess_module_num';
vinf.variables.value(7)=33;
vinf.variables.default(7)=0;
vinf.variables.name{8}='ess_module_mass';
vinf.variables.value(8)=0.4075;
vinf.variables.default(8)=1.1347;
vinf.variables.name{9}='mc_spd_scale';
vinf.variables.value(9)=2;
vinf.variables.default(9)=1;
```

```
vinf.variables.name{10}='mc_trq_scale';  
vinf.variables.value(10)=1.3;  
vinf.variables.default(10)=1;  
vinf.variables.name{11}='mc_eff_scale';  
vinf.variables.value(11)=1.0106;  
vinf.variables.default(11)=1;  
vinf.variables.name{12}='veh_cargo_mass';  
vinf.variables.value(12)=100;  
vinf.variables.default(12)=136;  
vinf.variables.name{13}='mc_mass';  
vinf.variables.value(13)=60;  
vinf.variables.default(13)=101.9;  
vinf.variables.name{14}='wh_1st_rrc';  
vinf.variables.value(14)=0.007;  
vinf.variables.default(14)=0.009;  
vinf.variables.name{15}='wh_radius';  
vinf.variables.value(15)=0.323;  
vinf.variables.default(15)=0.282;
```

# C ARQUIVOS DE SIMULAÇÃO - FASTSIM™

Neste apêndice, são mostrados os parâmetros utilizados para simulação no FASTSim™. Os nomes das variáveis são mostrados conforme se encontram na ferramenta, facilitando a identificação e exportação dos arquivos para o ambiente de simulação.

Tabela C.1 – Parâmetros Construtivos (*Vehicle*)

Parâmetro	Variável	Convencional	HEV	PHEV	BEV
<i>Fuel economy test procedure</i>	vehPtType	1	2	3	4
<i>Drag coefficient</i>	dragCoef	0,35	0,29	0,28	0,308
<i>Frontal area (m<sup>2</sup>)</i>	frontalAreaM2	2,14	2,05	2,124	2,253
<i>Vehicle glider mass (kg)</i>	gliderKg	1225,594	1225,594	607,577	450
<i>Vehicle center of gravity height (m)</i>	vehCgM	0,53	0,55	0,53	0,53
<i>Drive axle weight fraction</i>	driveAxleWeightFrac	0,53	0,51	0,6	0,6
<i>Wheel base (m)</i>	wheelBaseM	2,528	2,56	2,631	2,601
<i>Cargo mass (kg)</i>	cargoKg	136	136	136	136
<i>Vehicle override test mass (kg)</i>	vehOverrideKg	1120	1175	1615	1616

Tabela C.2 – Parâmetros Tanque de Combustível (*Fuel Storage*)

Parâmetro	Variável	Convencional	HEV	PHEV	BEV
<i>Fuel storage power (kW)</i>	maxFuelStorKw	2000	2000	2000	-
<i>Fuel storage time to full power (s)</i>	fuelStorSecsToPeakPwr	1	1	1	-
<i>Fuel storage energy (kWh)</i>	fuelStorKwh	480,6	336,4	356	-
<i>Fuel and fuel storage mass (kWh/kg)</i>	fuelStorKwhPerKg	9,89	9,89	9,89	-

Tabela C.3 – Parâmetros MCI (*Fuel Converter*)

Parâmetro	Variável	Convencional	HEV	PHEV	BEV
<i>Fuel converter power (kW)</i>	maxFuelConvKw	76,426	85	110	-
<i>Fuel converter efficiency type</i>	fcEffType	1	2	2	-
<i>Efficiency improvement</i>	fcRelEffImpr	-0,03	-0,02	-0,04	-
<i>Fuel converter time to full power (s)</i>	fuelConvSecsToPeakPwr	6	2	3	-
<i>Fuel converter base mass (kg)</i>	fuelConvBaseKg	61	61	61	-
<i>Fuel converter specific power (kW/kg)</i>	fuelConvKwPerKg	2,13	2,13	2,13	-
<i>Minimum Engine-on Time (s)</i>	minFcTimeOn	30	30	30	-

Tabela C.4 – Parâmetros Máquina Elétrica (*Motor*)

<b>Parâmetro</b>	<b>Variável</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
<i>Motor power (kW)</i>	maxMotorKw	-	59	71	150
<i>Motor peak efficiency</i>	motorPeakEff	-	0,95	0,95	0,95
<i>Motor time to full power (s)</i>	motorSecsToPeakPwr	-	2	3	3
<i>Motor controller mass (kg/kW)</i>	mcPeKgPerKw	-	0,833	0,833	0,833
<i>Motor controller base mass (kg)</i>	mcPeBaseKg	-	21,6	21,6	21,6

Tabela C.5 – Parâmetros Bateria (*Traction Battery*)

<b>Parâmetro</b>	<b>Variável</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
<i>Battery power (kW)</i>	maxEssKw	-	35	90	150
<i>Battery energy (kWh)</i>	maxEssKwh	-	0,76	8,7	66
<i>Battery mass (kg/kWh)</i>	essKgPerKwh	-	8	8	8
<i>Battery base mass (kg)</i>	essBaseKg	-	75	75	75
<i>Battery round trip efficiency</i>	essRoundTripEff	-	0,98	0,95	0,97
<i>Battery life coefficient A (product)</i>	essLifeCoefA	-	110	110	110
<i>Battery life coefficient B (power)</i>	essLifeCoefB	-	-0,6811	-0,6811	-0,6811

Tabela C.6 – Parâmetros Pneus (*Wheel*)

<b>Parâmetro</b>	<b>Variável</b>	<b>Convencional</b>	<b>HEV</b>	<b>PHEV</b>	<b>BEV</b>
<i>Wheel inertia (one wheel) (kg.m<sup>2</sup>)</i>	wheelInertriaKgM2	0,815	0,815	0,815	0,815
<i>Number of wheels</i>	numWheels	4	4	4	4
<i>Rolling resistance coefficient</i>	wheelRrCoef	0,007	0,007	0,007	0,007
<i>Tire radius (m)</i>	wheelRadiusM	0,311	0,311	0,317	0,323
<i>Wheel coefficient of friction</i>	wheelCoefOfFric	0,7	0,7	0,7	0,7

Tabela C.7 – Parâmetro Gerenciamento de Energia (*Energy Management*)

Parâmetro	Variável	Convencional	HEV	PHEV	BEV
<i>Minimum state of charge</i>	minSoc	-	0,1	0,15	0,05
<i>Maximum state of charge</i>	maxSoc	-	0,9	0,9	1
<i>ESS discharge effort toward max FC efficiency (%)</i>	essDischgToFcMaxEffPerc	-	0	1	0
<i>ESS charge effort toward max FC efficiency (%)</i>	essChgToFcMaxEffPerc	-	0	0	0
<i>Speed where the battery reserved for accelerating is zero</i>	maxAccelBufferMph	-	60	60	60
<i>Percent of usable battery energy reserved to help accelerate</i>	maxAccelBufferPercOfUseableSoc	-	0,2	0,2	0,2
<i>Percent SOC buffer for high accessory loads during cycles with long idle time</i>	percHighAccBuf	-	0	0	0
<i>Speed at which engine is commanded on (mph)</i>	mphFcOn	-	32	81	1
<i>Power demand at which engine is commanded on (kW)</i>	kwDemandFcOn	-	30	80	100

Tabela C.8 – Outros parâmetros (*Miscellaneous*)

Parâmetro	Variável	Convencional	HEV	PHEV	BEV
<i>Alternator efficiency (conv. veh only)</i>	altEff	1	1	1	1
<i>Charger efficiency</i>	chgEff	0,86	0,86	0,86	0,86
<i>Auxiliary loads (kW)</i>	auxKw	0,7	0,7	0,7	0,7
<i>Force auxiliary loads on fuel converter (true/false)</i>	forceAuxOnFC	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
<i>Transmission mass (kg)</i>	transKg	114	114	114	114
<i>Transmission efficiency</i>	transEff	0,95	0,98	0,98	0,98
<i>Component mass multiplier</i>	compMassMultiplier	1,4	1,4	1,4	1,4
<i>Max battery to fuel energy error</i>	essToFuelOkError	0,005	0,005	0,005	0,005
<i>Max regen</i>	maxRegen	0,98	0,9	0,9	0,9