

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**GIORDANO OLIVEIRA CASSOL**

**LEVANTAMENTO DE UM CICLO DE CONDUÇÃO SUBURBANO  
VISANDO A AVALIAÇÃO DE VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS NO  
CONTEXTO DA GRANDE PORTO ALEGRE**

Porto Alegre

2018

**GIORDANO OLIVEIRA CASSOL**

**LEVANTAMENTO DE UM CICLO DE CONDUÇÃO SUBURBANO  
VISANDO A AVALIAÇÃO DE VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS NO  
CONTEXTO DA GRANDE PORTO ALEGRE**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos à Graduação em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Prof. Me. Igor Pasa Wiltuschnig**

**Coorientadora: Eng. Ana Paula Zanatta**

Porto Alegre

2018

## CIP - Catalogação na Publicação

Cassol, Giordano Oliveira

Levantamento de um ciclo de condução suburbano visando a avaliação de veículos híbridos e elétricos no contexto da Grande Porto Alegre / Giordano Oliveira Cassol. -- 2018.

117 f.

Orientador: Igor Pasa Wiltuschnig.

Coorientadora: Ana Paula Zanatta.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Ciclo de condução. 2. Aquisição de dados reais. 3. Veículos híbridos. 4. Veículos elétricos. I. Wiltuschnig, Igor Pasa, orient. II. Zanatta, Ana Paula, coorient. III. Título.

**GIORDANO OLIVEIRA CASSOL**

**LEVANTAMENTO DE UM CICLO DE CONDUÇÃO SUBURBANO  
VISANDO A AVALIAÇÃO DE VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS NO  
CONTEXTO DA GRANDE PORTO ALEGRE**

Este Projeto de Diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

**Orientador:**

---

Prof. Me. Eng. Igor Pasa Wiltuschnig – DELET/UFRGS

**Coorientadora:**

---

Eng. Ana Paula Zanatta – PPGEE/UFRGS

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Eng. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro – DELET/UFRGS

---

Prof. Dr. Eng. Sérgio Luiz Schubert Severo – IFSul Pelotas

---

Eng. Rafael Mester Furtado – PROMEC/UFRGS



*Dedico este trabalho a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram comigo nessa jornada. À memória de meu pai (Jorge Luiz Cassol), que me passou os valores e ensinamentos que norteiam a minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

À minha família, aqueles que sempre estiveram ao meu lado e me fizeram seguir adiante, meu irmão Giancarlo Oliveira da Silveira Cassol e minhas duas irmãs Giana Oliveira Cassol e Giorgia Peukert Oliveira Cassol, que são a minha referência e estímulo diários, aos meus tios Octávio Oliveira da Silveira, Jurandyr Seibel e Denise Oliveira e meus primos, Jill Ramsey e família, pelo apoio em todos os momentos que necessitei para que concluísse plenamente os meus estudos ao longo da graduação. Agradeço à minha mãe Liana Oliveira da Silveira Cassol pela paciência, sabedoria, coragem e apoio incondicional nos momentos mais simples e mais complexos durante toda a minha trajetória acadêmica.

Um agradecimento especial à minha coorientadora Eng. Ana Paula Zanatta pelo empenho, determinação e esforço para a realização deste trabalho. Seus ensinamentos, discussões e apoio foram inspiradores e imensuráveis, sendo fundamentais para o sucesso desse estudo.

Ao Eng. Rafael Mester Furtado pelas importantes discussões, ensinamentos e envolvimento para o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Me. Eng. Igor Pasa Wiltuschnig, pelas discussões e por ser um pesquisador que busca inovar e inspirar os demais.

Ao Prof. Dr. Eng. Sérgio Luiz Schubert Severo pelas importantes ponderações e pela paciência para discussões pertinentes e enriquecedoras.

Ao Eng. Braian Kaiser Zanini pelas discussões intermináveis e envolventes, amizade e apoio imensuráveis ao longo da trajetória acadêmica.

Aos meus amigos e colegas da universidade, ao grupo Daqui Pro Bar FC por serem fundamentais nos momentos de estudo e descontração ao longo desses anos. Em especial aos colegas e amigos Yago Lafourcade Baracy, Lucas Wortmann, Samuel Moraes, Felipe Quadros, Felipe Pegoraro e Vinícius Müller.

Aos amigos e colegas do Politecnico di Torino, que fizeram parte de um dos períodos mais importantes da graduação e da minha vida.

À equipe da Feira de Oportunidades da UFRGS, pelos momentos e experiências únicos.

Aos amigos de infância que sempre compreenderam a ausência em diversos momentos, incentivaram e me motivaram a seguir em frente. Em especial ao amigo Marcelo de Oliveira Rosa e família, pela amizade e por estarem sempre comigo em todos os períodos importantes.

Aos meus colegas e amigos da CIM-Team, pelos ensinamentos, compreensão e apoio para a conclusão dos meus estudos.

À empresa Pro Tune, na pessoa do Eng. Albert Ohira, pela disponibilidade e por ter realizado a aquisição dos dados para a concretização do trabalho.

Às empresas Car House Toyota e Savarauto Toyota, em especial a Jonatas Hepp, João Pedro Wolf e Jeferson Quintana pelas importantes discussões e por se disponibilizarem à realização de testes para o trabalho.

Aos poucos Professores que buscaram compartilhar os seus conhecimentos de maneira construtiva e que realmente se importam com os seus alunos.

*“Imagination is more important than  
knowledge, as knowledge is limited.*

*Imagination encircles the world.”*

Albert Einstein (1879-1955)

## RESUMO

A importância dos ciclos de condução baseados em dados reais bem modelados e obtidos a partir de aquisição de dados experimentais é relevante para o projeto e a homologação de veículos híbridos e elétricos. O objetivo deste trabalho é desenvolver um ciclo de condução suburbano baseado na aquisição de dados reais para a Grande Porto Alegre, a quinta maior região metropolitana brasileira. Este trabalho também inclui um capítulo de revisão teórica sobre as principais arquiteturas de veículos elétricos e híbridos. A metodologia para a construção do ciclo de condução consiste em um sistema não invasivo de aquisição de dados que monitora um carro popular durante várias viagens; os dados foram processados por um algoritmo computacional desenvolvido na plataforma MATLAB®, implementando condições baseadas em ciclos de condução normatizados e literatura relacionada. O ciclo de condução desenvolvido tem 1800 segundos e três estágios de velocidade. Para a sua verificação foram realizadas simulações computacionais na plataforma MATLAB®/Simulink/Simscape visando à avaliação do consumo de energia de veículos híbridos (arquitetura *power split*) e elétricos (2 e 4 MiW) no contexto das circunstâncias do tráfego local.

**Palavras-chave:** ciclo de condução; aquisição de dados reais; veículos híbridos; veículos elétricos.

## ABSTRACT

The importance of well-modelled driving cycles has been lately relevant for certification and design of hybrid and electric vehicles. The purpose of this work is to develop a suburban driving cycle based on real data acquisition for Porto Alegre, the Brazil's fifth largest metropolitan region. This work also includes a chapter on theoretical review of the most important architectures of electric and hybrid vehicles. The methodology for driving cycle construction comprises a non-invasive data logging system monitoring an economy car during several trips; the data was processed by a computational algorithm at MATLAB® implementing conditions based on standard driving cycles and related literature. The developed driving cycle has 1800 seconds and three speed stages. For the verification of this work, computational simulations at MATLAB®/Simulink/Simscape were made for energy consumption evaluation of hybrid (power split architecture) and electric (2 and 4 MiW) vehicles taking into account local traffic circumstances.

**Keywords:** driving cycle; real data acquisition; hybrid vehicles; electric vehicles.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: DIFERENTES FONTES DE ENERGIA, VETORES DE ENERGIA E TIPOS DE VEÍCULOS.....	25
FIGURA 2: EMISSÕES DE WTW DE VES EM DIFERENTES MATRIZES ENERGÉTICAS, COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE TRACÇÃO. A BARRA "REFERÊNCIA" CORRESPONDE ÀS EMISSÕES DE VCIS. ....	26
FIGURA 3: IMPACTO CLIMÁTICO DOS VES EM DIFERENTES MATRIZES ENERGÉTICAS.....	27
FIGURA 4: HÁBITOS DE RECARGA DE USUÁRIOS DE VEBs E VEHPs COM ELETROPOSTOS SOMENTE EM CASA.....	28
FIGURA 5: USUÁRIOS DE VEBs E VEHPs COM ELETROPOSTO DISPONÍVEL EM CASA E NO TRABALHO ..	29
FIGURA 6: VEBs ESTACIONADOS EM VIA PÚBLICA SENDO RECARREGADOS. ....	30
FIGURA 7: VEÍCULOS ELÉTRICOS PRODUZIDOS OU PARCEIROS, ITAIPU BINACIONAL .....	30
FIGURA 8: COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE VEÍCULOS LEVES COM DIFERENTES SISTEMAS DE TRACÇÃO .....	31
FIGURA 9: VEÍCULO ELÉTRICO JAMAIS CONTENTE DE 1899 .....	33
FIGURA 10: LOHNER-PORSCHE: PRIMEIRO VEH SÉRIE .....	34
FIGURA 11: PRIMEIRO VEB BRASILEIRO, GURGEL ITAIPÚ.....	34
FIGURA 12: ANTIGO VEB SENDO CARREGADO ATRAVÉS DE UMA FONTE DE BAIXA TENSÃO CC PARA UM MOTOR/GERADOR CC.....	35
FIGURA 13: COMPOSIÇÃO DE CÉLULAS DE ÍON-LI.....	37
FIGURA 14: PRODUTORES DE ELEMENTOS DE TERRAS RARAS (MEDIDAS EM TONELADAS – ÓXIDO DE TERRA RARA EQUIVALENTE) .....	38
FIGURA 15: FORÇAS QUE ATUAM EM UM VEÍCULO QUE SE MOVE EM UM PLANO INCLINADO .....	40
FIGURA 16: REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AR QUE FLUI EM VOLTA DO VEÍCULO PASSANDO PELA VARIAÇÃO DE VELOCIDADE E PRESSÃO ESTÁTICA. ....	40
FIGURA 17: BALANÇO ENERGÉTICO DE UM VEÍCULO (O COMPRIMENTO DAS BARRAS REPRESENTA A ENERGIA).....	43
FIGURA 18: ILUSTRAÇÃO CONCEITUAL DA CONFIGURAÇÃO GERAL DE UM VEB.....	44

FIGURA 19: SISTEMA DE DIREÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO COM O MOTOR ELÉTRICO DIRETAMENTE SUBSTITUINDO O MCI E ACIONANDO AS RODAS TRASEIRAS, (A) COM CAIXA DE CÂMBIO E (B) SEM CAIXA DE CÂMBIO .....	45
FIGURA 20: OPÇÕES DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE VEBs QUE APROVEITAM AS VANTAGENS DA FLEXIBILIDADE DE POSIÇÃO E NÚMERO DE MÊs, (A) MOTOR ÚNICO SUSPENSO INTEGRADO COM DIFERENCIAL E CAIXA DE ENGENHAGENS, (B) DOIS MOTORES SUSPENSOs, (C) DOIS MOTORES PARCIALMENTE SUSPENSOs, E (D) MOTORES <i>IN-WHEEL</i> (SEM SUSPENSÃO) .....	47
FIGURA 21: SISTEMA DE TRACÇÃO DIANTEIRO DE UM VEB PRIMÁRIO .....	48
FIGURA 22: POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES DE VEBs: (A) SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONVENCIONAL COM MULTIENGENHAGENS E EMBREAGEM; (B) TRANSMISSÃO DE ENGENHAGEM ÚNICA SEM A NECESSIDADE DE EMBREAGEM; (C) DIFERENCIAL E ENGENHAGEM FIXA INTEGRADOs; (D) DOIS MOTORES SEPARADOs E ENGENHAGEM FIXA COM SEUS EIXOS DE DIREÇÃO; (E) ACIONAMENTO DIRETO COM DOIS MOTORES SEPARADOs E ENGENHAGEM FIXA; (F) DOIS ACIONAMENTOs SEPARADOs COM MOTORES <i>IN-WHEEL</i> .....	50
FIGURA 23: ARQUITETURA GERAL DE UM VEB COM 4 MÊs <i>IN-WHEEL</i> ; EDEI SIGNIFICA EIXO DIFERENCIAL ELETRÔNICO INTEGRADO.....	51
FIGURA 24: VISÃO GERAL DE ACIONAMENTOs ELÉTRICOs .....	53
FIGURA 25: GRÁFICO COM AS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DE 3 CONCEITOs DE TRACÇÃO: MSIP (NESTE CASO, MÁQUINA SÍNCRONA DE ÍMÃs PERMANENTEs SUPERFICIAL COM RELAÇÃO DE SALIÊNCIA IGUAL A 1, MÁQUINA DE INDUÇÃO COM ROTOR DE GAIOLA DE ESQUILO) E MRV (MÁQUINA DE RELUTÂNCIA CHAVEADA).....	54
FIGURA 26: MODELO DE VEB DA TESLA, MODEL S, COM 2 MÊs E TRACÇÃO Às 4 RODAS.....	55
FIGURA 27: MÁQUINA SÍNCRONA DE RELUTÂNCIA ASSISTIDA POR ÍMÃs PERMANENTEs, UTILIZADA NO BMW i3 .....	56
FIGURA 28: CARACTERÍSTICAS DE RENDIMENTO DE UM ME TÍPICO .....	57
FIGURA 29: TOPOLOGIAS DE VEHS .....	58
FIGURA 30 SISTEMA HÍBRIDO EM SÉRIE.....	58
FIGURA 31 SISTEMA HÍBRIDO EM PARALELO.....	59
FIGURA 32 SISTEMA HÍBRIDO TOYOTA THS E THS-II.....	60



FIGURA 33: MODO 0 DE OPERAÇÃO DO TOYOTA PRIUS, CE É A CAIXA DE EMBREAGEM .....	61
FIGURA 34: MODO 1 DE OPERAÇÃO DO TOYOTA PRIUS, CE É A CAIXA DE EMBREAGEM .....	62
FIGURA 35: MODO 2 DE OPERAÇÃO DO TOYOTA PRIUS, CE É A CAIXA DE EMBREAGEM .....	63
FIGURA 36: CICLO DE CONDUÇÃO URBANO ADOTADO NO BRASIL (FTP-75).....	70
FIGURA 37: CICLO DE CONDUÇÃO RODOVIÁRIO ADOTADO NO BRASIL (HWFET).....	70
FIGURA 38: ETIQUETA PBEV 2016 PARA O TOYOTA PRIUS .....	71
FIGURA 39: COMPARATIVO DE CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PRIUS E COROLLA, TOYOTA.....	71
FIGURA 40: ALGUNS EXEMPLOS DE CICLOS DE CONDUÇÃO PADRONIZADOS. O GRÁFICO DE PIZZA SIMBOLIZA O CONSUMO ENERGÉTICO PROPORCIONAL A CADA CICLO.....	73
FIGURA 41: CICLO DE CONDUÇÃO TRANSITÓRIO WLTC CLASSE 3 .....	75
FIGURA 42: OBJETIVOS DO PROJETO ASTERICS PARA CICLOS DE CONDUÇÃO BASEADOS EM DADOS REAIS PARA AVALIAÇÃO DE VES .....	78
FIGURA 43: MAPA DA REGIÃO COM TRAJETOS REALIZADOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS E CRIAÇÃO DE CICLO DE CONDUÇÃO NA GRANDE DUBLIN, IRLANDA.....	79
FIGURA 44: MAPA DA ROTA PERCORRIDA, A MARCAÇÃO VERDE É O PONTO INICIAL E A VERMELHA, O PONTO DE CHEGADA DO TRAJETO .....	82
FIGURA 45: (A) <i>DASH LOGGER</i> , MODELO TDL 4.3, E (B) ANTENA DE GPS. AMBOS DISPOSITIVOS DA PRO TUNE.....	84
FIGURA 46: EXEMPLO DE CONEXÃO ENTRE DISPOSITIVO DE AQUISIÇÃO DE DADOS (CÍRCULO VERMELHO) E A PORTA DE COMUNICAÇÃO (CÍRCULO VERDE) EM UM VEÍCULO TOYOTA PRIUS.....	84
FIGURA 47: LAYOUT DO <i>SOFTWARE</i> DE ANÁLISE DOS DADOS DO <i>DASH LOGGER</i> , PRO TUNE ANALYZER .	85
FIGURA 48: FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA O LEVANTAMENTO DO PoA SDC, PARTE 1 .....	88
FIGURA 49: FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA O LEVANTAMENTO DO PoA SDC, PARTE 2 .....	90
FIGURA 50: FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA O LEVANTAMENTO DO PoA SDC, PARTE 3 .....	92
FIGURA 51: FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA O LEVANTAMENTO DO PoA SDC, PARTE 4 .....	93
FIGURA 52: FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PARA O LEVANTAMENTO DO PoA SDC, PARTE 5 .....	94
FIGURA 53: CICLO DE CONDUÇÃO SUBURBANO DA GRANDE PORTO ALEGRE (PoA SDC).....	94
FIGURA 54: HISTOGRAMAS DOS DADOS COLETADOS E DO PoA SDC .....	95

FIGURA 55: MODELO ADAPTADO DO <i>POWER SPLIT HYBRID VEHICLE ELECTRICAL NETWORK</i> DO MATLAB®/SIMULINK/SIMSCAPE PARA SIMULAÇÃO DO CICLO PoA SDC COM UM VEH .....	99
FIGURA 56: VELOCIDADE ALCANÇADA PELO VEH USANDO O PoA SDC COMO SINAL DE REFERÊNCIA DE VELOCIDADE.....	99
FIGURA 57: VELOCIDADE EXECUTADA PELO VEH USANDO O WLTC CLASSE 3 COMO REFERÊNCIA DE VELOCIDADE.....	100
FIGURA 58: CONSUMO ENERGÉTICO DO MCI E DA BATERIA DO VEH SOB O PoA SDC.....	100
FIGURA 59: CONSUMO ENERGÉTICO DO MCI E DA BATERIA DO VEH SOB O WLTC CLASSE 3 .....	101
FIGURA 60: MODELO UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO DO VEB COM O CICLO PoA SDC .....	102
FIGURA 61: SIMULAÇÃO DO CICLO PoA SDC COM UM VEB COM 2 MiW PARA AVALIAR A TRAJETÓRIA E A DIFERENÇA DE VELOCIDADES QUE NÃO FORAM ATINGIDAS .....	103
FIGURA 62: SIMULAÇÃO DO CICLO PoA SDC COM UM VEB COM 2 MiW PARA AVALIAR CONSUMO ENERGÉTICO COM E SEM FRENAGEM REGENERATIVA E DISTÂNCIA PERCORRIDA.....	103
FIGURA 63: SIMULAÇÃO DO CICLO PoA SDC COM UM VEB COM 4 MiW PARA AVALIAR A TRAJETÓRIA E A DIFERENÇA DE VELOCIDADES QUE NÃO FORAM ATINGIDAS .....	104
FIGURA 64: SIMULAÇÃO DO CICLO PoA SDC COM UM VEB COM 4 MiW PARA AVALIAR CONSUMO ENERGÉTICO COM E SEM FRENAGEM REGENERATIVA E DISTÂNCIA PERCORRIDA.....	104

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPARAÇÃO DOS REQUERIMENTOS DAS BATERIAS PARA VEBS E VEHS .....	36
TABELA 2: DENSIDADE DE ENERGIA, DENSIDADE DE POTÊNCIA, VIDA ÚTIL E CUSTOS DE DIFERENTES TIPOS DE BATERIAS; O SÍMBOLO * SIGNIFICA QUE NÃO HÁ VALORES DETALHADOS DISPONÍVEIS ...	36
TABELA 3: COMPARATIVO DE DIFERENTES TOPOLOGIAS DE MES .....	54
TABELA 4: VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MES UTILIZADAS PARA TRACÇÃO - MA, MSIP, MRV E MCC .....	57
TABELA 5 COMPARAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES DOS VEHS .....	64
TABELA 6: FUNÇÕES DISPONÍVEIS NOS DIFERENTES GRAUS DE HIBRIDIZAÇÃO DE VEHS.....	65
TABELA 7: VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS GRAUS DE HIBRIDIZAÇÃO .....	66
TABELA 8: CARACTERÍSTICAS DO CICLO WLTC CLASSE 3 .....	75
TABELA 9: INFORMAÇÕES SOBRE DADOS ADQUIRIDOS NO TRAJETO .....	83
TABELA 10: VALORES DE TEMPO E DIFERENÇA DE VELOCIDADES DOS DADOS COLETADOS .....	95
TABELA 11: PARÂMETROS DO CICLO SUBURBANO DA GRANDE POA FORMATADO PARA 1800 S .....	95
TABELA 12: CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CICLO POA SDC .....	96
TABELA 13: PARÂMETRO ESTATÍSTICOS DO POA SDC E OUTROS CICLOS DE CONDUÇÃO .....	96
TABELA 14: COMPARATIVO DO VEH NOS CICLOS POA SDC E WLTC-3 .....	101
TABELA 15: COMPARAÇÃO ENTRE DUAS TOPOLOGIAS DE VEB SOB O CICLO POA SDC .....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTERICS	<i>Ageing and Efficiency Simulation &amp; Testing under Real World Conditions for Innovative Electric Vehicles Components and Systems</i>
CA	Corrente Alternada
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CC	Corrente Contínua
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CVT	<i>Continuously Variable Transmission</i>
EDEI	Eixo Diferencial Eletrônico Integrado
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
GNC	Gás Natural Comprimido
GPS	<i>Global Position System</i>
HP	<i>Horse-Power</i>
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test</i>
kJ	quilojoule-hora (unidade de energia)
kWh	quilowatt-hora (unidade de energia)
MA	Máquina Assíncrona
MCC	Máquina de Corrente Contínua
MCI	Motor a Combustão Interna
ME	Máquina Elétrica ou Motor Elétrico
MiW	<i>Motor in Wheel</i>
MRV	Máquina de Relutância Chaveada
MSIP	Máquina Síncrona de Ímãs Permanentes
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>
OBD II	<i>On Board Diagnostic II</i>
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PMR	Relação Potência Massa do Veículo
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
RPM	Rotações por Minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAPD	<i>Speed Acceleration Probability Distribution</i>
SDC	<i>Suburban Driving Cycle</i>
t	Tonelada Métrica
TDL	<i>Touch Dash Logger</i>
TTW	<i>Tank-to-Wheel</i>
UCE	Unidade de Comando Eletrônico
VCI	Veículo a Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
VEAE	Veículo Elétrico de Alcance Estendido
VEB	Veículo Elétrico a Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VEHP	Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i>
WLTC	<i>World Harmonized Light Vehicles Test Cycle</i>
WLTP	<i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure</i>
WTW	<i>Well-to-Wheel</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	19
2	VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS .....	24
2.1	A História dos Carros Elétricos .....	33
2.2	Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica .....	35
2.3	Descrição Geral do Movimento do Veículo .....	39
2.4	Sistemas de Tração Puramente Elétrica .....	43
2.4.1	Sistemas de Transmissão .....	44
2.4.2	Arquiteturas de VEBs .....	47
2.4.3	Máquinas Elétricas para VEs .....	51
2.5	Configurações de Sistemas Híbridos .....	57
2.6	Graus de Hibridização .....	65
3	CICLOS DE CONDUÇÃO.....	67
3.1	Ciclos de Condução Normatizados .....	68
3.2	Metodologias para Levantamento de Ciclos de Condução Baseados em Dados Reais .....	76
3.3	Etapas para o Desenvolvimento de Ciclos de Condução Reais ....	79
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	82
4.1	Aquisição de Dados .....	83
4.2	Pré-Processamento de Dados e Preparação para Análise .....	85
4.3	Processamento dos Dados e Síntese do Ciclo .....	86

5	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	98
5.1	Avaliação com Veículo Elétrico Híbrido .....	98
5.2	Avaliação com Veículo Elétrico .....	102
6	CONCLUSÃO.....	106
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	109
	ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DASH LOGGER PRO TUNE ....	116
	ANEXO B – FICHA TÉCNICA DO VEÍCULO UTILIZADO PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS REAIS PARA O POA SDC .....	117

## 1 INTRODUÇÃO

Na conjuntura atual da sociedade, a demanda por hábitos de vida e de consumo mais sustentáveis e eficientes é cada vez maior e presente no cotidiano. A mobilidade urbana é um dos principais pilares na infraestrutura das grandes cidades, e o uso de veículos individuais e compartilhados para o transporte é crescente. Em virtude disso, iniciativas para a substituição gradativa de veículos à combustão interna (VCIs) por opções com melhor rendimento e menor prejuízo para o ecossistema, em todos os seus âmbitos, são cada vez maiores, demonstrando ser um caminho natural a ser percorrido.

Nesse contexto, os veículos que estão sendo fabricados hoje sofreram grandes mudanças, uma vez que a dependência de um sistema único de tração, como VCIs, não é mais a mesma. Os motores de combustão interna (MCIs) que equipam tais veículos são caracterizados pela baixa eficiência energética, utilização - na sua grande maioria - de combustíveis fósseis e por causarem poluição sonora e atmosférica, no solo e na água. Em virtude disso, a atenção começou a se voltar a modos alternativos de tração veicular, em direção aos veículos elétricos (VEs), com o uso de tração totalmente elétrica ou mesmo híbrida, capaz de assegurar a mobilidade produzindo menos emissões nocivas. Entretanto, os VEs, que parecem superar os problemas elencados, alcançando o ideal de uma mobilidade “limpa” e com altos níveis de eficiência energética, ainda enfrentam algumas limitações, em particular o preço elevado e a baixa oferta em muitos países, e uma mudança de hábito no que diz respeito à recarga de energia, haja vista que o abastecimento com combustíveis líquidos é até o momento mais rápido e cômodo. O que demonstra, assim, a necessidade de um maior estudo acerca dos desafios do fornecimento de energia elétrica levando-se em conta o impacto futuro que as recargas das baterias causarão, aliada ao descarte delas e demais componentes que terão uma demanda cada vez maior.

Os veículos elétricos a bateria (VEBs) são caracterizados pela tração puramente elétrica e recargas de energia externa. Possuem diferentes arquiteturas quanto ao número e posicionamento dos motores elétricos (MEs).



O seu sistema de tração possui a peculiaridade de tanto fornecer potência para o movimento do veículo (motor) quanto para gerar energia para o mesmo (frenagem regenerativa), a partir de um motor-gerador elétrico.

Os veículos elétricos híbridos (VEHs) são o resultado da junção de dois tipos de sistemas de propulsão: elétrica e a combustão interna. Possuem os aspectos positivos e negativos de ambos, todavia com índices de desempenho gerais superiores aos tradicionais VCIs. E através de sofisticados sistemas de controle, permite opções de condução apenas com o ME, apenas com o MCI ou com a combinação de ambos na topologia série-paralelo *power split*, para tração e frenagem, por exemplo.

Ambos VEBs e VEHs possuem diferentes variações e topologias, que sofreram grandes transformações nos últimos anos e ainda estão sendo aprimoradas. Entender como é o uso de todos os componentes que fazem parte de VEBs e VEHs permite prever como será o seu comportamento durante o uso. Contudo, apenas estimar tais parâmetros pode não ser suficiente para avaliações mais precisas, em uma cidade ou região específica, por exemplo.

Os responsáveis por projetar e validar VEBs e VEHs possuem grande preocupação com o consumo de energia dos mesmos, trabalhando na otimização dos sistemas de tração do veículo, redução das emissões de poluentes, diminuição de custos e melhorias no desempenho. Diversos componentes e parâmetros de projeto já são bem consolidados como os sistemas de tração, transmissão, controle e gerenciamento de energia, com modelos matemáticos e numéricos confiáveis na literatura (EHSANI et al., 2010). Entretanto, os ciclos de condução utilizados para as simulações virtuais e testes com dinamômetro de chassi dos veículos não possuem modelos bem consolidados e são mais voltados apenas para avaliação das emissões de VCIs, comprometendo a análise, principalmente de VEBs e VEHs (PFLUEGL et al., 2015). Existem alguns ciclos de condução normatizados para diferentes países e regiões, e. g.: WLTC, NEDC, FTP-75, 10-15 e Artemis. Embora os ciclos citados sejam usados para homologação e certificação de veículo, eles não representam as peculiaridades das condições reais em lugares para os quais não foram projetados (TIETGE et al., 2017).

Para comparar diferentes veículos, respeitando determinadas categorias, são utilizados como dados de entrada os ciclos de condução. Estes são definidos como uma série de pontos de dados de velocidade do corpo de um veículo em um determinado período de tempo. Mesmo que fabricantes, órgãos e organizações públicas e privadas definam quantitativamente características como autonomia, rendimento e perdas de energia em um veículo através de ciclos de condução normatizados, com dados teóricos ou reais, é difícil compreender com exatidão se o comportamento em regiões específicas será o mesmo.

Na execução de simulações computacionais e testes de dinamômetro de chassi, os parâmetros definidos são ajustados de acordo com a conveniência do usuário. Logo, os resultados não são fieis ao perfil da estrada em que o veículo será submetido, as condições de clima locais, o tráfego usual da região, a disponibilidade de eletropostos (para VEBs), a qualidade do combustível líquido (para VEHs e VCIs), os hábitos dos motoristas e outras questões relevantes (FONTARAS; ZACHAROF; et al., 2017). Ademais, muitos dos estudos realizados com ciclos de condução são voltados para a emissão de poluentes, o que não é tão relevante quando se trata de VEBs, no sentido de que os mesmos não emitem gases nocivos durante o uso, porém devem ser capazes de ter autonomia e potência para o deslocamento durante todo o trajeto (acelerações, desacelerações, plano inclinado, tráfego intenso, entre outros).

Tais discussões apresentam um aumento de relevância nos últimos 10 anos e estudos recentes sobre metodologias para aquisição de dados reais para ciclos de condução e também voltados para parâmetros de VEBs e VEHs em grandes países e regiões como a União Europeia (PFLUEGL et al., 2015; BERZI et al., 2016; BRADY; O'MAHONY, 2016), Canadá (NOURI; MORENCY, 2017), EUA (DURAN; EARLEYWINE, 2012), China (HUNG et al., 2007), África (ACHOUR; OLABI, 2016), e o próprio Brasil (ROSO, 2016; OLIVEIRA et al., 2016) apontam uma tendência à utilização de parâmetros locais e reais para a determinação do desempenho de veículos e as peculiaridades que cada condução pode enfrentar.

Com o intuito de avaliar com maior clareza e discernimento como é o real comportamento de VEBs e VEHS na região é proposto neste trabalho o desenvolvimento de um ciclo de condução suburbano para Porto Alegre, a quinta maior cidade do Brasil. Depois de instrumentar um VCI com um sistema de aquisição de dados comercial, foram coletados dados de 14 viagens em horário de pico de aproximadamente 24 minutos cada. Em seguida, realizou-se o processamento de dados para filtrar, segmentar e tratar os valores de velocidade das viagens. Culminando no ciclo de condução suburbano da Grande Porto Alegre, o PoA SDC (Porto Alegre *Suburban Driving Cycle*).

O objetivo final do trabalho foi simular modelos computacionais de VEBs e VEHS com o ciclo criado. Nas simulações para os VEHS é feita uma comparação entre o ciclo normatizado transitório (baseado em dados reais) WLTC classe 3 e o ciclo PoA SDC, visando o desempenho, através de um modelo computacional do MATLAB®/Simulink/Simscape, em ambos os ciclos e comparando parâmetros como distância percorrida, acompanhamento de todas as velocidades por parte do VEH e as diferenças entre os consumos energéticos do MCI e da bateria do veículo.

As simulações para a verificação do ciclo PoA SDC com um VEB foram feitas utilizando a plataforma computacional MATLAB®/Simulink, a partir de um modelo desenvolvido e testado em Turim, Itália, de (FURTADO, 2016). O modelo de VEB simulado possui uma configuração de motores elétricos (MEs) *in-wheel*<sup>1</sup>, (MiW). Foram avaliadas configurações com 2 e 4 MiW com o intuito de comparar como seria o desempenho em tração de cada uma delas quando submetidas ao ciclo criado. Os parâmetros representativos para análise foram distância percorrida e consumo energético, com e sem frenagem regenerativa.

A organização do presente trabalho se divide em 5 capítulos. No Capítulo 2, é contextualizada a situação atual dos VEBs e VEHS, a história dos carros elétricos, o funcionamento dos sistemas de armazenamento de energia, a mecânica do movimento do veículo e os diferentes sistemas de tração e arquiteturas de VEBs e VEHS. O Capítulo 3 é voltado aos ciclos de

---

<sup>1</sup> Máquina elétrica acoplada diretamente na roda, também abreviada como MiW, *Motor in-Wheel*.

condução, abordando os ciclos normatizados e metodologias de aquisição e tratamento de dados para ciclos de condução reais. No Capítulo 4 é apresentado como foram feitos todos os procedimentos para a criação do ciclo PoA SDC, metodologia, parâmetros de comparação e análise de resultados. Por fim, no Capítulo 5 estão os resultados das simulações feitas para comparação entre ciclos de condução (uso de modelo virtual de VEH) e avaliação das diferenças no consumo energético para duas configurações de VEBs MiW. Além disso, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e o Capítulo 7 traz algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS

No século 20, a grande disponibilidade de petróleo, a relativa simplicidade dos processos de refinamento e de produção dos combustíveis, junto da facilidade da sua distribuição global, favoreceram a difusão de veículos equipados com MCIs. A concorrência da tração elétrica, presente nos primeiros veículos criados no final do século 19, foi facilmente vencida pelos MCIs, que se tornaram protagonistas da motorização de massa de todo o planeta (D'ANDRIA, 2007).

Entretanto, segundo (D'ANDRIA, 2007), no início do século XXI as questões ligadas à proteção ambiental e aos escassos recursos da Terra assumem uma importância cada vez maior. Os poluentes, o buraco na camada de ozônio, o efeito estufa preocupam a opinião pública, que passa a questionar um desenvolvimento energético baseado na exploração dos recursos não renováveis, devido à crescente queda da qualidade do ar, do solo e da água. Concomitantemente, as tensões internacionais ligadas à exploração dos recursos petrolíferos ainda disponíveis, localizados em lugares de elevada instabilidade política, contribuíram ao forte aumento do preço do petróleo.

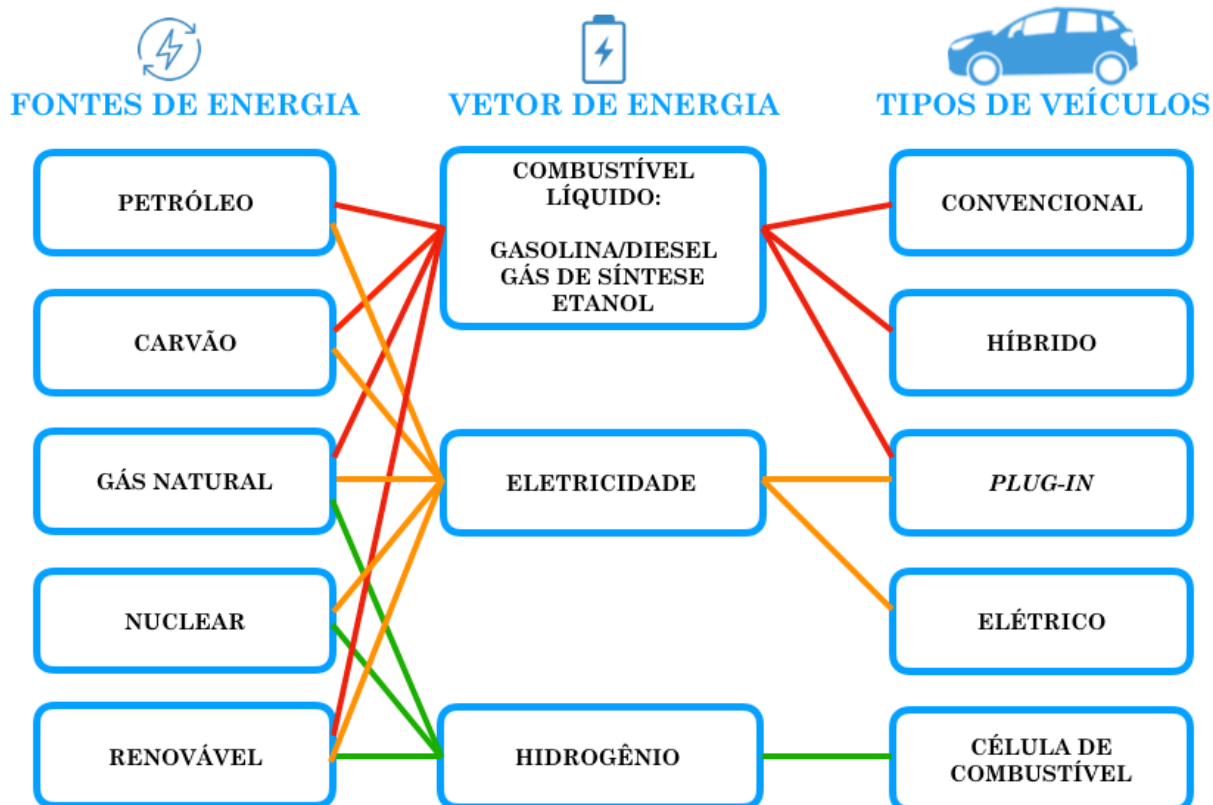
Veículos convencionais, os VCIs, são alimentados, na sua grande maioria, por gasolina ou diesel, combustíveis líquidos que são derivados geralmente de combustíveis fósseis. Os VEHs, apesar de mais eficientes e consumirem menos combustível que veículos convencionais, ainda dependem de combustíveis fósseis como matriz energética. Portanto, tanto VCIs quanto VEHs não são sustentáveis. VEBs e veículos a célula combustível dependem de eletricidade e hidrogênio, respectivamente. A eletricidade e o hidrogênio podem ser gerados a partir de fontes de energia renováveis, sendo sustentáveis enquanto apenas tais fontes forem usadas para esse propósito. Já os VEHPs<sup>2</sup>, embora não sejam totalmente sustentáveis, oferecem as vantagens dos VCIs e dos VEBs ao mesmo tempo. Os VEHPs podem substituir parte do uso de combustíveis fósseis consumindo a eletricidade da rede elétrica. Embora não sejam a solução definitiva para a sustentabilidade, eles constroem um atalho para um futuro sustentável, uma

---

<sup>2</sup> Veículo Elétrico Híbrido *Plug-in* (VEHP), cuja bateria pode ser também recarregada a partir da rede de distribuição de energia elétrica, não somente com frenagem regenerativa, como os VEHs.

transição entre o uso de VCIs para veículos puramente elétricos e de outras fontes renováveis. Na Figura 1, estão resumidas as dependências energéticas dos diferentes tipos de veículos (MI; MASRUR, 2017).

Figura 1: Diferentes fontes de energia, vetores de energia e tipos de veículos



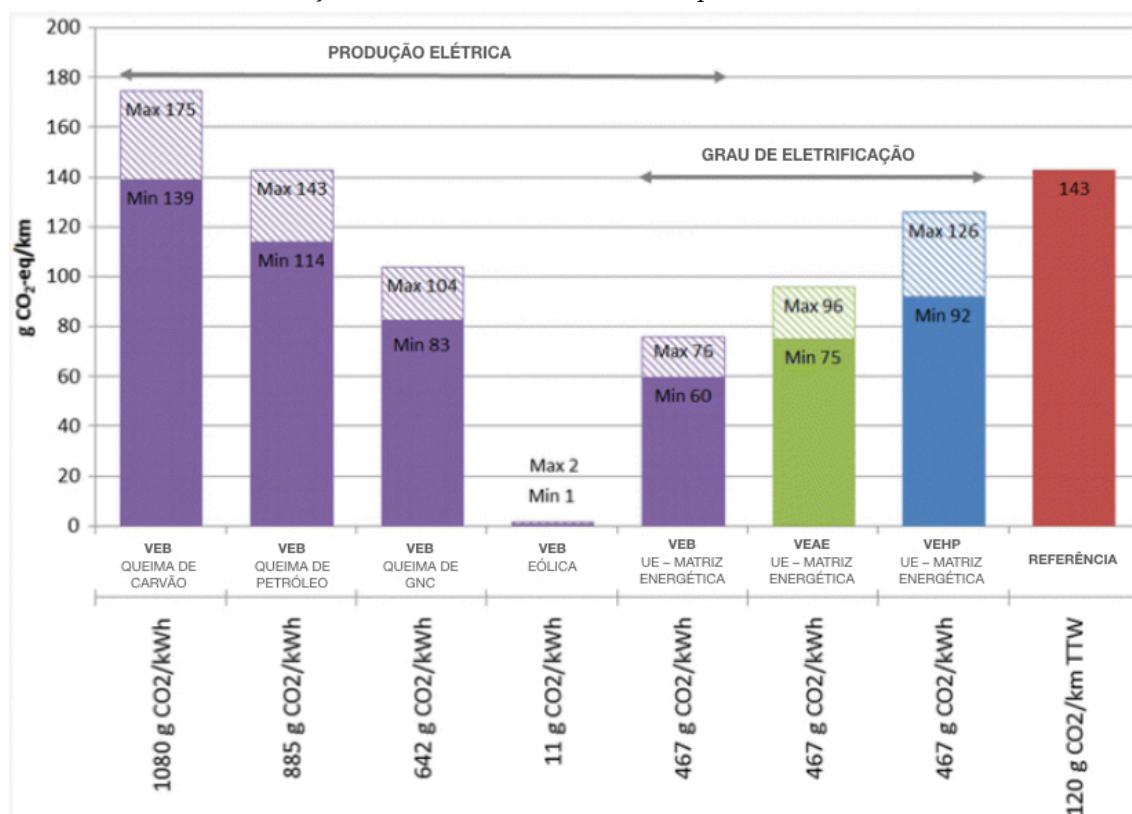
Fonte: adaptado de (MI; MASRUR, 2017)

De acordo com (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017), o desempenho de VEs é um tópico de importância crescente, com uma extensiva literatura nos últimos anos. Contudo, existem diferenças nos tipos de abordagens que são feitas no que diz respeito a qual etapa do ciclo de vida do produto é considerada na avaliação do VE. Muitas das descobertas não refletem uma avaliação inteiramente consistente do desempenho dos mesmos “do berço ao túmulo”, sobretudo por causa das variações nas hipóteses, especialmente as diferenças na intensidade de carbono da combinação da matriz energética utilizada; o uso inapropriado de resultados de testes; falta de dados reais das emissões de gases do escapamento; tempo de duração de componentes como a carroceria (*glider*) e a bateria. Então alguns estudos apenas consideram o desempenho dos VEs “do

tanque à roda”, contemplando somente o ciclo de vida do vetor energético usado para acionar o veículo; outros consideram o desempenho durante todo o ciclo de vida (e. g., incluindo a produção da bateria).

Os estudos com abordagem “da fonte à roda” possuem maior ênfase na quantidade de carbono emitida na produção de eletricidade, e o grau de eletrificação do veículo – VEB, VEH ou VEHP. A Figura 2 ilustra o desempenho “da fonte à roda” de VEs em função da fonte de energia utilizada para produzir eletricidade, e usa a composição média da matriz energética europeia para comparar o desempenho de veículos com diferentes níveis de eletrificação. Ainda com base na composição da matriz energética europeia de 2015 da Figura 2, um VEB em comparação com um VCI emite metade das emissões de carbono WTW<sup>3</sup> (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017).

Figura 2: Emissões de WTW de VEs em diferentes matrizes energéticas, comparação entre sistemas de tração. A barra "referência" corresponde às emissões de VCIs.

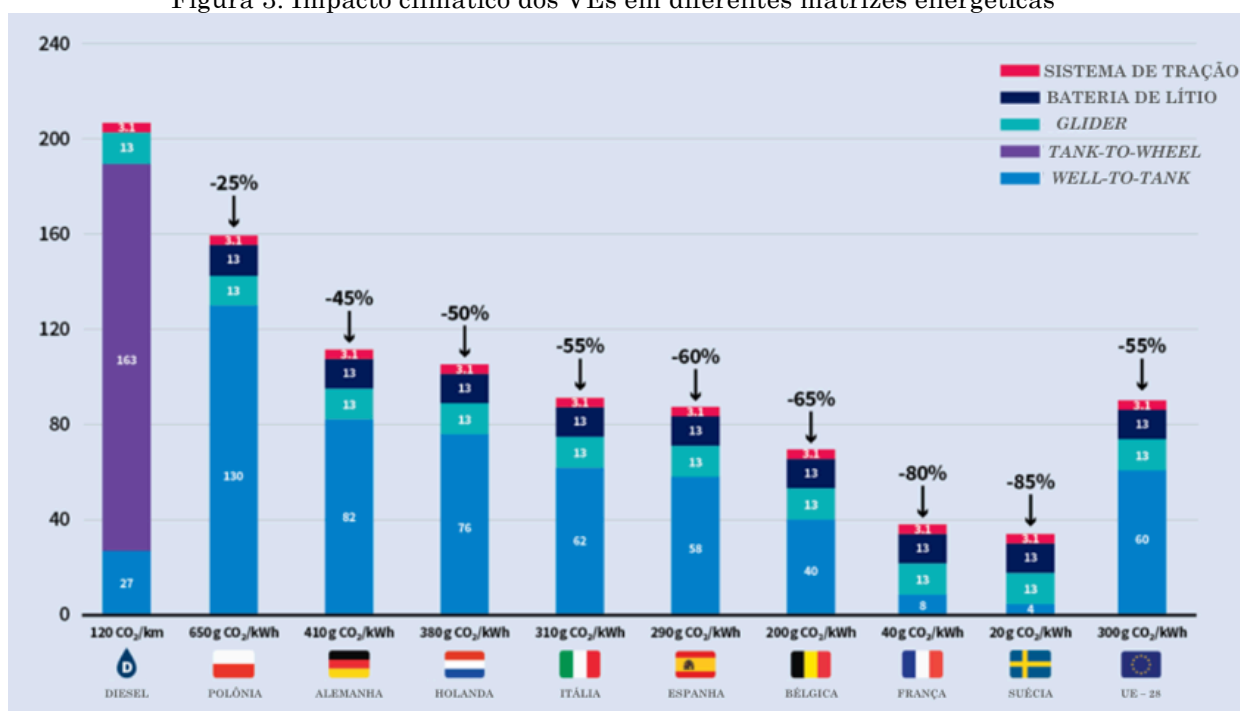


Fonte: adaptado de (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017)

<sup>3</sup> *Well-To-Wheel*, em tradução livre "da fonte à roda".

O gráfico da Figura 3 explica o impacto ambiental durante todo o ciclo de vida de VEs frente aos VCIs, relacionando às matrizes energéticas de diferentes países da União Europeia. Mesmo naqueles em que há predominância de matrizes dependentes de combustíveis fósseis, o impacto do ciclo de vida de um VE é 25% menor do que de um VCI, como na Polônia e na Alemanha. Em outros países, como na França e na Suécia, esse valor pode mais de 80% menor.

Figura 3: Impacto climático dos VEs em diferentes matrizes energéticas



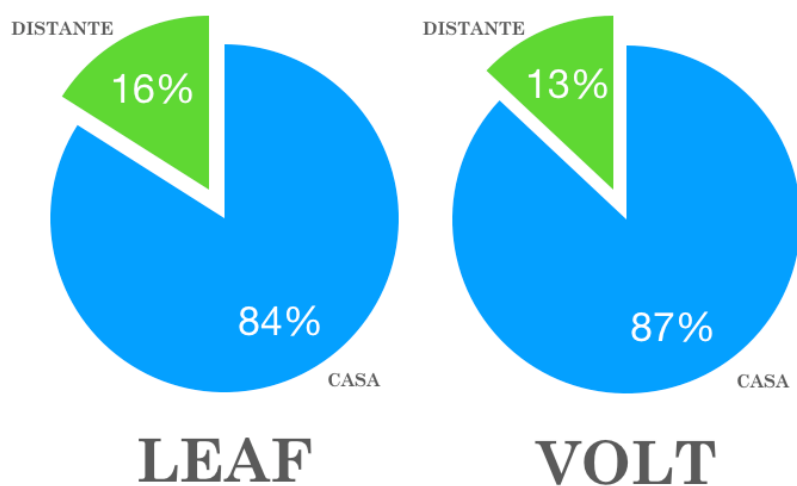
Fonte: adaptado de (MESSAGIE, 2017; TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017)

Em suma, frente às informações levantadas nas Figura 2 e Figura 3, o desempenho ambiental de VEs se mostra superior aos VCIs. De acordo com (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017), analisando-se o ciclo de vida de um VE é visto que mesmo em países que possuem maior dependência de matrizes energéticas provenientes de fontes não renováveis, a sua emissão de carbono é inferior a de VCIs, justificando a substituição dos sistemas de tração, de VCIs por VEs do ponto de vista ambiental. E ao passo que outras medidas e melhorias forem feitas, como aumento das matrizes de energia renovável, reciclagem de baterias, desenvolvimento de novas tecnologias, aumentará ainda mais a sustentabilidade dos VEs.



Um dos maiores problemas enfrentados pelos donos de VEs é a autonomia das baterias e a oferta de pontos de recarga das mesmas. Nas Figura 4 e Figura 5 é possível comparar como são os hábitos de uso dos condutores de VEs nos Estados Unidos. Segundo uma pesquisa realizada pelo (IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2015) os usuários que não possuem a opção de carregar as suas máquinas em algum lugar fixo, como o local de trabalho, costumam carregar os seus VEBs e VEHPs, modelos Nissan Leaf e GM Volt, nas suas residências em mais de 80% dos casos, conforme a Figura 4.

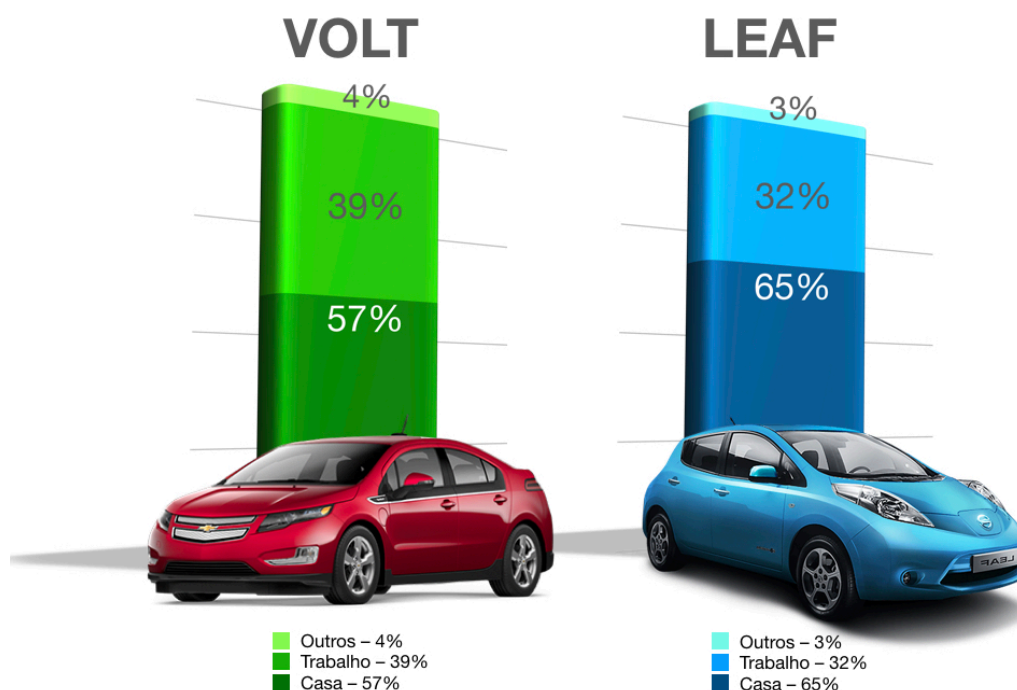
Figura 4: Hábitos de recarga de usuários de VEBs e VEHPs com eletropostos somente em casa



Fonte: adaptado de (IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2015; KUBO, 2017)

Aqueles que possuem pontos de carregamento em um local fixo e de frequência de deslocamento considerável, como um local de trabalho (Figura 5), tendem a carregar por menos tempos seus VEs em suas residências, porém a frequência de recargas em locais diferentes é muito pequena.

Figura 5: Usuários de VEBs e VEHPs com eletroposto disponível em casa e no trabalho



Fonte: adaptado de (IDAHO NATIONAL LABORATORY, 2015; KUBO, 2017)

Em comum às duas análises é o fato de que as recargas em outros lugares que não sejam fixos, residência ou trabalho, consideradas “recargas de ocasião”, como chamadas por (WESTBROOK, 2001), possuem uso muito menor. Tais lugares requerem disponibilidade de estações públicas de carregamento onde carros elétricos são estacionados, em supermercados, em estações de trem, em estacionamentos de centros de compras e inclusive juntamente a ruas residenciais, bastante usadas como estacionamento por uma boa parcela de motoristas, como pode ser observado o exemplo na Figura 6.

No Brasil, desde 2003 a Itaipu Binacional ampliou a sua missão em relação à geração de energia de qualidade e demais responsabilidades. Como parte dos seus planos estratégicos criou-se o Programa Veículo Elétrico, com diversos parceiros na iniciativa privada e pública, que desempenha diferentes atividades, como o desenvolvimento, a montagem e a manutenção de VEBs (terrestres e aéreos). O que os torna um dos expoentes no país em relação às novas tecnologias para mobilidade sustentável, já atuando como fornecedor para empresas e órgãos

do governo (JORNAL DA ITAIPU ELETRÔNICO, 2017), como pode ser visto na Figura 7, que representa diferentes modelos de VEBs que são envolvidos no projeto da Itaipu Binacional.

Figura 6: VEBs estacionados em via pública sendo recarregados.



Fonte: (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017)

Figura 7: Veículos elétricos produzidos ou parceiros, Itaipu Binacional



Fonte: (KUBO, 2017)

Os veículos movidos puramente a combustíveis fósseis tendem a perder espaço de mercado, frente ao incremento das vendas de veículos elétricos e híbridos, associados a uma mudança de cultura, o que pode ser atestado na Figura 8 que apresenta um comparativo entre a eficiência energética de diferentes tipos de sistemas de tração veiculares. Portanto, estipular a melhor relação entre as novas alternativas, avaliando os parâmetros mais relevantes frente aos hábitos médios de uso do transporte, considerando ciclos de condução pré-estabelecidos, é de suma importância.

Figura 8: Comparativo da eficiência energética de veículos leves com diferentes sistemas de tração

**Quantos quilômetros você pode dirigir com 10 kilowatt-hora de energia?**  
Perdas de energia produzidas e entregues incluídas (roda-a-roda)



Fonte: adaptado de (ECARS - NOW! GLOBAL COMMUNITY, 2008)

Um dos motivos pela crescente procura por outros sistemas de tração está relacionado à baixa eficiência dos MCIs. Apesar das grandes melhorias que passaram ao longo dos anos, os VCIs possuem uma eficiência média que não supera 15%, sendo que o remanescente de 85% é dissipado entre as perdas térmicas e aerodinâmicas, atritos ao longo do sistema cinemático e perdas na rodagem do pneu. Então, adicionar um ME a um sistema de tração equipado com um MCI resultará numa notável melhora da eficiência energética global do sistema. Deste modo é obtido um sistema de tração híbrida, que consiste em explorar o MCI nas condições de funcionamento que exigem um rendimento mais

elevado, minimizando a utilização nas situações de baixa carga em VEHs (D'ANDRIA, 2007).

Segundo (BINDER, 2016a), as vantagens da tecnologia híbrida, já eram notadas no início do século 20, todavia, tornaram-se acessíveis apenas recentemente, com o desenvolvimento de sistemas de acionamento, de controle eletrônico e de armazenamento de energia elétrica sofisticados, junto de um custo de produção mais condizente com a realidade econômica média da população usuária de tais meios. O que acarretou na comercialização dos veículos em larga escala: os VEBs e VEHs que estão hoje disponíveis em muitos países e podem reduzir de maneira consistente o consumo de combustíveis não renováveis e o impacto ambiental global, sem um aumento excessivo dos custos.

No Brasil, embora não haja ainda uma ampla gama de opções de VEBs e VEHs disponíveis no mercado, e que sejam economicamente restritos a uma parcela reduzida da população, desde o ano de 2015, os VEBs e VEHs, em alguns estados, possuem incentivos fiscais e outros benefícios. São Paulo, Rio de Janeiro e Mato Grosso do Sul oferecem isenção de 50% do valor do Imposto sobre Propriedade de Veículos Automotores (IPVA), além de outros sete estados que dão isenção de IPVA a modelos elétricos: Ceará, Maranhão, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul e Sergipe (KUTNEY, 2017; VITAL; SEABRA, 2017).

Segundo a (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO, 2017), no país existem cerca de 3 mil VEBs e VEHs. A frota total do país era de 89,7 milhões de veículos em setembro de 2015, de acordo com o Departamento Nacional de Trânsito. Ainda que sejam medidas iniciais e pouco difundidas, demonstram que o cenário automotivo brasileiro está se transformando, aliado a importantes discussões de novas leis que estão sendo debatidas no congresso nacional, como o projeto de lei da câmara nº 65 de 2014 que incentiva a instalação de pontos de recarga de baterias de carros elétricos em locais públicos e privados que está passando por processos de aprovação recentes (CRUVINEL; RIBEIRO, 2014; FAGUNDES, 2017).



## 2.1 A História dos Carros Elétricos

Embora os VEs ainda não estejam presentes em muitos países, a sua história começou no ano de 1834, quando foi criado o primeiro VE, que não era recarregável. Já o primeiro VEB é datado no ano de 1881, chamado de veículo de Trouvè, possuía acumuladores eletroquímicos de chumbo e um motor elétrico em corrente contínua a partir do dínamo de Pacinotti (1859). Em 1898, Justus Entz foi provavelmente o primeiro a construir um VEH, que era dotado de um MCI e de um ME, para Pope Manufacturing (Connecticut, EUA), porém, o protótipo pegou fogo e a empresa abandonou o projeto. Quase no fim do século 19, em 1899, o VEB Jamais Contente criado por Camille Jenatzy estabeleceu o recorde mundial de velocidade na terra com 105 km/h, com dois MEs (um em cada roda posterior) que proporcionavam 68 HP, o qual pode ser observado na Figura 9 (GUGLIELMI, 2015).

Figura 9: Veículo Elétrico Jamais Contente de 1899



Fonte: Museo Nazionale dell'Automobile, fotografado pelo autor em 2015

O mesmo Camille Jenatzy foi o responsável pela produção em série dos primeiros VEHs na Europa no início do século 20, apresentando um sistema híbrido em paralelo ao Salão do Automóvel de Paris de 1901, com um MCI de 4,4 kW e um motor-gerador elétrico de 10,3 kW. Em 1903, Lohner-Porsche construiu um sistema híbrido em série, com um motor térmico de 14,7 kW que acionava, em cada uma das rodas dianteiras, um motor-gerador elétrico em CC de 20,6 kW, que pode ser visto na Figura 10. Poucos anos depois a Mercedes construiu, com uma empresa chamada Mixte, o seu próprio veículo híbrido. Na década de 1930 se interrompeu a produção dos últimos VEHs, enquanto os veículos com MCIs

continuavam a prosperar. Apenas nos anos 1960, com o aparecimento de estudos mais claros a respeito das consequências da exploração dos combustíveis fósseis, que o interesse por trações alternativas voltou em pauta (GUGLIELMI, 2015).

Figura 10: Lohner-Porsche: primeiro VEH série



Fonte: (PORSCHE CARS NORTH AMERICA, 2017)

No ano de 1974, no Brasil, o engenheiro João Gurgel, através da sua empresa homônima, apresentou o primeiro VEB brasileiro, o Itaipú (Figura 11), em homenagem a Usina Itaipu Binacional. Alguns outros VEBs foram lançados posteriormente, porém, devido às limitações técnicas e à falta de incentivo na época, os projetos foram descontinuados (GURGEL 800, 2017). Então, diversas transformações e aprimoramentos foram sendo desenvolvidos, bem como cenários políticos e econômicos instáveis, culminando com o primeiro VEH comercializado em larga escala no ano de 1997, no Japão: o Toyota Prius (D'ANDRIA, 2007).

Figura 11: Primeiro VEB brasileiro, Gurgel Itaipú

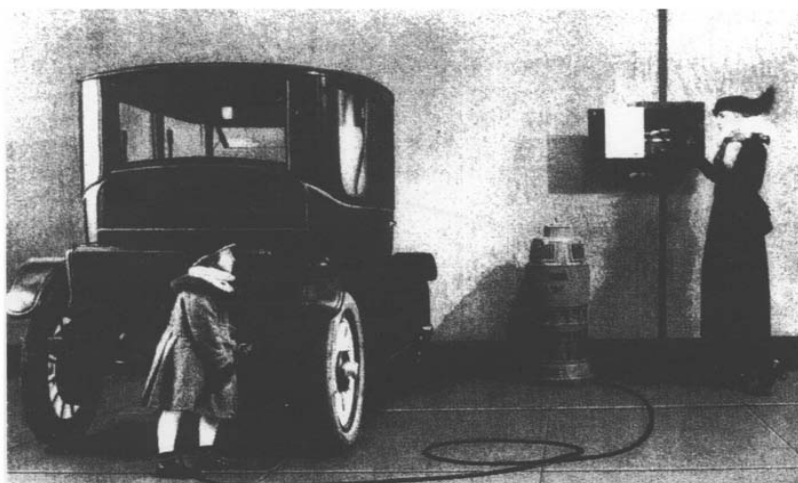


Fonte: (GURGEL 800, 2017)

## 2.2 Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica

No início do século XX, havia uma grande disputa entre VEBs e VCIs e naquela época os sistemas de carregamento eram muito mais simples em relação aos de hoje. As matérias-primas utilizadas pelas baterias eram ácido ou níquel-ferro, sendo a mesma alimentada por uma fonte CA, com o auxílio de um transformador, responsável por fornecer a tensão adequada ao sistema, e demais componentes de eletrônica de potência para retificação. Em alguns casos, também fazia parte da instalação de recarga um motor-gerador, assegurando que a tensão da bateria do veículo fosse menor que a da fonte. Uma instalação típica desse tipo é mostrada na Figura 12, na qual um VEB, provavelmente da época de 1912-1914, está sendo carregado (WESTBROOK, 2001).

Figura 12: Antigo VEB sendo carregado através de uma fonte de baixa tensão CC para um motor/gerador CC



Fonte: (WESTBROOK, 2001)

De acordo com (D'ANDRIA, 2007), as baterias atuais são protegidas e isoladas, impedindo a descarga de energia. Em condições normais de operação, não há risco de choques. Possuem uma vida útil entre 8 e 10 anos, dependendo das condições de uso e da realização de manutenção periódica. Uma das formas de recarregar as baterias é a partir de parte da energia cinética que é gerada nas desacelerações (frenagens regenerativas) de VEBs e VEHs, a qual é transformada em energia elétrica, quando o ME está operando como gerador, energia que de outra forma seria dissipada em forma de calor e compressão de ar, por exemplo. A



bateria é o principal custo dos VEBs e VEHs, porém, segundo (WATANEBE et al., 2017), atualmente apresenta uma queda de custo de 20% ao ano e existem previsões de que a partir de 2020 devem diminuir o seu custo de modo que os VEBs alcançarão um valor menor do que os VCI movidos a gasolina.

Para VEBs, é importante haver uma alta densidade de energia, de acordo com o seu ciclo de condução. Logo, para um VEB com massa de 1000 kg, como é apresentado na Tabela 1, são estimados mais do que 20 kWh, considerando uma distância de 150 km. Na Tabela 2 é possível observar um comparativo entre os diferentes tipos de baterias usados para o fornecimento de energia em VEBs e VEHs. De acordo com o ciclo de condução prioritário que o veículo desempenhará, a relação entre os parâmetros estabelecidos e os custos de cada tipo de bateria fornecem informações pertinentes para a melhor escolha deste componente (BINDER, 2016).

Tabela 1: Comparação dos requerimentos das baterias para VEBs e VEHs

<b>Características</b>	<b>Unidade</b>	<b>Veículos elétricos</b>	<b>Veículos híbridos</b>
Densidade de energia	(kWh/1000 kg)	20	1,5
Densidade de potência	(kW/1000 kg)	30	30 – 60
Capacidade de Carga	(kW/1000 kg)	>3	10 – 30
Vida útil		200.000 km ou 10 anos	
Eficiência		90%	

Fonte: adaptado de (BINDER, 2016)

Tabela 2: Densidade de energia, densidade de potência, vida útil e custos de diferentes tipos de baterias; o símbolo \* significa que não há valores detalhados disponíveis

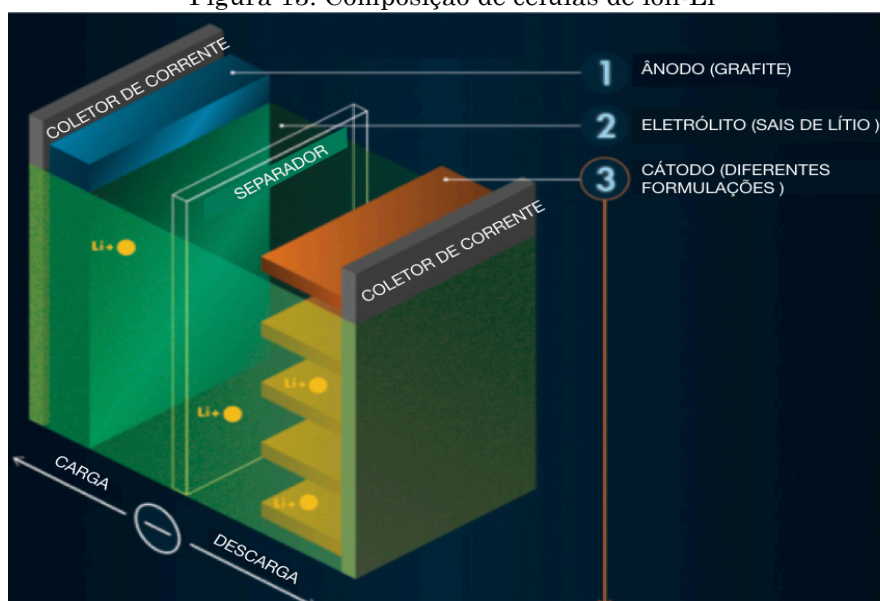
<b>Tipo de Bateria</b>	<b>Densidade de energia</b>		<b>Densidade de potência</b>	<b>Vida útil</b>			<b>Custo</b>
	Wh/kg	Wh/dm <sup>3</sup>	W/kg	W/dm <sup>3</sup>	Ciclos	Anos	Euro/kWh
Chumbo	30-50	70-120	150- 400	350-1000	50-1000	3-5	100-150
Níquel-Cádmio	40-60	80-130	80-175	180-350	> 2000	3-10*	225*-350
Níquel-Metal-Hidreto	60-80	150- 200	200- 300	400-500	500-1000	5-10*	225*-300
Sódio-Cloreto de Níquel em altas temperaturas	85-100	150- 175	155	255	800-1000	5-10*	225*-300

Tipo de Bateria	Densidade de energia		Densidade de potência	Vida útil			Custo
	Wh/kg	Wh/dm <sup>3</sup>	W/kg	W/dm <sup>3</sup>	Ciclos	Anos	Euro/kWh
Íon de Lítio	90-120	160- 200	Cerca de 300	300	1000	5-10*	275*
Polímero de Lítio	150	220	Cerca de 300	450	< 1000	-	< 225*
<i>Zinc-air</i>	100-220	120- 250	Cerca de 100	120	-	-	60

Fonte: adaptado de (BINDER, 2016b)

A produção de veículos elétricos, como muitas outras aplicações com tecnologia de ponta, precisa de “metais críticos”, incluindo os chamados elementos de terras raras. Baterias de VEs são predominantemente baterias de lítio-íon, que usam lítio, cobalto, níquel e grafite. Segundo (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017), as células de íon-Li usam um cátodo (eletrodo positivo), um ânodo (eletrodo negativo) e eletrólito como condutor. O cátodo é composto de níquel (73%), cobalto (14%), lítio (11%) e alumínio (2%). O ânodo é usualmente completamente feito de grafite. O eletrólito consiste de sais de lítio (sendo o hexafluorofosfato de lítio o mais comum) em um solvente orgânico. A Figura 13 ilustra a composição de uma célula de íon-Li típica.

Figura 13: Composição de células de íon-Li

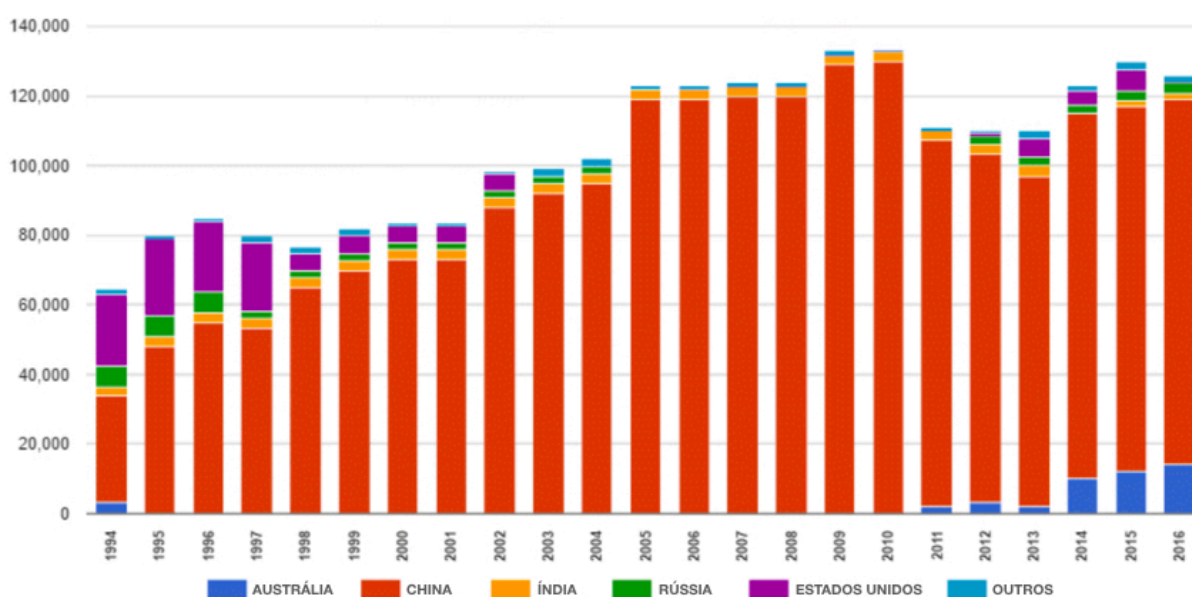


Fonte: adaptado de (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017)

A principal matéria prima para os sistemas de armazenamento de energia de veículos atuais que utilizam bateria é o lítio (Li), da família dos alcalinos. A maioria das reservas de lítio conhecidas está na Bolívia, Argentina, Chile, Austrália e China. Atualmente, a mineração de lítio acontece principalmente na Austrália e Chile. O chamado “triângulo sul americano” é detentor das maiores reservas de lítio, ainda amplamente inexploradas, e pode se beneficiar tremendamente da crescente demanda por baterias de íons de Li.

Outros elementos químicos importantes para os VEBs, são os elementos de terras raras, grupo de 17 elementos químicos que, apesar do nome, não são recursos escassos, todavia estão disponíveis apenas em pequenas quantidades dispersas na crosta terrestre, encontrados em MEs. A maioria dos VEBs (à exceção dos Tesla) e VEHs usam ímãs permanentes de neodímio ferro boro (NdFeB), que são essenciais para produção de MEs de alta performance. Tais ímãs contêm os seguintes elementos de terras raras: neodímio, praseodímio e disprósio. Na Figura 14 são apresentados os principais produtores de elementos de terras raras. (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017).

Figura 14: Produtores de elementos de terras raras (medidas em toneladas – óxido de terra rara equivalente)



Fonte: adaptado de (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017)

Também relevantes para a indústria automotiva, matérias-primas como o níquel, são encontradas principalmente em depósitos de laterita e sulfureto. Os maiores produtores em 2016 foram as Filipinas, Canadá e Austrália, que também aparece na Figura 14. 65% da produção mundial de cobalto vem do Congo, com um terço do fornecimento mundial protegido pela empresa suíça Glencore. Em 2016, a China foi o principal consumidor mundial de cobalto, com 80% do seu consumo utilizado na fabricação de baterias. A importância desproporcional do Congo na produção mundial do cobalto, e sua instabilidade política, podem levar a riscos de falta de suprimento se as ofertas de cobalto não forem diversificadas no futuro. Em contrapartida, a China é a responsável pela produção, quase exclusiva, do grafite. Devido à falta de um fornecimento diversificado, a União Europeia está trabalhando para fechar acordos comerciais de modo a assegurar a disponibilidade a produtores europeus (TRANSPORT & ENVIRONMENT, 2017).

### 2.3 Descrição Geral do Movimento do Veículo

O comportamento do movimento de um veículo em uma determinada direção é completamente determinado por todas as forças que atuam nele nessa mesma direção. Enquanto o veículo se move, há o atrito que tenta parar o movimento. O atrito geralmente inclui a “resistência de rolamento”, o “arrasto aerodinâmico”, e a “resistência ao aclone”. De acordo com a segunda lei de Newton, a aceleração veicular pode ser escrita como está em (1):

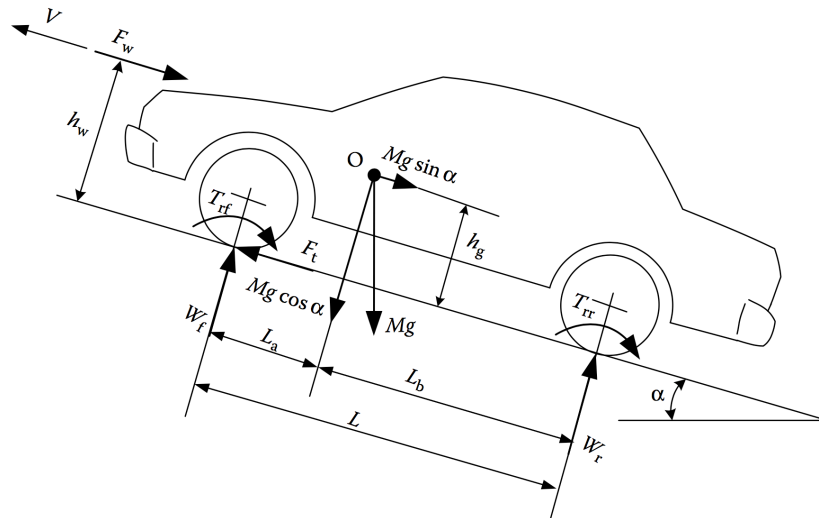
$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad (1)$$

Onde  $V$  é a velocidade do veículo,  $F_t$  é a força de tração total do veículo,  $F_r$  é o atrito total,  $M$  é a massa total do veículo, e  $\delta$  é o fator de massa que equivalentemente converte a inércia rotacional dos componentes girantes em massa translacional (EHSANI et al., 2010).

O esforço de tração é importante para modelar a performance do veículo. As forças que vão contra o movimento do veículo são: resistência de rolamento, arrasto aerodinâmico, resistência ao aclone e resistência inercial para aceleração

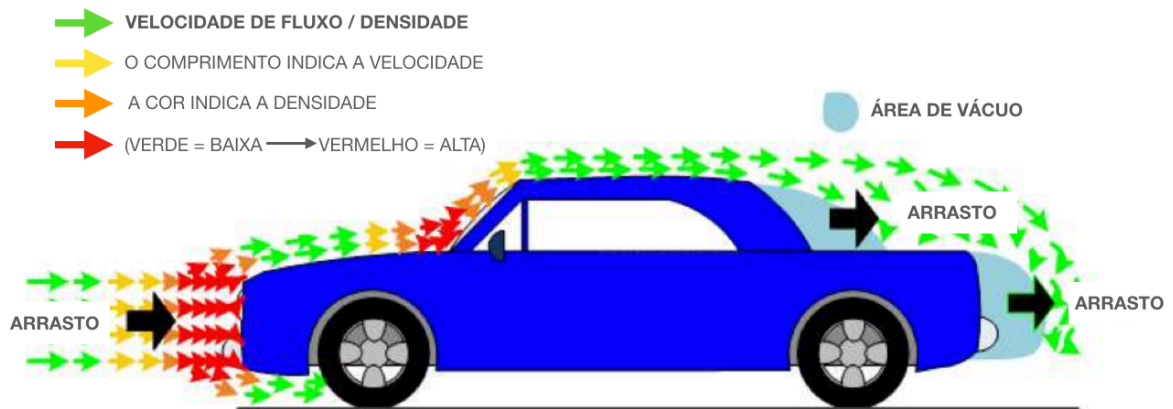
do veículo (TENCONI, 2014). Alguns desses esforços de tração que o veículo deve superar estão exemplificados nas Figura 15 e Figura 16.

Figura 15: Forças que atuam em um veículo que se move em um plano inclinado



Fonte: adaptado de (EHSANI et al., 2010)

Figura 16: Representação do comportamento do ar que flui em volta do veículo passando pela variação de velocidade e pressão estática.



Fonte: adaptado de (FURTADO, 2016)

Na primeira, Figura 15, a resistência ao rolamento é o atrito que ocorre entre dois sólidos rolando um sobre o outro sem quebrar. Ela se opõe ao seu movimento, incluindo resistência de rolamento dos pneus, aparecendo como os conjugados de resistência de rolamento  $T_{rf}$  e  $T_{rr}$ , o arrasto aerodinâmico  $F_w$ , e a resistência ao aclave  $M_g \sin \alpha$ .

Já na segunda, Figura 16, o arrasto aerodinâmico, corresponde à parcela da força devida à fricção do corpo do veículo se movendo através do ar, efeito resultante da distribuição irregular da pressão em torno do veículo (FURTADO, 2016). Ela está relacionada às características construtivas do veículo como a área frontal, forma, saliências, dutos e passagens de ar, *spoilers*<sup>4</sup>. Cabe ressaltar que o coeficiente de arrasto é um importante parâmetro de projeto do design do veículo, pois diminuindo reduzirá a necessidade de dutos de ar de refrigeração sobre o veículo (TENCONI, 2014).

De acordo com ONORI et al. (2016), o balanço de energia de um veículo é dado pela multiplicação de todos os termos de potência relativos aos esforços de tração pela velocidade do veículo. Tal somatório de potência é apresentado em (2):

$$P_t = P_{inércia} + P_{active} + P_{rol} + P_{aero} \quad (2)$$

O termo  $P_t$  representa a potência de tração nas rodas, tanto positiva ou negativa.  $P_t$  positiva é gerada pelo sistema de tração para impulsionar o veículo, enquanto  $P_t$  negativa (correspondente à desaceleração) pode ser obtido usando o sistema de tração, os freios ou ambos. Em veículos convencionais, a quantidade de potência negativa que o sistema de tração pode absorver é um tanto limitada: consiste nas perdas por atrito em vários componentes e “perdas de bombeamento” no MCI. Em VEHs, a quantidade de potência negativa é muito maior, uma vez que máquinas de tração elétrica são reversíveis e podem ser usadas para desaceleração, como gerador, tanto quanto para aceleração, como motor.

O termo  $P_{inércia}$  representa a quantidade de potência necessária apenas para acelerar o veículo (sem considerar as perdas); os termos  $P_{rol}$  e  $P_{aero}$  são a quantidade de potência necessária para vencer as resistências de rolamento e aerodinâmica, respectivamente; e  $P_{active}$  é a potência de aclave (ou, se a inclinação for negativa e o veículo está descendo um declive, é a potência que acelera o veículo e, quando em excesso, deve ser dissipada para evitar aceleração indesejada). Ainda em relação à situação em que o veículo está descendo um declive, abandonado a partir de certa velocidade, pode-se usar o freio-motor. Neste caso o motor absorve energia mecânica, em vez de fornecê-la como

---

<sup>4</sup> Abas projetadas para criarem arrasto, criando um impulso para baixo e aumento a aderência ao solo do veículo.

normalmente ocorre, devendo-se controlar a velocidade do carro ao reduzir as marchas (ONORI et al., 2016).

Ao se integrar os termos de (2) em relação ao tempo de uma viagem, intervalo de tempo entre  $t_0$  e  $t_f$ , tem-se o balanço energético resultante total em (3). Para verificar os valores dos termos individualmente, bastaria executar o mesmo procedimento de integração ao longo de um intervalo de tempo com as respectivas fórmulas.

$$E_t = \int_{t_0}^{t_f} P_t dt = E_{inércia} + E_{active} + E_{rol} + E_{aero} \quad (3)$$

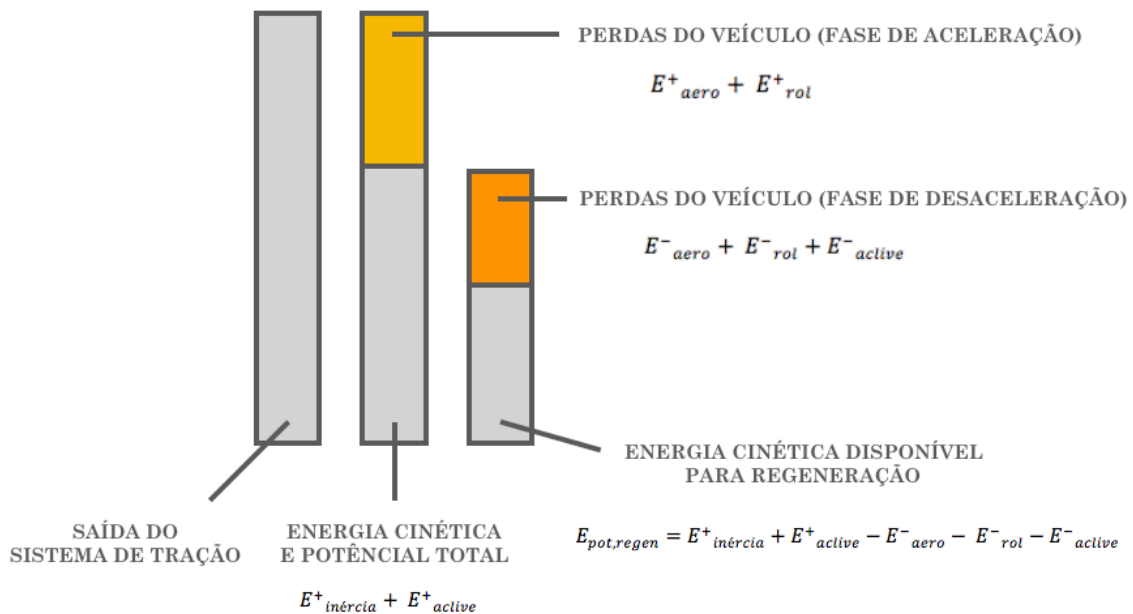
Cada termo da energia  $E_t$  é o produto de dois termos: um representando os parâmetros do veículo (massa, coeficientes de atrito), que são independentes do ciclo de condução, e outro representando as informações do ciclo de condução, independente das características do veículo e função apenas do perfil de velocidade do mesmo (ONORI et al., 2016).

Quando o veículo desacelera necessita dissipar toda a energia cinética acumulada durante a aceleração. As resistências dissipativas contribuem para isso, uma vez que tendem a desacelerar o veículo. Entretanto, a quantidade de energia cinética a ser dissipada durante a desaceleração pode ser maior que a soma das resistências de rolamento e aerodinâmica; nesse caso, o veículo deve ser desacelerado por atuadores adicionais, por exemplo usando freios mecânicos ou, em veículos híbridos, produzindo conjugado negativo com os motores de tração elétrica, recuperando então parte da energia. A quantidade de energia disponível para regeneração é a energia total do veículo acumulada durante a aceleração (cinética e potencial) menos as perdas durante a fase de desaceleração, dadas pelas perdas dissipativas (resistência de rolamento e arrasto aerodinâmico) e pelo aumento da energia potencial, conforme visto em (4) (ONORI et al., 2016).

$$E_{pot,regen} = E_{inércia}^+ + E_{active}^+ - E_{aero}^- - E_{rol}^- - E_{declive}^- \quad (4)$$

O diagrama da Figura 17 mostra graficamente esse conceito: da esquerda para a direita, perdas são subtraídas para computar a energia disponível em cada um dos estágios.

Figura 17: Balanço energético de um veículo (o comprimento das barras representa a energia)



Fonte: adaptado de (ONORI et al., 2016)

## 2.4 Sistemas de Tração Puramente Elétrica

De acordo com (WESTBROOK, 2001) a conversão de potência elétrica em mecânica é fundamental para a viabilidade VEBs e VEHs. Os primeiros VEBs utilizavam motores CC para converter energia elétrica em mecânica nos sistemas de tração, uma vez que a potência das baterias estava disponível instantaneamente na forma de CC, e poderia ser controlada pelo chaveamento da tensão e variação do campo e da resistência do circuito de armadura e, mais recentemente, por chaveamento *on-off* de alta frequência da saída da bateria.

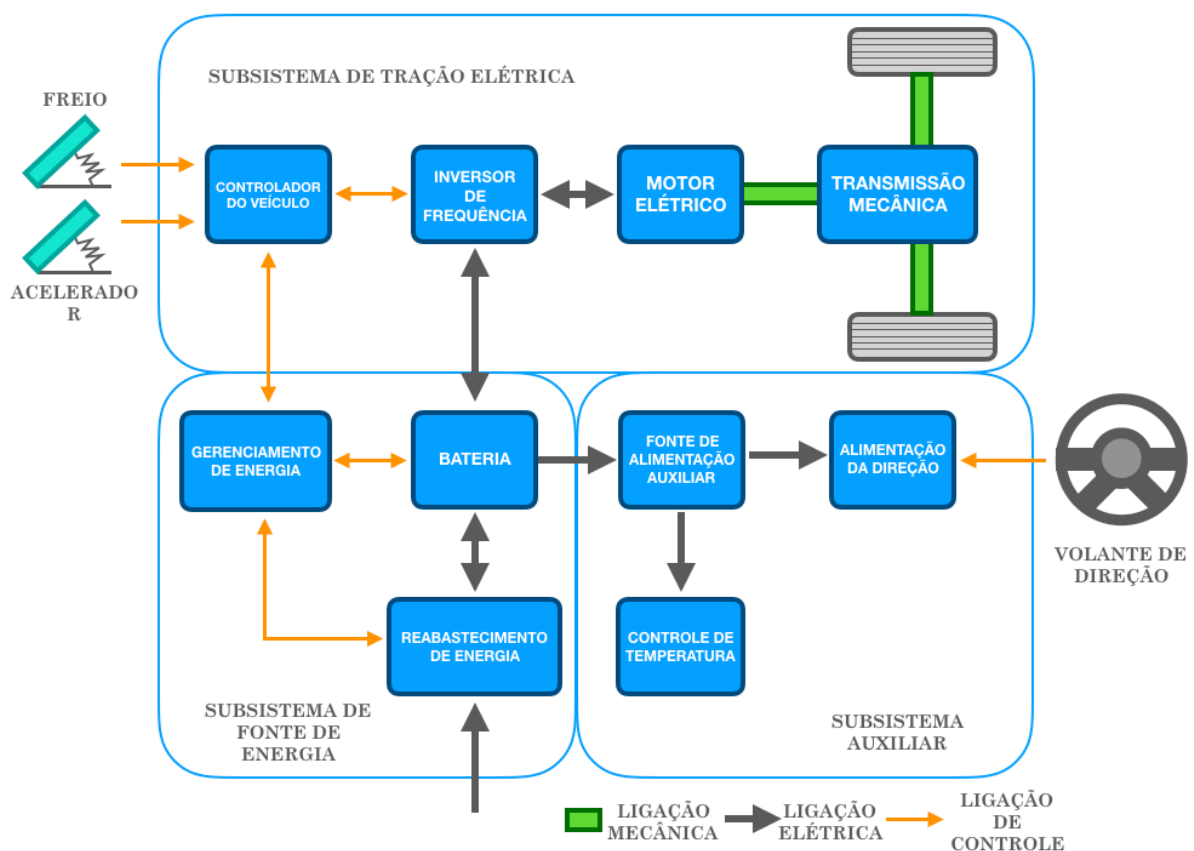
A partir da década de 1960, com o surgimento de dispositivos chaveados de eletrônica de potência adequados para aplicações com altas correntes, tem sido possível converter a corrente CC das baterias em corrente CA de frequência e amplitude variáveis, tornando então praticável o uso tanto de motores de indução quanto de motores síncronos. O uso de máquinas CA tem mostrado consideráveis vantagens em custo, tamanho, peso e confiabilidade (WESTBROOK, 2001).

Um sistema de transmissão moderno é ilustrado na Figura 18, o qual, segundo (EHSANI et al., 2010), consiste em três principais subsistemas: tração



elétrica, armazenamento de energia e auxiliares. O subsistema de tração elétrica compreende o controlador do veículo, o inversor de frequência, o ME, transmissão mecânica e transmissão para as rodas. Já o subsistema de armazenamento de energia envolve as baterias, a unidade de gerenciamento de energia e a unidade de reabastecimento de energia. Por fim, o subsistema auxiliar é composto pela unidade de alimentação da direção, a unidade de controle de temperatura e a fonte de alimentação auxiliar.

Figura 18: Ilustração conceitual da configuração geral de um VEB



Fonte: adaptado de (EHSANI et al., 2010)

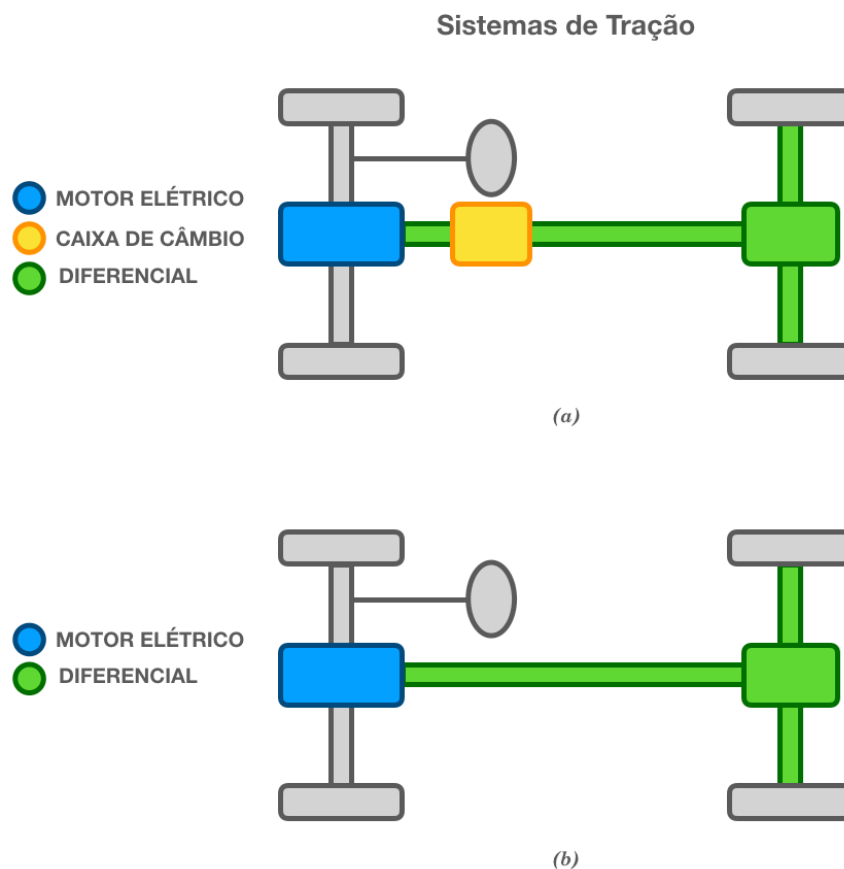
#### 2.4.1 Sistemas de Transmissão

Em um veículo com MCI e tração nas rodas dianteiras, o sistema de transmissão consiste em motor, embreagem, transmissão, eixo de tração, engrenagem diferencial, semieixos e rodas. Esse complexo sistema torna possível altas variações na rotação do motor, na faixa de 0 a 15000 RPM. O sistema de

transmissão também deve acomodar a diferença entre as velocidades nas rodas interna e externa durante curvas, o que ocasiona uma ampla extensão de potência de saída (EHSANI et al., 2010).

No caso de VEBs, embora seja possível simplesmente substituir o MCI por um ME, como mostrado na Figura 19a, isto não tira proveito das tantas vantagens de acionamentos elétricos. Particularmente, a capacidade de um ME de partir de velocidades nulas possibilita eliminar a embreagem, e a faixa de velocidade disponível é suficiente para não exigir o uso de engrenagens de transmissão, conforme apresentado na Figura 19b.

Figura 19: Sistema de direção de veículo elétrico com o motor elétrico diretamente substituindo o MCI e acionando as rodas traseiras, (a) com caixa de câmbio e (b) sem caixa de câmbio



Fonte: adaptado de (WESTBROOK, 2001)

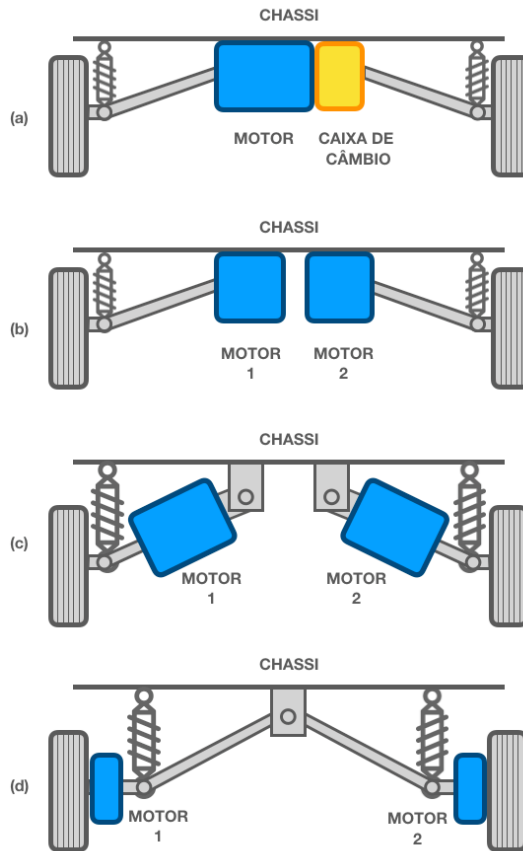
Em 2001, a maioria dos VEBs utilizava a configuração da Figura 20a (Ford Ecostar) ou Figura 20b (GM EV1 e Nissan FEV). Contudo, muitos VCIs convertidos para VEBs usavam a topologia da Figura 19b, com o ME substituindo

o MCI e sua transmissão diretamente. No desenvolvimento de VEBs, é essencial que os projetos do motor e da transmissão sejam totalmente integrados para então se ter relações de custo, segurança e desempenho ótimas. Em virtude da capacidade de motores CA de atingir altas velocidades, e, conseqüentemente, baixos volume e massa, atualmente são as opções de motorização mais exploradas. Sistemas de transmissão mais complexos podem ser exigidos em VEHs, já que pode ser necessário o intercâmbio entre tração puramente elétrica para somente combustão interna ou a combinação de ambas, dependendo da topologia do mesmo (WESTBROOK, 2001).

Um passo à frente na simplificação do sistema de direção e na eliminação do diferencial pode ser dado através do uso de dois motores elétricos, conectados às rodas tracionadas. Existem três maneiras diferentes de se realizar isso. A primeira é montar os dois motores no chassi do veículo e conectá-los às respectivas rodas através de um semieixo curto de velocidade constante, como pode ser observado na Figura 20b. Isso permite um movimento livre das rodas sem que o peso dos motores afete a massa de cada uma das rodas sem suspensão. Tal fato é importante, pois a dirigibilidade de um veículo é altamente afetada pelas perturbações da superfície da estrada nas rodas e demais partes relacionadas, uma vez que estas não estão isoladas pelo sistema de suspensão, como o resto do veículo está (WESTBROOK, 2001).

A segunda topologia com dois MEs, Figura 20c, consiste em articular cada motor em um lado do chassi com o eixo de acionamento do motor diretamente conectado às rodas. A terceira opção, Figura 20d, é montar um motor em cada roda, conhecido como motor *in-wheel*, mesmo que isso exija um ME com alta razão de potência/massa, tanto devido ao pouco espaço disponível quanto pela necessidade de reduzir a massa, que não possui apoio para ficar suspensa. Porém, essa não é uma ideia recente, já que, em 1900 e em 1902, Ferdinand Porsche projetou dois carros elétricos usando motores *in-wheel*, além do VEH ilustrado anteriormente na Figura 10 (WESTBROOK, 2001).

Figura 20: Opções de sistemas de transmissão de VEBs que aproveitam as vantagens da flexibilidade de posição e número de MEs, (a) motor único suspenso integrado com diferencial e caixa de engrenagens, (b) dois motores suspensos, (c) dois motores parcialmente suspensos, e (d) motores *in-wheel* (sem suspensão)

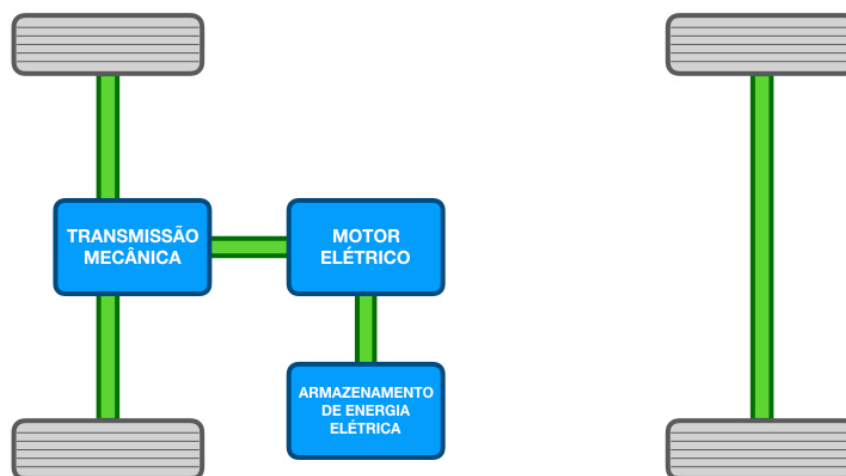


Fonte: adaptado de (WESTBROOK, 2001)

#### 2.4.2 Arquiteturas de VEBs

Antigamente, os VEBs eram principalmente convertidos de VCIs existentes apenas substituindo-se o MCI e o tanque de combustível por um acionamento com ME e um banco de baterias, mantendo-se os demais componentes, como está ilustrado na Figura 21. Isto acarretava em desvantagens, tais como peso excessivo, pouca flexibilidade e diminuição de desempenho, causando o desaparecimento desse tipo de VEB. Em seu lugar, os VEBs modernos são construídos e projetados para esse fim, o que satisfaz as exigências estruturais únicas para um melhor desempenho e uso da maior flexibilidade de sistemas de tração elétrica (EHSANI et al., 2010).

Figura 21: Sistema de tração dianteiro de um VEB primário



Fonte: adaptado de (EHSANI et al., 2010)

De acordo com (EHSANI et al., 2010), há uma variedade de configurações de VEBs possíveis devido a variações nas características da tração elétrica e nas fontes de energia, flexibilidade já evidenciada anteriormente, na Figura 20. É apresentada na Figura 22a uma configuração de tração elétrica que substitui o MCI de um veículo com sistema de transmissão convencional. Essa topologia consiste em um ME, embreagem, caixa de engrenagens, e diferencial. A embreagem e a engrenagem podem ser substituídas por uma transmissão automática. A embreagem é usada para conectar ou desconectar a tração do ME da transmissão das rodas. A caixa de engrenagens tem um conjunto de relações de câmbio para modificar o perfil potência-velocidade (conjugado), de forma a atender os requisitos de carga. O diferencial é um dispositivo mecânico (geralmente um conjunto de engrenagens planetárias), que permite que as rodas dos dois lados sejam acionadas a diferentes velocidades e conjugados quando o veículo é conduzido em curvas, uma grande preocupação de veículos de competição de alta velocidade, uma vez que precisam fazer as curvas com a maior velocidade possível.

Em virtude de muitas topologias de MEs terem potência constante em uma grande extensão de velocidades, uma engrenagem fixa pode substituir o câmbio multivelocidades e dispensar o uso de embreagem. Essa configuração, mostrada na Figura 22b, não apenas reduz o tamanho e o peso da transmissão mecânica,

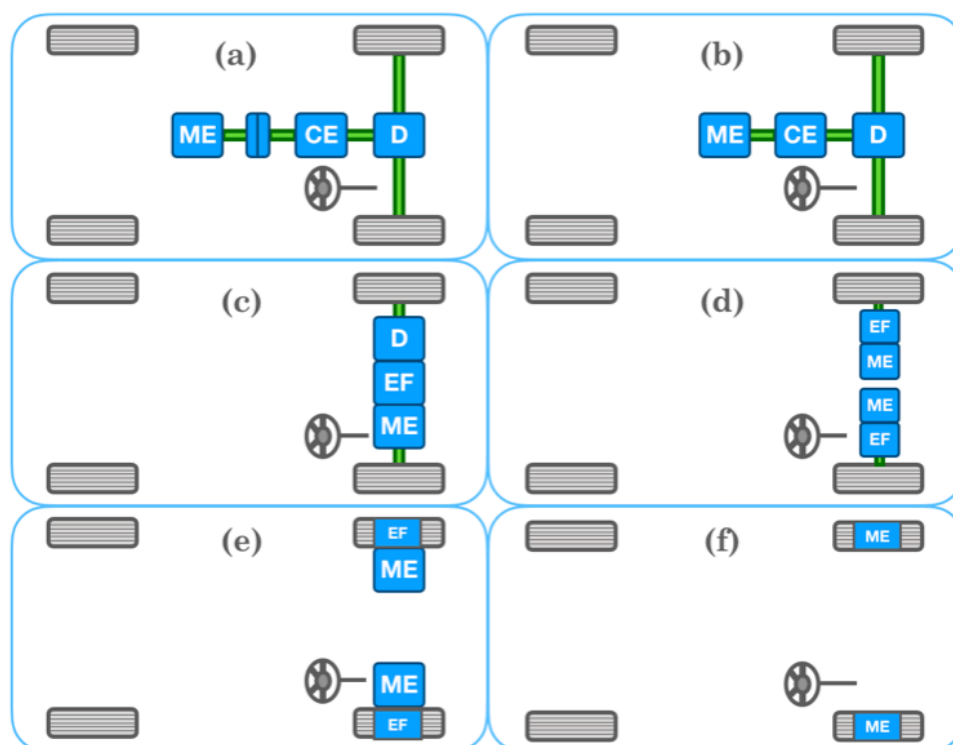
como também simplifica o controle do sistema de direção por prescindir troca de marchas (EHSANI et al., 2010).

Similar ao sistema de transmissão na Figura 22b, o ME, a engrenagem fixa e o diferencial podem ser integrados em uma única montagem, enquanto o eixo está conectado diretamente à transmissão das rodas. Todo o sistema de tração se torna ainda mais simplificado e compacto, como visto na Figura 22c. O diferencial mecânico é substituído por dois motores de tração na Figura 22d. Cada um deles aciona uma roda de um lado e opera em velocidades diferentes quando o veículo realiza alguma curva (EHSANI et al., 2010).

Na Figura 22e é feita mais uma simplificação, o ME pode ser colocado dentro da roda. Esse arranjo é então chamado de acionamento *in-wheel*. Um conjunto de engrenagens planetárias pode ser empregado para reduzir a velocidade do motor e aumentar o conjugado do motor. O conjunto de engrenagens planetárias oferece a vantagem de uma razão de uma alta redução de velocidade como também um arranjo alinhado dos eixos de entrada e saída (EHSANI et al., 2010).

Por último, na Figura 22f, são retiradas as engrenagens mecânicas entre o ME e a transmissão da roda, sendo o rotor externo do ME conectado diretamente à roda. O controle de velocidade do ME é equivalente ao das rodas, logo corresponde à velocidade angular das rodas. Todavia, nessa topologia, para partir e acelerar o VEB é necessário que o ME tenha um alto conjugado (EHSANI et al., 2010).

Figura 22: Possíveis configurações de VEBs: (a) sistema de transmissão convencional com multiengrenagens e embreagem; (b) transmissão de engrenagem única sem a necessidade de embreagem; (c) diferencial e engrenagem fixa integrados; (d) dois motores separados e engrenagem fixa com seus eixos de direção; (e) acionamento direto com dois motores separados e engrenagem fixa; (f) dois acionamentos separados com motores *in-wheel*



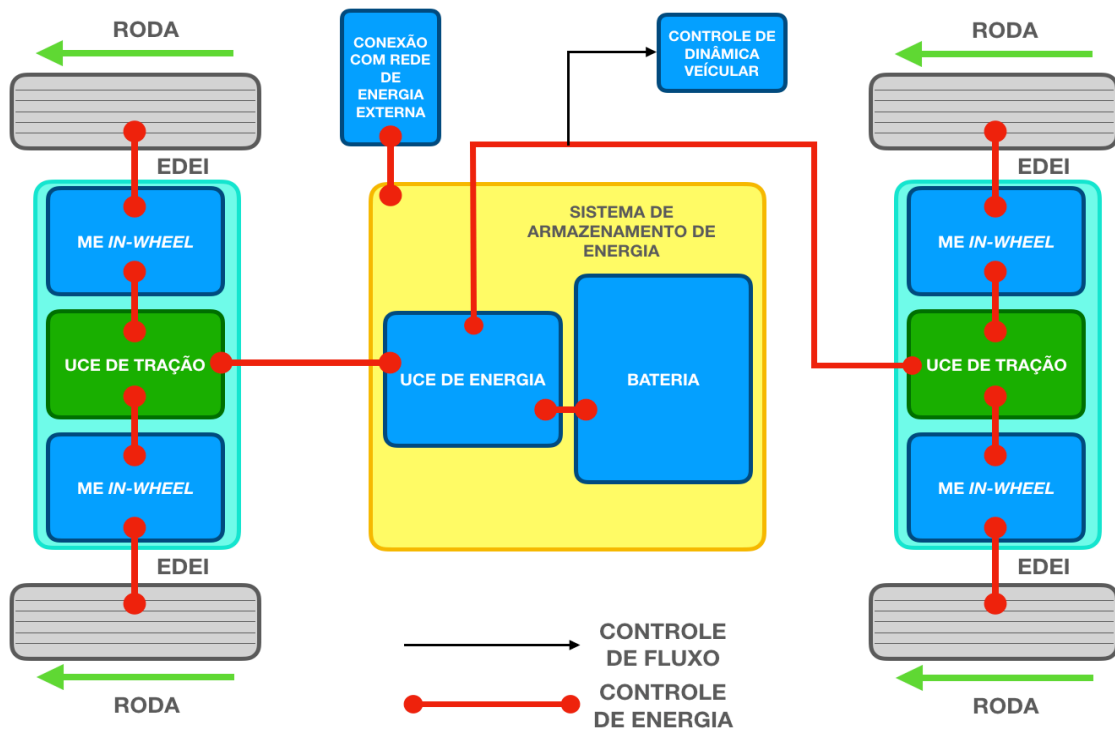
LEGENDA: D = DIFERENCIAL / CE = CAIXA DE ENGRANAGEM / ME = MOTOR ELÉTRICO / EF = ENGRANAGEM FIXA

Fonte: adaptado de (EHSANI et al., 2010)

Atualmente, segundo (EHSANI et al., 2010), um considerável trabalho tem sido feito para desenvolver motores adequados para o uso *in-wheel*, porém, essa é uma tarefa complexa, devido aos valores à produção de motores pequenos com alta potência e alto conjugado e a complexidade de se usar engrenagens entre o motor e a roda. O custo também impacta na decisão de se usar MEs nas quatro rodas, uma configuração que permite um controle independente e ótimo da tração e da direção. Há também desvantagens específicas associadas aos motores *in-wheel*, como o aumento do peso e o seu consequente efeito na condução do veículo; o efeito do aquecimento do freio, que se torna pior pela dificuldade de se suprir uma refrigeração eficaz; e a possibilidade de danificar o motor nessa posição que o deixa vulnerável. Uma topologia com 4 MEs *in-wheel* é ilustrada na Figura 23,

junto aos demais subsistemas, gerenciadas por UCEs<sup>5</sup>, presentes na arquitetura geral de um VEB, com as conexões identificadas (FURTADO, 2016).

Figura 23: Arquitetura geral de um VEB com 4 MEs *in-wheel*; EDEI significa eixo diferencial eletrônico integrado



Fonte: adaptado de (FURTADO, 2016)

### 2.4.3 Máquinas Elétricas para VEs

Na conjuntura atual, há uma vasta variedade de MEs para veículos (BINDER, 2016). Usualmente, os acionamentos elétricos têm potências na faixa de 20 a 80 kW dependendo do tamanho e aplicação do veículo. O posicionamento deles é, de modo geral, próximo ao eixo que se liga às rodas, como MCIs, onde a transmissão às rodas é feita através de um conjunto de engrenagens. Em casos especiais, a ME também pode estar no eixo como um acionamento direto ou acionar as rodas como um motor de cubo, conforme explicitado nas Figura 20, Figura 22 e Figura 23.

<sup>5</sup> A unidade de comando eletrônico (*Electronic Control Unit* - ECU) é responsável pelo gerenciamento e registro de diferentes atuadores de um veículo. As UCEs, sensores e atuadores se comunicam entre si através de sistemas de comunicação-multiplexados, como um barramento CAN (TRIEBEL et al., 2009).



De acordo com (BINDER, 2016), o acionamento elétrico para VEs deve atender as seguintes exigências:

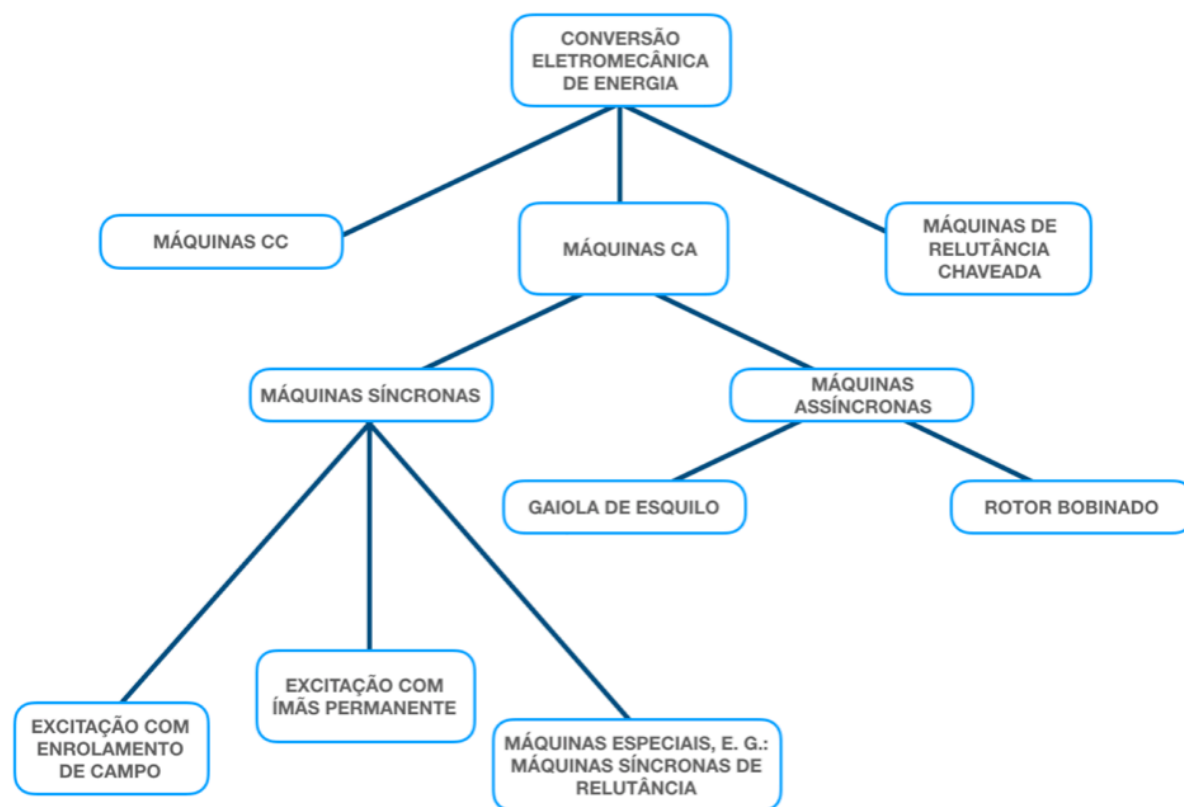
- Alta densidade de potência (razão potência/massa);
- Alta densidade de conjugado (razão conjugado/volume da máquina);
- Alto rendimento em baixas cargas e com carga nominal;
- Recuperação da energia de desaceleração com alto rendimento total (frenagem regenerativa);
- Alta robustez contra forças de aceleração;
- Refrigeração líquida;
- Confiabilidade (segurança);
- Baixo custo de fabricação;
- Manufatura simples;
- Alta sofisticação;
- Adequação a automóveis.

Segundo os autores, (BINDER, 2016a; PELLEGRINO et al., 2016; WILTUSCHNIG et al., 2016), alguns dos MEs que são empregados nos sistemas de tração de automóveis são:

- Máquinas CC com enrolamentos série e paralelo;
- Máquinas de indução;
- Máquinas síncronas de ímãs permanentes;
- Máquinas de relutância chaveada;
- Máquinas síncronas de relutância assistida por ímãs permanentes;
- Máquinas de fluxo axial.

Todas essas máquinas apresentadas na Figura 24, são baseadas no princípio de que o conjugado é produzido por um condutor de corrente, i. e. o rotor dentro do campo magnético do estator, submetido a uma força tangencial na direção rotacional (força de Lorentz); ou pelo arrasto do rotor devido ao campo rotativo do estator por causa das diferenças de relutância magnética ao longo da circunferência do rotor (BINDER, 2016).

Figura 24: Visão geral de acionamentos elétricos

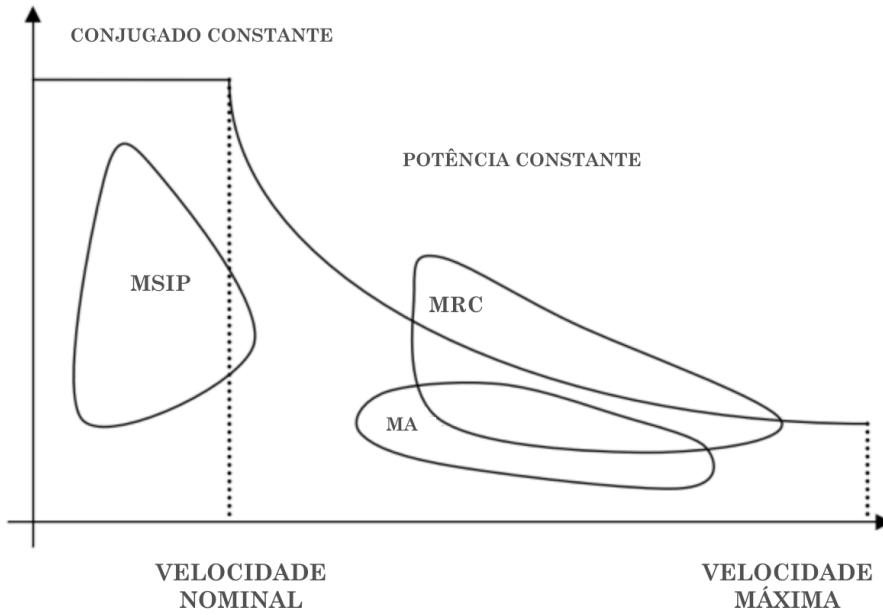


Fonte: adaptado de (BINDER, 2016a)

No passado, conforme já comentado, VEBs e VEHs utilizavam uma grande quantidade de MEs CC, o que, atualmente, não é mais visto. A tendência atual é pelo uso de MSIP<sup>6</sup> nos projetos mais recentes, em decorrência do uso de novos ímãs de materiais de terras raras, citados no início do Capítulo 2, que possuem altas densidade de energia e eficiência em baixas velocidades. As MSIP, com ímãs superficiais e enrolamento distribuído, como pode ser observado na Figura 25, não operam de forma ótima acima da velocidade nominal. Caso fossem de ímãs internos (razão de saliência diferente de 1) também operariam na região de potência constante, através do enfraquecimento de campo, com controle vetorial. Já as MRCs e as MAs, fazem enfraquecimento de campo consumindo menos corrente para operarem nesses pontos acima da velocidade nominal (BINDER, 2016a; PELLEGRINO et al., 2016).


























<sup>6</sup> Traduzido do inglês PMSM, *Permanent Magnet Synchronous Machines*, Máquinas Síncronas de Ímãs Permanentes são muito usada em VEBs e VEHs.

Figura 25: Gráfico com as curvas características de operação de 3 conceitos de tração: MSIP (neste caso, máquina síncrona de ímãs permanentes superficial com relação de saliência igual a 1, MA (máquina de indução com rotor de gaiola de esquilo) e MRV (máquina de relutância chaveada)



Fonte: adaptado de (BINDER, 2016a)

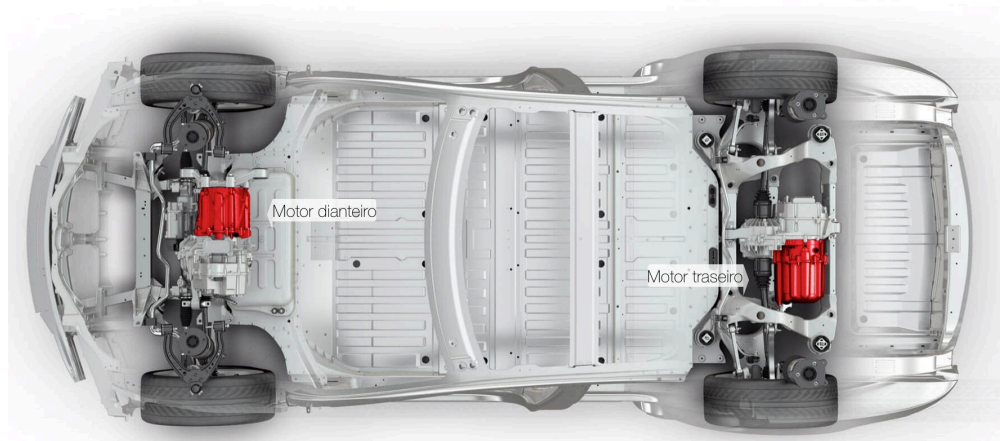
Tabela 3: Comparativo de diferentes topologias de MEs

	 Máquina de Ímãs Permanentes Superficiais	 Máquina de Ímãs Permanentes Internos	 Máquina Síncrona de Relutância assistida por ímãs permanentes (Híbrida)	 Máquina Síncrona de Polos salientes excitada por enrolamento de campo	 Máquina Assíncrona
Potência Constante Com Variação De Velocidade					
Relação Entre Conjugado E Corrente De Armadura					
Rendimento Em Toda A Faixa De Operação					
Peso					

Fonte: adaptado de (MERWERTH, 2014)

Na Tabela 3 é possível observar um comparativo entre diferentes topologias de MEs. A maioria dos carros elétricos e os melhores híbridos usam MSIP com ímãs internos. Uma exceção, a Renault emprega máquinas síncronas de polos salientes em seus VEBs. Já a Tesla, utiliza MAs em seus modelos de VEBs, com opção de topologia com 2 MEs, um no eixo traseiro e outro no dianteiro, possibilitando tração nas 4 rodas e controlando ambos de maneira independente, conforme Figura 26. Ainda sobre os VEBs da Tesla, é interessante ressaltar que eles possuem as baterias no chassi do carro, mais próximas do solo, o que deixa o centro de gravidade do veículo mais baixo e pode ajudar a evitar capotagens. As MSIP com ímãs superficiais possuem maior aderência em VEHS com baixo grau de hibridização, devido às limitações de operação acima da velocidade nominal (BINDER, 2016a).

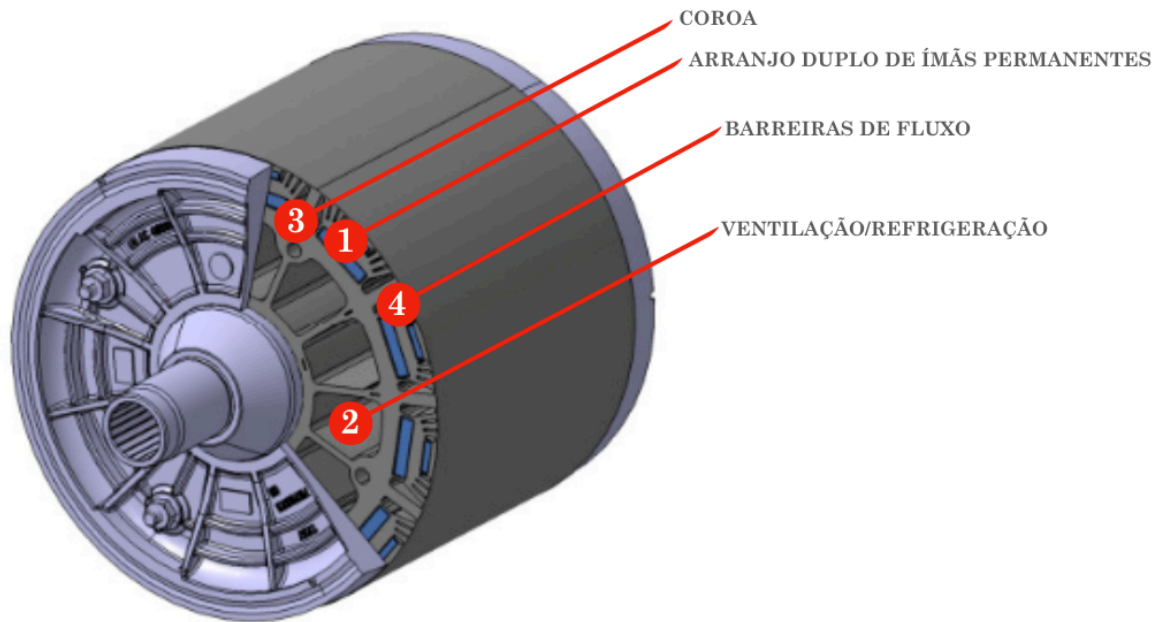
Figura 26: Modelo de VEB da Tesla, Model S, com 2 MEs e tração às 4 rodas.



Fonte: (TESLA MOTORS, 2015)

Alguns fabricantes utilizam topologias de MEs consideradas híbridas, que reúnem características de diferentes máquinas. A BMW utiliza uma dessas topologias, presente na Figura 27, de máquina síncrona de relutância assistida por ímãs permanentes, possuindo, como pode ser visto na Tabela 3, vantagens em todos os parâmetros de comparação. O arranjo duplo de ímãs permanentes resulta em uma tensão induzida com baixa distorção harmônica total (THD). E o seu elevado número de pares de polos, 6, permite reduzir o seu peso, já que a largura da coroa será menor.

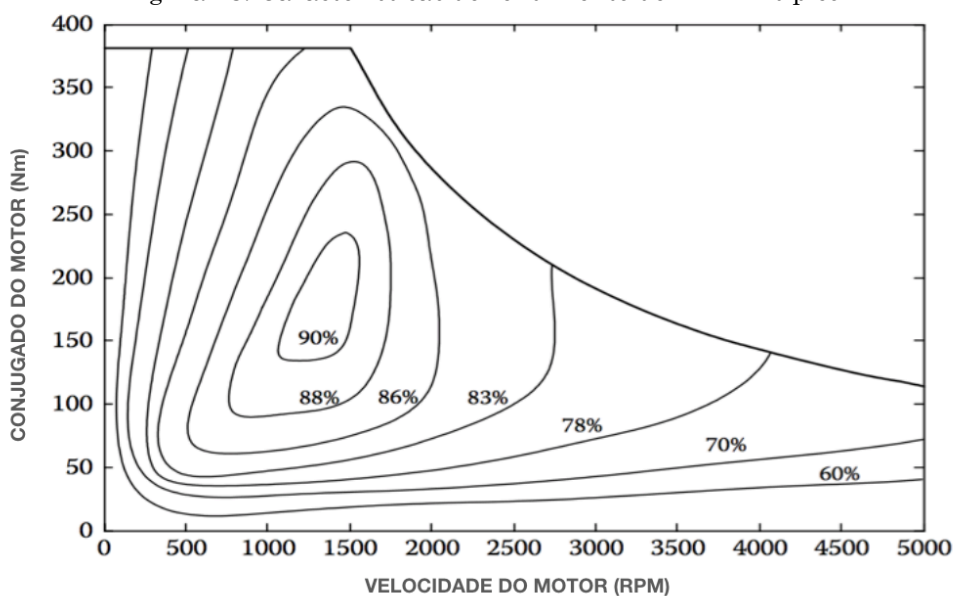
Figura 27: Máquina síncrona de relutância assistida por ímãs permanentes, utilizada no BMW i3



Fonte: adaptado de (MERWERTH, 2014)

O rendimento de um ME varia de acordo com seus pontos de operação no plano conjugado-velocidade como mostrado na Figura 28, na qual a área de operação de maior rendimento é de 90%. No projeto de uma ME para um VEB ou VEH, essa área deve sobrepôr ou pelo menos estar o mais próximo possível dos principais pontos de operação do veículo, visando alcançar o máximo de eficiência. Os MEs modernos atingem rendimentos maiores que 90%, dependendo da faixa de potência nominal. Na Tabela 4, comparam-se MEs (EHSANI et al., 2010).

Figura 28: Características de rendimento de um ME típico



Fonte: adaptado de Ehsani (2010)

Tabela 4: Vantagens e desvantagens de MEs utilizadas para tração - MA, MSIP, MRV e MCC

	Máquina de Indução	Máquina de Ímãs Permanentes Superficiais	Máquina de Relutância Chaveada	Máquina CC
Densidade de conjugado	±	++	+	-
Rendimento	±	++	±	-
Peso	+	++	+	-
Estado da arte	++	+	±	++
Inversor	+	±	--	++
Custo	±	-	++	-
Fabricação	+	-	++	-
Ruído	+	++	-	+

Fonte: adaptado de (BINDER, 2016a)

## 2.5 Configurações de Sistemas Híbridos

Os VEHs são a tentativa de combinar os benefícios de ambos os motores, ME e MCI, apresentando diferentes configurações dos seus sistemas: série, paralelo, série-paralelo, complexos e outros, como pode ser visto na Figura 29.

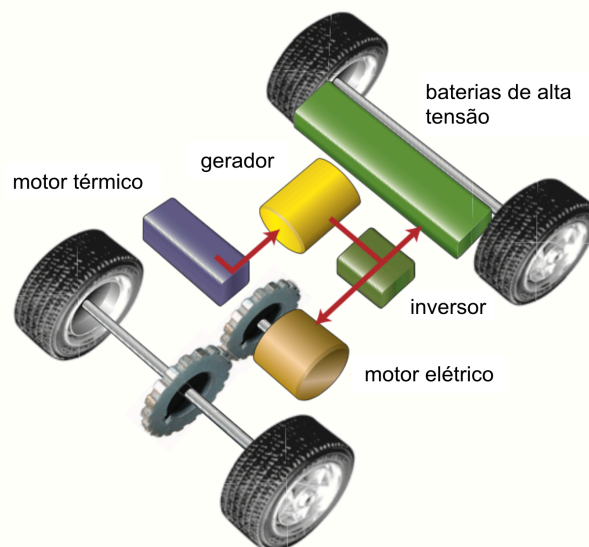
Figura 29: Topologias de VEHs



Fonte: adaptado de (BINDER, 2016a)

No sistema híbrido em série, o MCI é conectado a um gerador elétrico e a corrente gerada alimenta um ME, o qual fornece tração às rodas ou recarrega a bateria (quando opera como gerador), conforme pode ser observado na Figura 30. Esse sistema é caracterizado por possuir tração puramente elétrica, sendo que o MCI atua apenas no sentido de fornecer energia ao gerador.

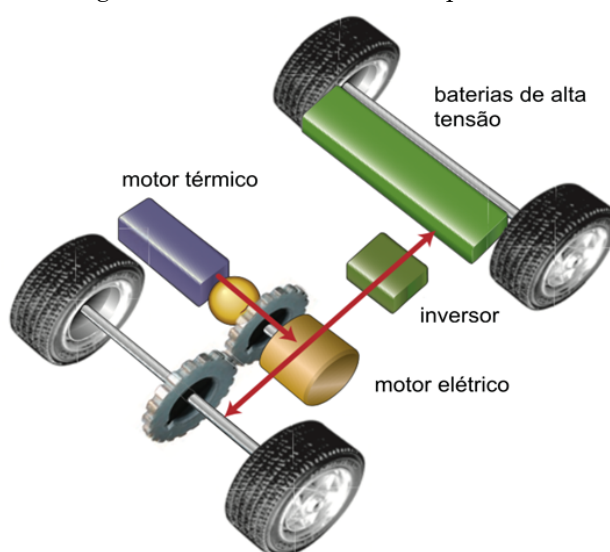
Figura 30 Sistema híbrido em série



Fonte: adaptado de (D'ANDRIA, 2007)

Tanto o MCI quando o ME, no sistema híbrido em paralelo, são conectados diretamente à transmissão para fornecer tração às rodas, o que pode ser visto na Figura 31. Nessa topologia o veículo pode operar com ambos os tipos de motores: MCI ou ME para tracionar o mesmo. Além disso, apenas o ME é responsável por alimentar a bateria, quando opera como gerador.

Figura 31 Sistema híbrido em paralelo



Fonte: adaptado de (D'ANDRIA, 2007)

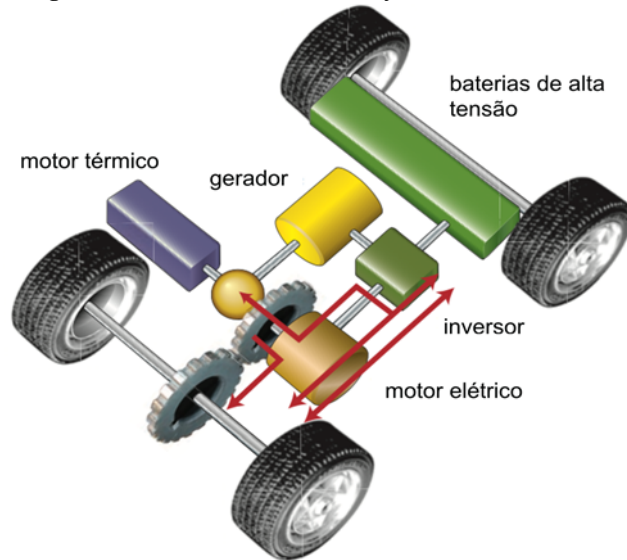
O sistema híbrido desenvolvido pela Toyota, Figura 32, na primeira geração do modelo Prius (que era comercializada no Japão em 1997) possui o nome de THS (*Toyota Hybrid System*) e consiste em uma evolução da configuração básica dos sistemas híbridos em paralelo. Segundo (D'ANDRIA, 2007), o modelo Prius que era comercializado em 2003 e 2004 utilizava o sistema THS-II (*Hybrid Synergy Drive*), uma evolução do THS, que permite, entre outras coisas, a ativação através de um botão de uma modalidade de tração totalmente elétrica, seja apenas por breves percursos (2 km ao máximo) ou em determinadas condições (bateria suficientemente carregada, velocidade máxima do veículo inferior a 50 km/h etc.).

Nessa topologia, o VEH opera com tração elétrica, térmica ou tração combinada, possibilitando diferentes modos de condução e operação do mesmo. Ele é composto por um MCI, um ME, um gerador e uma engrenagem planetária na transmissão. O MCI é conectado ao transmissor, o motor elétrico é conectado à



engrenagem anel como também à engrenagem final, e o gerador é conectado à engrenagem solar (MI; MASRUR, 2017).

Figura 32 Sistema híbrido Toyota THS e THS-II



Fonte: adaptado de (D'ANDRIA, 2007)

Segundo (MI; MASRUR, 2017), as relações de velocidade e conjugado são dadas pelas expressões de (5) a (8).

$$\omega_{mci} = \omega_g \frac{N_r}{N_r + N_s} + \omega_r \frac{N_r}{N_r + N_s} \quad (5)$$

$$C_r = C_{mci} \frac{N_r}{N_r + N_s} \quad (6)$$

$$C_g = C_s = C_{mci} \frac{N_s}{N_r + N_s} \quad (7)$$

$$C_{eixo} = (C_{me} + C_r) \cdot i_1 \quad (8)$$

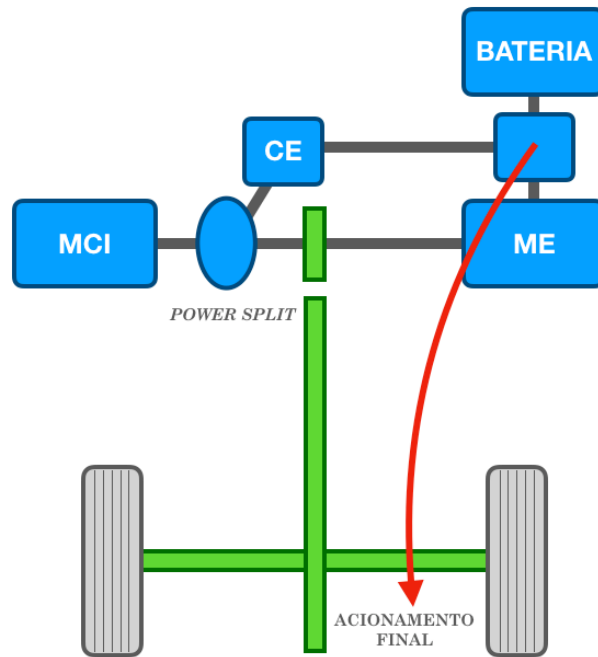
Nas quais  $\omega_{mci}$ ,  $\omega_{me}$  e  $\omega_g$  são as velocidades do MCI, do ME e do gerador, respectivamente,  $\omega_r$  é a velocidade da engrenagem anel,  $\omega_{me} = \omega_r$ ;  $\omega_s = \omega_g$ ;  $i_1 = N_1/N_2$  é a razão da engrenagem final, e  $N_1$  e  $N_2$  são o número de dentes da engrenagem final. Os conjugados são representados por  $C_{mci}$ ,  $C_{me}$  e  $C_g$ , respectivamente do MCI, do ME e do gerador.

Uma vez que não há embreagem, a engrenagem planetária opera sempre que o veículo está se movendo. A partir das equações acima e da Figura 32 pode

ser observado que a velocidade do ME é diretamente proporcional à velocidade do veículo através do raio dos pneus dianteiros e à razão da engrenagem final. A velocidade da engrenagem anel e a velocidade do ME são idênticas (MI; MASRUR, 2017). Seguem abaixo os 4 diferentes modos de operação que o Prius possui:

- Modo 0: partida e marcha ré – o ME é alimentado pela bateria e o veículo é movido apenas pela tração do ME, conforme a Figura 33. Nessas situações o conjugado do gerador e do MCI é nulo, conforme observado em (9)-(11).

Figura 33: Modo 0 de operação do Toyota Prius, CE é a caixa de embreagem



Fonte: adaptado de (MI; MASRUR, 2017)

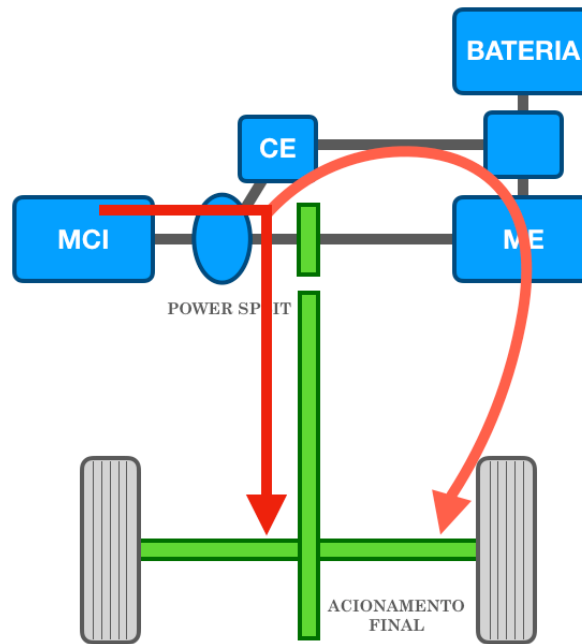
$$C_{mci} = 0 \quad (9)$$

$$C_g = 0 \quad (10)$$

$$C_{mci} = i_1 C_{me} \quad (11)$$

- Modo 1: cruzeiro, ou e-CVT<sup>7</sup> modo 1, Figura 34. Nesse modo o veículo está operando em velocidade constante e com tração combinada, conforme pode se observar pela relação de conjugado de saída (soma dos conjugados do MCI e do ME). Além disso, o MCI está fornecendo energia para o gerador, que alimenta o ME e resulta na tração das rodas, de acordo com (12)-(16).

Figura 34: Modo 1 de operação do Toyota Prius, CE é a caixa de embreagem



Fonte: adaptado de (MI; MASRUR, 2017)

$$C_r = C_{mci} \frac{N_r}{N_r + N_s} \quad (12)$$

$$C_g = C_{mci} \frac{N_s}{N_r + N_s} \quad (13)$$

$$C_{saída} = (C_r + C_{me}) \cdot i_1 \quad (14)$$

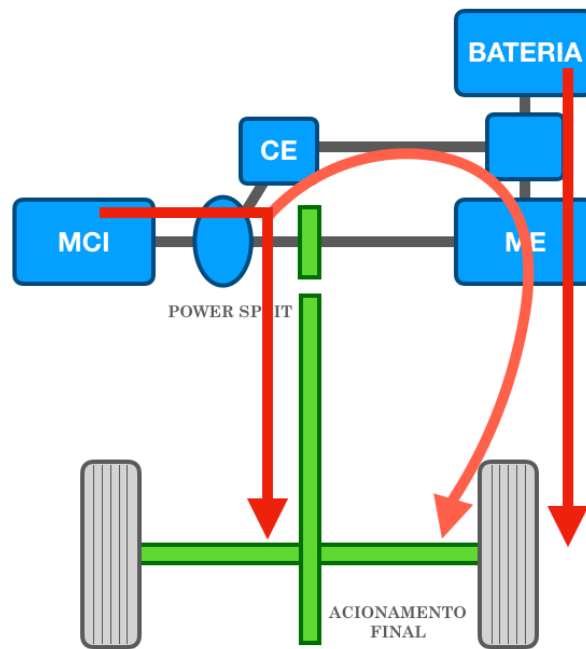
$$P_{bateria} = 0 \quad (15)$$

$$P_{me} = \omega_{me} C_{me} = P_g = \omega_g C_s \quad (16)$$

<sup>7</sup> *Continuously Variable Transmission*, é uma transmissão contínua variável que simula uma quantidade infinita de relações de marcha, possuindo uma topologia diferente das convencionais: sistema de duas polias de tamanhos diferentes interligadas por uma correia metálica de alta resistência. Idealizada por Leonardo da Vinci, é usada em carros com câmbio automático ou manual. Possui aceleração contínua, sem trancos, como se não houvesse trocas de marchas, possuindo maior eficiência energética em relação aos demais tipos (ROSSI et al., 2009).

- Modo 2: aceleração repentina, e-CVT modo 2, ilustrado na Figura 35. Potência combinada do MCI e do ME. Devido à necessidade de maior energia para aceleração, a bateria também fornece potência ao ME. Como visto em (17)-(20).

Figura 35: Modo 2 de operação do Toyota Prius, CE é a caixa de embreagem



Fonte: adaptado de (MI; MASRUR, 2017)

$$C_r = C_{mci} \frac{N_r}{N_r + N_s} \quad (17)$$

$$C_g = C_{mci} \frac{N_s}{N_r + N_s} \quad (18)$$

$$C_{saída} = (C_r + C_{me}) \cdot i_1 \quad (19)$$

$$P_{me} = \omega_{me} C_{me} = P_g + P_{bateria} \quad (20)$$

- Modo 3: Frenagem regenerativa – MG2 opera como gerador para produzir eletricidade e carregar a bateria ao mesmo tempo que fornece frenagem e conjugado à engrenagem final. Essa operação ocorre de maneira reversa à partida e à marcha-ré.

Durante a operação normal (e-CVT ou aceleração), a velocidade do MCI é controlada pelo conjugado do gerador. Basicamente, a potência do gerador é

ajustada de forma que o MCI gire na velocidade desejada. Assim, ajustando-se a velocidade do gerador, o MCI pode operar a uma velocidade relativamente constante enquanto o veículo é conduzido em diferentes velocidades. Tal comportamento é uma das vantagens dos VEHs, haja vista que os MCIs não costumam operar no seu ponto ótimo de operação em veículos convencionais (MI; MASRUR, 2017).

Na Tabela 5 é apresentada uma descrição das topologias que foram abordadas, com o intuito de compará-las mais facilmente e permitir uma análise de funcionamento mais precisa.

Tabela 5 Comparação das configurações dos VEHs

<b>Sistema</b>	<b>Tração</b>	<b>Energia</b>	<b>Frenagem Regenerativa</b>	<b>Do Gerador Para</b>
HS	ME	Gerador/Bateria	ME	ME/Bateria
HP	MCI/ME	MCI/Bateria	ME	-
HSP	MCI/ME	MCI/Gerador/Bateria	ME	ME/Bateria

Fonte: elaborado pelo autor

Uma possibilidade a ser considerada, no que diz respeito ao funcionamento dos sistemas híbridos, é a recarga das baterias de modo externo, topologia VEHP, através da conexão com a rede elétrica. Dessa forma, uma das vantagens seria permitir uma maior autonomia do veículo quando o mesmo está no modo puramente elétrico (sem uso do MCI). Em contrapartida, o sistema terá as mesmas desvantagens dos VEBs, como uma bateria de grandes dimensões, pesada e de custo mais elevado, bem como um longo tempo de recarga da mesma. Porém o peso total do veículo será menor que um VEB convencional, já que ele não depende apenas da bateria para se locomover (D'ANDRIA, 2007).

## 2.6 Graus de Hibridização

De acordo com (MAGALHÃES, 2014), os VEHs são caracterizados por diferentes graus de hibridização, de forma que há modelos que dependem mais de MCI e outros de ME. A classificação também pode ser alterada de acordo com o modo como o VEH é recarregado. Os quatro graus principais são: *Micro-Hybrid*, *Mild-Hybrid*, *Full-Hybrid* e o *Plug-in-Hybrid*. Na Tabela 6 são apresentados parâmetros de bateria para os diferentes tipos de graus de hibridização de VEHs.

Tabela 6: Funções disponíveis nos diferentes graus de hibridização de VEHs.

	<i>Micro-Hybrid</i>	<i>Mild-Hybrid</i>	<i>Full-Hybrid</i>	<i>Plug-in-Hybrid</i>
Desligamento no tempo ocioso	x	x	x	x
Assistência de conjugado elétrico		x	x	x
Frenagem regenerativa	x	x	x	x
Modo 100% elétrico			x	x
Recarga durante funcionamento			x	x
Recarga pela rede elétrica				x

Fonte: adaptado de (X-ENGINEER.ORG, 2017)

Na Tabela 7 é apresentada uma síntese dos pontos positivos e negativos de cada um dos tipos de graus de hibridização. A principal diferença entre eles é nos modos de tração, porém também é possível classificá-los segundo os seus critérios estruturais.

Tabela 7: Vantagens e desvantagens dos graus de hibridização

<b>Aspectos</b>	<b><i>Micro-Hybrid</i></b>	<b><i>Mild-Hybrid</i></b>	<b><i>Full-Hybrid</i></b>	<b><i>Plug-in-Hybrid</i></b>
<b>Positivos</b>	+ Integração simples com veículos convencionais + Custo reduzido	+ Suporte ao sistema primário de tração + Permite a função <i>boost</i> (assistência de conjugado elétrico) + Economia energética de até 15%	+ Economia energética de até 30% + Maior eficiência + Versatilidade operacional	+ Acrescenta função de recarregamento adicional externo da bateria
<b>Negativos</b>	- Apenas permite função de <i>start/stop</i> e frenagem regenerativa - Necessidade de baterias com elevado ciclo de vida	- Sistema de tração secundário não permite tração direta	- Elevado custo - Elevada complexidade	- Relação custo eficiência elevada - Necessidade de baterias grandes - Períodos de carregamento alto vs. autonomia pequena

Fonte: adaptado de (MAGALHÃES, 2014)

### 3 CICLOS DE CONDUÇÃO

Durante um trajeto, um condutor submete o seu veículo a diferentes situações, as quais podem ocorrer dentro de uma cidade, numa rodovia ou até mesmo em zonas rurais. É difícil saber com antecedência que tipo de trânsito e tráfego o mesmo encontrará em todas as circunstâncias. Seria possível realizar experimentos e equipar um veículo com sensores para monitoramento de velocidade e de conjugado, todavia, realizar tais procedimentos em todas as plataformas de veículos é simplesmente irrealista, se não impossível (MI; MASRUR, 2017).

Logo, segundo (MI; MASRUR, 2017), através de estudos de engenharia, foram desenvolvidas algumas situações limitadas, que permitem avaliar de modo aproximado os típicos perfis rodoviários e os terrenos normalmente encontrados. Usando-se alguns desses perfis, é possível criar ou sintetizar vários perfis de estrada arbitrários. Os quais podem envolver conduções em um ciclo urbano, rodoviário, terrenos com aclive ou declive, para citar alguns. Os ciclos de condução apenas fornecem o tempo e as flutuações de velocidade correspondentes, com a identificação - através de rótulos anexados aos mesmos - do tipo de ciclo, por exemplo, urbano ou rodoviário.

Com base nessas informações é possível então obter-se os dados relativos à característica velocidade-tempo, de forma a sintetizar muitos ciclos de condução típicos desempenhados pelo veículo. Tais gráficos estimam o uso do veículo na prática em relação à variação da velocidade ao longo do tempo durante diferentes tipos de percurso, determinando os seus períodos de aceleração e desaceleração. Supondo-se que se deseja estimar a economia de combustível de um determinado veículo X. Não é suficiente apenas afirmar que a potência que o veículo X atinge é 80 kW. Também é necessário enfatizar em qual tipo de ciclo ele será submetido, seja urbano, rodoviário ou até mesmo a combinação de ambos. A partir dessas considerações será possível uma comparação justa entre um veículo X e outro veículo Y. Portanto, ao se realizarem tais simulações, será possível compreender as necessidades de potência (motor) e de energia (bateria ou combustível) que o veículo demandará em média durante o seu uso (MI; MASRUR, 2017).



Em virtude da existência de diferentes tipos de ciclos de condução, o de um automóvel de passeio não pode ser comparado ao ciclo de um caminhão de lixo ou de um ônibus, uma vez que eles possuem comportamentos diferentes em relação a frenagens e arrancadas durante os seus trajetos (MI; MASRUR, 2017). De acordo com (MACIEL FILHO, 2013), que fez o levantamento de um ciclo de condução com ônibus em São Paulo, o desempenho de VCIs que foram homologados via ciclos padronizados não é o mesmo encontrado em situações reais no Brasil, pois ônibus trabalham em velocidades baixas e fazem muitas acelerações e desacelerações ao longo dos seus trajetos, dependendo da cidade.

Em (CARRARO et al., 2016) é analisado um projeto de otimização de uma ME para uso na tração de VEBs, considerando o uso em dois ciclos de condução diferentes, um urbano e outro suburbano. Os autores projetam duas máquinas, uma diferente por ciclo, tendo como objetivo investigar qual a melhor região de operação das MEs para cada um dos ciclos, ao invés de se realizar em um ou poucos pontos de operação, como é o habitual. Eles concluem que uma otimização global nos pontos de operação se mostrou a melhor alternativa para um aumento de desempenho nos ciclos de condução, sendo que os melhores resultados ocorreram nos pontos de alta velocidade das MEs, o que corrobora a importância desse tipo de análise.

Finalmente, é importante salientar que um ciclo de condução diz respeito ao perfil da estrada que um veículo percorrerá, portanto, é uma situação externa ao mesmo. Os ciclos podem ser classificados como modais, com dados obtidos de maneira teórica, e transitórios, caracterizados por dados reais adquiridos. A resposta de um veículo a um determinado ciclo de condução, em termos de economia de energia, será diferente de acordo com o tipo de veículo: um VCI regular, um VEB, um VEH, e assim por diante. Consequentemente, o sistema de tração utilizado no veículo é um parâmetro extremamente importante na avaliação com ciclos de condução (MI; MASRUR, 2017).

### **3.1 Ciclos de Condução Normatizados**

Cada país realiza, de acordo com as suas normas, os procedimentos padrões à homologação, certificação ou estimativa de emissões de poluentes, os quais podem variar significativamente entre diferentes regiões. Com relação aos

ciclos de condução, na norma SAE<sup>8</sup> J2711 é definido que os mesmos também podem ser tidos como referência para a avaliação de gastos energéticos com combustível. Para a determinação da variação da velocidade ao longo de um tempo pré-determinado, para os ciclos padronizados, se utilizam dinamômetros de chassi e é simulado o comportamento de um automóvel em diferentes condições de operação (ROSO, 2016).

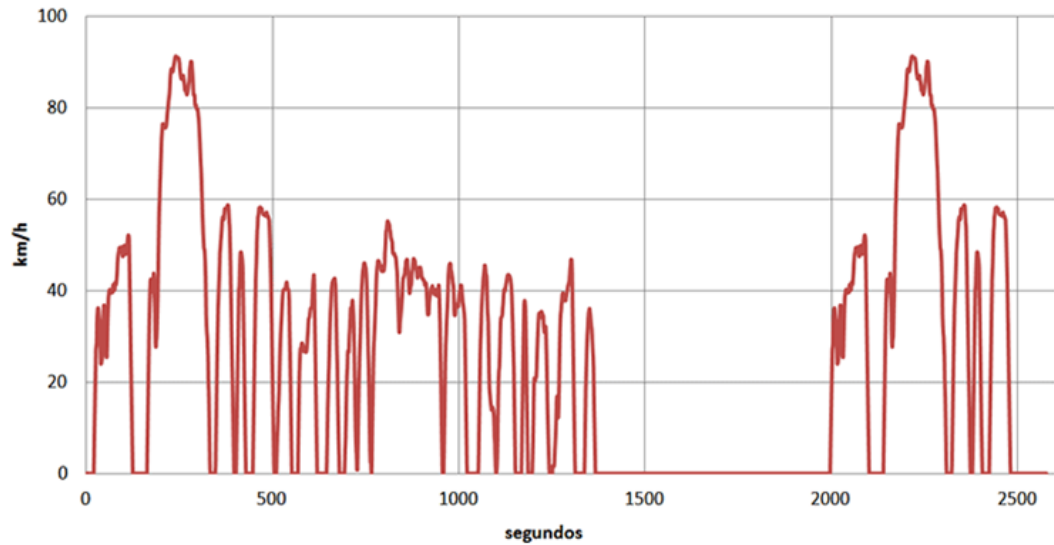
Entretanto, como uma infinidade de projetos de veículos possui distribuição global, os mesmos devem estar de acordo com a legislação local, bem como se submeterem aos métodos de teste de cada um dos países em que forem comercializados. Embora os procedimentos e métodos padrões possuam o mesmo objetivo fim, de avaliar a eficiência energética e as emissões de poluentes, os fabricantes possuem acréscimos nos custos para certificar os seus veículos em diferentes regulamentos de países e regiões (ARAÚJO, 2015).

Já no Brasil, de acordo com (MACIEL FILHO, 2013; ROSO, 2016), o órgão regulador responsável é a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), por meio do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Tal programa, junto com o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) usa os ciclos de condução norte-americanos US FTP-75, para testes de consumo e emissões em uso urbano, e HWFET, para consumo rodoviário, presentes nas normas da ABNT NBR 6601 e NBR 7024, respectivamente. Os ciclos adotados no Brasil são considerados transitórios, uma vez que são originários de dados reais gravados durante viagens na cidade de Los Angeles, Califórnia. Nos testes orientados pela ABNT, o veículo inicia o ciclo urbano (Figura 36) com motor frio, sendo o rodoviário (Figura 37) feito em seguida, portanto, com motor aquecido, utilizando-se um dinamômetro de chassi no ensaio. O objetivo geral do programa é estimular inovações e melhorias nos veículos, porém, com um enfoque maior em controlar o nível de poluentes emitidos por veículos novos.

---

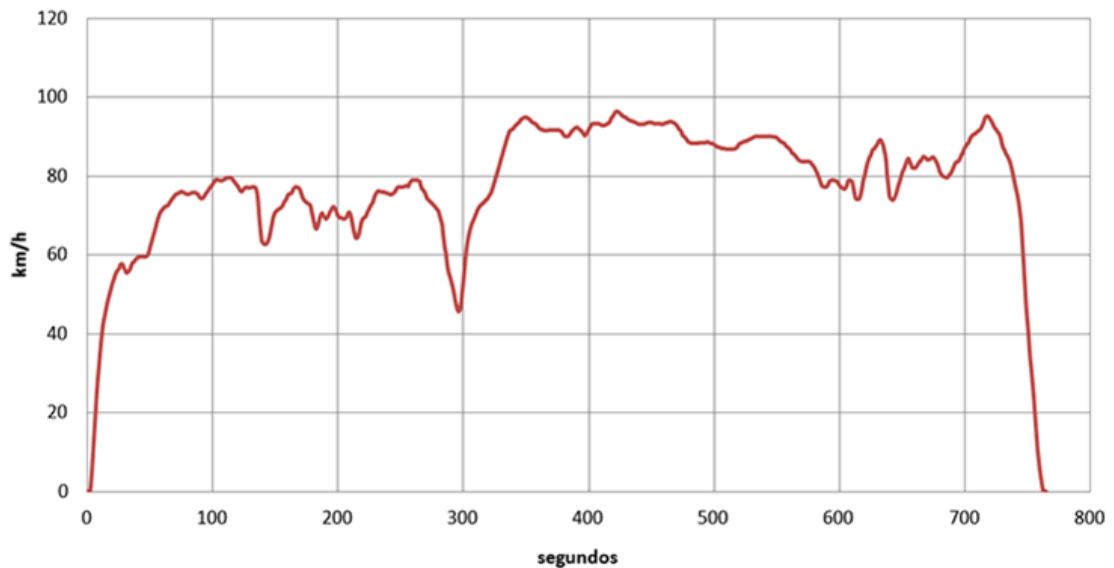
<sup>8</sup> *Society of Automotive Engineers*, Sociedade de Engenheiros Automotivos, é uma associação profissional internacional que, dentre outras atividades, desenvolve normas para profissionais de engenharia de várias indústrias, com ênfase na indústria de transportes, como automotiva, aeroespacial e de veículos comerciais.

Figura 36: Ciclo de Condução Urbano adotado no Brasil (FTP-75)



Fonte: (HOFFMANN, 2015)

Figura 37: Ciclo de Condução Rodoviário adotado no Brasil (HWFET)

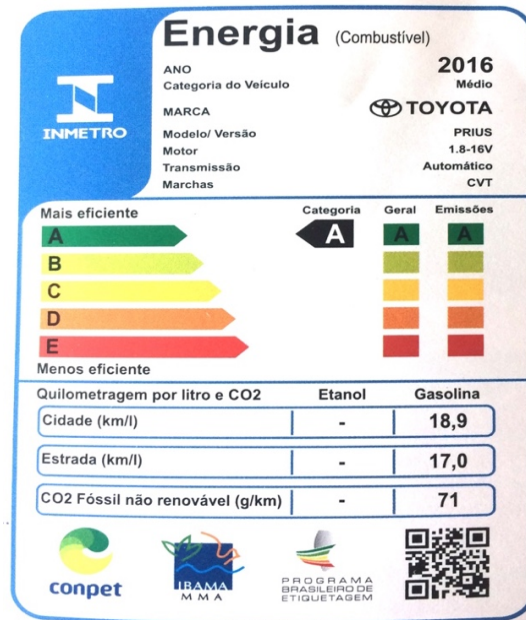


Fonte: (HOFFMANN, 2015)

De acordo com (ROSO, 2016), o PBEV conta com a participação voluntária de diversas montadoras que submetem seus veículos a testes para registros de consumo de combustível e emissões de poluentes. O programa oferece informações relevantes ao consumidor, que através da etiqueta PBEV (Figura 38) apresenta níveis de emissões e valores pontuais de consumo de combustível para diversos modelos de veículos. Com base nesses dados, incluindo o ciclo de

condução, comparações como a da Figura 39 permitem verificar a diferença de consumo e eficiência energética de VCIs e VEHs, por exemplo.

Figura 38: Etiqueta PBEV 2016 para o Toyota Prius



Fonte: (TOYOTA BRASIL, 2017a)

Figura 39: Comparativo de consumo e eficiência energética Prius e Corolla, Toyota

## CONSUMO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA



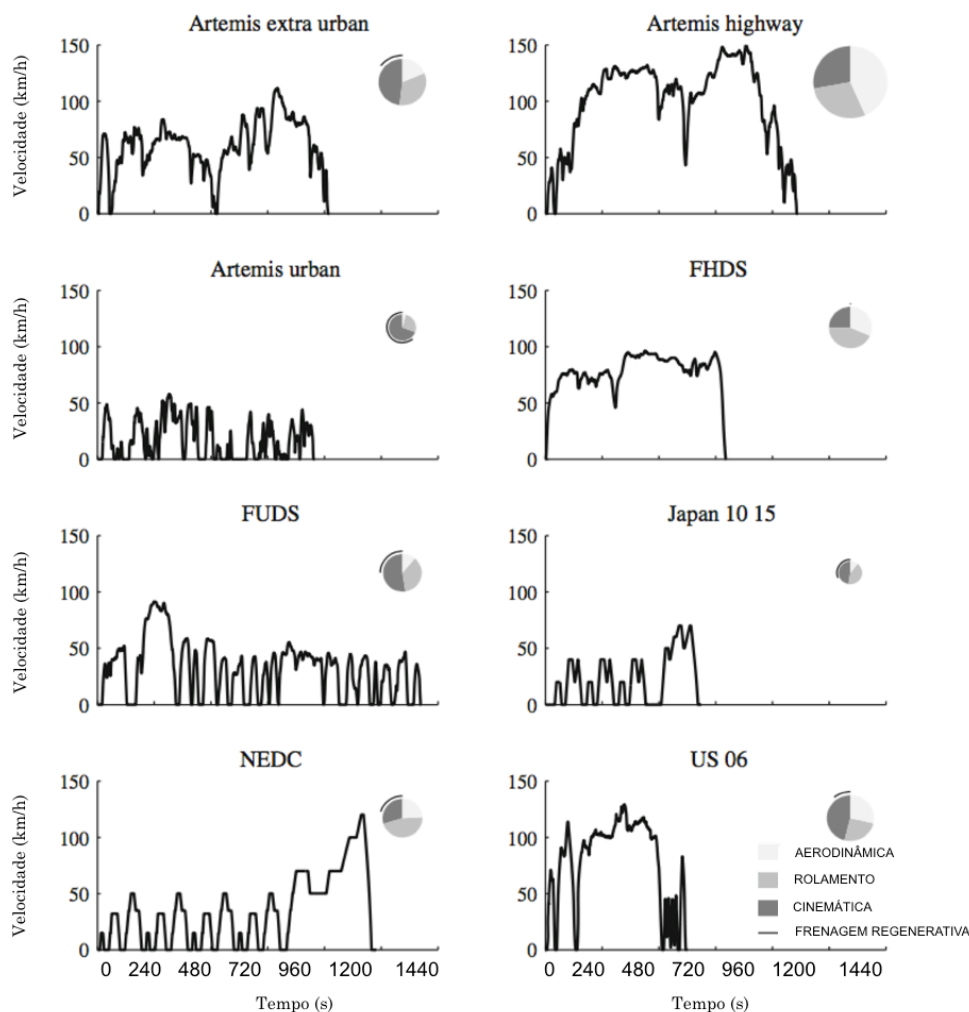
		<b>PRIUS</b>	<b>COROLLA</b>
MOTOR		<b>1.8-16V</b>	2.0-16V
TRANSMISSÃO		<b>AUTOMÁTICO</b>	AUTOMÁTICO
AR-CONDICIONADO		<b>SIM</b>	SIM
DIREÇÃO ASSISTIDA		<b>ELETRASSISTIDA</b>	ELETRASSISTIDA PROGRESSIVA
PNEUS		<b>195/65</b>	215/50 R17
COMBUSTÍVEL		<b>GASOLINA</b>	ETANOL / GASOLINA
GÁS EFEITO ESTUFA/GASOLINA	CO2 Fóssil	<b>71</b>	118
CONSUMO KM/L GASOLINA	Cidade	<b>18,9</b>	10,6
	Estrada	<b>17,0</b>	12,6
CONSUMO ENERGÉTICO (MEGA JOULE/KM)		<b>1,15 MJ/KM</b>	1,92 MJ/KM
CLASSIFICAÇÃO PBE	Comparação Relativa Categoria	<b>A</b>	A
	Comparação Absoluta Geral	<b>A</b>	B
SELO CONPET		<b>SIM</b>	SIM

Fonte: (TOYOTA BRASIL, 2017b)

Esses ciclos de condução americanos apresentados até então são projetados para representar condições de condução urbanas e rodoviárias. Exemplos de outros ciclos padronizados são mostrados na Figura 40, na qual também estão inclusos uma comparação básica da análise energética. O gráfico de pizza mostra a quantidade relativa dos termos de energia cinética, aerodinâmica, de rolamento, como também a quantia de energia cinética que pode ser recuperada de acordo com (4). A área da pizza é proporcional à energia total do ciclo definida por (3). As energias foram calculadas com os dados de um VEH usado pelo autor e disponibilizado pelo mesmo. O ciclo japonês 10-15 e o europeu NEDC possuem dados sintéticos, i.e. são ciclos modais, enquanto os outros reproduzem medidas de velocidade de veículos em estradas reais, i.e. são transitórios. Entretanto, à exceção do US 06, os níveis de aceleração estão consideravelmente abaixo da capacidade de carros mais modernos, o que resulta em consumos de combustível muito otimistas e incapazes de reproduzir condições de condução do mundo real (ONORI et al., 2016).

Ainda, segundo (ONORI et al., 2016), os ciclos normatizados devem ser considerados uma ferramenta de comparação padronizada e não uma representação fiel das condições de operação reais. De fato, não é possível calcular como um veículo será conduzido, uma vez que cada veículo possui um padrão de uso diferente e cada motorista, um estilo de direção. Assim, fabricantes de automóveis devem desenvolver seus próprios ciclos de condução para estimativas mais realistas do consumo energético em condições reais para um veículo específico.

Figura 40: Alguns exemplos de ciclos de condução padronizados. O gráfico de pizza simboliza o consumo energético proporcional a cada ciclo.



Fonte: adaptado de (ONORI et al., 2016)

A partir da crescente demanda por normas mais realistas, dada a divergência entre ciclos normatizados modais e transitórios locais, foi criado em 2007 e entrou em vigor em 2017 um procedimento padronizado de teste para veículos leves, denominado WLTP<sup>9</sup>. As orientações para o procedimento de testes são rígidas em aspectos como: condições de teste no dinamômetro, peso total do veículo (passageiros, equipamentos extras e cargas), tipo de carga da estrada (forças contrárias ao movimento natural do veículo), qualidade do combustível utilizado, condições de temperatura do ambiente e pressão do pneu utilizado (ARAÚJO, 2015).

<sup>9</sup> O *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (WLTP)*, foi fruto de um grupo informal criado a partir do Fórum Mundial para a Padronização das Regulamentações de Veículos da Comissão Econômica das Nações Unidas (UNECE).

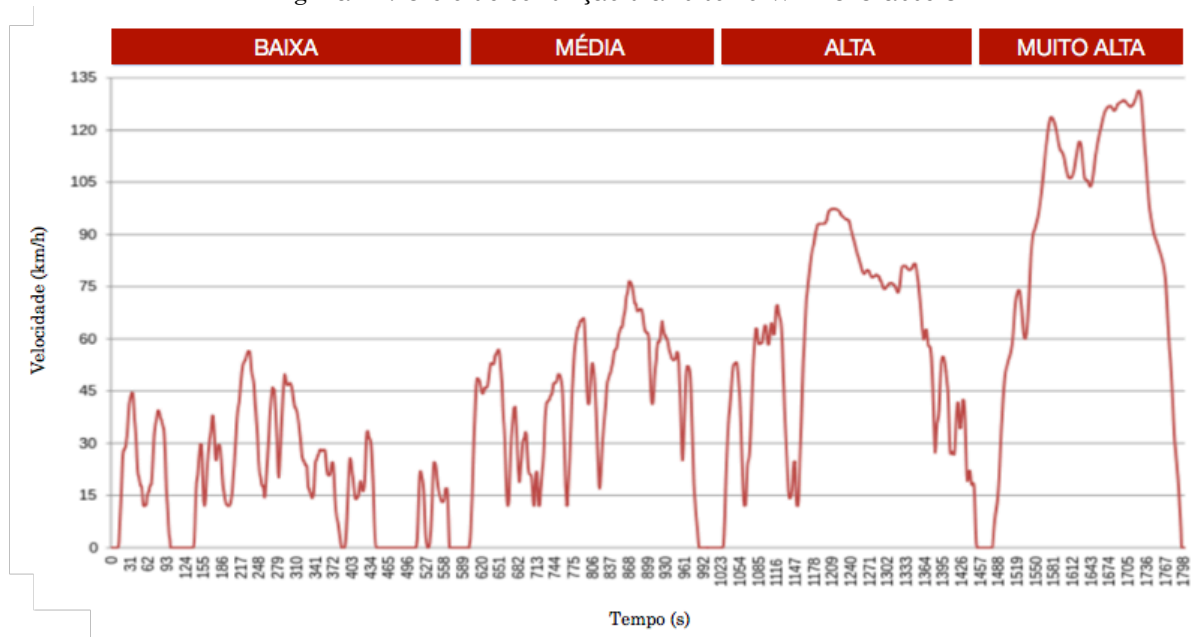
O procedimento de teste para o WLTP é o ciclo de condução WLTC (*World harmonized Light vehicles Test Cycle*), que corresponde ao ciclo de testes padronizados para veículos leves. Existem três tipos de ciclos de teste WLTC que são utilizados e que dependem da classe do veículo que será testado. As classes de veículos são definidas pela razão entre a potência e a massa do veículo, isto é, PMR em kW/t:

- **Classe 1** – veículos de baixa potência  $PMR \leq 22$ ;
- **Classe 2** – veículos com  $22 < PMR \leq 34$ ;
- **Classe 3** – veículos de alta potência com  $PMR > 34$ .

Diferentes períodos de condução são desenvolvidos em cada classe com o intuito de representar o modo de funcionamento do veículo em estradas urbanas, estradas nacionais e autoestradas. Os períodos possuem duração fixa em cada classe, todavia os valores de aceleração e curvas de velocidade se ajustam de forma diferente. Cada estágio ainda possui restrições de velocidade máxima do veículo. Também é previsto no procedimento de testes do WLTP um algoritmo para calcular os pontos ótimos de troca de marcha do veículo durante o trajeto (ARAÚJO, 2015).

O autor (ARAÚJO, 2015) também explica que o ciclo de condução WLTC para a classe 3 de veículos, Figura 41, é dividido em quatro períodos: *Low*, *Medium*, *High* e *Extra High Speed* (Velocidade Baixa, Média, Alta e Muito Alta, respectivamente). Para veículos testados que não alcancem a velocidade de 135 km/h, o período de *Extra High Speed* deve ser alterado para o período de *Low Speed*. As principais características da classe 3 do ciclo WLTC estão presentes na Tabela 8. As demais classes não serão apresentadas, uma vez que aquela que possui maior relevância para o estudo desenvolvido é a classe 3.

Figura 41: Ciclo de condução transitório WLTC Classe 3



Fonte: adaptado de (ARAÚJO, 2015)

Tabela 8: Características do ciclo WLTC Classe 3

	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	Total
Duração (s)	589	433	455	323	1800
Duração das paragens (s)	156	48	31	7	242
Distância (km)	3,095	4,756	7,158	8,254	23,262
Velocidade Média sem paradas (km/h)	25,3	44,5	60,7	94,0	53,5
Velocidade Média com paradas (km/h)	18,9	39,4	56,5	91,7	46,5
Velocidade máxima (km/h)	56,5	76,6	97,4	131,3	-
Aceleração máxima (m/s <sup>2</sup> )	1,6	1,6	1,7	1,1	-

Fonte: adaptado de (ARAÚJO, 2015)

O WLTP também contempla disposições especiais para o teste de várias categorias de veículos híbridos e elétricos: VEHPs, com carregamento externo de bateria e VEHs, que não possuem carregamento externo; e VEBs, puramente elétricos. VEHPs, VEHs e VEBs são classificados como classe 3 de veículos para o ciclo, dependendo da PMR. A quantidade de emissões e os valores de outros parâmetros são testados para a classe 3 (dependendo da velocidade máxima alcançada), em ambos os modos de redução e de manutenção de carga da bateria. Além disso, alguns parâmetros são testados em ciclos urbanos do WLTC, compostos somente pelas faixas de baixa e média velocidade (DIESELNET, 2017).



Como pode ser visto no projeto de um protótipo de veículo elétrico leve com motores *in-wheel*, em (FURTADO, 2016), o uso de dois ciclos urbanos normatizados diferentes, um modal e outro transitório, permite estimar como será o comportamento do veículo com 2 ou 4 máquinas *in-wheel*, de forma a avaliar se as configurações necessitarão de ajustes no projeto para que o VEB tenha bateria suficiente para o uso durante um determinado trajeto, por exemplo. A partir das simulações com os diferentes ciclos, o autor conclui que há diferença na autonomia da bateria entre o ciclo transitório e o modal. De forma que no ciclo transitório a diferença de autonomia entre a configuração de 2 para 4 motores *in-wheel* é maior em relação ao ciclo modal. Isso demonstra a importância de simulações com ciclos de condução baseados em dados reais, embora para ambos os ciclos e configurações a bateria projetada consiga suprir as necessidades de um veículo leve em uma região urbana.

### **3.2 Metodologias para Levantamento de Ciclos de Condução Baseados em Dados Reais**

Aqueles que projetam e avaliam carros híbridos e elétricos estão frequentemente preocupados com o consumo de energia em favor da otimização do sistema de tração do veículo, reduzindo emissões, reduzindo custos e melhorando o desempenho geral do carro. Elementos como motores elétricos, baterias, engrenagens planetárias, motores, pneus e rodas possuem modelos matemáticos e numéricos confiáveis apresentados na literatura. Entretanto, os ciclos de condução de veículos não são bem modelados, de forma a comprometer a avaliação virtual e real dos carros. Existem alguns ciclos de condução padronizados, como os já citados, NEDC, Artemis, 10-15, FTP-75 e WLTC. Embora haja uma tendência em aplicar os ciclos de condução transitórios, eles não representam comportamentos de condução locais (TIETGE et al., 2017).

Ao se executar simulações computacionais ou mesmo testes de dinamômetro de chassi, a maioria das variáveis médias é definida à conveniência do usuário. É fácil inferir que esses resultados não consideram adequadamente o perfil da estrada, as condições climáticas, a elevação da pista do trajeto, a qualidade do sistema de fornecimento de energia, o tráfego usual, os hábitos do motorista e outros parâmetros importantes (FONTARAS; CIUFFO; et al., 2017).

Em virtude desses fatores, diversos trabalhos foram publicados para suprir essa demanda, desenvolvendo-se ciclos de condução locais para cidades como Montreal, no Canadá (SEERS et al., 2015; NOURI; MORENCY, 2017), Dublin, na Irlanda (BRADY; O'MAHONY, 2016), Aleppo, na Síria (ACHOUR; OLABI, 2016), Hong Kong, na China (HUNG et al., 2007), Campinas (ECKERT, 2013) e Santa Maria (ROSO, 2016), ambos no Brasil.

Um ciclo de condução, segundo (BERZI et al., 2014, 2016), através do projeto ASTERICS<sup>10</sup>, é o resultado de um procedimento padronizado focado na avaliação da performance de um veículo e na reprodutibilidade de um trajeto sob condições de teste. O seu sinal principal de entrada é a relação velocidade-tempo do veículo, sendo o teste significativo caso o ciclo de condução represente o uso típico do veículo. O ciclo de condução pode ser obtido a partir da leitura e análise de dados medidos. Mesmo que um grande número de ciclos de condução esteja disponível na literatura e nas normas de regulamentação de veículos, ainda existem fortes razões para o desenvolvimento de novos ciclos, tais como:

- Variações significativas nos padrões de condução podem às vezes ser identificados em uma escala local;
- Os veículos que possuem tração elétrica podem induzir um padrão de condução diferente daqueles adotados em veículos convencionais pelos mesmos usuários;
- A capacidade de frenagem regenerativa pode modificar o estilo de condução do usuário, influenciando significativamente no consumo de energia do veículo, tanto em VEBs como em VEHs.

O projeto ASTERICS tinha como objetivo a identificação de ciclos de condução baseados em condições do mundo real, resultando no desenvolvimento de metodologias de testes avançados para preencher automaticamente os modelos de simulação de componentes de VEBs, como bateria, inversor e ME. Além disso, conseguiria executar procedimentos para avaliar e prever o desgaste acelerado destes componentes através da redução do tempo de teste. Assim, poderia desenvolver modelos precisos de alta fidelidade dos componentes essenciais de

---

<sup>10</sup> ASTERICS, simulação e testes de eficiência e obsolescência em condições reais para componentes e sistemas inovadores de veículos elétricos, é um projeto financiado pela Comissão Européia no âmbito do Sétimo Programa para Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico.

um VEB. Ao final, realizaria a integração e validação dos modelos do sistema em bancadas de ensaio, conforme ilustrado na Figura 42. Com parcerias entre a iniciativa privada, universidades e governos, foi possível a realização de um projeto que tem contribuído para melhorar as ferramentas de modelagem e teste que serão a base para o desenvolvimento de VEBs, isto é, veículos puramente elétricos (PFLUEGL et al., 2015).

Figura 42: Objetivos do projeto ASTERICS para ciclos de condução baseados em dados reais para avaliação de VEs



Fonte: Adaptado de (BERZI et al., 2014)

A literatura recente propõe novos tipos de ciclos com diferentes enfoques através da utilização de uma grande quantidade de dados de condução em vez de ciclos puramente sintéticos como pode ser visto em (BRADY; O'MAHONY, 2016). Neste trabalho, sete VEBs, modelo Mitsubishi iMiEV, foram usados por funcionários da ESB (*Electric Suply Board*), companhia de eletricidade irlandesa, na região da grande Dublin por 6 meses, registrando 1485 repetições. Na Figura 43 pode ser visto o mapa da região com os dados coletados do trabalho citado, evidenciando assim a importância de um banco de dados de viagens do mundo real para VEs.

Figura 43: Mapa da região com trajetos realizados para aquisição de dados e criação de ciclo de condução na Grande Dublin, Irlanda



Fonte: (BRADY; O'MAHONY, 2016)

### 3.3 Etapas para o Desenvolvimento de Ciclos de Condução Baseados em Dados Reais

As metodologias para o desenvolvimento de ciclos de condução baseados em dados reais divergem muito em relação às normas e variam de acordo com o objetivo fim do levantamento dos mesmos. A quantidade de repetições das aquisições pode estar relacionada ao tipo de ciclo que se deseja avaliar: urbano, suburbano, rodoviário ou rural.

Porém, qualquer processo para a definição de um ciclo de condução é baseado nas seguintes etapas, segundo (BERZI et al., 2014; PFLUEGL et al., 2015):

- 1) Aquisição de dados de trajeto/veículo em um contexto pré-definido;
- 2) Pré-processamento de dados e preparação para análise:
  - Avaliação de pontos fora da curva que devem ser descartados;
  - Filtragem;
- 3) Processamento de dados:
  - Cálculo de parâmetros cinemáticos;

- Análise de Distribuição de Probabilidade de Aceleração de Velocidade (SAPD<sup>11</sup>).
- Reconhecimento e agrupamento em viagens/microviagens;

#### 4) Síntese do ciclo:

- Definição de condições iniciais e finais;
- Seleção de dados / aleatorização;
- Verificação;

#### 5) Proposta de dados adicionais:

- Dependência de trajetos com inclinação;
- Consumo de equipamentos auxiliares (e. g., ar-condicionado);
- Informação ambiental.

No programa ASTERICS, conforme (PFLUEGL et al., 2015), foram realizados 3 estudos de casos em diferentes cidades (Turim e Florença na Itália, e Lion, na França), com o intuito de avaliar diferentes condições de condução para o uso de VEBs e VEHs. Em ambos os estudos foram desenvolvidas novas metodologias para processamentos de dados experimentais, estabelecendo comparações entre os diferentes veículos e contextos.

Um dos trabalhos resultantes do programa, (BERZI et al., 2016), realizou a aquisição de dados em Florença, com uma pequena frota de VEBs. Uma das particularidades do estudo é que, devido ao contexto da cidade, apenas VEBs, por lei, podem trafegar em regiões centrais da cidade. De forma que se desenvolveu um ciclo de condução considerando tais regiões inacessíveis para VCIs, com dados oriundos de VEBs. No qual se conclui que os ciclos baseados em dados reais gerados são muito mais exigentes de que os normatizados, como o NEDC. Abaixo estão exemplos de parâmetros utilizados para descrever um ciclo de condução:

- Tempo (duração, % em aceleração, % em cruzeiro...)
- Velocidade (velocidade média, velocidade média em movimento...)
- Aceleração (aceleração média positiva/negativa...)
- Paradas (paradas/km, distância média entre as paradas...)
- Dinâmica (aceleração positiva relativa, energia cinética positiva...)

---

<sup>11</sup> SAPD, *Speed Acceleration Probability Distribution* ou Distribuição Probabilística de Aceleração e Velocidade, método estatístico muito utilizado na avaliação de ciclos de condução.

- Dados de Distribuição: distribuição de velocidade e SAPD.

Para (PFLUEGL et al., 2015), o processo de síntese dos dados reais adquiridos de um ciclo de condução é geralmente dividido em três estágios principais:

- A partir da base de dados disponível das sequências de condução e dos parâmetros cinemáticos associados, uma série de microviagens (sinal de velocidade entre dois pontos de parada), ou outro tipo de segmentação, é randomicamente selecionada de acordo com as características desejadas dos ciclos (proporção representativa para cada classe de veículos);
- As sequências selecionadas são "coladas" de acordo com os critérios de "correspondência" ou a coerência em termos de velocidade final do segmento anterior com a do segmento posterior; e. g., para microviagens, que estão entre dois pontos de parada, a velocidade é zero;
- Quando o critério de duração do percurso escolhido foi alcançado, é realizada uma verificação da representatividade do ciclo.

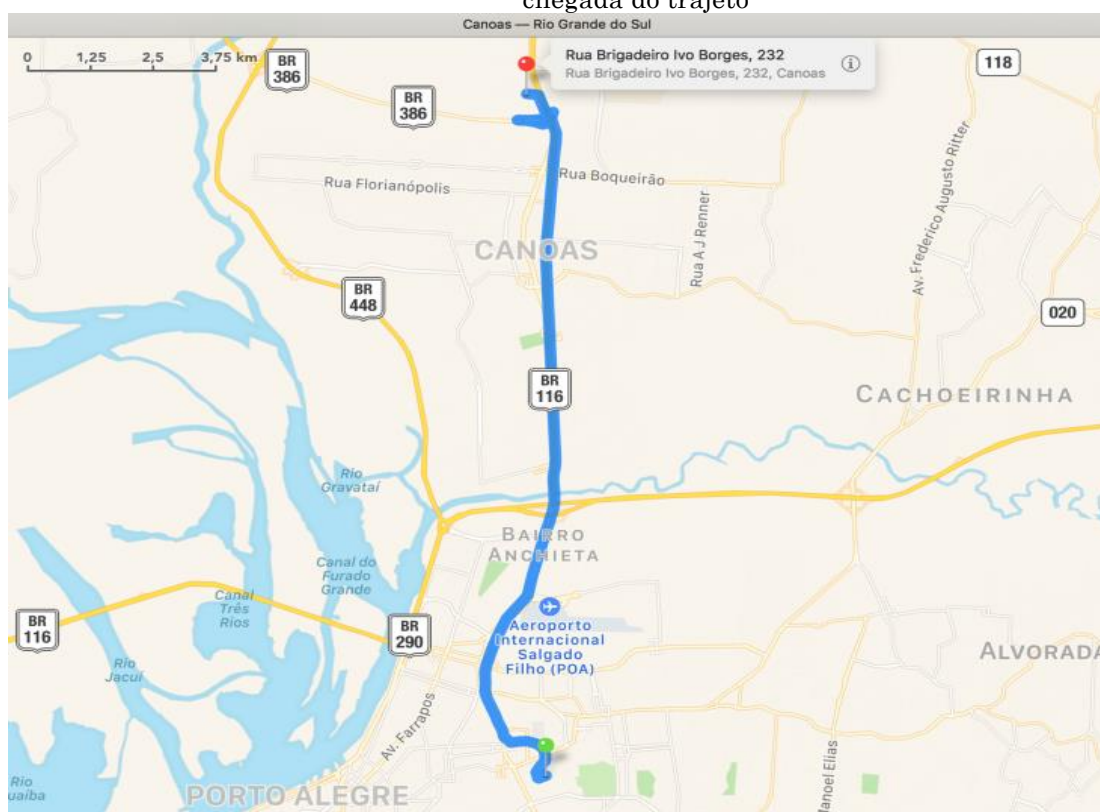
Dentro da atividade de pesquisa, o processamento de dados ainda está em desenvolvimento e, em particular, a comparação dentro de cada conjunto de dados (para diferentes veículos, contextos e objetivos) deve ser realizada. Para validação, são necessárias comparações entre o conjunto original de dados e uma versão preliminar do ciclo de condução sintético. Avaliam-se então os desvios de valores entre os dados, verificando-se o grau de fidelidade entre o ciclo adquirido e o gerado, de forma que os procedimentos podem ser repetidos utilizando-se outros critérios e valores conforme necessário (PFLUEGL et al., 2015).

#### 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Embora resultados mais consistentes sejam alcançados após diversas repetições e longos períodos de tempo de aquisição, esse projeto teve como propósito o desenvolvimento de uma metodologia factível para o contexto da Grande Porto Alegre, se restringindo aos prazos e recursos disponíveis. Para a aquisição de dados foi escolhido um trajeto que abrange pontos de grande fluxo em Porto Alegre e na sua região metropolitana, de forma a representar os hábitos de deslocamento da população dessas áreas, tanto de trabalhadores como de estudantes.

A rota analisada para o ciclo de condução está ilustrada na Figura 44. Ela abrange uma distância de aproximadamente 19 km de um bairro central na cidade de Porto Alegre até o município de Canoas, localizado na região metropolitana da capital gaúcha. Nesse trajeto suburbano estão compreendidas diferentes condições de condução: tráfego urbano em ruas residenciais e de grande fluxo, tráfego rodoviário e trechos com planos inclinados.

Figura 44: Mapa da rota percorrida, a marcação verde é o ponto inicial e a vermelha, o ponto de chegada do trajeto



Fonte: elaborado pelo autor

Para este propósito, um veículo Volkswagen Gol 2010 (ANEXO B) foi equipado usando um dispositivo comercial de aquisição de dados com protocolo CAN<sup>12</sup> com uma taxa de amostragem de 20 Hz (uma amostra a cada 0,05 s) e com GPS para registrar flutuações de velocidade ao longo do tempo. O motorista não alterou a sua rotina diária ao longo da semana e enviou os dados após o período de aquisição. Cabe ressaltar que devido a esse fato algumas viagens menores foram descartadas, pois não apresentavam um número significativo de repetições. A metodologia que será apresentada para a criação do ciclo de condução baseado em dados reais foi fundamentada em (BERZI et al., 2014; PFLUEGL et al., 2015), a qual foi apresentada na seção 3.3.

A rota definida foi repetida 14 vezes em nove dias diferentes, antes e depois de horários comerciais, totalizando por volta de 5,8 horas de dados registrados. Estas e outras informações relevantes estão resumidas na Tabela 9.

Tabela 9: Informações sobre dados adquiridos no trajeto

<b>Coordenadas do ponto de partida</b> Rua Anita Garibaldi, 1775, Porto Alegre, Brasil	-30.023870, -51.177949
<b>Coordenadas do ponto de chegada</b> Rua Brigadeiro Ivo Borges, 232, Canoas, Brasil	-29.888201, -51.181908
<b>Taxa de aquisição dos dados</b>	20 Hz
<b>Distância total (aproximada)</b>	19 km
<b>Número de repetições do trajeto</b>	14
<b>Tempo de dados adquiridos</b>	5,8 h

Fonte: elaborado pelo autor através do *software* Mapas©

#### 4.1 Aquisição de Dados

As amostras foram obtidas se conectando o dispositivo de aquisição de dados (*dash logger*),

Figura 45a, através da porta OBD-II<sup>13</sup> do veículo (exemplo na Figura 46), que é um conector de diagnóstico padrão que permite a leitura de diferentes UCEs do mesmo e a aquisição dos dados destes parâmetros. Cabe ressaltar que

<sup>12</sup> *Control Area Network* - Protocolo de comunicação em série desenvolvido por Roberto Bosh e muito utilizado na indústria automotiva (DIEGUES, 2014).

<sup>13</sup> *On Board Diagnostic II* - Sistema padrão de 2ª geração de autodiagnóstico de veículos (TRIEBEL et al., 2009).



os dados de interesse para o estudo (velocidade e tempo) foram adquiridos a partir de canais oriundos do sinal da antena de GPS do dispositivo,

Figura 45b, que fora fixado no veículo. Além disso, o dispositivo utilizado (ANEXO A) é voltado para veículos de corrida e competição, o qual é adequado para o objetivo fim do estudo.

Figura 45: (a) *Dash logger*, modelo TDL 4.3, e (b) Antena de GPS. Ambos dispositivos da Pro Tune



Fonte: adaptado de (PRO TUNE SISTEMAS ELETRÔNICOS LTDA, 2015a)

Figura 46: Exemplo de conexão entre dispositivo de aquisição de dados (círculo vermelho) e a porta de comunicação (círculo verde) em um veículo Toyota Prius.



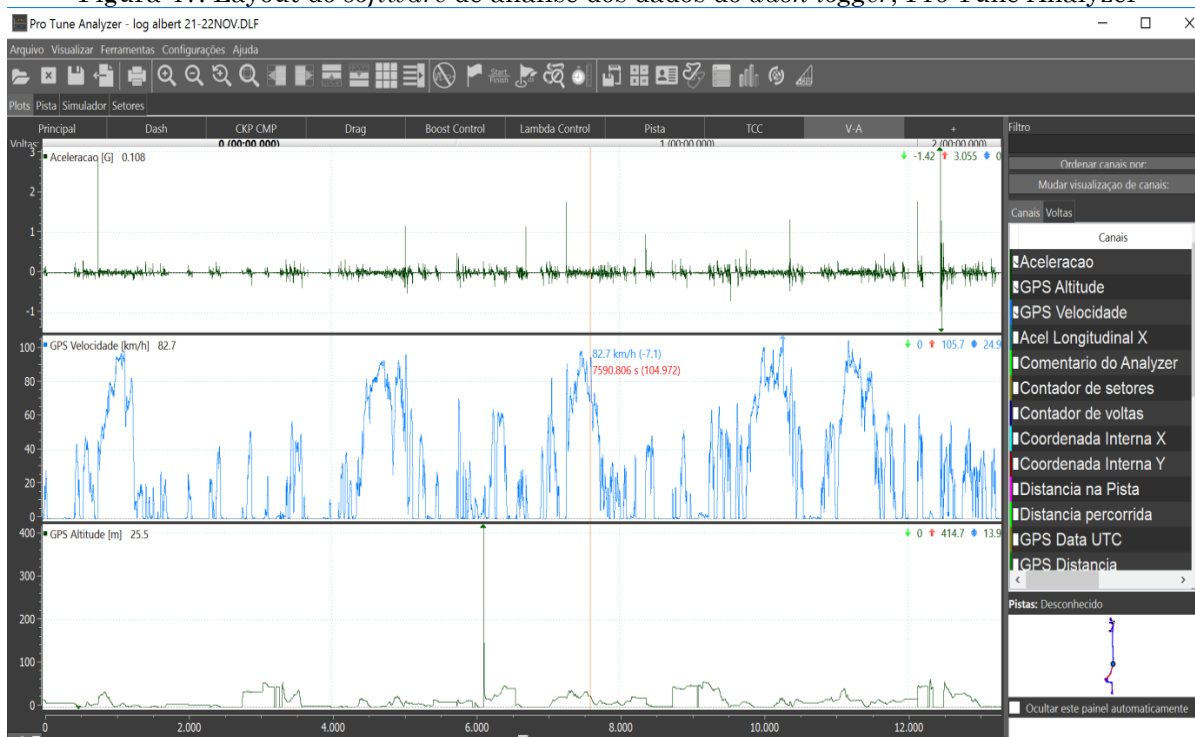
Fonte: adaptado de (TRIEBEL et al., 2009)

## 4.2 Pré-Processamento de Dados e Preparação para Análise

Os ciclos de condução de modo geral são voltados à avaliação de VCIs, visando um estudo das emissões de poluentes. Todavia, um ciclo direcionado a VEBs e VEHs permite a real análise do comportamento e da eficiência desses sistemas de tração. Na metodologia que será apresentada, as amostras que continham velocidades iguais a zero foram descartadas. Uma vez que esse levantamento de dados visa evidenciar outros parâmetros de comparação relacionados aos VEBs e VEHs, os quais, quando estão parados, desligam o motor, o que, conseqüentemente, graças a complexos sistemas de controle, aprimora o seu sistema de consumo. Enfatiza-se que um VEH também emite gases poluentes, quando está em movimento e usando a tração térmica ou combinada com a elétrica, ainda que em menor quantidade frente aos VCIs.

Uma vez adquiridos, transmitidos e recebidos os dados das viagens, eles foram abertos e estudados no *software* de análise de dados do fabricante do *dash logger*, Pro Tune Analyzer. Nesse, era possível se fazer a leitura de diferentes canais e parâmetros do veículo, conforme pode ser observado na Figura 47.

Figura 47: Layout do *software* de análise dos dados do *dash logger*, Pro Tune Analyzer



Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados, então, foram exportados no formato padrão .csv para o *software* Microsoft Excel. Realizou-se a filtragem de dados com a análise dos mesmos em conjunto com o *software* Pro Tune Analyzer, de forma a se verificar quais trajetos correspondiam ao pretendido através dos mapas de traçado dos trajetos, dos canais do GPS, como tempo, hora, latitude e longitude. Após o descarte dos trajetos secundários, foram descartados os dados de velocidade de valor zero, conforme explicado no início da presente seção.

### 4.3 Processamento dos Dados e Síntese do Ciclo

Baseando-se no ciclo de condução normatizado WLTC classe 3, os dados de velocidade adquiridos foram divididos em 3 estágios: baixa, média e alta velocidade. As velocidades máximas em cada estágio são, 29,9 km/h, 59,9 km/h e 103,4 km/h, respectivamente, que correspondem a velocidades usuais em cada trecho de um deslocamento que envolve ambientes urbano residencial, urbano com vias rápidas e rodoviário. Embora, no WLTC classe 3, a velocidade máxima do estágio de altas velocidades seja de 97,4 km/h, a média das velocidades máximas das 14 repetições foi de 103,4 km/h, então esse valor foi adotado.

Para criar um ciclo de condução de 1800 s, isto é, 30 min, o tempo total foi segmentado em três estágios, de modo proporcional ao número de amostras de cada estágio de velocidade, resultando em 778,5 s para estágios de baixa velocidade, 446,0 s para estágios de velocidade média e 575,5 s para estágios de alta velocidade. A duração média das 14 viagens foi de 1486 s, sendo que a classe 3 do WLTC adota 1800 s. O ciclo de condução foi criado aleatoriamente com velocidade média de 9,3 km/h no estágio de baixa velocidade, 43,8 km/h no estágio de velocidade média e 81,3 km/h para estágio de alta velocidade, levando em consideração o vetor de diferença de velocidades entre pontos subsequentes dos dados adquiridos.

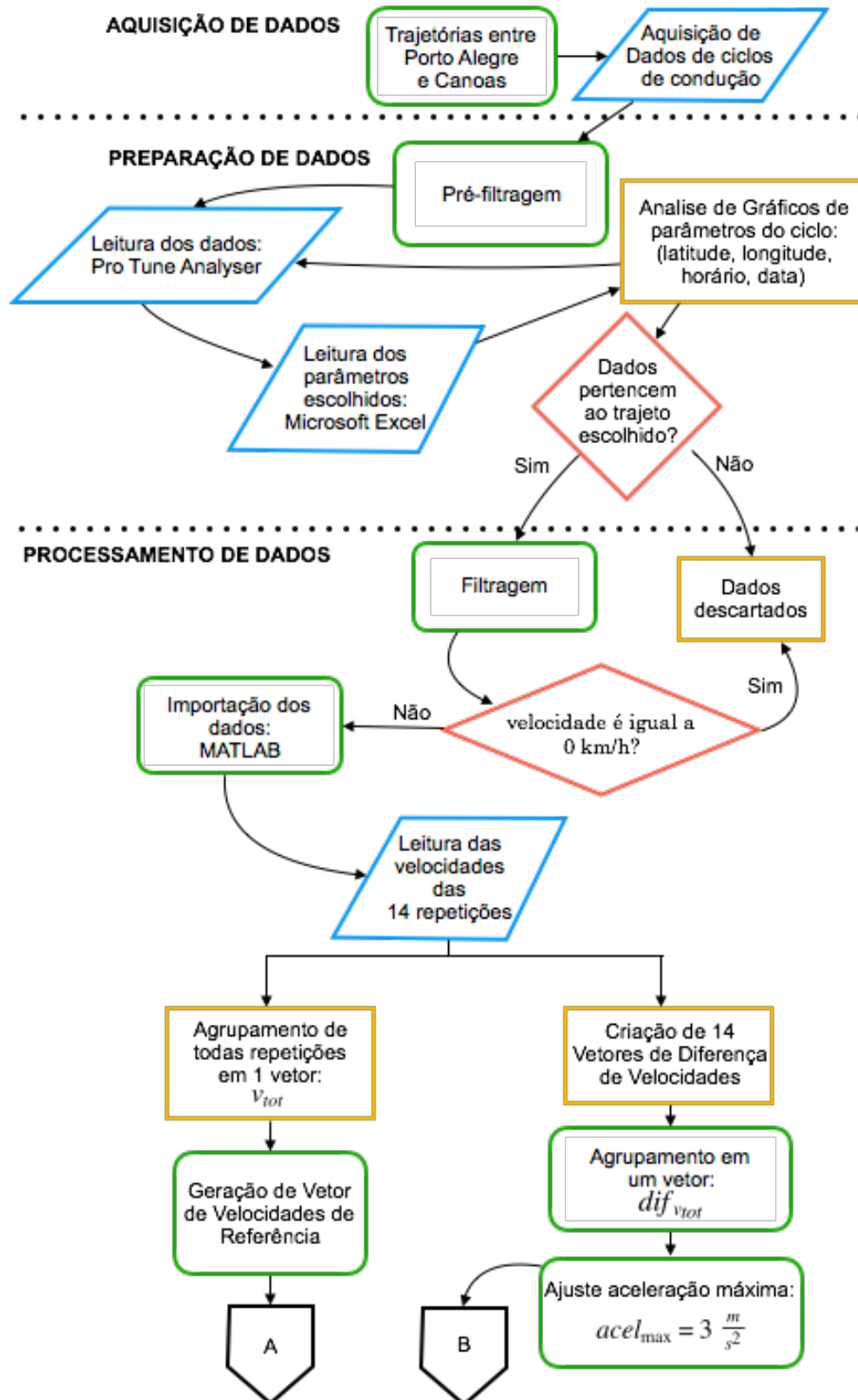
Nas fronteiras das diferentes faixas de velocidades e no início e fim do ciclo se usaram funções para suavizar as transições entre pontos subsequentes, visando maior coerência para o trajeto que um veículo desempenhará no mesmo. Tal tratamento foi feito com valores de acelerações e desacelerações compatíveis com cada uma das 3 faixas, como pode ser visto em (LARMINIE; LOWRY, 2012).

O ciclo originado foi denominado *Porto Alegre Suburban Driving Cycle* (PoA SDC), de forma a identificá-lo mais facilmente a nível mundial.

Para verificação dos resultados obtidos, comparações com o WLTC classe 3 foram feitas. Também se repetiram os ajustes após a realização de simulações com modelos de VEBs e VEHs na plataforma Simulink/Simscape do *software* MATLAB®, conforme será abordado no Capítulo 5. Todos os passos realizados para a criação do ciclo de condução seguem abaixo:

- Procedimentos de aquisição de dados, preparação de dados e primeira parte de processamento de dados, ilustrados no fluxograma da Figura 48:
  - Aquisição de dados de ciclo de condução através do *dash logger* da Pro Tune durante trajetos entre Porto Alegre e Canoas;
  - Análise dos dados obtidos utilizando o *software* Pro Tune Analyzer;
  - Importação dos dados das viagens para o *software* Microsoft Excel;
  - Organização dos dados de velocidade relativos ao trajeto escolhido (considerando os parâmetros de latitude, longitude, data e horário), visualizando os gráficos e os valores dos dados adquiridos através do Pro Tune Analyzer;
  - Descarte de velocidades nulas em cada repetição (critério pré-definido);
  - Exportação dos dados para o *software* MATLAB®;
  - Leitura dos dados de velocidade de cada repetição;
  - Geração de vetores com diferenças de velocidades entre os pontos de velocidade adquiridos sequencialmente a partir dos dados de velocidade de cada uma das 14 viagens;
  - Agrupamento dos dados de diferenças de velocidades de ida e volta das repetições do trajeto, resultando no vetor  $dif_{v_{tot}}$ ;
  - Agrupamento dos dados de velocidades de ida e volta das repetições;
  - Ajuste para que a aceleração máxima entre dois pontos consecutivos seja de no máximo  $3 \text{ m/s}^2$  no ciclo que será gerado. Esse valor foi definido a partir da sua observação de ocorrência nas amostras, através do *software* Pro Tune Analyzer.

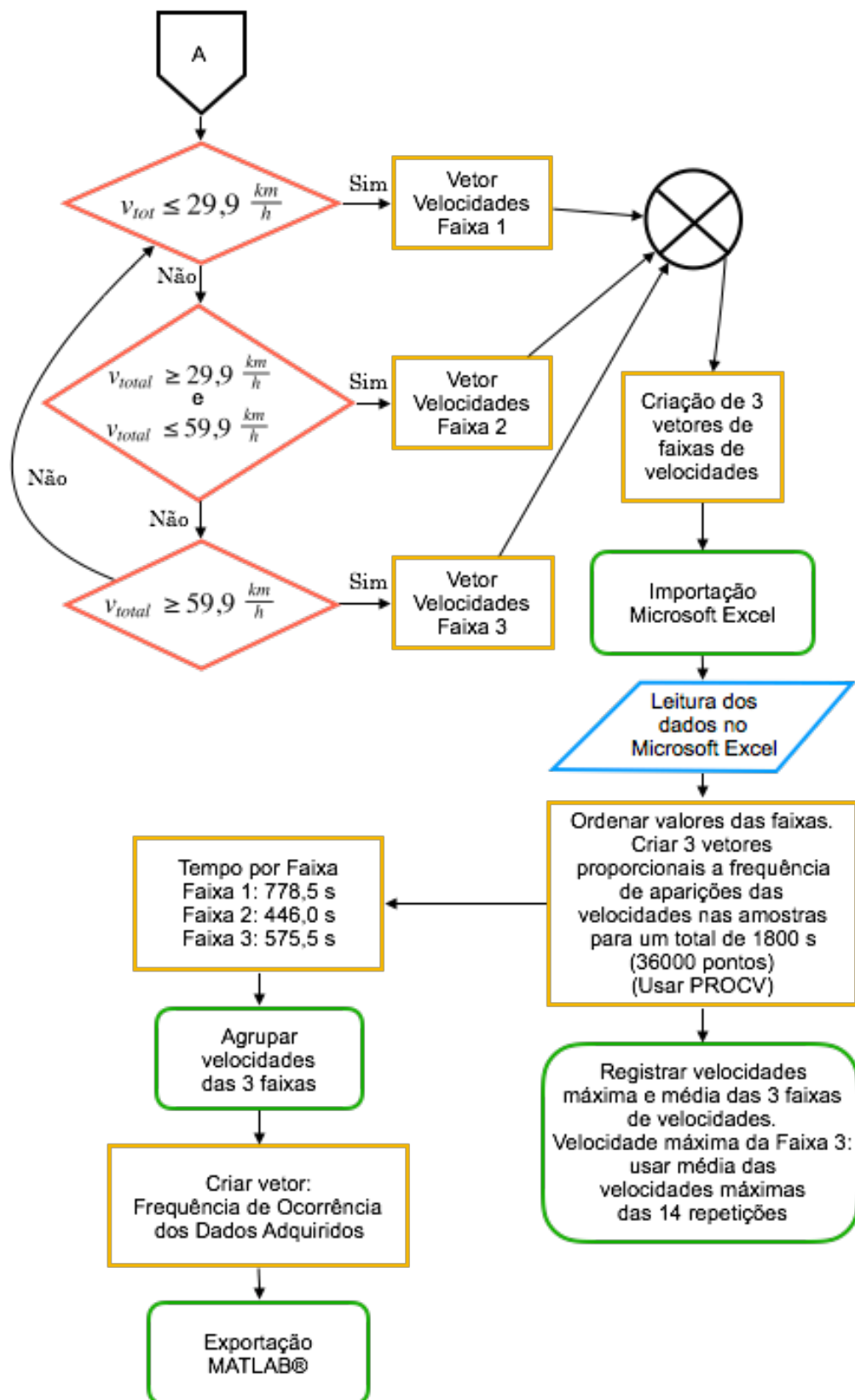
Figura 48: Fluxograma da Metodologia para o levantamento do PoA SDC, Parte 1



Fonte: elaborado pelo autor

- Procedimentos da segunda parte de processamento de dados relativos ao ciclo de condução que será gerado, ilustrados na Figura 49:
  - Segmentação em 3 faixas de velocidade (baixa, média, alta), a partir de valores pré-estabelecidos;
  - Criação de 3 vetores, cada um com todas os pontos de velocidades das amostras conforme as restrições de cada faixa;
  - Importação dos vetores para o *software* Microsoft Excel para criação de vetores de frequência de repetição dos valores de velocidade de cada faixa, para referência;
  - Ordenar valores das velocidades em cada um dos vetores;
  - Representar a frequência de aparições de cada valor de velocidade para as 3 faixas, de maneira proporcional a 1800s (duração estabelecida);
  - Registrar as velocidades média e máxima em cada uma das 3 faixas (à Faixa 3 definiu-se como velocidade máxima a média das velocidades máximas das 14 repetições);
  - Registrar a proporção de tempo em cada uma das faixas a partir dos dados amostrados para o período de 1800s;
  - Agrupar as 3 faixas, originando o vetor Frequência de Ocorrência dos Dados Adquiridos;
  - Usar valores registrados como parâmetros no algoritmo do ciclo de condução que será gerado de maneira aleatória;
  - Exportação dos dados obtidos para o MATLAB®.

Figura 49: Fluxograma da Metodologia para o levantamento do PoA SDC, Parte 2  
**PROCESSAMENTO DE DADOS**

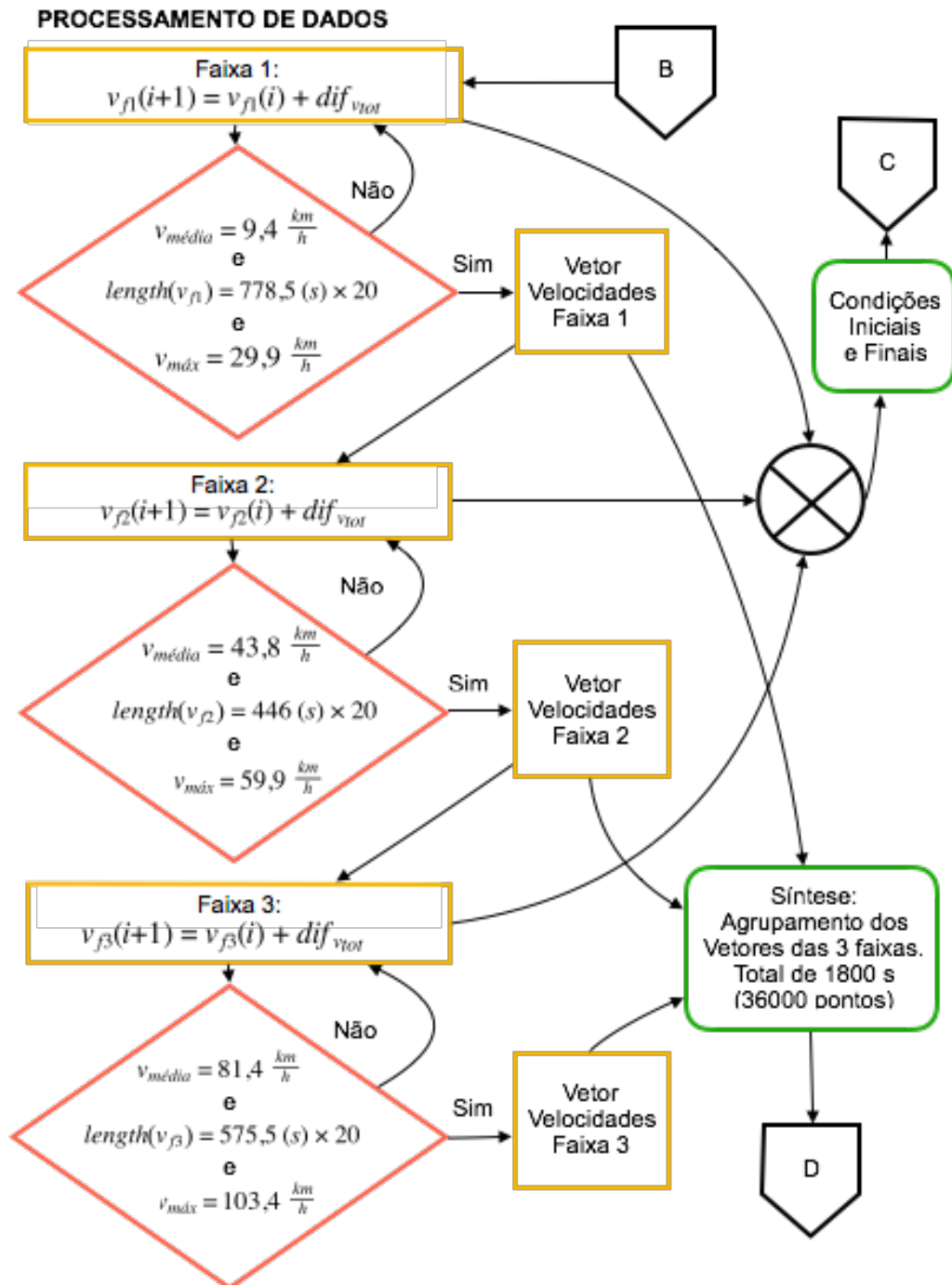


Fonte: elaborado pelo autor

- Procedimentos da terceira parte de processamento de dados relativos ao ciclo de condução que será gerado de maneira aleatória, Figura 50:
  - Segmentação em 3 faixas de velocidade (baixa, média, alta);
  - Definição dos critérios para as velocidades que serão geradas em cada faixa (velocidades média e máxima) e tempo de duração de cada uma proporcional às amostras adquiridas;
  - As velocidades que irão compor os vetores de cada faixa são incrementadas com o vetor  $diff_{v_{tot}}$ ;
  - Criação de 3 vetores de velocidade, um para cada faixa;
  - Síntese do ciclo, através do agrupamento dos vetores gerados, considerando-se as condições iniciais e finais, para cada faixa em um único vetor.
- Procedimentos da quarta parte de processamento de dados referentes ao ciclo de condução que será gerado, fluxograma da Figura 51:
  - Condições iniciais e finais em cada uma das faixas foram estabelecidas a partir da análise das transições do WLTC classe 3 e de metodologia proposta em (LARMINIE; LOWRY, 2012);
  - Os valores definidos para as velocidades e tempos de aceleração e desaceleração são ilustrados no fluxograma.
- Procedimentos para os resultados relativos ao ciclo de condução gerado, ilustrados no fluxograma da Figura 52:
  - Geração do Ciclo de Condução PoA SDC, Figura 53;
  - Cálculo do período em que a diferença de velocidade entre dois pontos consecutivos é nula no ciclo de condução (parâmetro definido como tempo em velocidade de cruzeiro);
  - Cálculo da distância percorrida durante o período de tempo de 1800 s considerando-se as diferentes variações de velocidades;
  - Plotagem de histograma para comparação entre o vetor Frequência de Ocorrência dos Dados Adquiridos e o Ciclo de Condução PoA SDC, também representando a frequência de ocorrência de velocidades do mesmo, Figura 54.

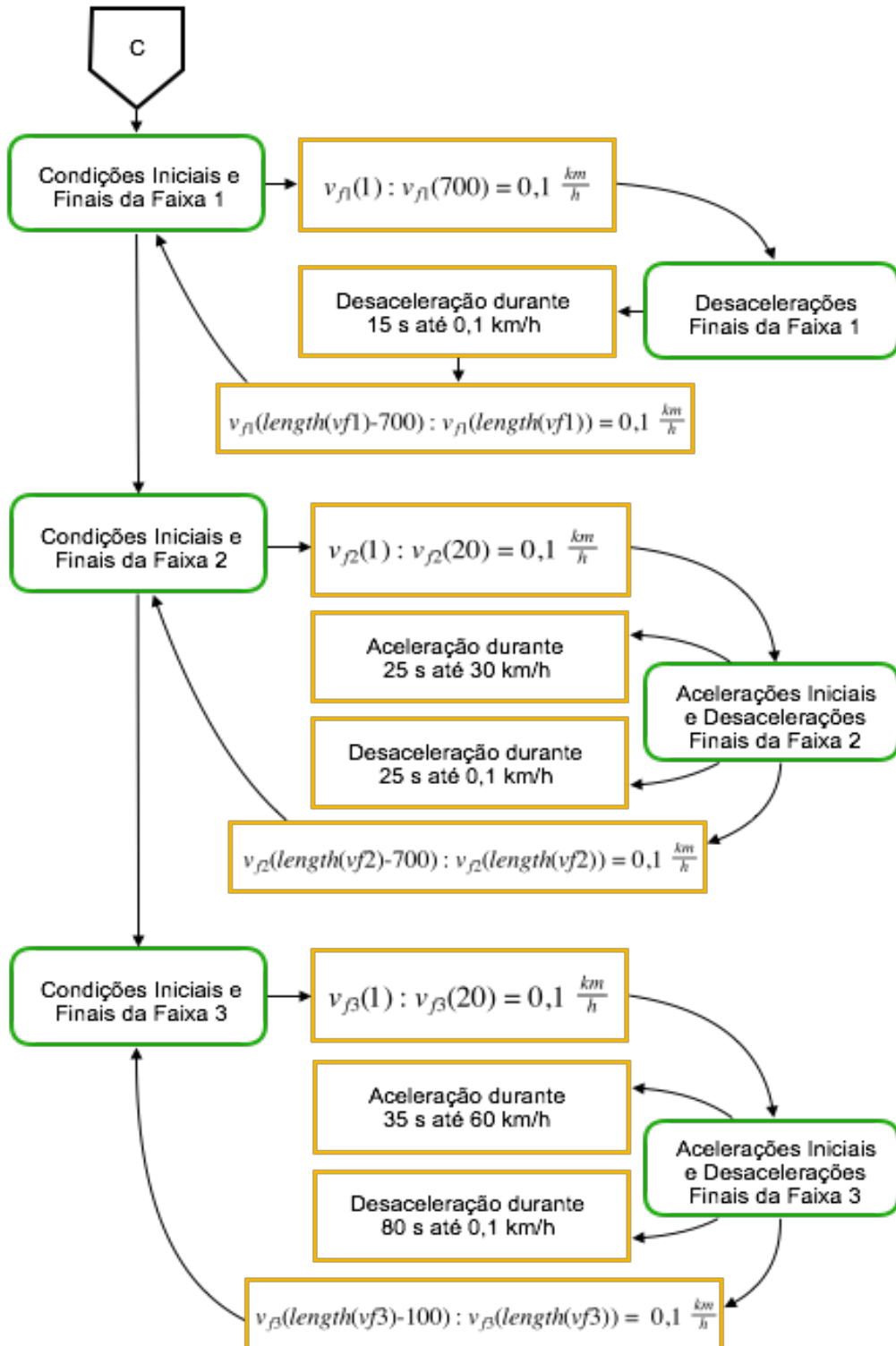


Figura 50: Fluxograma da Metodologia para o levantamento do PoA SDC, Parte 3



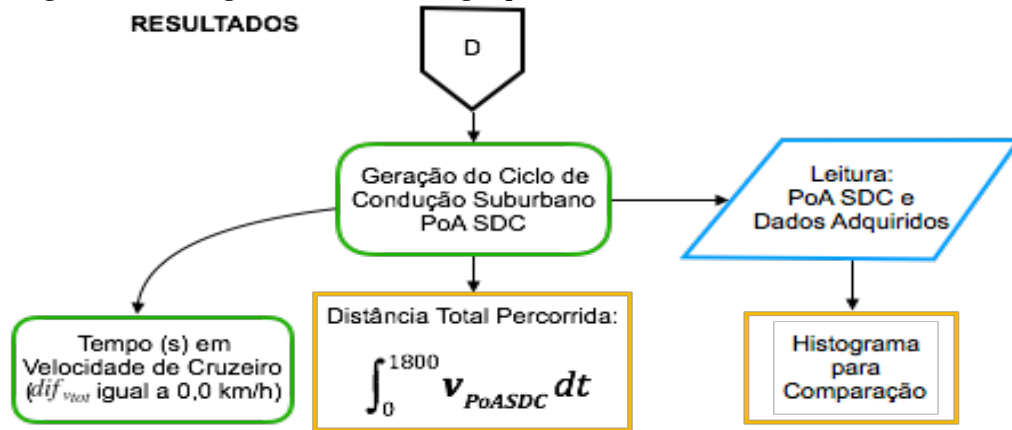
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 51: Fluxograma da Metodologia para o levantamento do PoA SDC, Parte 4

**PROCESSAMENTO DE DADOS**

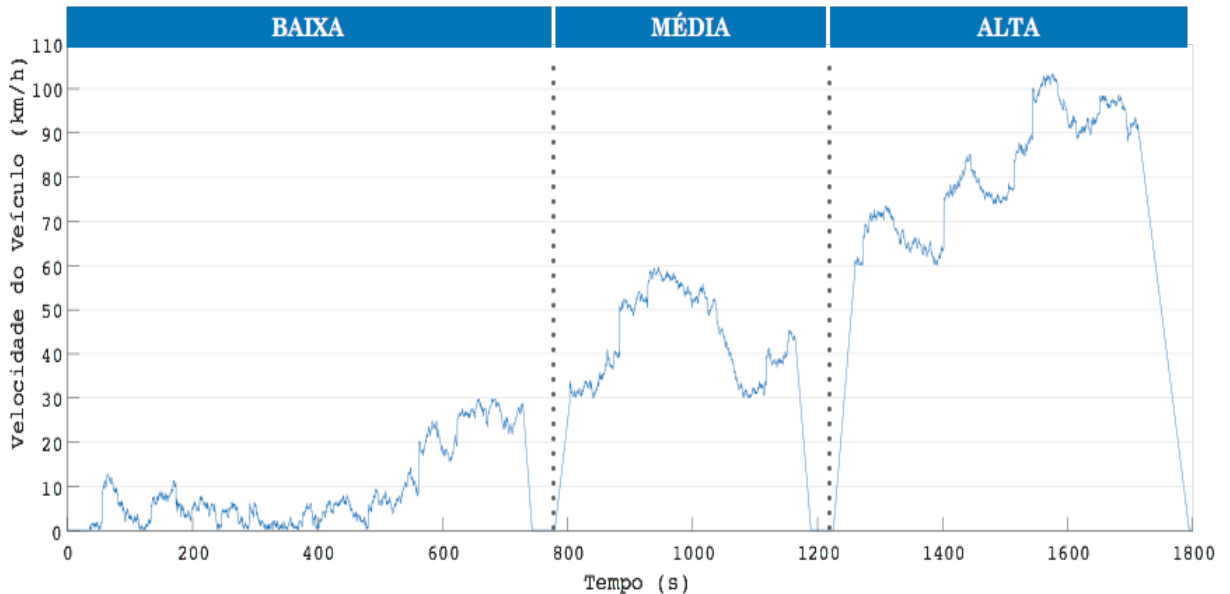
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 52: Fluxograma da Metodologia para o levantamento do PoA SDC, Parte 5



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 53: Ciclo de Condução Suburbano da Grande Porto Alegre (PoA SDC)



Fonte: elaborado pelo autor

Os valores na Tabela 10 foram obtidos após a filtragem e o tratamento dos dados. Os mesmos foram usados como referência para a criação do vetor aleatório que deu origem ao ciclo. As velocidades em cada faixa são geradas de modo aleatório. Toda vez que o algoritmo for executado, um novo ciclo de condução será obtido, mantendo a relação com os dados adquiridos nas repetições. Na Tabela 11 estão os dados resultantes da segmentação das velocidades nas faixas para o período de 1800 s do ciclo PoA SDC.

Tabela 10: Valores de tempo e diferença de velocidades dos dados coletados

Tempo total das amostras	Tempo médio por repetição	Dif. de velocidades - total	Dif. de velocidades - cruzeiro	Dif. de velocidades - positiva	Dif. de velocidades - negativa
20798,3 s	1485,6 s	415952 pontos	308875 pontos	53221 pontos	53856 pontos

Fonte: elaborado pelo autor

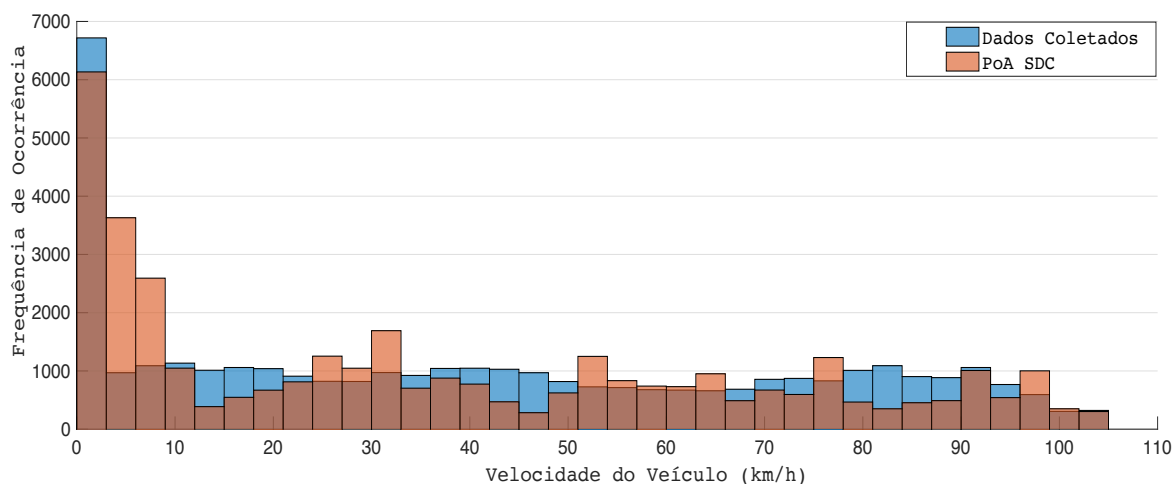
Tabela 11: Parâmetros do Ciclo Suburbano da Grande POA formatado para 1800 s

Faixas	Total de amostras	Velocidades por faixa (km/h)	Amostras por faixa	Período por faixa - 1800 s	Número de pontos por faixa - 1800 s
1	179905	0,1-29,9	43,25 %	778,5 s	15570
2	103062	30-59,9	24,78 %	446 s	8920
3	132999	60-103,4	31,97 %	575,5	11510
Total	415966	-	100 %	1800 s	36000

Fonte: elaborado pelo autor

Com o intuito de comparar o ciclo gerado de maneira randômica com os dados adquiridos, após todo o processo relativo ao algoritmo, fizeram-se histogramas dos dados coletados já filtrados e tratados com o mesmo. Na Figura 54 é possível verificar a coerência do PoA SDC, uma vez que todas os seus valores de velocidades são encontrados nos dados coletados, com diferenças de frequência de ocorrência de no máximo 2618 pontos para um mesmo intervalo de velocidades (como pode ser observado entre 5 e 10 km/h), que em relação aos 36000 pontos totais de todo o ciclo de condução equivalem a apenas 7,27% de diferença.

Figura 54: Histogramas dos dados coletados e do PoA SDC



Fonte: elaborado pelo autor.

E conforme relatado nas seções anteriores, o PoA SDC foi criado seguindo padrões e métodos de outros ciclos baseados em dados reais ao redor do mundo e no ciclo WLTC classe 3, comportando-se de maneira coerente e apresentado os resultados previstos na metodologia. O resumo dos dados obtidos é apresentado na Tabela 12. Para efeitos de comparação foram colocados parâmetros de outros ciclos de condução modais e transitórios na Tabela 13.

Tabela 12: Características gerais do ciclo PoA SDC

	Baixa	Média	Alta	Total
Duração (s)	778,5	446	575,5	1800
Duração em 0.1 km/h (s)	70,4	36,0	6,0	112,4
Distância (km)	1,9	4,6	11,6	18,1
Velocidade média (km/h)	9,4	43,8	81,4	36,1
Velocidade máxima (km/h)	29,9	59,9	103,4	-
Aceleração máxima (m/s <sup>2</sup> )	3,0	3,0	3,0	-
Tempo em cruzeiro (%)	6,5	3,4	3,9	13,8

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 13: Parâmetro estatísticos do PoA SDC e outros ciclos de condução

Ciclos	Tempo (s)	Distância (km)	Velocidade Média (km/h)	Velocidade máx. (km/h)	Aceleração máx. (m/s <sup>2</sup> )	Tempo cruzeiro (%)
PoA SDC	1800	18,1	36,1*	103,4	3,0	13,8
WLTC classe 3	1800	23,3	53,5*	97,4	1,7	N/A
Hong Kong <i>Sub-urban</i>	1476	18,28	46,5*	106,5	2,1	13,6
Dublin <i>city cycle</i>	1645	14,1	30,9*	81,0	2,2	27,6
Turin <i>city cycle</i>	1578	8,7	28,1*	48,5	1,2	N/A
FTP-75	1874	17,8	34,1	91,3	1,7	25,3
NEDC	1180	10,9	43,1*	120	1,1	41,1

Fonte: adaptado pelo autor de (HUNG et al., 2007; ARAÚJO, 2015; PFLUEGL et al., 2015; BRADY; O'MAHONY, 2016)

O parâmetro de velocidade média apresentado na Tabela 13 com \* são para os ciclos com valores sem considerar velocidades nulas, o qual é um dado

importante uma vez que o foco, já enaltecido, do ciclo gerado para a Grande Porto Alegre é uma avaliação que desconsidera tais valores. Esse e os demais valores dos parâmetros apresentados demonstram que o ciclo PoA SDC possui coerência com os demais ciclos baseados em dados reais, como o Hong Kong Sub-urban (HUNG et al., 2007) que é um modelo usado como referência para muitos outros ciclos, e também com os ciclos normatizados de outros países. Salienta-se que as diferenças encontradas reafirmam a importância do desenvolvimento de estudos *in loco*.

## 5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

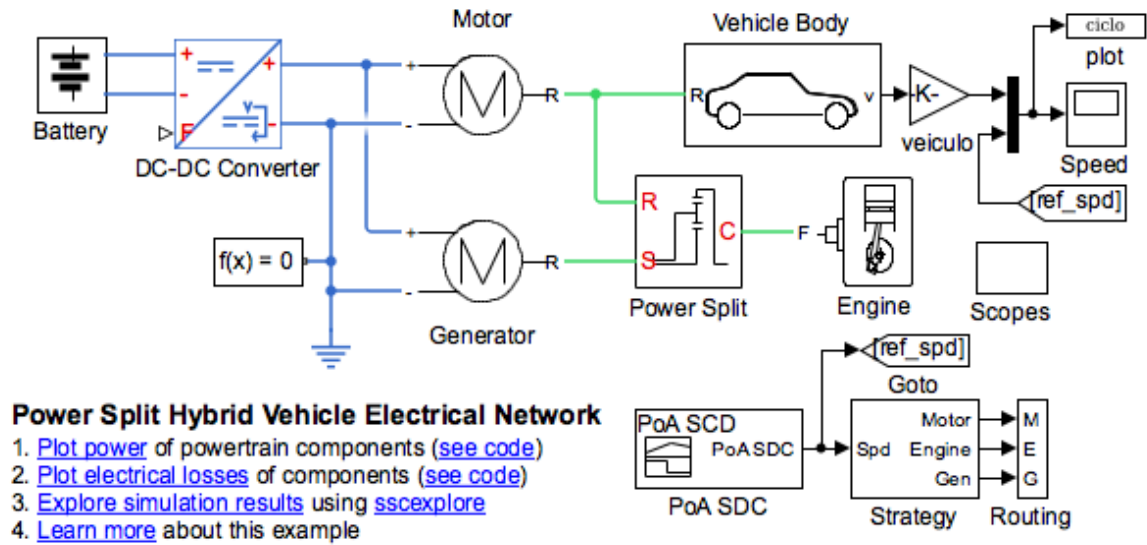
Neste capítulo, o ciclo de condução PoA SDC é aplicado na avaliação de VEHs e VEBs, considerando, por exemplo, o consumo energético e a frenagem regenerativa em modelos computacionais. Comparações com o ciclo de condução normalizado WLTC classe 3 são realizadas no contexto das simulações com VEH, enquanto os desempenhos de duas arquiteturas de VEBs são comparados sob o PoA SDC.

### 5.1 Avaliação com Veículo Elétrico Híbrido

O ciclo de condução desenvolvido, PoA SDC, foi utilizado em uma simulação computacional de um modelo de VEH, com o objetivo de comparar os resultados obtidos com simulações feitas para outro ciclo, o WLTC classe 3. Optou-se pela comparação entre os ciclos escolhidos devido às semelhanças dos mesmos, que seguem critérios parecidos, como referenciado no Capítulo 4. Além disso o WLTC é um ciclo do tipo transitório que foi aprovado como normalizado recentemente, 2017, o que aumenta sua importância de uso em estudos.

Para isso escolheu-se um modelo de VEH *Power-Split*, discutido no Capítulo 2, e que possui a mesma topologia do principal VEH comercial disponível em Porto Alegre e no Brasil, o Toyota Prius. Na Figura 55 está uma visão geral do exemplo integrado do MATLAB®/Simulink/Simscape, modificado para a simulação com o PoA SDC. O Simscape permite o uso de ferramentas para modelagem e simulação de sistemas físicos que contenham componentes elétricos, mecânicos e hidráulicos, possibilitando simulações ágeis e que, de acordo com o nível de complexidade, podem trazer resultados muito satisfatórios. Um modelo equivalente ao da Figura 55 foi usado para a simulação do ciclo WLTC classe 3, sendo que os parâmetros do veículo e dos demais componentes do subsistemas foram os mesmos para os dois ciclos, como os dados do ME, MCI, gerador, dimensões do corpo do veículo, entre outros.

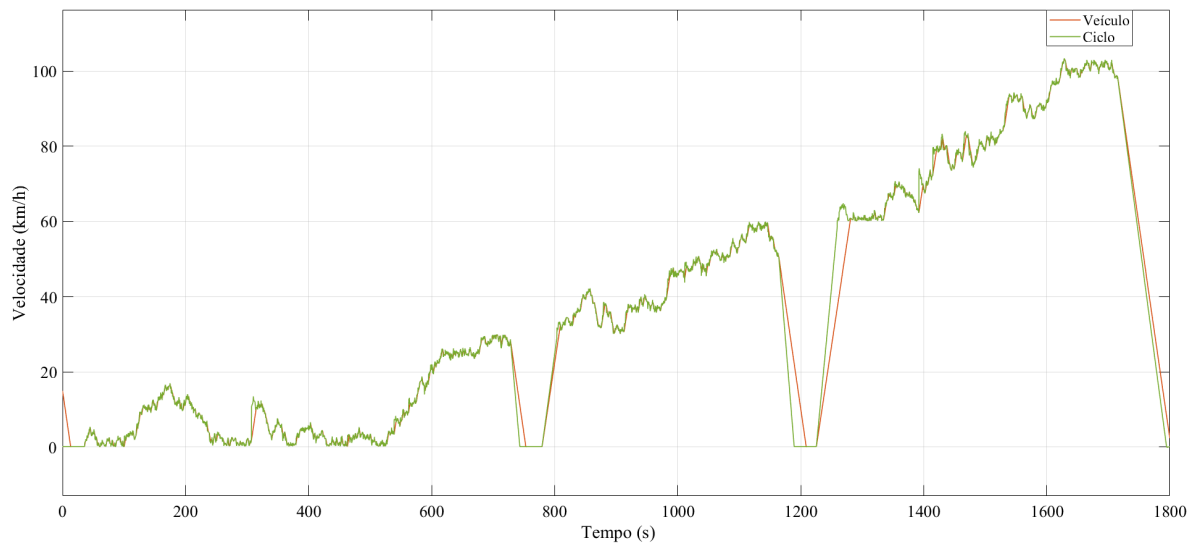
Figura 55: Modelo adaptado do *Power Split Hybrid Vehicle Electrical Network* do MATLAB®/Simulink/Simscape para simulação do ciclo PoA SDC com um VEH



Fonte: adaptado pelo autor.

A partir das simulações realizadas, visando o trajeto que o VEH percorreu durante ambos os ciclos e as perdas energéticas associadas a eles, foram obtidos os gráficos comparativos das Figura 56 e Figura 58, para o PoA SDC, e os das Figura 57 e Figura 59, para o WLTC classe 3.

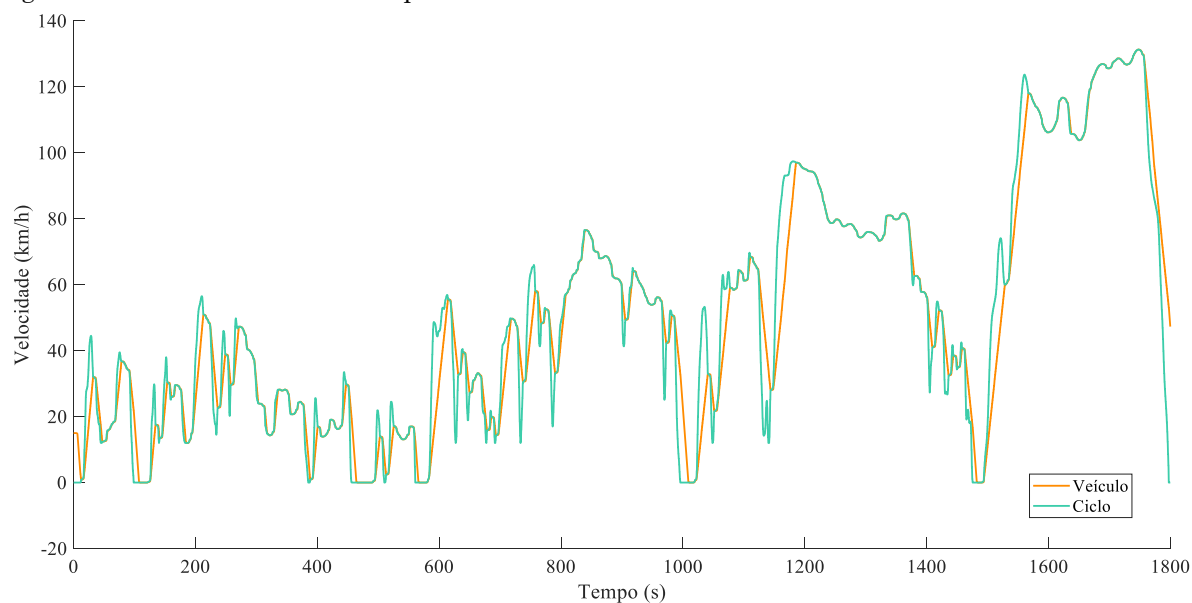
Figura 56: Velocidade alcançada pelo VEH usando o PoA SDC como sinal de referência de velocidade



Fonte: elaborado pelo autor.

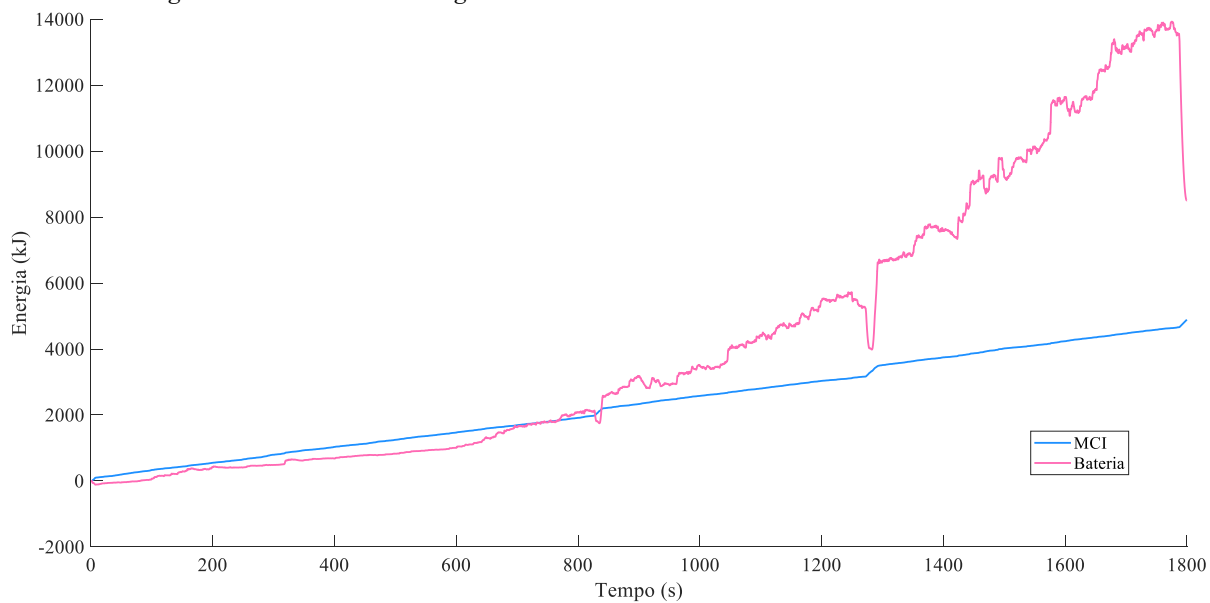


Figura 57: Velocidade executada pelo VEH usando o WLTC classe 3 como referência de velocidade



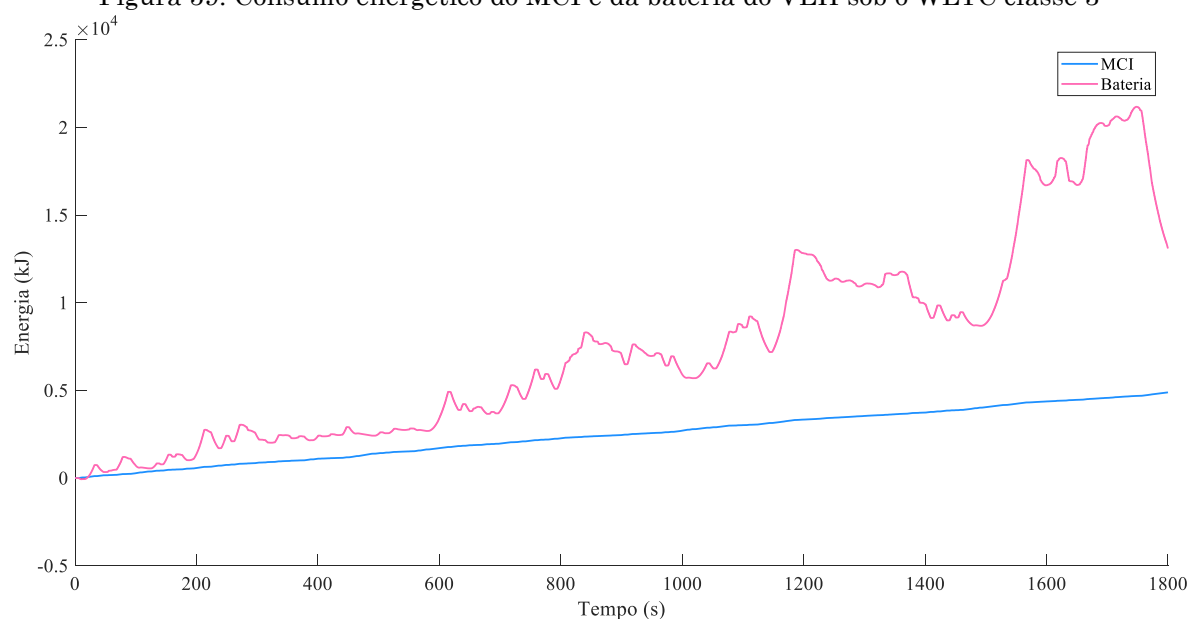
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 58: Consumo energético do MCI e da bateria do VEH sob o PoA SDC



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 59: Consumo energético do MCI e da bateria do VEH sob o WLTC classe 3



Fonte: elaborado pelo autor.

Analisando-se os resultados da Tabela 14 é possível perceber as diferenças em relação às velocidades alcançadas pelo VEH nos ciclos, de forma que no WLTC-3 o mesmo teve maiores dificuldades de atingir elas do que no PoA SDC. A distância percorrida no WLTC-3, para o mesmo período de tempo, foi 21,22 % maior, o que, para as condições da região de Porto Alegre, não representa precisamente a realidade de um ciclo suburbano.

Tabela 14: Comparativo do VEH nos ciclos PoA SDC e WLTC-3

	PoA SDC	WLTC-3	Diferenças
<b>Duração (s)</b>	1800	1800	0,00%
<b>Distância (km)</b>	18,00	22,85	21,22%
<b>Energia Consumida Bateria (kJ)</b>	8507	13090	35,01%
<b>Energia Consumida MCI (kJ)</b>	4891	4890	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor.

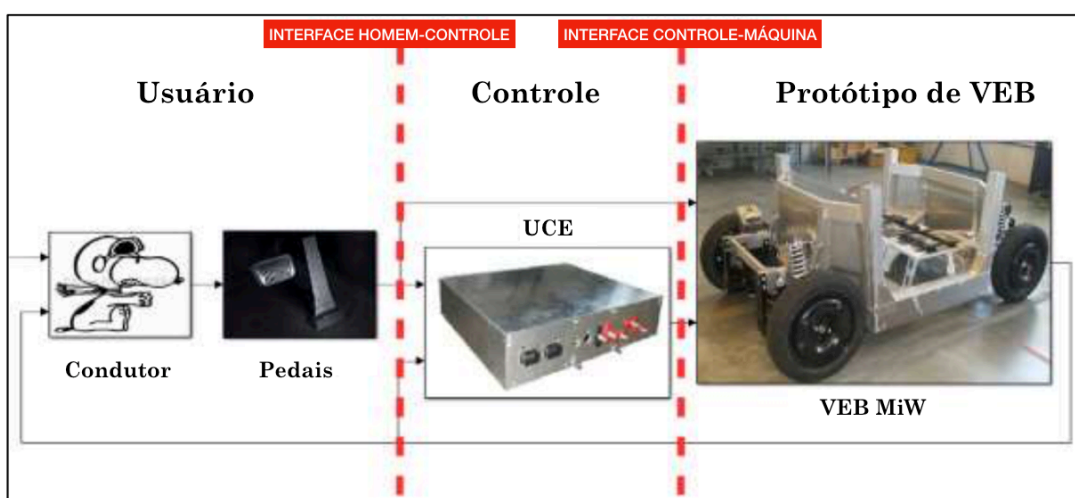
## 5.2 Avaliação com Veículo Elétrico

Os ciclos de condução para VEBs possuem ainda mais relevância uma vez que parâmetros como a autonomia de bateria e a disponibilidade de pontos de recarga da mesma ao longo dos trajetos podem determinar se o veículo conseguirá chegar ao seu destino. De forma que assim é possível fazer uma previsão da autonomia das baterias para a realização de determinado trajeto. Haja vista que este parâmetro é ainda um dos principais fatores a serem melhorados frente aos VCIs.

Com o intuito de avaliar e verificar o ciclo de condução PoA SDC com um veículo puramente elétrico, escolheu-se um modelo de simulação presente no trabalho de (FURTADO, 2016). Esse modelo foi desenvolvido na plataforma MATLAB®/Simulink e foi usado para simulações de um protótipo de VEB com 2 e 4 MiW. A partir dos parâmetros desse protótipo foram realizadas simulações computacionais relacionadas ao desempenho do mesmo no ciclo, tais como diferenças de velocidades alcançadas no trajeto, distância percorrida e eficiência energética. Uma imagem da tela da lógica de simulação com o protótipo de VEB pode ser vista na Figura 60.

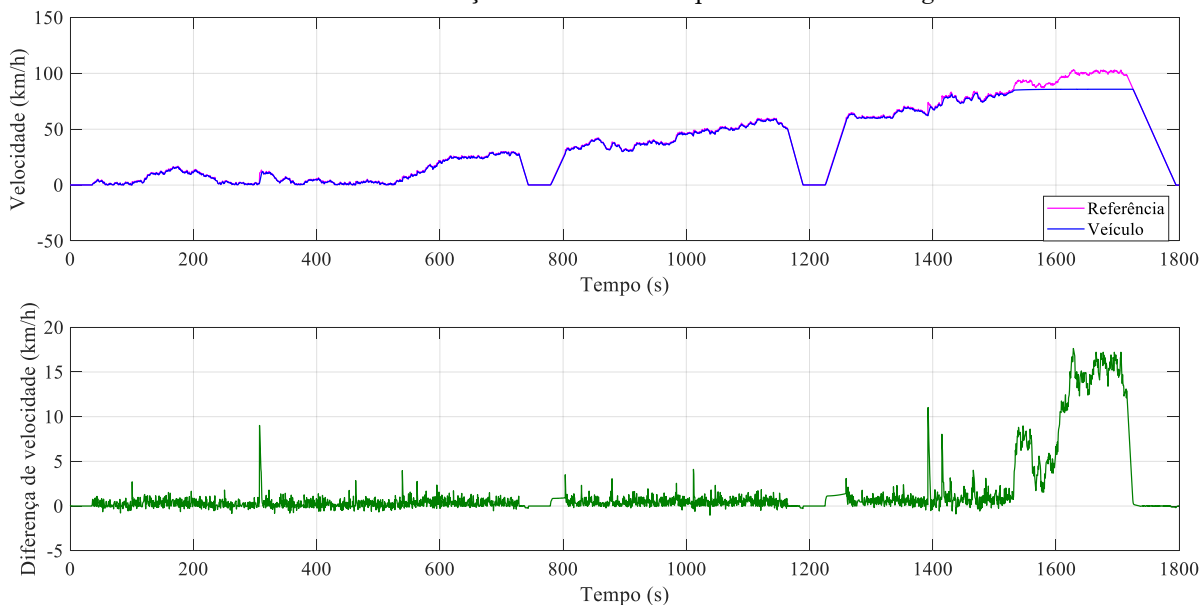
Cabe ressaltar que a simulação foi realizada considerando-se alguns parâmetros como a temperatura, de 16 °C (a temperatura média anual de Porto Alegre é de 19,5 °C) e uma carga de um passageiro de 75 kg sem bagagem.

Figura 60: Modelo utilizado para simulação do VEB com o ciclo PoA SDC



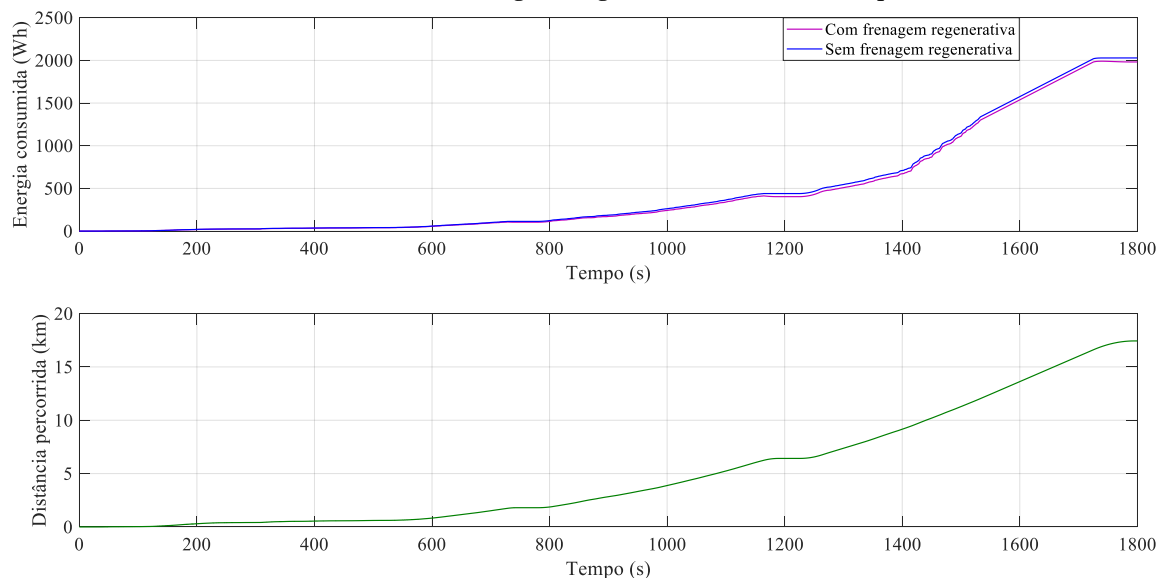
Os resultados para a simulação do VEB com 2 MEs *in-wheel* estão presentes nas Figura 61 e Figura 62.

Figura 61: Simulação do ciclo PoA SDC com um VEB com 2 MiW para avaliar a trajetória e a diferença de velocidades que não foram atingidas



Fonte: elaborado pelo autor

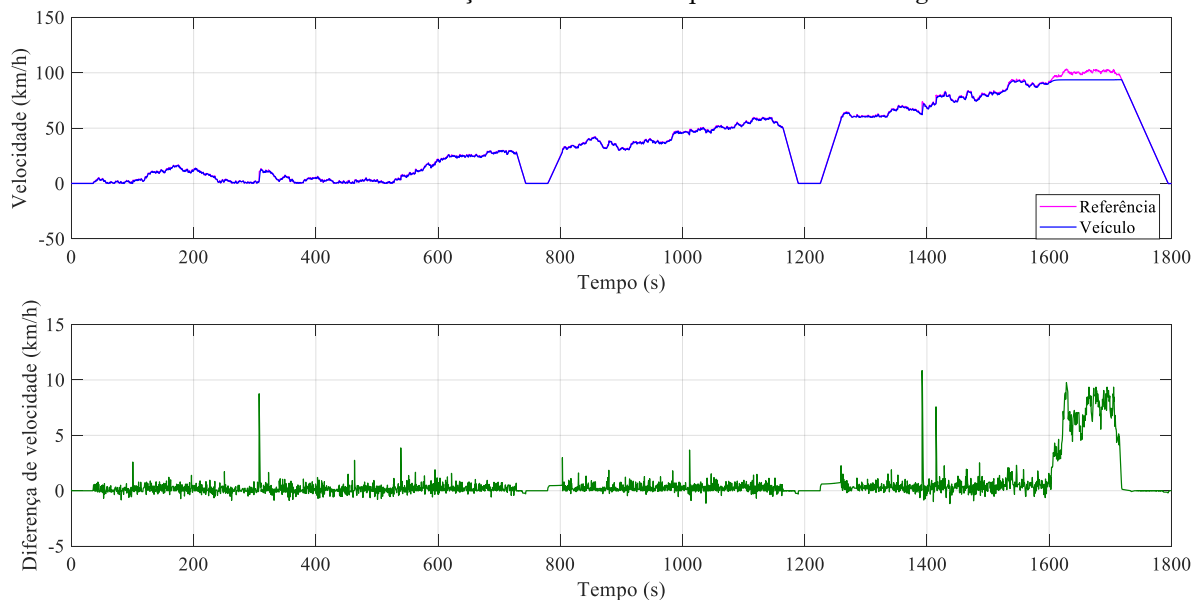
Figura 62: Simulação do ciclo PoA SDC com um VEB com 2 MiW para avaliar consumo energético com e sem frenagem regenerativa e distância percorrida



Fonte: elaborado pelo autor

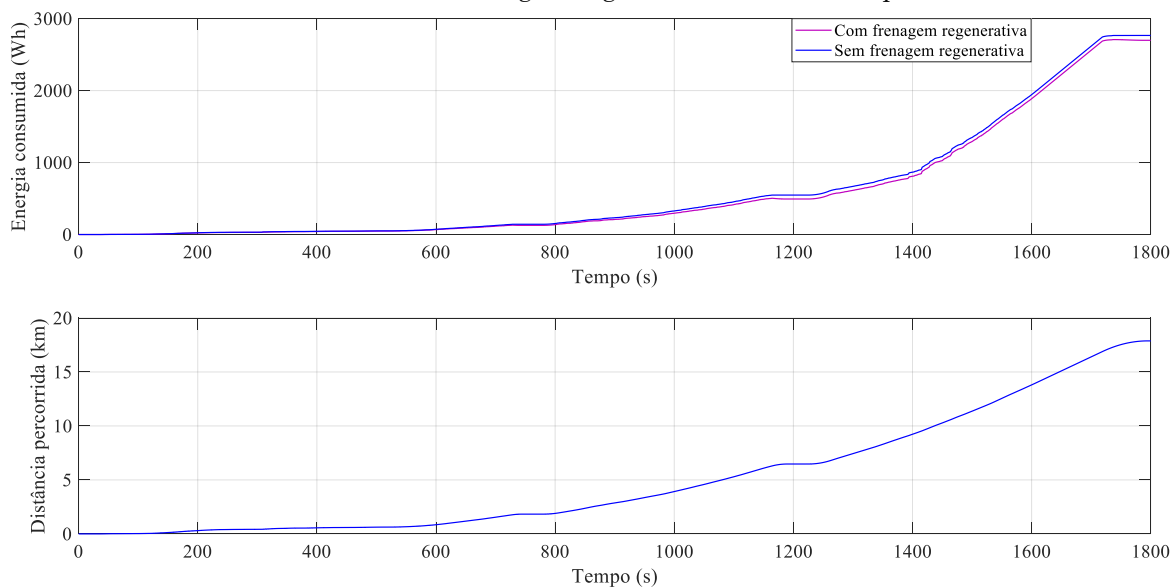
Os resultados para a simulação do VEB com 4 MEs *in-wheel* estão presentes na Figura 63 e Figura 64.

Figura 63: Simulação do ciclo PoA SDC com um VEB com 4 MiW para avaliar a trajetória e a diferença de velocidades que não foram atingidas



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 64: Simulação do ciclo PoA SDC com um VEB com 4 MiW para avaliar consumo energético com e sem frenagem regenerativa e distância percorrida



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 15: Comparação entre duas topologias de VEB sob o ciclo PoA SDC

	2 MiW	4 MiW	Diferenças (%)
<b>Duração (s)</b>	1800	1800	0,00
<b>Distância (km)</b>	17,44	17,88	2,46
<b>Energia sem frenagem reg. (kWh)</b>	2029	2766	25,65
<b>Energia com frenagem reg. (kWh)</b>	1982	2699	26,57

Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com os dados e as diferenças encontradas na Tabela 15 entre as duas configurações de VEBs apresentadas, é possível aferir que a frenagem regenerativa não teve grande impacto na recuperação da energia gasta para ambos os carros, já que os valores de energia consumidas sem o seu uso foram muito próximos. A distância percorrida teve uma pequena diferença, logo o uso de 4 MiW no Ciclo PoA SDC não aparenta grandes vantagens em relação a esse aspecto, haja vista os custos envolvidos, de acordo com os argumentos levantados no Capítulo 2. Para condições em que um maior conjugado fosse requerido, como em regiões montanhosas, um ciclo de condução apropriado indicaria a necessidade de maiores acelerações e de uma configuração de 4 MiW para maior potência.

## 6 CONCLUSÃO

A abordagem de sistemas de tração voltados para a motorização elétrica vai ao encontro com a conjuntura presente e em curto prazo, pois os maiores fabricantes do setor automotivo e as maiores organizações governamentais e privadas ao redor do mundo estão buscando essas soluções. Os VEBs, conforme abordado, possuem um impacto significativamente menor nas mudanças climáticas e nas poluições sonora e do ar urbanas, em comparação com VCIs. O aumento das matrizes de energia renováveis reduzirá ainda mais o impacto dos mesmos. Porém, cabe ressaltar que a análise deve ser feita para todo o ciclo de vida do veículo, WTW, para que assim medidas mais inteligentes e eficientes da cadeia produtiva ao processo de reciclagem de componentes tenham maior efetividade.

Infelizmente, as iniciativas nacionais ainda são mal distribuídas embora promissoras, como os projetos desenvolvidos em Itaipu Binacional. O país já teve um fabricante nacional de VEBs, o Gurgel, porém, como já visto em outras esferas de desenvolvimento e tecnologia, não desenvolveu as condições necessárias para crescer e consolidar-se como uma referência na área ou, ao menos, uma opção frente aos demais concorrentes. Paralelo a isso, cresce o número de fabricantes independentes das marcas mais consolidadas no mercado. A Tesla Motors, criada em 2003 por engenheiros, é voltada para VEBs e desponta hoje como a maior fabricante do gênero e com um crescimento a cada ano maior, sediado no berço da tecnologia e inovação mundial: Califórnia, EUA.

Os hábitos de vida e de consumo estão mudando cada vez mais rápidos a cada geração. Porém, aliadas ao processo e com acesso mais rápido e dinâmico à globalização, as pessoas ainda necessitam se deslocar para as suas demandas diárias. Muito devido a aspectos e interesses econômicos de governos e corporações em relação a matrizes energéticas, principalmente o petróleo, os VEBs e VEHS não foram competitivos no passado frente aos VCIs. Felizmente o cenário dos últimos anos mudou, as preocupações ambientais ganharam um forte viés econômico e político. Aliados a esses fatos, as tecnologias avançaram e agora há MEs mais eficientes e com desempenho

superior aos MCIs, baterias com autonomia e durabilidade suficientes para as demandas gerais da sociedade, custos menores, com o aumento da relação oferta e procura, eletrônica e controle mais precisos e seguros. O tempo mudou e a sociedade também, a engenharia automotiva está cada vez mais próxima das últimas tendências e novidades tecnológicas, muito devido à possibilidade de integração entre diferentes sistemas: tração, transmissão, conversão eletromecânica e controle. Melhorias associadas a outras características, como o corpo do veículo e máquinas elétricas, a partir da substituição dos materiais atuais por outros mais leves e eficientes, reduzirão o peso e espaço ocupado pelos mesmos, possibilitando o aumento da área às baterias e, conseqüentemente, da autonomia de VEBs e VEHS em geral. Mudanças nas topologias como o uso de máquinas *in-wheel*, tração dupla com sistemas de controle independentes, entre outros, possibilitarão um maior gerenciamento das perdas e potências fornecidas para o sistema como um todo.

Com base na crescente criação de ciclos de condução locais, que divergem muitas vezes significativamente em relação aos normatizados para as mesmas regiões, normas mais rígidas e abrangentes devem ser criadas para que tanto fabricantes quanto consumidores tenham acesso a informações mais fidedignas a respeito de parâmetros de desempenho de veículos nas regiões em que serão usados. Iniciativas público-privadas, como o projeto ASTERICS, aparentam ser uma alternativa mais viável a curto e médio prazos, uma vez que ambas as esferas possuem interesse nos resultados de estudos do gênero.

A partir dos dados obtidos da análise experimental e das simulações é possível corroborar a abordagem teórica e destacar a importância da aquisição de dados experimentais para os ciclos de condução. Os estudos mais recentes discutidos e apresentados, em quase todos os continentes do mundo, ressaltam que essa é uma preocupação clara e que traz muitos benefícios relacionados à engenharia automotiva e à mobilidade urbana. Devido às recentes abordagens e metodologias para os melhores procedimentos de obtenção de um ciclo real, o estudo realizado mostrou-se satisfatório e concatenou aspectos importantes previamente definidos: o ciclo PoA SDC



apresenta resultados diferentes de um ciclo normatizado transitório, ainda que para efeito de comparação tenha sido utilizado aquele que é considerado, entre os seus iguais, o mais atual e próximo da realidade, o WLTC classe 3. Como já ressaltado, no Brasil ainda é usado um ciclo normativo urbano antigo e que não corresponde às diferentes condições encontradas nas suas dimensões continentais, o americano FTP 75. O que define a relevância de ciclos de condução baseados em dados reais para o desenvolvimento de procedimentos para o projeto, testes e homologação de qualquer tipo de veículo, em termos de detalhe e variedade, permitindo a análise de peculiaridades do veículo no ambiente em que será utilizado. O aumento do levantamento de ciclos de condução em território nacional incentiva o desenvolvimento de metodologias mais sofisticadas e capazes de analisar uma maior volume de dados.

Ademais, analisando-se as simulações com VEH, o consumo de bateria mostrou-se maior no ciclo normatizado, já a energia gasta pelo MCI foi praticamente a mesma para ambos os ciclos. Tais resultados evidenciam a importância do dimensionamento da bateria, dos sistemas de tração e outros componentes de um VEH considerando-se a realidade das cidades e regiões em que o mesmo será utilizado. No Brasil ainda são poucos os estudos que visam avaliar os ciclos de condução baseados em dados reais, diferente de outros países em que existe cooperações e metodologias compartilhadas para tais procedimentos. Baseando-se em estudos como o ciclo de condução suburbano PoA SDC é possível avaliar com mais fidelidade como será o comportamento de diferentes veículos na região metropolitana de Porto Alegre, com enfoque maior a aspectos relativos a VEBs e VEHs que desempenham papel fundamental nas mudanças de mobilidade que estão por vir.

## 7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir são sugeridas algumas propostas para possíveis trabalhos futuros inspirados neste:

- Aprimoramento do algoritmo criado, reunindo um maior volume de dados (*big data* e *clustering*) para uma abrangência maior do ciclo no contexto da Grande Porto Alegre, com mais repetições e métodos matemáticos, probabilísticos e estatísticos mais avançados, como algoritmo de análise de agrupamento *k-means*, cadeias de Markov, método Monte Carlo e redes bayesianas;
- Validação do ciclo PoA SDC com a aquisição de novos dados com VEHs (Toyota Prius e Lexus CT 200h) e VEBs (BMW i3 e Chevrolet Bolt) de forma a comparar os seus desempenhos experimentais com simulações utilizando os seus parâmetros nos modelos computacionais;
- Validação do ciclo criado utilizando ferramentas computacionais prontas para o desenvolvimento de um ciclo de condução, tais como o NREL DRIVING CYCLE, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA, o software desenvolvido no programa europeu ASTERICS e o IGNITE, criado pela empresa Ricardo Software®;
- Realizar simulações computacionais na plataforma MATLAB®/Simulink/Simscape com diferentes modelos de VEH e VEBs, utilizando dados de veículos comerciais disponíveis para venda no estado do Rio Grande do Sul, buscando a análise e comparação entre ciclos de condução baseados em dados reais e seus resultados;
- Desenvolvimento de diferentes ciclos de condução com dados experimentais dos trajetos feitos com mais frequência no contexto da Grande Porto Alegre, tais como ciclos de condução urbanos para as Zonas Sul, Central, Norte e Leste. Ou então, um ciclo rodoviário com trajetos entre Porto Alegre e o litoral norte gaúcho e catarinense;
- Projeto de parâmetros construtivos de máquinas elétricas e demais sistemas de um VEB ou VEH, como a bateria, baseando-se nos trajetos aos quais serão submetidos. Por exemplo: projetar, a partir da metodologia utilizada no ciclo PoA SDC, ciclos de condução voltados para

as pistas em que são realizadas provas de automobilismo, para assim otimizar as características construtivas da ME que equipará um VE de competição para possuir o melhor desempenho (pontos de operação na relação conjugado-velocidade);

- Parceria com instituições de transporte compartilhado (Uber, 99 pop, Cabify) para aquisição e monitoramento de dados para a criação de ciclos de condução que mapeiem toda a região da cidade de Porto Alegre;
- Desenvolvimento de ciclos de condução para outras categorias de veículos e meios de transporte, por exemplo, monitoramento da frota de ônibus e os seus hábitos de condução;
- Análise do impacto de VEBs na rede de distribuição de energia elétrica gaúcha, como também sua integração com *smart grids*.

## REFERÊNCIAS

- ACHOUR, H.; OLABI, A. G. Driving cycle developments and their impacts on energy consumption of transportation. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 1778–1788, 2016.
- ARAÚJO, B. J. O. DE. **Desenvolvimento de um Modelo de Caracterização Energética de Ciclos de Condução**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Minho, Braga. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. ABVE apoia nova proposta sobre transporte sustentável na câmara de São Paulo. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/noticias/abve-apoia-nova-proposta-sobre-transporte-sustentavel-na-camara-de-sao-paulo>>. Acesso em: 9/1/2018.
- BERZI, L.; DELOGU, M.; PIERINI, M. Development of driving cycles for electric vehicles in the context of the city of Florence. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 47, p. 299–322, 2016.
- BERZI, L.; PIERINI, M.; BORGARELLO, L.; et al. Real world driving cycles for Electric and Hybrid Electric vehicles: Definition of a synthesis methodology and implementation on real-world case studies within the ASTERICS project. **European Green Vehicles Initiative – Expert Workshop**, 2014.
- BINDER, A. **Planning and application of electrical drives - Drives for electric vehicles: Hybrid and electrical vehicles**. Darmstadt: Institut für Elektrische Energiewandlung (Technische Universität Darmstadt), 2016a.
- BINDER, A. **Planning and application of electrical drives (PAED) - Drives for electric vehicles (Basics of Drive Calculations)**. Darmstadt, 2016b.
- BRADY, J.; O'MAHONY, M. Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas. **Applied Energy**, v. 177, p. 165–178, 2016.
- CARRARO, E.; MORANDIN, M.; BIANCHI, N. Traction PMASR Motor Optimization According to a Given Driving Cycle. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 1, p. 209–216, 2016.
- CRUVINEL, H.; RIBEIRO, F. **PROJETO DE LEI DA CÂMARA Nº 65**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2014.
- D'ANDRIA, J. Sistemi a Trazione Ibrida. **Enciclopedia Degli Idrocarburi**, 2007.
- DIEGUES, D. **Rede CAN para Estimativa de Orientação e Posição de Máquinas Agrícolas**. 2014. 104 f. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. 2014.
- DIESELNET. Emission Test Cycles: WLTC. Disponível em: <<https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>>. Acesso em: 8/1/2018.
- DURAN, A.; EARLEYWINE, M. GPS Data Filtration Method for Drive Cycle Analysis Applications. In: SAE 2012 World Congress (Org.); . p.9, 2012.

ECARS - NOW! GLOBAL COMMUNITY. Energy Efficient - eCars - Now! Disponível em: <<http://ecars-now.wikidot.com/why:energy-efficient>>. Acesso em: 15/4/2017.

ECKERT, J. J. **Análise Comparativa entre os Métodos de Cálculo da Dinâmica Longitudinal em Veículos**. 2013. 168 f. Universidade Estadual de Campinas. 2013.

EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles : fundamentals, theory, and design**. Second ed. Boca Raton, 2010.

FAGUNDES, D. Senado aprova projeto de lei sobre instalação de pontos de recarga. Disponível em: <<https://motor1.uol.com.br/news/224695/senado-projeto-instalacao-pontos-recarga/>>. Acesso em: 31/12/2017.

FONTARAS, G.; CIUFFO, B.; ZACHAROF, N.; et al. The difference between reported and real-world CO<sub>2</sub> emissions: How much improvement can be expected by WLTP introduction? **Transportation Research Procedia**, v. 25, p. 3933–3943, 2017.

FONTARAS, G.; ZACHAROF, N.-G.; CIUFFO, B. Fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 60, p. 97–131, 2017.

FURTADO, R. M. **Studio delle Prestazioni di un Veicolo Elettrico Leggero (LEV) con Motori In-Wheel**. 2016. 87 f. Politecnico di Torino. 2016.

GUGLIELMI, P. **Propulsione di veicoli elettrici e ibridi: Full Electric Vehicles**. Turim: Politecnico di Torino, 2015.

GURGEL 800. Gurgel Itaipú. Disponível em: <<http://www.gurgel800.com.br/gurgel/itaipu/especificacoes.php?imprimir=sim>>. Acesso em: 11/11/2017.

HOFFMANN, F. O escândalo da VW: por dentro dos testes de emissões. Disponível em: <<http://bestcars.uol.com.br/bc/mais/tecnica/diesel-o-escandalo-da-volkswagen-e-os-testes-de-emissoes/>>. Acesso em: 10/9/2017.

HUNG, W. T.; TONG, H. Y.; LEE, C. P.; HA, K.; PAO, L. Y. Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 12, n. 2, p. 115–128, 2007.

ICARROS LTDA. Volkswagen Gol Power 1.6 (G5) (Flex) 2010: Ficha Técnica. Disponível em: <<http://www.icarros.com.br/volkswagen/gol/2010/ficha-tecnica/7957>>. Acesso em: 10/12/2017.

IDAHO NATIONAL LABORATORY. Plugged In: How Americans Charge Their Electric Vehicles. , p. 1–24, 2015.

JORNAL DA ITAIPU ELETRÔNICO. Itaipu entrega um veículo elétrico e dois eletropostos para o Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/itaipu-entrega-um-veiculo-eletrico-e-dois-eletropostos-para-o-ministerio-de>>. Acesso em: 31/12/2017.

KUBO, M. M. Programa VE de ITAIPU – Visão Geral: O futuro começa aqui! Fórum Brasil-Alemanha de Mobilidade Elétrica. **Anais...** . p.15, 2017.

KUTNEY, P. Rota 2030 deve trazer nova sobretaxa de IPI. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/26465/rota-2030-deve-trazer-nova-sobretaxa-de-ipi>>. Acesso em: 31/12/2017.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric Vehicle Technology Explained**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012.

MACIEL FILHO, F. F. **Construção de ciclos de condução para estimativa de emissões veiculares para ônibus urbanos**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2013.

MAGALHÃES, C. M. M. **Hibridização de um Smart ForTwo Coupé: Projeto do método de Gestão dos modos de Funcionamento do Sistema Híbrido**. 2014. 118 f. Universidade do Porto. 2014.

MERWERTH, J. The Hybrid-Synchronous Machine of The New BMW i3 and i8. Disponível em: <[http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404\\_BMW.pdf](http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf)>. Acesso em: 11/1/2018.

MESSAGIE, M. **Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles**. Bruxelas, 2017.

MI, C.; MASRUR, M. A. **Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives**. Second ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd All, 2017.

NOURI, P.; MORENCY, C. Evaluating Microtrip Definitions for Developing Driving Cycles. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2627, p. 86–92, 2017.

OLIVEIRA, A. DE M.; BERTOTI, E.; ECKERT, J. J.; et al. Evaluation of Energy Recovery Potential through Regenerative Braking for a Hybrid Electric Vehicle in a Real Urban Drive Scenario. SAE Technical Paper Series. **Anais...** . p.10, 2016.

ONORI, S.; SERRAO, L.; RIZZONI, G. **Hybrid Electric Vehicles**. London: Springer London, 2016.

PELLEGRINO, G.; JAHNS, T. M.; BIANCHI, N.; SOONG, W.; CUPERTINO, F. **The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

PFLUEGL, H.; RICCI, C.; BORGARELLO, L.; et al. A Framework for Electric Vehicle Development: From Modelling to Engineering Through Real-World Data Analysis. **Asterics-Project.Eu**. p.55–73, 2015.

PORSCHE CARS NORTH AMERICA, I. Prof. Ferdinand Porsche Created the First Functional Hybrid Car. Disponível em: <<http://press.porsche.com/news/release.php?id=642>>. Acesso em: 11/5/2017.

PRO TUNE SISTEMAS ELETRÔNICOS LTDA. Manual Touch Dash Logger Pro Tune. Disponível em: <[www.protuneelectronics.com/products/ManualTDLv2.0.pdf](http://www.protuneelectronics.com/products/ManualTDLv2.0.pdf)>. Acesso em:

12/11/2017a.

PRO TUNE SISTEMAS ELETRÔNICOS LTDA. **Especificações Técnicas TDL 4.3 Sunlight**. Canoas: Pro Tune Sistemas Eletrônicos LTDA, 2015b.

ROSO, V. R. **Ciclos Reais de Condução Veicular em Santa Maria e seus Impactos em Consumo e Emissões**. 2016. 87 f. Dissertação de Mestrado - UFSM, Santa Maria. 2016.

ROSSI, C.; CORBELLI, P.; ZARRI, L.; CASADEI, D. Power split e-CVT ship propulsion system. **IEEE Electric Ship Technologies Symposium, ESTS 2009**, p. 505–514, 2009.

SEERS, P.; NACHIN, G.; GLAUS, M. Development of two driving cycles for utility vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 41, p. 377–385, 2015.

TENCONI, A. **Sistema di Propulsione Elettrica per i Trasporti (Trazione Elettrica): Dinamica del veicolo**. Turim: Politecnico di Torino, 2014.

TESLA MOTORS. Model S. Disponível em:  
<[https://www.tesla.com/pt\\_PT/models](https://www.tesla.com/pt_PT/models)>. Acesso em: 12/11/2017.

TIETGE, U.; MOCK, P.; FRANCO, V.; ZACHAROF, N. From laboratory to road: Modeling the divergence between official and real-world fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission values in the German passenger car market for the years 2001–2014. **Energy Policy**, v. 103, n. November 2016, p. 212–222, 2017.

TOYOTA BRASIL. **All New Prius Catálogo**. Porto Alegre: Toyota Brasil, 2017a.

TOYOTA BRASIL. Prius - Toyota. Disponível em:  
<<http://www.toyota.com.br/modelos/prius/>>. Acesso em: 10/9/2017b.

TRANSPORT & ENVIRONMENT. Electric vehicle life cycle analysis and raw material availability. , , n. October, p. 1–11, 2017.

TRIEBEL, R.; KRUCKER, M.; BITZI, R. **Communication with a Toyota Prius Decoding of the CAN Protocol and Development of a Graphical Interface**. Zurich, 2009.

VITAL, A.; SEABRA, R. Debatedores defendem redução de impostos para incentivar a compra de veículos elétricos. Disponível em:  
<<http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/TRANSPORTE-E-TRANSITO/550529-DEBATEDORES-DEFENDEM-REDUCAO-DE-IMPOSTOS-PARA-INCENTIVAR-A-COMPRA-DE-VEICULOS-ELETRICOS.html>>. Acesso em: 12/12/2017.

WATANEBE, C.; KAHN, J.; KOCHKODIN, B. Why Battery Cost Could Put the Brakes on Electric Car Sales. Disponível em:  
<<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-11-28/electric-cars-need-cheaper-batteries-before-taking-over-the-road>>. Acesso em: 10/12/2017.

WESTBROOK, M. H. **The Electric Car: development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars**. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage SG1 2AY, UK: IET, 2001.

WILTUSCHNIG, I. P.; ECKERT, P. R.; DORRELL, D. G.; FLORES FILHO, A. F. A Study of the Influence of Quasi-Halbach Arrays on a Torus Machine. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 52, n. 7, p. 1–4, 2016.

X-ENGINEER.ORG. Understanding micro, mild, full and plug-in hybrid electric vehicles. Disponível em: <<https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/micro-mild-full-hybrid-electric-vehicle/>>. Acesso em: 11/10/2017.



## ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DASH LOGGER PRO

### TUNE

<b>Especificações Técnicas</b>	
<b>Item</b>	<b>Característica</b>
Alimentação	8 a 18 Volts
Consumo a 12 Volts	De 640 mA a 830 mA
Entradas analógicas	2 entradas de 0 a 18,8 Volts
Protocolo CAN	100 a 1000 kbps - resistor de terminação externo
Protocolo ISSO	5bps à 57600bps
Protocolo Protune SP	Serial à 115.2 kbps / 500 kbps
Temperatura de operação	De -10 à +70°C
Luminância do display	250 nits (cd/m2)
GPS	Taxa de amostragem - 20Hz / Antena externa, alimentação 3.3V / Conector tipo MCX.
Sensor de luz	Localizado na lente do primeiro LED no canto superior esquerdo do produto. Detecta o nível de luminosidade. Escala 0-100% (0%-Escuro à 100%-Luz do sol)
Barra de LEDs	LEDs RGB de alto brilho - Cores ajustáveis pelo usuário - 16 níveis de brilho
Proteções	Inversão de polaridade da bateria / Transiente de tensão de alimentação / Transiente de tensão nas linhas da rede CAN / Respingos d'água e poeira. O produto é recomendado para uso indoor.

Fonte: adaptado de (PRO TUNE SISTEMAS ELETRÔNICOS LTDA, 2015b)

**ANEXO B – FICHA TÉCNICA DO VEÍCULO UTILIZADO PARA A  
AQUISIÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS PARA O POA SDC**

<b>Mecânica</b>		
<b>Motorização</b>		1.6
<b>Combustível</b>	Álcool	Gasolina
<b>Potência (cv)</b>	104	101
<b>Conjugado (kgf.m)</b>	15,6	15,4
<b>Velocidade Máxima (km/h)</b>	192	190
<b>Tempo 0-100 (s)</b>	9,6	9,6
<b>Consumo cidade (km/l)</b>	8,8	N/D
<b>Consumo estrada (km/l)</b>	12,4	N/D
<b>Câmbio</b>	manual de 5 marchas	
<b>Tração</b>	dianteira	
<b>Direção</b>	hidráulica	
<b>Suspensão dianteira</b>	Suspensão tipo McPherson e dianteira com barra estabilizadora, roda tipo independente e molas helicoidal.	
<b>Suspensão traseira</b>	Suspensão tipo eixo de torção, roda tipo semi-independente e molas helicoidal.	
<b>Freios</b>	Dois freios à disco com dois discos ventilados.	
<b>Dimensões</b>		
<b>Altura (mm)</b>		1.460
<b>Largura (mm)</b>		1.656
<b>Comprimento (mm)</b>		3.899
<b>Peso (Kg)</b>		978
<b>Tanque (L)</b>		55
<b>Entre-eixos (mm)</b>		2.465
<b>Porta-Malas (L)</b>		1.460
<b>Ocupantes</b>		1.656

Fonte: (ICARROS LTDA, 2017)