

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 973

**AVALIAÇÃO DA HIBRIDIZAÇÃO DE UM VEÍCULO NACIONAL COMPACTO  
UTILIZANDO ARQUITETURA PARALELA DE EIXOS SEPARADOS**

**Rafael Átila Silva**

DATA DA DEFESA: 20/02/2017

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**AVALIAÇÃO DA HIBRIDIZAÇÃO DE UM VEÍCULO NACIONAL  
COMPACTO UTILIZANDO ARQUITETURA PARALELA DE EIXOS  
SEPARADOS**

Rafael Átila Silva

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Igor Amariz Pires

Belo Horizonte - MG

Fevereiro de 2017

S586a Silva, Rafael Átila.  
Avaliação da hibridização de um veículo nacional compacto utilizando a arquitetura paralela de eixos separados [manuscrito] Rafael Átila Silva. – 2017.  
155 f., enc.: il.

Orientador: Igor Amariz Pires.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: 113-132.

Bibliografia: f. 110-112.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Veículos - Teses. 3. Carros elétricos híbridos - Teses. 4. Motores de combustão interna - Teses. 5. Máquinas elétricas de indução - Teses. I. Pires, Igor Amariz. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

RAFAEL ÁTILA SILVA

Avaliação da Híbridização de um Veículo Nacional  
Compacto Utilizando a Arquitetura Paralela de  
Eixos Separados.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Igor Amariz Pires, PPGEE – UFMG.

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil.

Prof. Dr. Fabrício J. P. Pujatti, DEMEC – UFMG.

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil.

Prof. PhD. Braz de Jesus Cardoso Filho, PPGEE – UFMG.

Doutor pela Universidade de Wisconsin – Madison, Estados Unidos da América.

Prof. Dr. Hélder de Paula, PPGEE – UFMG.

Doutor pela Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia, Brasil.



Belo Horizonte.

Fevereiro de 2017.

**"Avaliação da Hibridização de um Veículo Nacional Compacto  
Utilizando Arquitetura Paralela de Eixos Separados"**

**Rafael Átila Silva**

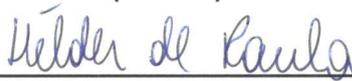
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2017.

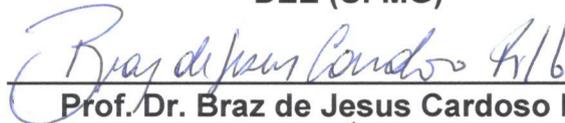
Por:



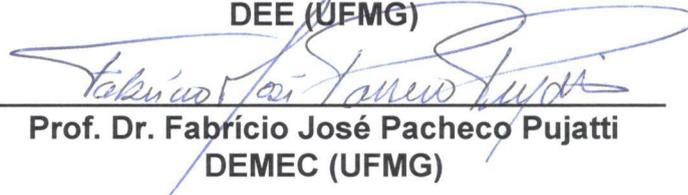
Prof. Dr. Igor Amariz Pires  
(UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Helder de Paula  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Braz de Jesus Cardoso Filho  
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Fabricio José Pacheco Pujatti  
DEMEC (UFMG)

Dedico esta dissertação à  
minha mãe...

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concebido a graça e o dom da vida, me proporcionando forças, saúde e iluminando meu caminho para que essa etapa fosse concluída.

Aos meus familiares pelo apoio, aos meus pais Carlos Antônio e Maria de Fátima por me ajudarem a transformar essa possibilidade em realidade. Aos meus irmãos Gabriel e Higor pelo carinho. Aos meus tios, meus primos e aos meus avós pelas orações, pelo carinho e pelos bons momentos em família.

Ao meu orientador, professor Igor Amariz Pires, pela disponibilidade, confiança e por compartilhar de seu precioso conhecimento, sempre com bastante paciência no esclarecimento de minhas dúvidas.

Ao professor Fabrício Pujatti, pela disponibilidade em ajudar, doando parte do seu precioso tempo para o esclarecimento de dúvidas e ensinamentos de mecânica, sempre muito paciente.

Aos professores Braz e Sidelmo pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo dessa etapa que estou concluindo.

Aos colegas do Lab. Tesla Engenharia de Potência, Tiago, Fernando, Nicolas, Hélio, Girdeon, Abraão, Camila, Tamires, Patrícia, Reginaldo, Alysson, André, Sandro, Pedro, Júlio e Rodrigo pela companhia diária e à Arlete, pelos cuidados e pelo grande carinho.

Aos professores Genésio Diniz e Manuel Camela, pelas oportunidades e pela confiança depositada em mim ao longo da graduação. Por me incentivarem a realizar esse grande passo de me tornar Mestre.

Aos colegas de Itabira, Geovane Reis e Paulo Mata pela companhia, pelas horas de estudos que passamos juntos e pela amizade construída neste período.

Ao Lucas por aceitar dedicar parte de seu tempo para trabalhar comigo neste projeto.

Aos colegas de república Tiago Gaiba, Aécio Bolzan e Jean Diniz, pela alegria e pela amizade ao longo desta jornada. Ao Bruno Cota pela amizade.

Aos grandes amigos de infância que ganhei em Itabira, Davidsson Fortunato, Voney Paiva, Athos Moisés, Mateus Vaz, Omar Beltrame, Philip Lopes, Túlio Avelar, Mateus Avelar, Felipe Avelar, Vitor Hugo, Alisson Heleno.

A minha namorada Bianca Cunha pelo amor, confiança e por se fazer presente mesmo a distância.

Por fim, mas não menos importante, à CAPES pela provisão da bolsa de mestrado para elaboração deste trabalho de pesquisa.

Muito obrigado a todos!

*"É melhor lançar-se à luta em busca do triunfo mesmo expondo-se ao insucesso, que formar fila com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito; E vivem nessa penumbra cinzenta sem conhecer nem vitória nem derrota."*

*(Franklin Roosevelt)*

Página intencionalmente deixada em branco.



Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Escola de Engenharia

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Rafael Átila Silva

A sociedade moderna se torna cada dia mais dependente da mobilidade, sendo os veículos leves a opção principal adotada, o têm provocado sérios impactos. O volume de veículos do setor de transporte somado ao do setor automobilístico é responsável por níveis de emissão de gases de efeito estufa que quase se igualam aos provocados pela indústria. As consequências podem ser percebidas por indicadores de saúde pública, principalmente com as despesas financeiras para tratar das doenças causadas por essa poluição. Os veículos elétricos híbridos surgem como opção intermediária entre o veículo convencional de motor de combustão e o veículo elétrico, para acelerar o processo de redução de emissão e de consumo. Porém, os custos da tecnologia eleva o preço dos veículos híbridos em relação aos convencionais. Sendo assim, este trabalho propõe avaliar a redução de consumo de combustível de um veículo convencional com características de um nacional compacto de 999cc. Com o intuito de minimizar as alterações no veículo, a proposta é realizar a hibridização por meio da arquitetura paralela de eixos separados, Paralela-ES, fazendo uso de uma máquina de indução de nove fases como motor do sistema de tração elétrica, integrado ao eixo traseiro do veículo. Este trabalho utiliza ciclos de condução adotados pela norma brasileira e um ciclo de condução urbano real, medido em um dos principais corredores de Belo Horizonte – MG. O veículo convencional foi modelado e simulado no *software* ADVISOR, e a partir disso, foram realizados testes de desempenho e consumo entre o veículo real e o simulado. Tendo posse do modelo do veículo convencional, foram realizadas modificações para implementar o modelo do veículo hibridizado, e com isso, avaliar os ganhos obtidos com redução no consumo, eficiência e emissão de poluentes. Por fim, é realizada uma comparação entre os veículos hibridizados pela arquitetura Paralela-ES, e pela paralela de assistência, Paralela-SA.

**Palavras-chaves:** Veículo convencional; Veículo elétrico híbrido; Arquitetura paralela de eixos separados; Motor de combustão interna; Máquina de indução de nove fases.



Federal University of Minas Gerais  
Graduate Program in Electrical Engineering  
Engineering school

## ABSTRACT

Master's Degree  
Rafael Átila Silva

Modern society is becoming more and more dependent on mobility, with light vehicles being the main option adopted, which has caused serious impacts. The volume of vehicles in the transport sector added to that of the automobile sector is responsible for levels of greenhouse gas emissions that are almost equal to those caused by the industry. The consequences can be perceived by public health indicators, mainly with the financial expenses to treat the diseases caused by this pollution. Hybrid electric vehicles come as an intermediate option between the conventional combustion engine vehicle and the electric vehicle, to accelerate the process of reducing emissions and consumption. However, the costs of technology raise the price of hybrid vehicles over conventional ones. Thus, this work proposes to evaluate the reduction of fuel consumption of a conventional vehicle with characteristics of a compact national of 999cc. In order to minimize the changes in the vehicle, the proposal is to perform the hybridization through the parallel hybrid architecture of separate axes, known in the literature by Through-The-Road Parallel, making use of a nine-phase induction machine as the motor of the electric traction system, integrated to the rear axis of the vehicle. This work uses driving cycles adopted by the Brazilian standard and a real urban driving cycle, measured in one of the main corridors of Belo Horizonte - MG. The conventional vehicle was modeled and simulated in the software ADVISOR, and from this, performance and consumption tests were performed between the real and the simulated vehicle. Taking ownership of the conventional vehicle model, modifications were made to implement the hybrid vehicle model, and with that, to evaluate the gains obtained with reduction in consumption, efficiency and emission of pollutants. Finally, a comparison is made between the vehicles hybridized by the Parallel-TTR architecture, and the Start and Assistance Parallel, Known as Parallel-SA.

**KeyWords:** Conventional vehicle; Hybrid electric vehicle; Through-The-Road Parallel Architecture; Internal combustion engine; Nine phase induction machine.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>x</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xv</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xix</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>xxi</b>
<b>CAPÍTULO 1 – Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Motivação .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>10</b>
1.3.1 Objetivos específicos.....	11
<b>1.3. Contribuições .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4. Estruturação do texto .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 2 – Fundamentos de propulsão automóvel.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Conceitos de movimento.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Resistência ao movimento do veículo .....</b>	<b>15</b>
2.2.1 Resistência ao Rolamento.....	16
2.2.2 Resistência Aerodinâmica .....	17
2.2.3 Inclinação de Pista .....	18
<b>2.3. Dinâmica do movimento.....</b>	<b>18</b>
2.3.1 Força Máxima de Tração .....	19
2.3.2 Força Máxima de Frenagem .....	22
<b>2.4. Desempenho dos veículos .....</b>	<b>24</b>
2.4.1 Velocidade Máxima.....	24
2.4.2 Capacidade de Subida.....	26
2.4.3 Desempenho de Aceleração.....	27
<b>Conclusões .....</b>	<b>28</b>
<b>CAPÍTULO 3 – Veículo Elétrico Híbrido .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1. Grau de hibridização .....</b>	<b>30</b>
3.1.1 Micro - Híbrido.....	31
3.1.2 Híbrido Moderado a Médio .....	32

3.1.3 Híbrido Completo .....	33
<b>3.2. Arquitetura Híbrida .....</b>	<b>34</b>
3.2.1 Híbrido Série .....	34
3.2.2 Híbrido Paralelo.....	35
3.2.3 Híbrido Série-Paralelo .....	37
<b>3.3. Componentes de Veículos Elétricos Híbridos .....</b>	<b>38</b>
3.3.1 Motor de Combustão Interna.....	39
3.3.2 Transmissão Manual.....	42
3.3.3 Máquinas Elétricas .....	43
3.3.4 Baterias .....	49
<b>Conclusões .....</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO 4 – Conceção do sistema .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1. Conceção do sistema de tração convencional.....</b>	<b>55</b>
4.1.1 Características do veículo convencional .....	55
4.1.2 Motor de combustão Interna (MCI) .....	57
4.1.3 Transmissão manual de cinco velocidades.....	59
<b>4.2. Conceção do sistema de tração híbrido .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3. Definição da máquina elétrica .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4. Definição da transmissão.....</b>	<b>66</b>
<b>4.5. Definição da bateria.....</b>	<b>67</b>
<b>4.6. Modos operacionais .....</b>	<b>69</b>
4.6.1 Modos de Operação do VEH Paralelo – ES .....	69
<b>Conclusões .....</b>	<b>71</b>
<b>CAPÍTULO 5 – Implementação do modelo e simulação .....</b>	<b>73</b>
<b>5.1. Ciclos de condução.....</b>	<b>73</b>
<b>5.2. Modelo do veículo convencional .....</b>	<b>76</b>
<b>5.3. Validação do veículo convencional.....</b>	<b>77</b>
5.3.1 Testes de desempenho do veículo. ....	77
5.3.2 Testes de consumo em ciclos de condução .....	79
<b>5.4. Modificação no ADVISOR para a arquitetura Paralela-ES .....</b>	<b>84</b>
5.4.1 Modelo do veículo convencional hibridizado – Paralelo-ES .....	85
<b>5.5. Análise comparativa dos veículos Convencional e Paralelo-ES .....</b>	<b>91</b>
5.5.1 Emissão de poluentes com o sistema híbrido .....	96
5.5.2 Operação da MI9F na arquitetura Paralela-ES .....	97
<b>5.6. Análise comparativa dos veículos Paralelo-ES e Paralelo-SA .....</b>	<b>102</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>104</b>

<b>CAPÍTULO 6 – Conclusões</b> .....	<b>107</b>
<b>6.1. Trabalhos Futuros</b> .....	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>110</b>
<b>ANEXO A – Considerações utilizadas nas simulações</b> .....	<b>113</b>
<b>A. Lista de considerados utilizados nas simulações</b> .....	<b>113</b>
<b>ANEXO B – <i>Software</i> de simulação ADVISOR</b> .....	<b>117</b>
<b>B. Tutorial básico para inicialização do <i>software</i></b> .....	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-1 – Estados brasileiros adeptos ao programa de desconto do IPVA.....	5
Figura 2.2-1 – Forças atuantes sobre o veículo em pista com inclinação. ....	15
Figura 2.4-1 – Resistências ao deslocamento e da força de tração em transmissões de múltiplas velocidades (a) e em transmissão de uma velocidade. ....	24
Figura 3.1-1 – Classificação dos VEH quanto ao grau de hibridização.....	31
Figura 3.2-1 – Arquitetura híbrida – Série. ....	34
Figura 3.2-2 – Arquitetura híbrida – Paralela.....	35
Figura 3.2-3 – Arquitetura híbrida – Paralela-SA. ....	36
Figura 3.2-4 – Arquitetura híbrida – Paralela-ES.....	36
Figura 3.2-5 – Arquitetura híbrida – Série-Paralela. ....	37
Figura 3.3-1 – Estrutura do MCI de ignição por centelha de quatro tempos .....	39
Figura 3.3-2 – Ciclo do MCI de ignição por centelha de quatro tempos. ....	40
Figura 3.3-3 – Regiões de consumo e de eficiência dos MCI em relação às curvas de (a) Torque e de (b) Potência em função da velocidade de rotação. ....	41
Figura 3.3-4 – Característica de torque de MCI com transmissão de várias velocidades e Motores Elétricos de única velocidade. ....	42
Figura 3.3-5 – Classificação das máquinas elétricas de corrente alternada.....	44
Figura 3.3-6 – Classificação das máquinas elétricas de corrente contínua. ....	45
Figura 3.3-7 – Comparativo entre as máquinas de indução e síncronas de ímãs-permanentes.....	47
Figura 3.3-8 – Seção transversal das máquinas (a) Síncrona de Imã-Permanente (ED), (b) Síncrona de Imã-Permanente (EC), (c) Indução e (d) Relutância Variável.....	48
Figura 3.3-9 – Características de (a) Potência e Torque das máquinas elétricas e (b) regiões de eficiência na curva de torque de uma máquina específica. ....	48
Figura 3.3-10 – Modelo de bateria de Íon-Lítio (a) Célula, (b) Módulo e (c) Pack.....	49

Figura 3.3-11 – Diagrama com os modelos de tecnologia das baterias. ....	51
Figura 3.3-12 – Variação aceitável para o SOC das diferentes tecnologias de baterias. 53	
Figura 4.1-1 – Curvas de Potência (a) e torque (b) do MCI 1.0L 44kW.....	57
Figura 4.1-2 – Mapa de consumo do MCI em (a) e curvas de consumo de combustível para os valores de torque do MCI em (b). ....	58
Figura 4.1-3 – Mapas de eficiência (a) e de consumo de combustível (b) do MCI. ....	59
Figura 4.2-1 – Arquitetura híbrida proposta e seus respectivos componentes. ....	61
Figura 4.3-1 – Diagrama (a) e esquema elétrico (b) básicos da máquina de indução de nove fases utilizada neste trabalho. ....	62
Figura 4.3-2 – Alimentação das bobinas da máquina de indução de nove fases.....	63
Figura 4.3-3 – Fluxo principal da máquina de indução de nove fases no modo (a) 12Pólos - 3Fases e (b) 4Pólos – 9Fases.....	64
Figura 4.3-4 – Curvas de torque nominal e máximo para a máquina elétrica nos modos 3 fases (a) e no modo 9 fases (b), o modo de operação integrado (c) e com o mapa de eficiência (d). ....	65
Figura 4.4-1 – Sistema de tração elétrica no eixo traseiro.....	66
Figura 4.5-1 – Características de tensão (a) e resistência (b) da bateria .....	68
Figura 5.1-1 – Ciclo de condução Urbano FTP-75. ....	74
Figura 5.1-2 – Ciclo de condução Rodoviário HWFET.....	74
Figura 5.1-3 – Ciclo de condução Urbano real medido na Av. Antônio Carlos sentido Bairro-Centro.....	75
Figura 5.2-1 – Diagrama de blocos do modelo do veículo convencional no ADVISOR. ....	76
Figura 5.3-1 – Mapas do MCI com os pontos de operação (a), as marchas respectivas (b) e os pontos de eficiência em que o MCI operou – Teste de Aceleração. ....	78
Figura 5.3-2 – Mapas do MCI com os pontos de operação (a), as marchas respectivas (b) e os pontos de eficiência em que o MCI operou – Ciclo FTP-75.....	79
Figura 5.3-3 – Mapas do MCI com os pontos de operação (a), as marchas respectivas (b) e os pontos de eficiência em que o MCI operou – Ciclo HWFET. ....	80
Figura 5.3-4 – Mapas do MCI com os pontos de operação (a), as marchas respectivas (b) e os pontos de eficiência em que o MCI operou – Ciclo Av. Antônio Carlos.....	81
Figura 5.4-1 – Diagrama de blocos da arquitetura híbrida paralela no ADVISOR.....	84

Figura 5.4-2 – Diagrama de blocos do modelo do VEH paralelo de eixo separado implementado no ADVISOR. ....	85
Figura 5.4-3 – Diagrama de blocos do bloco de seleção do eixo de tração.....	86
Figura 5.4-4 – Diagrama de blocos do bloco de controle de ativação do sistema de tração elétrica.....	87
Figura 5.4-5 – Diagrama de blocos do bloco do diferencial do sistema de tração elétrica .....	88
Figura 5.4-6 – Diagrama de blocos da caixa de redução do sistema de tração elétrica .	88
Figura 5.4-7 – Torque de entrada e saída nas transmissões do eixo dianteiro e traseiro.	89
Figura 5.4-8 – Perfil de velocidade e torque do MCI e da máquina elétrica para um determinado ciclo de condução urbana. ....	90
Figura 5.5-1 – Ciclo FTP-75 repetido cinco vezes e o estado de carga da bateria do VEH Paralelo-ES. ....	91
Figura 5.5-2 – Mapas do MCI com os pontos de operação para o veículo convencional (a), e para o Paralelo-ES (b) – Ciclo FTP-75. ....	92
Figura 5.5-3 – Mapas do MCI com as respectivas marchas nos pontos de operação para o veículo convencional (a), e para o Paralelo-ES (b) – Ciclo FTP-75. ....	93
Figura 5.5-4 – Mapas do MCI com os pontos de eficiência em que o MCI operou no veículo convencional (a), e no Paralelo-ES (b) – Ciclo FTP-75. ....	93
Figura 5.5-5 – Mapa da máquina elétrica com os pontos de operação (a) e os pontos de eficiência em que operou.....	94
Figura 5.5-6 – Potência na bateria do sistema de tração elétrica (a) e Torque nos motores de tração – Ciclo FTP-75.....	95
Figura 5.5-7 – Operação da máquina de indução de 9 fases: (a) FTP-75, (b) Av. Antônio Carlos, (c) HWFET e (d) US06-HWY. ....	98
Figura 5.5-8 – Operação da máquina de indução de 9 fases - apenas diferencial mecânico: (a) FTP-75, (b) Av. Antônio Carlos, (c) HWFET e (d) US06-HWY. ....	100
Figura 5.5-9 – Operação da máquina de indução de 9 fases com redução de onze vezes: (a) FTP-75, (b) Av. Antônio Carlos, (c) HWFET e (d) US06-HWY.....	101
Figura B-1 – Janela de apresentação do software ADVISOR.....	118
Figura B-2 – Janela do help do ADVISOR. ....	118
Figura B-3 – Janela de trabalho inicial do ADVISOR. ....	119

Figura B-4 – Modelos de veículos disponíveis na biblioteca do ADVISOR, (a) Convencional, (b) Paralelo, (c) Elétrico, (d) Paralelo-SA, (e) Célula Combustível, (f) Série, (g) Série-Paralelo e (h) Paralelo-ES desenvolvido neste trabalho. ....	120
Figura B-5 – Janelas dos componentes que constituem os veículos no ADVISOR. ...	121
Figura B-6 – Arquivo .m com os parâmetros dos modelos de cada componente dos veículos no ADVISOR. ....	122
Figura B-7 – Mapas de Eficiência, Consumo e Emissão de Poluentes do MCI (a) e (b), da Máquina Elétrica (c) e da Bateria (d) do ADVISOR.....	122
Figura B-8 – Diagrama de blocos do veículo híbrido paralelo no ADVISOR.....	123
Figura B-9 – Janela de parâmetros de simulação do ADVISOR. ....	124
Figura B-10 – Modelos de ciclo de condução disponíveis no ADVISOR (a) e (b) Urbano e (c) Extra Urbano. ....	125
Figura B-11 – Janelas de configuração dos parâmetros do (a) teste de aceleração e do teste de (b) capacidade de subida. ....	126
Figura B-12 – Janela de apresentação dos resultados no ADVISOR para simulação com ciclos de condução.....	126
Figura B-13 – Mapas de operação do MCI (a) e (b), da máquina elétrica (c), Pontos de eficiência em que o MCI operou (d), Pontos de eficiência da máquina elétrica e do controle (e) e do sistema de transmissão (f). ....	127
Figura B-14 – Distribuição de energia em (kJ) entre os componentes do veículo.....	128
Figura B-15 – Distribuição de energia em formato gráfico de barras. ....	129
Figura B-16 – Janela da ferramenta de auxílio para MCI do ADVISOR – Engmodel. ....	130
Figura B-17 – Janela de conversão de formatos para .mat.....	131
Figura B-18 – Janela para processar os dados do MCI e gerar os mapas de consumo e eficiência e o arquivo .m para carregar no ADVISOR.....	131
Figura B-19 – Mapas de eficiência e consumo gerados pelo Engmodel.....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1-1 – Metas para redução de emissão de CO <sub>2</sub> adotada por alguns países. ....	2
Tabela 1.1-2 – Incentivos locais concedidos para proprietários de VE e VEH.....	4
Tabela 1.1-3 – Distribuição da alíquota do II conforme características dos veículos. ....	6
Tabela 3.2-1 - Topologia adotada por alguns dos VEH existentes no mercado.....	38
Tabela 3.3-1 – Comparativo entre as máquinas elétricas mais utilizadas em sistemas de propulsão veicular.....	46
Tabela 3.3-2 – Tecnologias de bateria utilizada em diferentes modelos de VEH.....	50
Tabela 3.3-3 – Comparativo das tecnologias de bateria de lítio.....	51
Tabela 3.3-4 – Empresas fabricantes de baterias com tecnologia de Íon-Lítio. ....	52
Tabela 4.1-1 – Características do veículo convencional. ....	56
Tabela 4.1-2 – Relação de redução do sistema de transmissão do veículo convencional. ....	60
Tabela 4.3-1 – Parâmetros técnicos da máquina de indução de nove fases. ....	64
Tabela 5.3-1 – Resultado dos testes experimental e simulado para o veículo convencional a MCI.....	77
Tabela 5.3-2 – Eficiência e consumo de combustível do veículo convencional simulado nos três diferentes ciclos de condução.....	82
Tabela 5.3-3 – Comparativo do consumo (E-22). ....	83
Tabela 5.5-1 – Eficiência e consumo de combustível dos veículos Convencional e Paralelo-ES simulados no ciclo de condução FTP-75.....	96
Tabela 5.5-2 – Emissão de gases poluentes dos veículos simulados no ciclo FTP-75...	97
Tabela 5.6-1 – Eficiência e consumo de combustível dos veículos Paralelo-SA e Paralelo-ES simulados no ciclo de condução FTP-75 – Limite de 10% de torque do MCI para recuperação. ....	103

Tabela 5.6-2 – Eficiência e consumo de combustível dos veículos Paralelo-SA e Paralelo-ES simulados no ciclo de condução FTP-75 - Limite de 25% de torque do MCI para recuperação (Apenas para o Paralelo-SA).....	104
Tabela A-1 – Considerações utilizadas para o MCI e para o Combustível utilizado...	113
Tabela A-2 – Considerações utilizadas para as transmissões dos sistemas de tração. .	114
Tabela A-3 – Peso adicionado ao veículo devido ao sistema de tração elétrico. ....	114
Tabela A-4 – Descrição dos arquivos utilizados como base para implementar os modelos do veículo deste trabalho. ....	115
Tabela A-5 – Considerações utilizadas para constantes físicas.....	115

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>Advanced Vehicle Simulator</i>	ADVISOR
Associação Brasileira de Normas Técnicas	ABNT
Centro de Gravidade	CG
Centro de Tecnologia da Mobilidade - UFMG	CTM/UFMG
Chumbo Ácido	PbA
Corrente Alternada	CA
<i>Degree of Hybridization</i>	DOH
Corrente Contínua	CC
Estratégias de Gerenciamento de Potência	EGP
Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo	FAPESP
<i>Federal Test Procedure</i>	FTP
Fosfato de Ferro-Lítio	LFP
Gases de Efeito Estufa	GEE
<i>Graphic User Interface</i>	GUI
<i>Highway Fuel Economy Test</i>	HWFET
Imposto de Importação	II
Imposto Privado sobre Veículos Automotores	IPVA
Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação	ICMS
Impostos sobre Operações Financeiras	IOF

Imposto sobre Produtos Industrializados	IPI
Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia	INMETRO
Lítio-Manganês Spinel	LMO/LTO
Lítio-Níquel-Cobalto-Alumínio	NCA
Lítio-Níquel-Manganês-Cobalto	NMC
Ministério de Cooperação Internacional e Desenvolvimento Econômico	BMZ
Motor de Combustão Interna	MCI
Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior	MDIC
<i>National Renewable Energy</i>	NREL
<i>New European Drive Cycle</i>	NEDC
Níquel Hidreto Metálico	NiMH
Óxido de Lítio-Cobalto	LCO
Pesquisa e Desenvolvimento	P&D
Programa de Integração Social/Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social	PIS/COFINS
Projeto de Lei da Câmara	PLC
Projeto de Lei do Senado	PLS
<i>State of Charge</i>	SOC
Unidade de Controle Híbrido	UCH
<i>United States Cycle Supplemental FTP</i>	US06-HWY
Veículo Elétrico	VE
Veículo Elétrico Híbrido	VEH

#### Siglas

Ciclo de condução da av. Antônio Carlos – Bairro/Centro	Av.AC
---------------------------------------------------------	-------

Combustível - Gasolina	E-22
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>
Enrolamento Concentrado das bobinas da máquina	EC
Enrolamento Distribuído das bobinas da máquina	ED
Hidróxido de Carbono	HC
Máquina de Indução de Nove Fases	MI9F
Mega Joule	MJ
Modo de operação doze pólos em três fases	12P-3F
Modo de operação quatro pólos em nove fases	4P-9F
Monóxido de Carbono	CO
Óxidos de Nitrogênio	NO <sub>x</sub>
Rendimento	$\eta$
Relação de redução das marchas da transmissão	G <sub>n</sub>
Unidade de frequência Hertz	Hz

## **CAPÍTULO 1 – Introdução**

A mobilidade é uma necessidade fundamental da sociedade moderna. Para supri-la os veículos leves são hoje a principal escolha adotada pelas pessoas, seja para utilização diária de trabalho ou mesmo para atividades de lazer. A grande quantidade de veículos que suprem essa necessidade está concentrada nos grandes centros urbanos, o que tem provocado efeitos colaterais na vida da população, principalmente pelas emissões de gases poluentes que os automóveis têm lançados à atmosfera. Segundo (EHSANI e EMADI, 2010), o volume de veículos do setor de transporte somado ao do setor automobilístico é responsável por 32% dos gases poluentes lançados na atmosfera, porcentagem que quase se iguala à emissão de 34% lançada pela indústria. Juntos são responsáveis pelo consumo de 61,3% do combustível fóssil (IEA, 2009), sendo que desta porcentagem, o segmento automotivo absorve cerca de 77,3% desta energia (CASTRO e FERREIRA, 2010). Mediante estes números, os veículos se tornam uma opção potencial para aplicar medidas de redução de emissão de gases poluentes. A substituição do combustível fóssil no setor já contribuiria para uma redução de cerca de 80% nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (BRAVO, MEIRELLES e GIALONARDO, 2014).

Sob a ótica dos grandes centros urbanos, os efeitos desta poluição são intensificados. Podem estar relacionados com mudanças fisiológicas do corpo humano, sinusite, ardência nos olhos, estresse, escamação de pele, dificuldade respiratória e bronquite, entre outras. As consequências desta poluição podem ser percebidas por indicadores de saúde pública, principalmente com as despesas financeiras. Um estudo realizado pela Universidade de São Paulo (USP) levantou o quanto é gasto nas principais capitais brasileiras com o tratamento de doenças causadas pela poluição. São Paulo lidera este

ranking com gastos de aproximadamente de US\$ 300 milhões, seguida pelo Rio de Janeiro (US\$250 milhões), Porto Alegre (US\$180 milhões), Belo Horizonte (US\$150 milhões), Curitiba (US\$140 milhões) e Recife (US\$ 100 milhões). Juntas, totalizam um gasto de 1 bilhão de dólares (BRAVO, MEIRELLES e GIALONARDO, 2014).

Com base nos problemas causados ao meio ambiente e à saúde pública, o crescente aumento dos preços dos combustíveis e a redução dos níveis de combustíveis fósseis fazem-se necessárias alternativas para reduzir a dependência deste combustível.

Com base nessas preocupações, os países começam a adotar programas que estabelecem metas de redução de emissão de gases poluentes lançados à atmosfera, onde cada um deles apresenta seus próprios prazos e limites em gramas de CO<sub>2</sub> por Km. Para a certificação dos níveis de consumo, são utilizados ciclos de condução normatizados. A Índia usa os ciclos normatizados da União Europeia. Brasil, México e Canadá utilizam os ciclos de ensaio Urbano e Rodoviário normatizados pelo EUA. A Tabela 1.1-1 ilustra os limites de emissão definidos pelos países e os ciclos de condução adotados.

**Tabela 1.1-1 – Metas para redução de emissão de CO<sub>2</sub> adotada por alguns países.**

Países	Tipo de veículos	Ciclo de teste	Meta atual	
			g CO <sub>2</sub> /km	Ano alvo
União Europeia	Automóveis	NEDC	95	2021
União Europeia	Comerciais Leves	NEDC	147	2020
Índia	Automóveis	NEDC	113	2021
Canadá	Automóveis	FTP-75 + HWFET	97	2025
Canadá	Comerciais Leves	FTP-75 + HWFET	141	2025
EUA	Automóveis	FTP-75 + HWFET	97	2025
EUA	Comerciais Leves	FTP-75 + HWFET	141	2025
Brasil	Autom./Com. Leves	FTP-75 + HWFET	117	2017
México	Automóveis	FTP-75 + HWFET	145	2016
México	Comerciais Leves	FTP-75 + HWFET	196	2016
Japão	Automóveis	JC08	122	2020

Fonte: (SILVA e PIRES, 2016).

Tais evidências têm feito com que os Veículos Elétricos Híbridos (VEH) sejam uma opção potencial para o cenário automotivo mundial. Os VEHs integram aos veículos convencionais de motor a combustão interna (MCI) tecnologias para aumentar a eficiência e a redução de consumo de combustível. A proposta do VEH é uma solução intermediária entre os veículos convencionais com propulsão a MCI e os veículos puramente elétricos (VE). Mesmo os VEH sendo mais caros que os convencionais, ainda são muito mais baratos que os veículos puramente elétricos (VE). Para minimizar os custos desta tecnologia e promover a disseminação desses veículos, é importante promover ações de incentivo.

No Brasil, os veículos elétricos e os híbridos não possuíam, até outubro de 2015, classificação específica e por isso não recebiam ações de incentivo. Tal classificação implicava em uma alíquota de importação máxima aplicável sobre os veículos de 35% do seu valor total, para sua entrada no Brasil. O ministério da fazenda elaborou, em 2010, um projeto para redução da alíquota para os VE e para os VEH, mas a análise da proposta foi adiada pelo então presidente da época, para ter tempo de avaliar melhor a proposta. O preço final destes veículos no Brasil se tornava ainda mais elevado devido à aplicação dos impostos de ICMS, em torno de 18%, de tributações sociais como o PIS/COFINS, (11,6% sobre o faturamento bruto), e ainda o imposto do IPVA, que pode atingir 4% do valor do veículo (BRAVO, MEIRELLES e GIALONARDO, 2014). Neste quesito, é de extrema importância que o governo atue na elaboração e aprovação de projetos de lei com medidas públicas que beneficiem os usuários destes veículos e que dê condições para a iniciativa privada de também promover o uso desta tecnologia. Segundo (CASTRO e FERREIRA, 2010) há pelo menos cinco medidas governamentais de incentivo à disseminação dos VE e VEH: bônus aos compradores, restrições à utilização de veículos convencionais, desconto em tributos, auxílio à pesquisa e desenvolvimento e infraestrutura.

O elevado preço dos atuais VE e dos VEH acaba dificultando sua difusão no mercado tradicional, e, para driblar esse entrave, alguns países têm adotado medidas de subsídio, fornecendo bônus aos compradores. No Brasil ainda não existem ações de incentivo que concedam bônus aos compradores, mas EUA e Japão são bons exemplos desta prática, concedendo bônus de US\$ 7.500,00 e US\$ 10.000,00, respectivamente, enquanto a

China oferece o equivalente a US\$ 8.780,00 (SILVA e PIRES, 2016). Outros exemplos de atrativos desta categoria podem ser vistos na Tabela 1.1-2.

**Tabela 1.1-2 – Incentivos locais concedidos para proprietários de VE e VEH.**

<b>País</b>	<b>Atrativo</b>
Alemanha	
Itália	
Holanda	Pontos de
Dinamarca (Copenhague)	estacionamento grátis
Suécia (Arlanda e Gotemburgo)	
EUA	
Holanda	Postos de recarga grátis
EUA	

Fonte: (SILVA e PIRES, 2016)

Como medidas de restrições a utilização de veículos convencionais, Paris anunciou intenção de reduzir a zero a circulação de veículos movidos por motores de combustão a diesel até 2020. Na Noruega, onde 25% dos veículos vendidos são elétricos, foi apresentada uma proposta para proibir até 2025 a circulação de qualquer veículo que não seja de natureza elétrica. A Holanda também estuda a possibilidade de proibição, a partir de 2025, de veículos que não sejam movidos à eletricidade. A proposta está em votação na câmara baixo holandesa (SILVA e PIRES, 2016). No Brasil, a cidade de São Paulo isenta os VE e VEH do rodízio municipal aplicado aos veículos convencionais.

Os descontos em tributos são também medidas que contribuem para tornar o uso destes veículos atraente, ainda que os preços estejam elevados. Em algumas regiões do Canadá são concedidos descontos de até US\$ 2.000,00 em impostos na aquisição de um VE. No Reino Unido, existe um programa de desconto na taxa de circulação e isenção de cobrança nos estacionamentos do centro de Londres. A Alemanha e a Dinamarca promovem isenção nas taxas de licenciamento enquanto a Itália isenta de taxas de

licenciamento para os primeiro 5 anos, sendo que após esse período o desconto é de 75% (SILVA e PIRES, 2016). No Brasil, a cidade de São Paulo aprovou uma lei de incentivo que concede 50% de desconto, dos 50% do IPVA que é de direito do município, para os veículos elétricos e híbridos. Esse desconto tem validade de cinco anos e não pode exceder o total de R\$ 10.000,00, ou seja, pra ser beneficiado o veículo deve custar menos de R\$ 150.000,00.

Além de São Paulo, Rio de Janeiro e Mato Grosso do Sul também dão desconto de 50% no imposto para esses veículos. A Figura 1.1-1 ilustra outros sete estados brasileiros que concedem isenção de IPVA a VE e VEH: Piauí, Maranhão, Ceará, Sergipe, Rio Grande do Sul, Rio Grande do Norte e Pernambuco (SILVA e PIRES, 2016). Os demais estados brasileiros não concedem este incentivo.

**Figura 1.1-1 – Estados brasileiros adeptos ao programa de desconto do IPVA.**



Fonte: (SILVA e PIRES, 2016)

No final de 2015 começam a ser aprovadas medidas de incentivo com o Governo Federal zerando os Impostos de Importação (II) para automóveis unicamente movidos à eletricidade com energia proveniente de baterias ou células combustíveis (hidrogênio). A resolução foi publicada em 27 de outubro de 2015 pela Câmara de Comércio Exterior

(Camex), no Diário Oficial da União. Essa medida é válida para VE com autonomia de pelo menos 80 quilômetros, sejam eles importados montado, semidesmontado ou desmontados. Para os VEH, com ou sem auxílio de recarga externa (*plug-in*), com propulsão elétrica complementar ao sistema de propulsão a combustão, a alíquota está fixada entre zero e 7 %, fator que é dependente da cilindrada e da eficiência energética do veículo. Para usufruir deste incentivo, o veículo deve possuir capacidade máxima de até seis pessoas e não ultrapassar 3.0 litros do motor a combustão (SILVA e PIRES, 2016). A Tabela 1.1-3 ilustra a distribuição de isenção da alíquota do Imposto de Importação (II) para os VEH.

**Tabela 1.1-3 – Distribuição da alíquota do II conforme características dos veículos.**

Veículos de cilindrada 1000 cm <sup>3</sup> a 3000 cm <sup>3</sup>	Consumo Energético do MCI		Alíquota de Importação (%)
	Igual ou Superior (MJ/km)	Menor (MJ/km)	
Automóvel semidesmontado	0,01	1,1	0
Automóvel desmontado			
Automóvel desmontado	1,1	1,68	
Automóvel montado	0,01	1,1	
Automóvel semidesmontado	1,1	1,68	2
Automóvel desmontado	1,68	2,07	
Automóvel montado	1,1	1,68	4
Automóvel semidesmontado	1,68	2,07	5
Automóvel montado			7

Fonte: (SILVA e PIRES, 2016)

Esta medida de redução da alíquota do II para os VE e VEH é um grande passo. Outras importantes medidas de incentivo que podem ser aprovadas estão em tramitação no Senado Federal. O primeiro exemplo a ser citado é o Projeto de Lei do Senado (PLS) n° 174/2014, que pretende conceder isenção do Imposto sobre Produtos Industrializados

(IPI) por 10 anos para os VE e para os VEH com MCI a etanol, desde que produzidos localmente no Brasil. Esta proposta também suspende, por 10 anos, o II e o IPI para importação direta de partes e acessórios destinados a fabricação dos veículos, desde que não haja similar nacional (SILVA e PIRES, 2016). A atual fase do projeto se encontra em análise pela Comissão de Assuntos Econômicos (Senado Federal, 2016).

Outro projeto em tramitação é o Projeto de Lei do Senado (PLS) n° 780/2015 que visa garantir, aos taxistas e aos deficientes físicos, a aquisição de VE ou VEH com isenção de IPI e Impostos sobre Operações Financeiras (IOF), que inclusive já existia para este perfil de proprietários dos veículos convencionais a combustão desde o ano de 1995 (SILVA e PIRES, 2016). A atual fase do projeto se encontra em análise pela Comissão de Assuntos Econômicos (Senado Federal, 2016).

No que diz respeito à infraestrutura, está em tramitação no senado o Projeto de Lei da Câmara (PLC) n° 65/2014 que institui a obrigatoriedade de instalação de postos de recarga de baterias para VE e VEH *plug-in* em estacionamentos públicos. Este projeto também obriga o poder público a desenvolver mecanismos que promovam a instalação de tomadas para recargas em garagens de ambientes residenciais (SILVA e PIRES, 2016) e encontra-se em análise pela Comissão de Serviços de Infraestrutura (Senado Federal, 2016).

No que tange Pesquisa & Desenvolvimento, os incentivos são medidas fundamentais para a redução dos custos e para aumentar a eficiência da tecnologia empregada. Mesmo que diversos modelos de VEH já estejam à disposição no mercado, não existe um padrão bem definido para estes veículos, o que acaba provocando uma corrida para o domínio da tecnologia. Os Estados Unidos utilizaram recursos que atingiram cerca de US\$ 2,4 bilhões em P&D de veículos e baterias. Nos EUA, o orçamento de 2012 foi destinado com foco em baterias, células a combustível, sistemas veiculares e infraestrutura, totalizando um recurso de US\$ 268 milhões. A Suécia também concentrou recursos para a atividade de P&D em baterias, investindo aproximadamente US\$ 3 milhões. O Japão tem concentrado esforços e investimentos em infraestrutura (SILVA e PIRES, 2016).

Quando se pensa em VE e VEH *plug-in*, se faz importante pensar em estimular a implantação de infraestrutura de recarga. Em países de pequena extensão, como Israel e Japão, já existem postos de recarga rápida em todo o território. No Japão, por exemplo, já existem mais postos de recarga do que bombas de combustível. Mesmo que os veículos convencionais ainda sejam maioria no país, esse fato ilustra a opção e a tendência para o mercado (Carro Barato, 2016). Os EUA concedem créditos de imposto de 30 % do custo para a instalação de pontos de recargas comerciais, limitado a US\$ 30 mil, e para o consumidor residencial o crédito está limitado à quantia de US\$ 1 mil. A iniciativa privada também exerce forte impacto no avanço a disseminação da tecnologia. Um bom exemplo é implantação de postos de recarga de veículos elétricos pela empresa americana Tesla Motors, onde milhares de Eletropostos estão disponibilizados nos EUA, Europa e Ásia.

Dinamarca e Finlândia destinaram cerca de US\$ 11 e 6 milhões para o desenvolvimento de infraestrutura, respectivamente. Na Noruega o governo investiu cerca de €\$ 6,5 milhões de Euros na construção de postos de recarga. Reino Unido disponibilizou recurso da ordem de US\$ 55 milhões para postos de recarga residenciais e públicos, em ruas e rodovias. Países em desenvolvimento também têm adotado medidas de incentivo. Na China, aproximadamente US\$ 1,1 bilhão foi destinado para projetos da tecnologia e análise de sua viabilidade, destinadas tanto para VE quanto para os VEH. A Índia lançou um Plano Nacional de Mobilidade Elétrica para 2020 com colaboração entre governo, indústria e academia, com esforços direcionados ao desenvolvimento de baterias e seus sistemas de gerenciamento (*Battery Management Systems - BMS*), eletrônica de potência, motores elétricos e sistemas de transmissão (CASTRO, BARROS e VAZ, 2015).

Essa conscientização e os esforços para incentivar a tecnologia e o mercado dos VE e VEH também abrem portas para parcerias no Brasil. A Alemanha firmou acordo de cooperação técnica com o Brasil em Março de 2016. O acordo será coordenado pelo Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC) e prevê duração de quatro anos e um investimento de €\$ 5 milhões de Euros provenientes do Ministério de Cooperação Internacional e Desenvolvimento Econômico da Alemanha (BMZ) (Automotive Business, 2016).

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e a Peugeot Citroën aprovaram uma proposta para a criação de um Centro de Pesquisa em Engenharia para o desenvolvimento de motores de combustão a etanol mais potente e eficiente. O Centro de Pesquisa irá reunir pesquisadores da UNICAMP, Instituto Mauá de Tecnologia, Instituto Tecnológico da Aeronáutica - ITA e da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP (Fapesp, 2013).

Existe um programa brasileiro cujo objetivo é criar condições para o aumento da competitividade no setor automotivo para produzir veículos mais econômicos e seguros, denominado Inovar-auto, que é o programa de incentivo à inovação tecnológica e adensamento da cadeia produtiva de veículos automotores. Este programa foi criado pela Lei nº 12.715/2012 e tem validade entre o período de 2013 a 2017. Este primeiro período do programa favorece as empresas do segmento com redução de impostos, para investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e na nacionalização das peças utilizadas nos veículos (INOVARAUTO, 2017). Renovar este programa é um passo importante que também irá contribuir para o avanço da eletrificação veicular.

A isenção de impostos oferecida, juntamente com os Projetos de Lei em discussão pelo governo, foi vista de forma positiva pela montadora alemã BMW, que avalia, caso os impostos permitam, iniciar fabricação do modelo i3, puramente elétrico, da marca Alemã, em Araquari - SC entre 2017 e 2018. A montadora Japonesa NISSAN também manifestou-se de forma positiva, afirmando estar atenta a estes projetos de Lei de Incentivos (Carros Uol, 2015). O interesse da Japonesa Toyota em fabricar no Brasil a nova geração do Prius em 2018 também é reflexo dos incentivos promovidos (Carros Uol, 2015). Face ao exposto, que as medidas de isenção e redução de alíquota também estimulam a produção de VE e VEH no mercado nacional.

É possível ver uma tendência do mercado automobilístico em absorver os VE e os VEH, pelos diversos motivos apresentados anteriormente, fato que obriga as montadoras a seguirem por este caminho. O grupo PSA, indústria automotiva que produz veículos sob as marcas Peugeot e Citroën, já divulgou agenda com proposta de desenvolvimento de quatro modelos de veículos elétricos e sete veículos híbridos até 2021, com as primeiras novidades previstas para 2019 (Automotive Business, 2016). O grupo Hyundai-Kia apresenta planos de ter em sua linha de produção, até o ano de 2020, 26 modelos

eletrificados, dos quais pelo menos 12 serão híbridos (HEV), 6 híbridos plug-in (PHEV) e 2 puramente elétricos (EV) (PlanetCarsZ, 2016).

## **1.1. Motivação**

Existem diversas razões para o estudo e a pesquisa sobre o assunto. A ideia de obter maior eficiência dos veículos convencionais utilizando sistemas de tração elétrica e com isso melhorar desempenho, reduzir consumo de combustível e os níveis de emissões de gases poluentes causadores de danos ao meio ambiente e dos males de saúde causados a população já é uma forte motivação.

No caso específico deste trabalho, a motivação também está em avaliar a utilização de uma máquina elétrica de indução de nove fases para hibridizar um veículo nacional compacto de motor de combustão interna de 999 cc utilizando a arquitetura híbrida paralela de eixos separados. Esta máquina elétrica atípica e esta arquitetura não muito comum apresentam vantagens interessantes que possibilitam hibridizar um veículo convencional já consolidado no mercado pelas montadoras sem que sejam necessárias grandes modificações mecânicas no veículo.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo deste trabalho é avaliar uma proposta de sistema de propulsão elétrica, baseada em máquinas de indução de nove fases, para a hibridização de um veículo nacional compacto de 999 cc.

### 1.3.1 Objetivos específicos

- Apresentar as políticas públicas e ações de incentivo para os veículos elétricos híbridos no mercado nacional, fazendo um paralelo com as medidas adotadas por outros países do mundo;
- Modelar um veículo convencional a MCI com as características de um convencional de 999 cc com o auxílio do *software* de simulação avançada de veículos, o ADVISOR;
- Validar o modelo comparando os resultados obtidos na simulação com os dados obtidos com o veículo real em pista de teste e em dinamômetro;
- Implementar no *software* ADVISOR a arquitetura híbrida Paralela de Eixo Separado e o controle do modo de operação do veículo hibridizado, visto que o mesmo não contempla esta arquitetura;
- Medir um ciclo de condução real ao longo da Av. Presidente Antônio Carlos, em Belo Horizonte - MG, inserindo-o no *software* ADVISOR para comparar com os resultados obtidos com o ciclo de condução urbano adotado pela norma brasileira;
- Avaliar o uso da máquina de indução de nove fases no sistema de tração elétrica embarcada no veículo;
- Apresentar uma proposta final para o sistema de tração elétrica capaz de contribuir com os esforços que vêm sendo apresentados para viabilizar a utilização dos VEH em grande escala;
- Comparar os resultados do veículo hibridizado pela arquitetura paralela de eixos separados com a arquitetura paralela de assistência.

### 1.3. Contribuições

Este trabalho deixa as seguintes contribuições:

- Implementação do modelo representativo de um veículo nacional compacto em ambiente de simulação, o que possibilita avaliar os efeitos da hibridização em

um veículo nacional. Com o mesmo fica relativamente fácil e rápido inserir diferentes arquiteturas híbridas disponíveis no ADVISOR para avaliação, conforme o propósito e a necessidade do usuário;

- Implementação de um ciclo de condução urbano medido na Av. Presidente Antônio Carlos, um dos principais corredores de Belo Horizonte – MG, possibilitando avaliar o desempenho do veículo em uma via urbana real;
- Modificação realizada no *software* ADVISOR para contemplar a arquitetura híbrida paralela de eixos-separados, recurso que não está disponível nesta ferramenta de simulação;
- Avaliação de uma utilização da máquina de indução de nove fases para tração elétrica nesta proposta de hibridização veicular;
- Avaliação dos efeitos da hibridização paralela de eixos separados na redução do consumo e da emissão de poluentes.

#### **1.4. Estruturação do texto**

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, apresentados conforme descrito a seguir. Neste primeiro capítulo, fez-se a introdução do tema do trabalho, descrevendo também as medidas de incentivo e políticas públicas para os VE e VEH, tanto no Brasil como em outros países. Foram apresentados também os objetivos, as motivações e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 estão apresentados os fundamentos de propulsão automóvel, que no decorrer do capítulo passa pelos conceitos de movimento e as resistências ao mesmo, dinâmica de movimento e parâmetros de desempenho dos veículos, a fim de esclarecer características e informações utilizadas nos modelos de simulação do veículo no ADVISOR.

No capítulo 3 estão apresentadas as opções tecnológicas dos VEH, os níveis de hibridização de um veículo e as arquiteturas híbridas disponíveis. Também estão

detalhadas as características dos componentes que constituem os VEH, passando pelos componentes do sistema de tração mecânica e elétrica.

O capítulo 4 mostra a concepção do sistema híbrido proposto neste trabalho. Aqui são detalhadas as características dos componentes, principalmente o MCI e a máquina de indução de nove fases, além da arquitetura híbrida definida e os modos operacionais do veículo hibridizado.

O capítulo 5 ilustra os ciclos de condução adotados pela ABNT e um real, medido na av. Antônio Carlos, em Belo Horizonte – MG, além de apresenta o modelo do veículo nacional a MCI implementado no ambiente de simulação ADVISOR e analisar os resultados de simulação e aqueles obtidos com o veículo em dinamômetro e em pista de testes. É apresentada também a modificação realizada na estrutura do ADVISOR para a inclusão da arquitetura paralela de eixos separados. Também são avaliados os resultados de simulação entre o convencional e o híbrido Paralelo-ES. Por fim, é realizada uma análise comparativa entre a arquitetura paralela de eixos separados e a arquitetura paralela de assistência, denominada Paralela-SA.

O capítulo 6 finaliza o trabalho apresentando as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

Por fim os anexos. O Anexo A apresenta as considerações utilizadas para realizar as simulações. No Anexo B é apresentado o *software* ADVISOR utilizado neste trabalho, para consulta mais detalhada dos recursos desta ferramenta de simulação.

## CAPÍTULO 2 – Fundamentos de propulsão automóvel

Entender o comportamento dinâmico dos veículos é muito importante para projetar sistemas de tração eficientes, seja ele um veículo convencional, elétrico ou híbrido. Esses automóveis são complexos, pois possuem centenas de componentes, por exemplo, motores de combustão interna (MCI), transmissão, armazenadores de energia, máquinas elétricas, unidades de controle, etc, que podem variar em capacidade, peso e volume. Neste aspecto, os computadores permitem avaliar dinamicamente características importantes de desempenho e os efeitos destes componentes na operação dos veículos. Neste capítulo estão apresentadas as equações matemáticas que descrevem a dinâmica de operação dos veículos segundo apresentado pelo autor (EHSANI e EMADI, 2010).

### 2.1. Conceitos de movimento

Para que um determinado veículo entre e permaneça em movimento o somatório das forças de tração,  $F_t$ , deve ser superior às forças de resistência,  $F_r$ , ao movimento. Essas forças de resistência são dadas pelo arraste aerodinâmico, inclinação da pista e por atritos.

Pela segunda Lei de Newton, a aceleração de um corpo pode ser descrita pela equação Eq. 2.1-1.

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M}$$

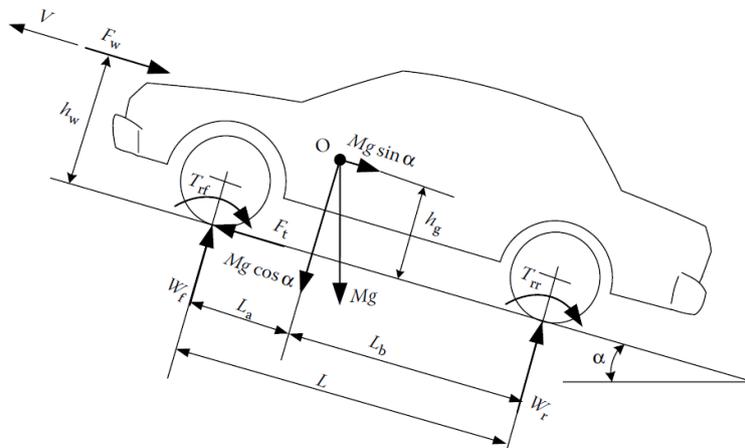
**Eq. 2.1-1**

Onde  $V$  é a velocidade,  $M$  é a massa a ser acelerada e  $\delta$  é o fator de massa que converte as inércias de rotação e dos componentes em massa translacional.

## 2.2. Resistência ao movimento do veículo

A Figura 2.2-1 ilustra as forças resistivas que se opõem ao movimento do veículo. Essas forças resistivas incluem o torque de resistência ao rolamento dos pneus no piso, dado por  $T_{rf}$  no eixo frontal e  $T_{rr}$  no eixo traseiro. A força de arraste aerodinâmico é representada por  $F_w$ , e o deslocamento de massa vertical por  $Mg \cdot \sin \alpha$  com a inclinação do piso, onde  $Mg$  é o produto da massa pela gravidade.

**Figura 2.2-1 – Forças atuantes sobre o veículo em pista com inclinação.**



Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010).

Onde,

- $V$  - velocidade;
- $F_t$  - força de tração;
- $F_w$  - força de arraste aerodinâmico;
- $h_g$  - altura do centro de gravidade;
- $h_w$  - altura do ponto de aplicação da força de arraste aerodinâmico;
- $T_{rf}$  - torque de resistência ao rolamento dos pneus do eixo frontal;

- $T_{rr}$  - torque de resistência ao rolamento dos pneus do eixo traseiro;
- $W_f$  - força normal sobre o eixo frontal;
- $W_r$  - força normal sobre o eixo traseiro;
- $L$  - distância do entre eixo;
- $L_a$  - distância do CG ao eixo frontal;
- $L_b$  - distância do CG ao eixo traseiro;
- $M$  - massa do veículo;
- $g$  - gravidade;
- $\alpha$  - inclinação da pista.

### 2.2.1 Resistência ao Rolamento

A resistência ao rolamento é dada pelo atrito de contato entre os pneus com o solo, mas os atritos dos rolamentos e engrenagens mecânicas também tem influência. Quando a força de tração é aplicada, os pneus sentem essa força, com isso aparece uma deformação no material do pneu. Essa deformação é denominada como histerese (EHSANI e EMADI, 2010). Com o veículo em repouso, existe uma distribuição simétrica da pressão dos pneus, o que resulta em uma força normal dada pela relação de proporcionalidade a massa do veículo e a gravidade, conforme ilustrado pela equação Eq. 2.2-1.

$$P = M \cdot g \tag{Eq. 2.2-1}$$

O tipo de solo em que os pneus estão em contato e o tipo dos pneus também influenciam na deformação e nessa distribuição de pressão. O torque de resistência ao rolamento do pneu é definido como  $T_r = P_a$ . A força a ser aplicada ao centro da roda, necessária para equilibrar essa resistência, é dada conforme descreve a equação Eq. 2.2-2.

$$F_r = \frac{T_r}{r_d} = \frac{P_a}{r_d} = P \cdot f_r \tag{Eq. 2.2-2}$$

Onde  $r_d$ , é o raio da roda e  $f_r = a/r_d$  é o coeficiente de resistência ao rolamento. A força  $F_r$  é a força horizontal resultante do torque  $T_r$ .

O coeficiente de resistência ao rolamento depende do tipo de solo, irregularidades e presença de líquidos, material do pneu, estrutura geométrica e pressão dos pneus. Esta variável é constante e tabelada conforme as características descritas, porém, podem ser obtidas calculando conforme ilustra a equação Eq. 2.2-3.

$$f_r = f_0 + f_s \left( \frac{V}{100} \right)^{2.5}$$

**Eq. 2.2-3**

Os coeficientes  $f_0$  e  $f_s$  são dependentes de características provenientes da pressão interna dos pneus do veículo. É aceitável linearizar a função do coeficiente através da velocidade em km/h. Esta aproximação simplifica a equação, que passa a ser escrita conforme equação Eq. 2.2-4.

$$f_r = 0.01 \left( \frac{V}{160} \right)$$

**Eq. 2.2-4**

Valores típicos de coeficientes de resistência ao rolamento,  $f_r$ , são 0,015 para um pneu de lona radial, até cerca de 0,005 para pneus desenvolvidos especialmente para veículos elétricos (LARMINIER e LOWRE, 2003). Para veículos de passeio que trafegam em piso de concreto ou asfalto é considerado um coeficiente de resistência ao rolamento de 0,013 (EHSANI e EMADI, 2010).

### 2.2.2 Resistência Aerodinâmica

A resistência aerodinâmica que o veículo encontra ao se deslocar por um volume de massa de ar cresce à medida que a velocidade de deslocamento do veículo aumenta e é

função de fatores como a área frontal do veículo, densidade do ar, aerofólios, espelhos retrovisores, dutos de passagens de ar, dentre outros. Essa força de arraste aerodinâmico  $F_w$  pode ser calculada pela equação Eq. 2.2-5.

$$F_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot C_D (V - V_w)^2$$

**Eq. 2.2-5**

Onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $A_f$  é a área frontal do veículo,  $C_D$  é o coeficiente de resistência aerodinâmica,  $V$  é a velocidade do veículo e  $V_w$  é a velocidade do vento, o que pode favorecer ou prejudicar o deslocamento.

### 2.2.3 Inclinação de Pista

Quando o veículo se desloca em uma pista com inclinação positiva ou negativa, seu peso produz uma componente vertical proporcional ao ângulo,  $\alpha$ , de inclinação da pista, conforme foi ilustrado anteriormente pela Figura 2.2-1. Para análises de desempenho é avaliada apenas a resistência de deslocamento em subida, ou seja, a capacidade de se deslocar em uma pista com uma determinada inclinação. Essa força pode ser determinada pela equação Eq. 2.2-6.

$$F_g = M \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

**Eq. 2.2-6**

## 2.3. Dinâmica do movimento

Conforme apresentado na seção anterior, as principais forças que atuam sobre o movimento do veículo são o atrito proveniente da resistência ao rolamento,  $F_r$ , a força

de arrasto aerodinâmico,  $F_w$ , e a força de tração  $F_t$ . Para veículos com sistema de tração aplicada unicamente em um eixo, seja ele frontal ou traseiro, a força do sistema de propulsão no eixo oposto é igual à zero. A equação geral que descreve o movimento está expressa conforme Eq. 2.3-1 e compreende o somatório de todas as forças aplicadas nos eixos do veículo.

$$M \cdot \frac{dV}{dT} = M \cdot a = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_w + F_g)$$

**Eq. 2.3-1**

Observa-se pela equação que, para produzir aceleração, as forças de tração devem ser superiores as força de resistência a esse movimento. Não exceder o limite máximo de tração aplicada nas rodas é um parâmetro de segurança importante, pois neste caso, existe perda de aderência entres os pneus e o solo, e com isso o veículo perde estabilidade. Essa perda de aderência também ocorre quando são excedidas as forças máximas de frenagem aplicáveis as rodas.

### 2.3.1 Força Máxima de Tração

Para determinar a força máxima de tração aplicável, é necessário conhecer as cargas que atuam sobre os eixos de tração do veículo. Este valor é obtido através da soma dos respectivos torques de tração. As equações Eq. 2.3-2 e Eq. 2.3-3 descrevem as forças normais  $W_f$  e  $W_r$  para os eixos dianteiro e traseiro, respectivamente.

$$W_f = \frac{M \cdot g \cdot L_b \cdot \cos(\alpha) - (T_{rf} + T_{rr} + F_w \cdot h_w + M \cdot g \cdot h_g \cdot \sin(\alpha) + M \cdot h_g \cdot \frac{dV}{dt})}{L}$$

**Eq. 2.3-2**

$$W_r = \frac{M \cdot g \cdot L_a \cdot \cos(\alpha) - (T_{rf} + T_{rr} + F_w \cdot h_w + M \cdot g \cdot h_g \cdot \sin(\alpha) + M \cdot h_g \cdot \frac{dV}{dt})}{L}$$

**Eq. 2.3-3**

Para veículos de passeio, é permitido assumir que a altura do ponto de aplicação da força aerodinâmica,  $h_w$ , é próxima da altura ao centro de gravidade do veículo, dado por  $h_g$ . Lembrando que a força de tração total é dada pela soma das forças de tração de cada eixo,  $F_t = F_{tf} + F_{tr}$ . Com isso, essas equações podem ser simplificadas como apresentado abaixo pelas equações Eq. 2.3-4 e Eq. 2.3-5.

$$W_f = \frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \left( F_w + F_g + M \cdot g \cdot f_r \cdot \frac{r_d}{h_g} \cdot \cos(\alpha) + M \cdot \frac{dV}{dt} \right)$$

**Eq. 2.3-4**

$$W_r = \frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \left( F_w + F_g + M \cdot g \cdot f_r \cdot \frac{r_d}{h_g} \cdot \cos(\alpha) + M \cdot \frac{dV}{dt} \right)$$

**Eq. 2.3-5**

E por fim pelas equações Eq. 2.3-6 e Eq. 2.3-7:

$$W_f = \frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \left( F_t - F_r \cdot \left( 1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right)$$

**Eq. 2.3-6**

$$W_r = \frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \left( F_t - F_r \cdot \left( 1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right)$$

**Eq. 2.3-7**

Onde  $F_r$  é a força total de resistência ao rolamento dos pneus. O primeiro termo do lado direito das equações, descreve a carga estática que atua sobre os eixos quando o veículo está em repouso em pista plana. O segundo termo representa a componente dinâmica da carga sobre o eixo.

Enfim, para obter a força de tração máxima admissível nos respectivos eixos antes do instante de escorregamento, é necessário multiplicar os respectivos torques pelo

coeficiente de aderência do pneu ao piso, dado por  $\mu$ . Para veículos com tração dianteira, a máxima força aplicável é dada pelas equações Eq. 2.3-8 e Eq. 2.3-9.

$$F_{t\_max} = \mu \cdot W_f = \mu \cdot \left[ \frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \cdot \left( F_{t\_max} - F_r \left( 1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \right]$$

**Eq. 2.3-8**

$$F_{t\_max} = \frac{\mu \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \left[ L_b + \frac{f_r(h_g - r_d)}{L} \right]}{1 + \mu \cdot \frac{h_g}{L}}$$

**Eq. 2.3-9**

As equações Eq. 2.3-10 e Eq. 2.3-11 ilustram o análogo para expressar a força total de tração para veículos com sistema de propulsão no eixo traseiro.

$$F_{t\_max} = \mu \cdot W_r = \mu \cdot \left[ \frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \cdot \left( F_{t\_max} - F_r \left( 1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \right]$$

**Eq. 2.3-10**

$$F_{t\_max} = \frac{\mu \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \left[ L_a - \frac{f_r(h_g - r_d)}{L} \right]}{1 - \mu \cdot \frac{h_g}{L}}$$

**Eq. 2.3-11**

Como visto anteriormente, o respectivo coeficiente de aderência depende essencialmente do tipo de pavimento. Sendo assim, a propulsão depende da possível força máxima longitudinal aplicável entre pneus e o piso, e não da máxima potência que o sistema de tração do veículo pode efetivamente aplicar. A aderência dos pneus ao piso está diretamente relacionada com o valor de deslizamento dos pneus. Este deslizamento

percentual para regimes de propulsão e de frenagem estão descritos pelas equações apresentadas por Eq. 2.3-12.

$$s_t = \left(1 - \frac{V}{r_d \cdot \omega}\right) \cdot 100 (\%) \quad s_b = \left(1 - \frac{r_d \cdot \omega}{V}\right) \cdot 100 (\%)$$

**Eq. 2.3-12**

A velocidade  $V$  é referente à velocidade de translação do centro do pneu,  $r_d$  o raio do pneu e  $\omega$  a velocidade angular. Como o produto  $r_d \cdot \omega$  é superior à velocidade  $V$ , o valor de  $s$  está compreendido entre 0 e 1. Estudos realizados no CTM/UFMG mostram que o pico máximo da força de tração é atingido para deslizamentos que estão entre 5 e 8%.

A máxima força de tração do pneu é função deste escorregamento e normalmente é expressa pela equação Eq. 2.3-13.

$$F_x = P \cdot \mu(s)$$

**Eq. 2.3-13**

Onde  $P$  é a carga normal sobre o eixo de tração e  $\mu(s)$  é o coeficiente de aderência do pneu ao piso em função do escorregamento.

### 2.3.2 Força Máxima de Frenagem

O sistema de freio dos veículos é de extrema importância para uma operação segura e confortável de redução de velocidade dos automóveis. Em regiões urbanas, esse sistema de freio mecânico dissipa uma energia muito grande, perdida na forma de calor. Com os avanços nos sistemas de tração elétricos e híbridos, é possível recuperar essa energia por frenagem regenerativa. Na frenagem, ocorre transferência de massa do eixo traseiro

para o dianteiro, alterando as forças sobre os eixos e o centro de gravidade do veículo. Por isso, tanto na frenagem regenerativa como na frenagem mecânica convencional, é importante manter a estabilidade do automóvel ao aplicar uma distribuição de forças de frenagem nos eixos.

Assim como foi visto anteriormente para o caso de aceleração, na frenagem existem forças aplicadas nos diferentes eixos do veículo. Na desaceleração as forças de arrasto aerodinâmico e atritos são praticamente desprezíveis, assim, considera-se que a desaceleração pode ser facilmente expressa pela equação Eq. 2.3-14.

$$j = \frac{F_{bf} + F_{br}}{M}$$

**Eq. 2.3-14**

Onde  $F_{bf}$  e  $F_{br}$  são as forças de frenagem que atuam nos eixos frontal e traseiro, respectivamente.

Na frenagem convencional por fricção, a força de frenagem,  $F_b$ , aplicada, é traduzida pelo atrito entre os componentes de frenagem do sistema hidráulico que criam um torque de frenagem dado por  $T_b = r_d \cdot F_b$ . Quanto maior o torque aplicado na frenagem, maior a força de frenagem. A força de frenagem máxima aplicável  $F_{b\_max}$  depende da capacidade de aderência dos pneus do veículo ao piso, do mesmo modo como visto anteriormente para tração. Em sistemas de frenagem com controle de bloqueio, o chamado ABS (*Antilock Brake System*), a desaceleração máxima do veículo é limitada pelo coeficiente de aderência, conforme ilustra a equação Eq. 2.3-15. Esse sistema não permite que as rodas travem e os pneus derrapem.

$$|j_{max}|_{\mu} = \frac{F_{bf\_max} + F_{br\_max}}{M} = \frac{(W_f + W_r) \cdot \mu}{M}$$

**Eq. 2.3-15**

## 2.4. Desempenho dos veículos

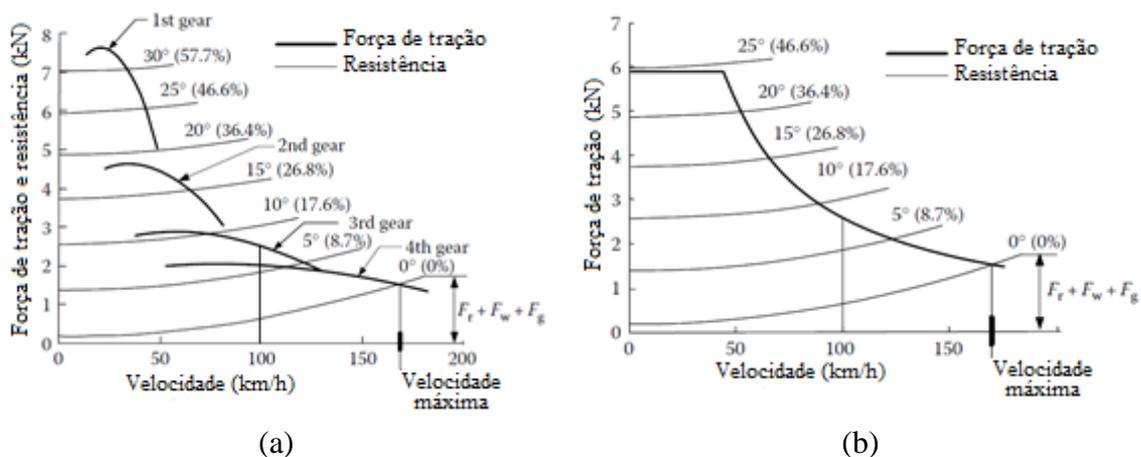
Dois fatores básicos limitam a força máxima de tração aplicável. O primeiro deles limita à força máxima de tração pela aderência dos pneus ao solo. O outro fator é a máxima força de tração disponível nas rodas em função do torque fornecido pelo MCI. O menor destes determina o desempenho dinâmico do veículo.

Os parâmetros de desempenho dos veículos se baseiam em três indicadores, velocidade máxima, aceleração e capacidade de subida.

### 2.4.1 Velocidade Máxima

A velocidade máxima é o parâmetro determinado pela velocidade constante em que o veículo consegue alcançar em uma pista plana. Nesta condição o motor de tração exerce sua maior potência. Essa velocidade é dada em função do equilíbrio entre a máxima força de tração do veículo e a resistência ao deslocamento. A Figura 2.4-1 ilustra as características de força de tração de sistemas de propulsão e das resistências.

**Figura 2.4-1 – Resistências ao deslocamento e da força de tração em transmissões de múltiplas velocidades (a) e em transmissão de uma velocidade.**



Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Traduzida.

Como pode ser observada a resistência ao deslocamento cresce com o aumento da velocidade e da inclinação da pista. Percebe-se que para uma pista sem inclinação, a velocidade máxima que o veículo irá desenvolver é superior a 150 km/h, quando acontece a intercessão entre as curvas de tração e de resistência. O mesmo vale para as demais curvas de resistência ao deslocamento considerando as inclinações de pista. O equilíbrio destas forças pode ser expresso conforme a equação Eq. 2.4-1.

$$\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} = M \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2 \quad \text{Eq. 2.4-1}$$

Onde  $i_g$  representa a razão entre velocidade de entrada e de saída do sistema de transmissão,  $i_0$  é a relação entre velocidade de entrada e saída do diferencial e  $\eta_t$  a eficiência deste conjunto. A equação Eq. 2.4-1 mostra que o veículo irá atingir a velocidade máxima quando a força de tração, representada pelo termo a esquerda da equação, for igual à resistência ao deslocamento, representado pelo termo a direita de igualdade.

Segundo (EHSANI e EMADI, 2010), veículos de alto desempenho, ou seja, com motores de tração de potência elevada, não existe uma intercessão entre a curva de força de tração a de resistência ao deslocamento. Assim a velocidade máxima alcançável pelo veículo fica limitada a velocidade do sistema de tração do veículo, expressa pela equação Eq. 2.4-2.

$$V_{max} = \frac{\pi \cdot n_{p\_max} \cdot r_d}{30 \cdot i_0 \cdot i_{g\_min}} \quad [m/s] \quad \text{Eq. 2.4-2}$$

Onde  $n_{p\_max}$  é a máxima velocidade do motor do sistema de tração e  $i_{g\_min}$  é a mínima relação de redução do sistema de transmissão.

## 2.4.2 Capacidade de Subida

A capacidade de subida, ou *gradeability* como também é conhecida, indica inclinação da pista no qual o veículo consegue manter uma velocidade constante, como por exemplo, qual a inclinação máxima de pista que o veículo irá conseguir manter a velocidade de 80 km/h.

Quando os veículos se deslocam em velocidade constante em pista com inclinação baixa, a força de tração se equilibra com as resistências conforme descrito pela equação Eq. 2.4-3.

$$\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} = M \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2 + M \cdot g \cdot i$$

**Eq. 2.4-3**

Rearranjando a equação Eq. 2.4-3 para colocar  $i$  em evidência, obtém-se a equação Eq. 2.4-4.

$$i = \frac{\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2}{Mg} = d - f_r$$

**Eq. 2.4-4**

Onde  $d$ , chamado de fator de desempenho, fica escrito conforme equação Eq. 2.4-5.

$$d = \frac{F_t - F_w}{Mg} = \frac{\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2}{Mg}$$

**Eq. 2.4-5**

Para pistas com grande inclinação, essa capacidade por ser calculada pela equação Eq. 2.4-6.

$$\sin \alpha = \frac{d - f_r \cdot \sqrt{1 - d^2 + f_r^2}}{1 + f_r^2}$$

**Eq. 2.4-6**

### 2.4.3 Desempenho de Aceleração

Este parâmetro de desempenho é definido pelo tempo de aceleração e pela distância percorrida pelo veículo de zero a uma determinada velocidade, por exemplo, zero a 100 km/h. Esse teste dinâmico de aceleração é realizado considerando pista plana. Assim é possível, pela segunda Lei de Newton, determinar a aceleração conforme descrito abaixo pela Eq. 2.4-7.

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{F_t - F_f - F_w}{M\delta}$$

**Eq. 2.4-7**

Substituindo  $F_t$ ,  $F_f$  e  $F_w$  pelas suas expressões ilustradas anteriormente apresentadas, pode-se reescrever a aceleração em uma forma mais completa conforme apresentado abaixo pela Eq. 2.4-8.

$$a = \frac{\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2}{M\delta}$$

**Eq. 2.4-8**

Onde  $\delta$  é considerado o fator de inércia rotacional, resultante do aumento da massa equivalente devido aos momentos angulares dos componentes rotativos. Este fator pode ser obtido pela equação Eq. 2.4-9.

$$\delta = 1 + \frac{I_w}{M \cdot r_d^2} + \frac{i_0^2 \cdot i_g^2 \cdot I_p}{M \cdot r^2} \approx 1 + 0,04 + 0,0025 \cdot i_0^2 \cdot i_g^2$$

**Eq. 2.4-9**

Onde  $I_w$  e  $I_p$  os fatores de inércia angular das rodas e do motor. Através da equação da aceleração, podem ser deduzidas as fórmulas de cálculo para o tempo de aceleração, dado pela equação Eq. 2.4-10.

$$t_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\delta \cdot M}{\frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1 \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2}{2}} dV$$

**Eq. 2.4-10**

Para calcular a distância percorrida na fase de aceleração, utiliza-se da representação apresentada pela equação Eq. 2.4-11.

$$S_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\delta \cdot M \cdot V}{\frac{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1 \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2}{2}} dV$$

**Eq. 2.4-11**

## Conclusões

Neste capítulo fica evidente a importância de entender os princípios da física que regem a dinâmica de movimento dos veículos. Com esses fundamentos descritos em equações, e apresentados anteriormente, é possível avaliar, com auxílio dos computadores, o comportamento dinâmico e assim avaliar características importante de desempenho dos veículos.

A potência e o torque dos motores de tração juntamente com o sistema de transmissão definem a capacidade e o desempenho de velocidade máxima, aceleração e a capacidade de subida dos veículos. Porém, a dinâmica de movimento dos veículos é limitada pela máxima capacidade do motor de tração e da transmissão e a capacidade de aderência dos pneus com a pista no qual o veículo se desloca.

Os motores de combustão utilizam sistemas de transmissão de múltiplas velocidades para aproximar suas características das ideias desejadas para sistemas de tração. Já as máquinas elétricas, tem essa capacidade desejada de prover torque plano em ampla faixa de velocidades, podendo assim utilizar sistemas de transmissão de uma velocidade.

## **CAPÍTULO 3 – Veículo Elétrico Híbrido**

Os Veículos Elétricos Híbridos (VEH) apresentam uma solução tecnológica capaz de aumentar a eficiência e a autonomia dos veículos convencionais combinando dois sistemas de propulsão. O primeiro sistema consiste no uso de motores de combustão interna (MCI), podendo ser a gasolina, etanol ou diesel. O segundo sistema consiste na propulsão elétrica, podendo ser baseada em vários tipos de máquinas elétricas, como por exemplo, máquinas de indução, máquinas síncronas, Brushless DC, etc.

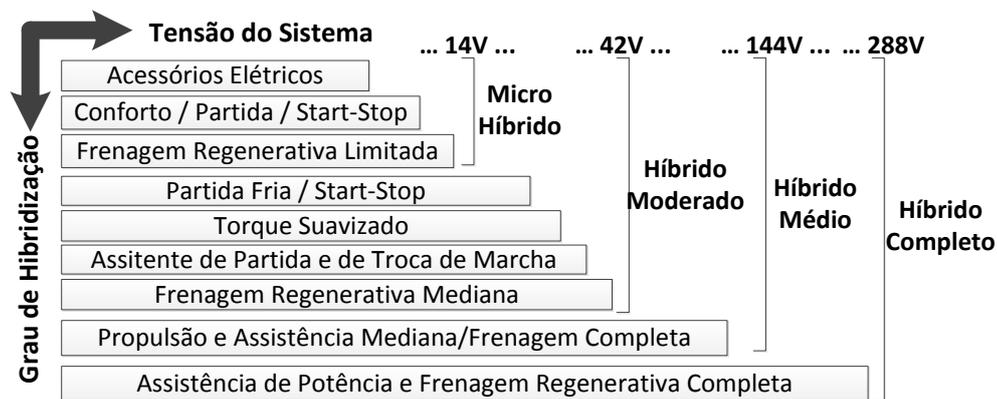
Um conjunto de baterias para armazenamento de energia e um conversor de frequência são responsáveis por realizar a conversão de energia para armazenar nas baterias e para acionar a máquina elétrica. Este sistema de propulsão elétrica pode ser integrado a um veículo convencional de diferentes formas, de acordo com as arquiteturas adotadas pelos fabricantes, e com os diferentes níveis de hibridização. O grau de hibridização e as arquiteturas híbridas dos VEH estão apresentados nas próximas subseções.

### **3.1. Grau de hibridização**

A classificação do grau de hibridização de um veículo é determinada conforme as características operacionais de tração do veículo. Segundo (MAGALHÃES, 2014), a forma como é feita a recarga de energia pelo sistema de frenagem regenerativa pode influenciar essa classificação. Fato é que, quanto maior o grau de liberdade do modo de operação híbrida, maior a complexidade e o nível de eficiência do sistema híbrido. Existem quatro classificações para o grau de hibridização, sendo eles do menor para o

maior, denominados Micro Híbrido, Híbrido Moderado, Híbrido Médio e Híbrido Completo. A Figura 3.1-1 ilustra as características dessas variantes.

**Figura 3.1-1 – Classificação dos VEH quanto ao grau de hibridização.**



Fonte: (JENE, SCHEID e KEMPE, 2009) – Modificada.

Os modos de operação e as funcionalidades que se obtém à medida que o grau de hibridização se eleva implicam em um sistema elétrico embarcado mais complexo e em níveis de tensão mais elevados. Segundo (LARMINIER e LOWRE, 2003), para os veículos de arquitetura paralela, o grau de hibridização de um veículo pode ser calculado pela relação de potência dos motores de tração, conforme descreve a equação Eq. 3.1-1. Neste caso, o autor considera que o maior grau de hibridização para o veículo é obtido com MCI de menor potência em relação ao motor elétrico do sistema híbrido.

$$DOH = \frac{Pot_{ME}}{Pot_{ME} - Pot_{MCI}} \quad \text{Eq. 3.1-1}$$

### 3.1.1 Micro - Híbrido

Este grau de hibridização é o menos expressivo, pois não possui sistema de tração elétrica complementar a tração convencional. Trata-se de uma hibridização simples que não demanda grandes alterações no veículo e por isso é fácil de ser empregada.

Este grau de hibridização está baseado na utilização de uma função chamada *Start/Stop*, denominado assim por possibilitar que o veículo seja desligado sempre que estiver parado, seja em semáforos ou em engarrafamento. Este é recurso funcional apenas para grandes centros urbanos. Com isso é possível obter redução do consumo de combustíveis e das emissões de gases poluentes provenientes desta queima.

O gerenciamento deste sistema é feito por uma central eletrônica que monitora as condições necessárias para o desligamento do veículo. Se a velocidade de transmissão engrenada for nula e o estado de carga das baterias for suficiente para dar a partida novamente, o motor de combustão interna do automóvel recebe comando para ser desligado. A partida do motor é realizada instantaneamente por uma máquina elétrica assim que a embreagem for acionada pelo motorista. Este sistema trabalha com tensões já existentes nos automóveis convencionais (14 a 42 V) e com máquinas elétricas de potências que variam entre 1 e 5 kW (KARDEN, 2005). Este sistema possibilita ainda utilizar a técnica de frenagem regenerativa para converter a energia cinética de frenagem em energia elétrica para as baterias. Segundo (MAGALHÃES, 2014), os benefícios obtidos com o uso desta tecnologia são interessantes apenas para uso em perímetros urbanos, podendo ser obtida uma economia em torno de 10%. O autor ainda ressalta que as baterias devem ser capazes de proporcionar constantes ciclos de carga e descarga, por este motivo, os veículos com esta funcionalidade utilizam baterias PbA melhoradas. No que diz respeito aos níveis de emissão de poluentes, este nível de hibridização pode reduzir em até 5% da quantidade de CO<sub>2</sub> lançado a atmosfera (MOURA S.A., 2016).

### 3.1.2 Híbrido Moderado a Médio

Neste grau de hibridização o sistema de tração recebe uma máquina elétrica que, por meio da energia armazenada em baterias e ou super capacitores, pode auxiliar o MCI na tarefa de propulsão do veículo. Este auxílio de potência elétrica para tração é limitado e acontece em regimes específicos de operação.

Com este nível de hibridização também é possível operar extraindo o máximo de potência de ambos os sistemas de propulsão e obter uma potência conjunta de tração maior. Esta função do modo de operação é conhecida como *Boost*, e pode ser muito útil quando se deseja alta taxa de aceleração, por exemplo, para realizar ultrapassagens. É possível obter ainda, maior capacidade de recuperação de energia por frenagem e assistência na troca de marcha, para que não aconteça interrupção de torque (SHEN, SHAN e GAO, 2011).

Segundo (MAGALHÃES, 2014), com este sistema é possível atingir uma economia média no consumo de combustível de aproximadamente 15%. Ainda segundo o autor, a este sistema não compete à tarefa de realizar propulsão secundária, ou seja, sua função é auxiliar o MCI e não executar tração apenas por meio do sistema de propulsão elétrica. Segundo (KARDEN, 2005), as máquinas normalmente empregadas para esta aplicação possuem potências que variam em torno de 10 a 20 kW. Com este grau de hibridização, é possível obter uma redução de emissão de CO<sub>2</sub> na faixa de 8 a 15% (MOURA S.A., 2016).

### 3.1.3 Híbrido Completo

Este grau de hibridização possibilita um modo operação mais flexível. Os sistemas de propulsão por MCI e elétrica são desacoplados, com isso o veículo ganha capacidade de tração puramente elétrica ou puramente térmica. Em contrapartida, neste grau de hibridização são necessárias modificações mais significativas na estrutura e na arquitetura dos veículos, além de ser necessário um sistema de armazenamento de energia com maior capacidade energética. As máquinas elétricas empregadas nestas aplicações possuem potências na faixa de 30 a 50 kW (KARDEN, 2005).

Segundo (MAGALHÃES, 2014), a economia que pode ser obtida com essa configuração em relação ao sistema de propulsão convencional, está em torno de 30%, sendo este o grau de hibridização mais eficiente. Os VEH com este grau de hibridização se apresentam nas configurações série, paralelo e série-paralelo. O autor afirma ainda

que este grau de hibridização proporciona uma redução de aproximadamente 30% na emissão CO<sub>2</sub>. Porém, segundo (MOURA S.A., 2016), ao utilizar o auxílio externo de recarga de baterias, a redução aproxima-se de 50%.

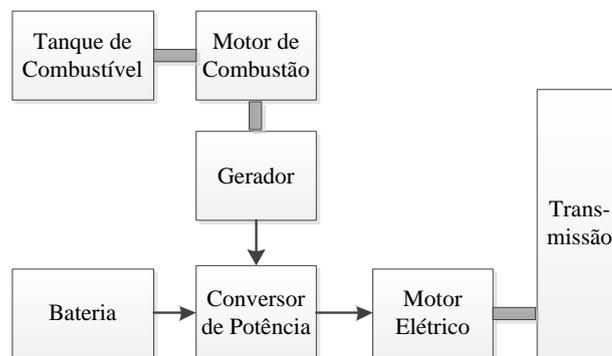
## 3.2. Arquitetura Híbrida

Existem algumas topologias bastante utilizadas e difundidas para estes sistemas de propulsão híbrida. Nas subseções seguintes estão apresentadas as principais topologias utilizadas.

### 3.2.1 Híbrido Série

Na arquitetura híbrida série não existe conexão entre o MCI e a transmissão do veículo, pois sua finalidade é operar como fonte de energia primária para o gerador elétrico alimentar o banco de bateria e o motor elétrico. Nessa configuração, a propulsão do veículo é dada única e exclusivamente pelo motor elétrico, fato que possibilita ao MCI trabalhar em seu ponto de operação de máxima eficiência. A Figura 3.2-1 ilustra o esquemático desta configuração.

**Figura 3.2-1 – Arquitetura híbrida – Série.**

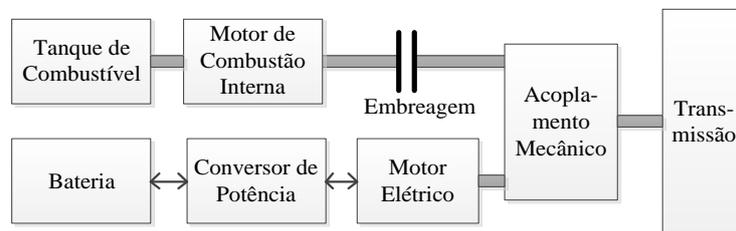


Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Traduzida.

### 3.2.2 Híbrido Paralelo

Na configuração paralela os sistemas de propulsão elétrica e mecânica são acoplados no mesmo sistema de transmissão. Essa configuração possibilita a operação individual ou conjunta de ambos os motores de tração para obter *boost* de potência. A Figura 3.2-2 ilustra o esquemático desta configuração.

**Figura 3.2-2 – Arquitetura híbrida – Paralela.**

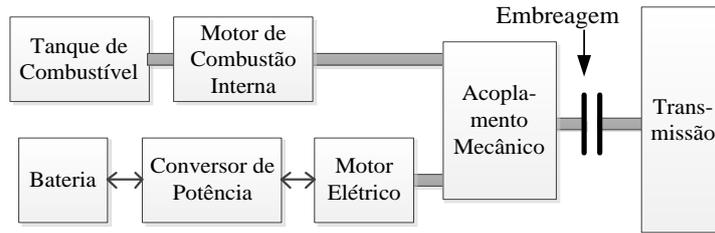


Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Traduzida.

A geração de energia para o sistema de propulsão elétrica na configuração paralela é dada pela recuperação em modo de frenagem regenerativa e nos intervalos de operação do MCI, assim a máquina elétrica passa a trabalhar como gerador devolvendo energia para as baterias.

A arquitetura paralela apresenta outras duas variações, uma denominada por configuração paralela de assistência e partida, também chamada de Paralela-SA. Neste caso, a máquina elétrica e o MCI se conectam por meio do acoplamento de torque, no qual ambos são isolados da transmissão pelo sistema de embreagem. A Figura 3.2-3 ilustra a arquitetura Paralela-SA em diagrama de blocos simplificado.

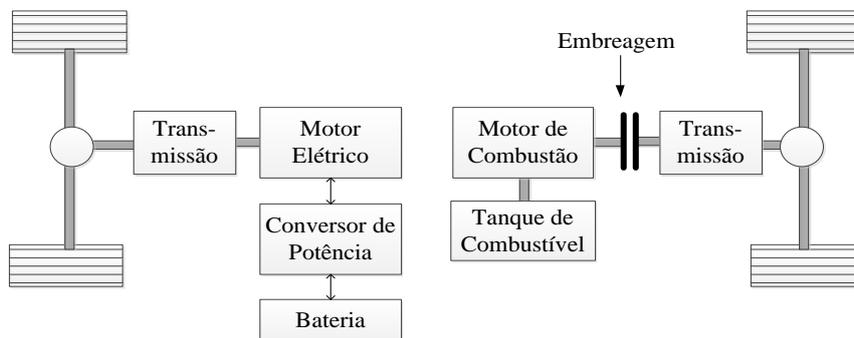
**Figura 3.2-3 – Arquitetura híbrida – Paralela-SA.**



Fonte: Autor.

Outra variação existente é a paralela de eixo separado, Paralela-ES. Esta arquitetura também é conhecida na literatura por *Through-The-Road (TTR) Parallel* onde o sistema de propulsão elétrica é embarcado no eixo oposto ao do sistema de propulsão do MCI. A Figura 3.2-4 ilustra a configuração paralela de eixo separado.

**Figura 3.2-4 – Arquitetura híbrida – Paralela-ES.**



Fonte: (SILVA e PIRES, 2016).

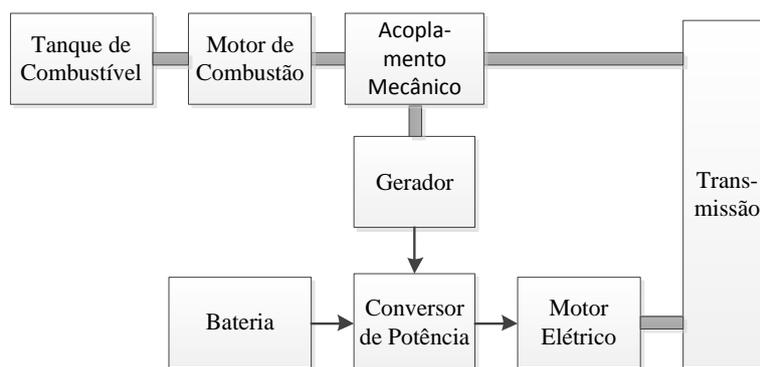
Esta proposta de arquitetura pode fazer uso do diferencial mecânico, como ilustrado, ou pode-se adotar o acionamento de dois motores elétricos, um em cada roda do sistema de propulsão elétrica, também conhecido como Paralelo TTR-IWM (*In-Wheel Motor*). Utilizar os motores na roda elimina em partes o espaço necessário para implementar o sistema de tração no eixo traseiro, porém, o controle do sistema de tração fica mais complexo e os custos com os componentes do sistema de tração podem aumentar. Os autores (ZULKIFLI, MOHD, *et al.*, 2012) apresentam os modos de operação desta

opção de motorização elétrica da arquitetura Paralela-ES. Como pode ser observado, as topologias apresentadas anteriormente apresentam certo grau de complexidade para serem implementadas em um veículo convencional, sendo necessárias grandes modificações. Esta arquitetura híbrida é interessante para hibridização de veículos convencionais já existentes no mercado, pois a demanda por modificações é menor do que as demais arquiteturas. Outra vantagem é a possibilidade de operar com tração em cada um dos eixos de forma independente ou combiná-los para uma tração 4x4, atrativo interessante para versões *off-road* dos veículo convencionais consolidados no mercado nacional.

### 3.2.3 Híbrido Série-Paralelo

A arquitetura Série-Paralela, como o próprio nome diz, é uma combinação das configurações série e paralela. É adicionado à configuração paralela um gerador acoplado mecanicamente ao MCI para trabalhar com sistema de geração de energia para as baterias. A Figura 3.2-5 ilustra o esquemático desta configuração.

**Figura 3.2-5 – Arquitetura híbrida – Série-Paralela.**



Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Traduzida.

Esta arquitetura proporciona maior grau de liberdade para a operação em modo híbrido. A recarga do sistema de armazenamento de energia pode ser realizada do modo de

frenagem regenerativa e pelo motor de combustão interna, caso necessário. Apesar de não existir um padrão bem definido para qual a melhor arquitetura, a série-paralela, ou combinada como também é conhecida, é a mais utilizada pelos VEH no mercado atual. A Tabela 3.2-1 apresenta as topologias de alguns dos híbridos presentes no mercado.

**Tabela 3.2-1 - Topologia adotada por alguns dos VEH existentes no mercado.**

<b>Modelo</b>	<b>Arquitetura</b>	<b>Montadora</b>	<b>Ano</b>
Prius	Combinado	Toyota	1997
Insigth	Paralelo	Honda	1999
Tino	Combinado	Nissan	2000
Civic	Paralelo	Honda	2001
Lexus LS 600h	Combinado	Lexus	2007
Toyota Auris	Combinado	Toyota	2010
Volt	Série	Chevrolet	2010
Lexus CT 200h	Combinado	Lexus	2011
V60	Paralelo - ES	Volvo	2013
i8	Paralelo - ES	BMW	2015

Fonte: (SHEN, SHAN e GAO, 2011) – Modificada.

### **3.3. Componentes de Veículos Elétricos Híbridos**

Os sistemas de tração embarcados nos veículos também são comumente chamados de *Powertrain*. Estes sistemas são compostos por uma fonte de potência, podendo ser um Motor de Combustão Interna (MCI) no caso de veículos convencionais, motores elétricos no caso dos Veículos Elétricos (VE), ou uma combinação de ambos no caso dos Veículos Elétricos Híbridos (VEH). Esses motores são conectados a uma caixa de transmissão por meio da embreagem. A transmissão pode ser automática ou manual, de múltiplas ou de uma velocidade. A transmissão é conectada ao diferencial, que por sua vez transfere torque e velocidade do motor para as rodas do veículo.

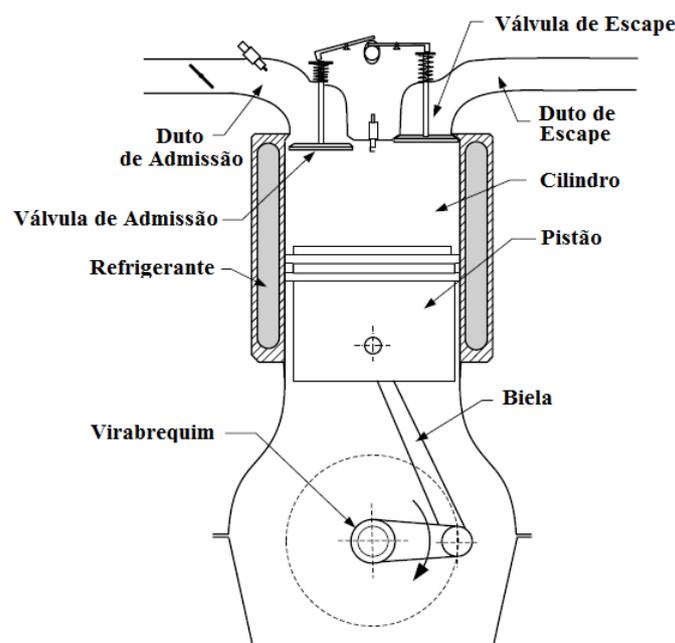
### 3.3.1 Motor de Combustão Interna

Os Motores de Combustão Interna (MCI) são máquinas térmicas que convertem energia química, proveniente dos combustíveis, em energia mecânica. Esse processo se dá por meio da combustão e da expansão deste combustível. Existem dois tipos de MCI, os de ignição por centelha (Gasolina e Etanol) e os de ignição por compressão (Diesel). Dentre estes modelos, existem os que possuem ciclo de trabalho baseado em dois tempos e os de quatro tempos.

Este trabalho concentra-se na utilização dos motores de ignição por centelha de quatro tempos, visto que este modelo é o mais empregado em veículos automotores. No caso dos motores de ignição por centelha, o processo de queima do combustível se dá a partir de uma centelha gerada pela vela de ignição.

A Figura 3.3-1 ilustra a estrutura básica e os componentes deste modelo de MCI apresentado.

**Figura 3.3-1 – Estrutura do MCI de ignição por centelha de quatro tempos**



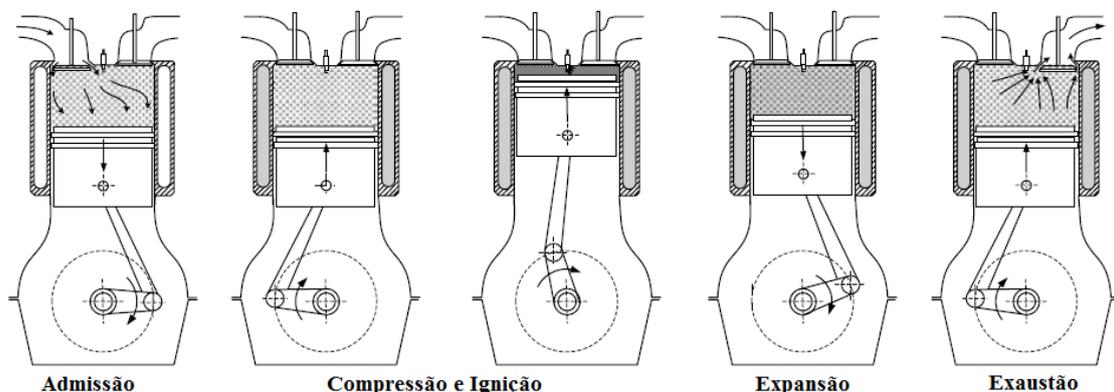
Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Modificada.

O ciclo de trabalho dos MCI de ignição por centelha compreendem os seguintes passos:

1. Admissão (Primeiro tempo): Nesta etapa a válvula de admissão abre e acontece a admissão da mistura ar e combustível para dentro da câmara de combustão. O pistão se desloca para a parte inferior da câmara;
2. Compressão (Segundo tempo): Nesta etapa a válvula de admissão fecha e o pistão se desloca verticalmente para cima comprimindo a mistura ar combustível. Como consequência desta compressão, a pressão e a temperatura interna aumentam muito. Uma centelha interna é gerada pela vela para provocar a explosão;
3. Expansão (Terceiro tempo): As válvulas de admissão e escape ficam fechadas, assim, a explosão provocada no interior do cilindro impulsiona o pistão novamente para a parte inferior;
4. Exaustão (Quarto tempo): Por fim, os gases provenientes da queima do combustível são liberados por meio da abertura da válvula de escape. A exaustão acontece naturalmente devido a diferença de pressão entre o ambiente e o interior da câmara. Após esta etapa o processo se repete pela admissão novamente.

A Figura 3.3-2 ilustra o ciclo nos quatro tempos de trabalho descrito acima.

**Figura 3.3-2 – Ciclo do MCI de ignição por centelha de quatro tempos.**

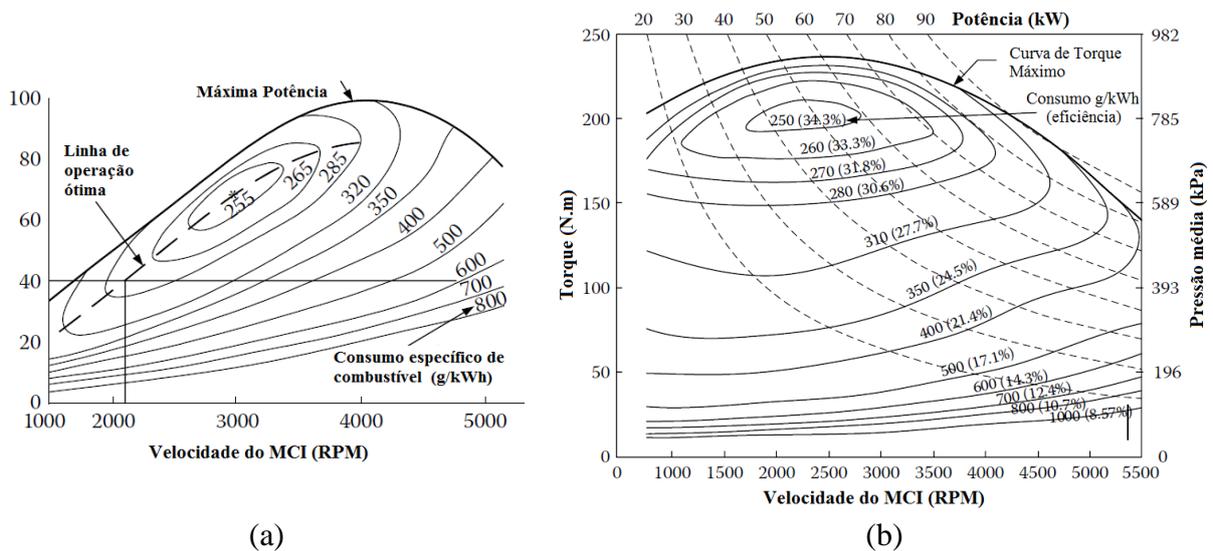


Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Traduzida.

Os parâmetros de desempenho dos MCI, aplicados em propulsão automóvel, são definidos pela máxima potência disponível para cada valor de velocidade, ou pelo máximo torque. Outro parâmetro é a faixa de velocidade e potência no qual o MCI trabalha em condição normal de operação.

A característica ideal desejada de um motor para tração é potência constante para toda a faixa de velocidade. Na realidade, os MCI apresentam características de potência diferentes do caso ideal. A Figura 3.3-3 ilustra estas características de potência e torque em função da velocidade.

**Figura 3.3-3 – Regiões de consumo e de eficiência dos MCI em relação às curvas de (a) Torque e de (b) Potência em função da velocidade de rotação.**



Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Traduzida.

É possível observar na Figura 3.3-3 – Regiões de consumo e de eficiência dos MCI em relação às curvas de (a) Torque e de (b) Potência em função da velocidade de rotação. Figura 3.3-3 (a) que o MCI em baixas velocidades apresenta potência reduzida com baixa eficiência. À medida que a velocidade de rotação aumenta a disponibilidade de potência também aumenta. O MCI atinge a região de máxima eficiência para velocidades intermediárias, e de máxima potência para velocidades ligeiramente abaixo da máxima. O mesmo pode ser observado Figura 3.3-3 (b), porém o mapa de eficiência

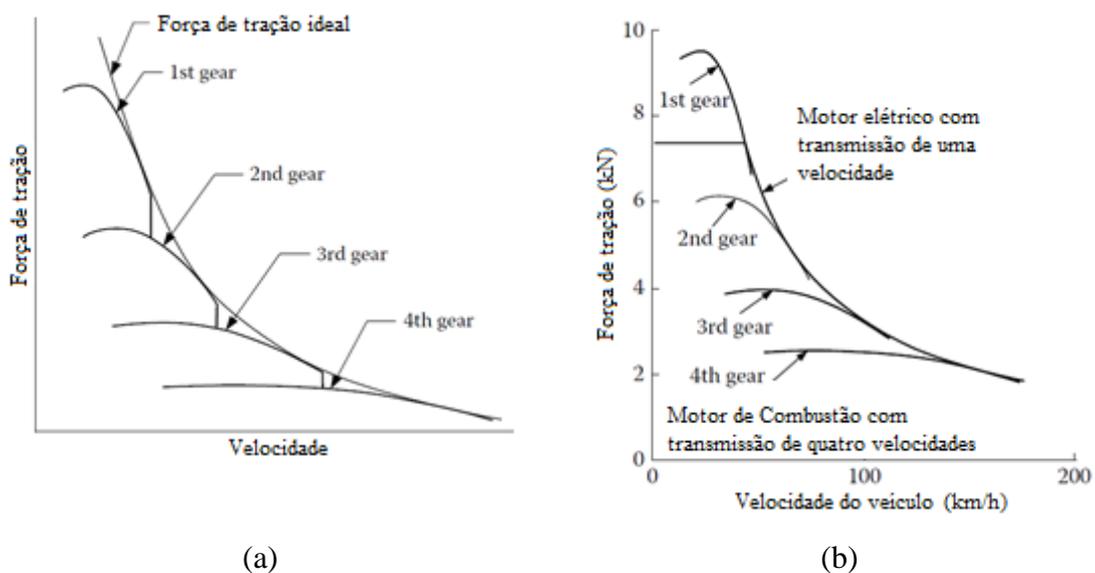
está em função do torque máximo. Observa-se que a curva de torque por velocidade é relativamente plana.

### 3.3.2 Transmissão Manual

Existem diferentes modelos de transmissão automática e manual. Neste trabalho o foco está transmissão manual, no qual é constituída pelo acoplamento mecânico, pela caixa de velocidades redutora e pelo veio de transmissão. A caixa redutora apresenta várias velocidades com razões de redução diferentes entre o veio do motor de tração e o veio da transmissão. Isto permite ajustar as características de velocidade do motor ao comportamento de velocidade das rodas do veículo. As equações utilizadas nesta subseção estão fundamentadas em (EHSANI e EMADI, 2010).

Como visto na Figura 3.3-3 (b), o comportamento de torque por velocidade é relativamente plano. Para obter uma aproximação ao comportamento idealmente desejado, utiliza-se a transmissão com múltiplas reduções de velocidades. Esse efeito está apresentado abaixo pela Figura 3.3-4.

**Figura 3.3-4 – Característica de torque de MCI com transmissão de várias velocidades e Motores Elétricos de única velocidade.**



Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Traduzida.

A velocidade máxima do veículo é atingida para velocidades de caixa superiores, ou seja, para relações de reduções menores. Por outro lado, relações de redução maiores na transmissão proporcionam forças de tração superiores. Para uma caixa de transmissão manual de cinco velocidades, as relações de redução podem ser expressas conforme descrito abaixo pela equação Eq. 3.1-1Eq. 3.3-1.

$$\frac{i_{g1}}{i_{g2}} = \frac{i_{g2}}{i_{g3}} = \frac{i_{g3}}{i_{g4}} = \frac{i_{g4}}{i_{g5}} = K_g$$

**Eq. 3.3-1**

Onde  $i_{g1}$ ,  $i_{g2}$ ,  $i_{g3}$ ,  $i_{g4}$  e  $i_{g5}$  são as relações de engrenagens para cada uma das respectivas velocidades. O fator  $K_g$  pode ser expresso conforme equação Eq. 3.3-2, onde  $n_g$  é o número de velocidades da transmissão.

$$K_g = \sqrt[n_g - 1]{\frac{i_{g1}}{i_{gn}}}$$

**Eq. 3.3-2**

Para veículos convencionais de passageiros que tenham transmissão manual as relações de caixa de marcha seguem a forma apresentada abaixo pela equação Eq. 3.3-3.

$$\frac{i_{g1}}{i_{g2}} > \frac{i_{g2}}{i_{g3}} > \frac{i_{g3}}{i_{g4}} > \frac{i_{g4}}{i_{g5}}$$

**Eq. 3.3-3**

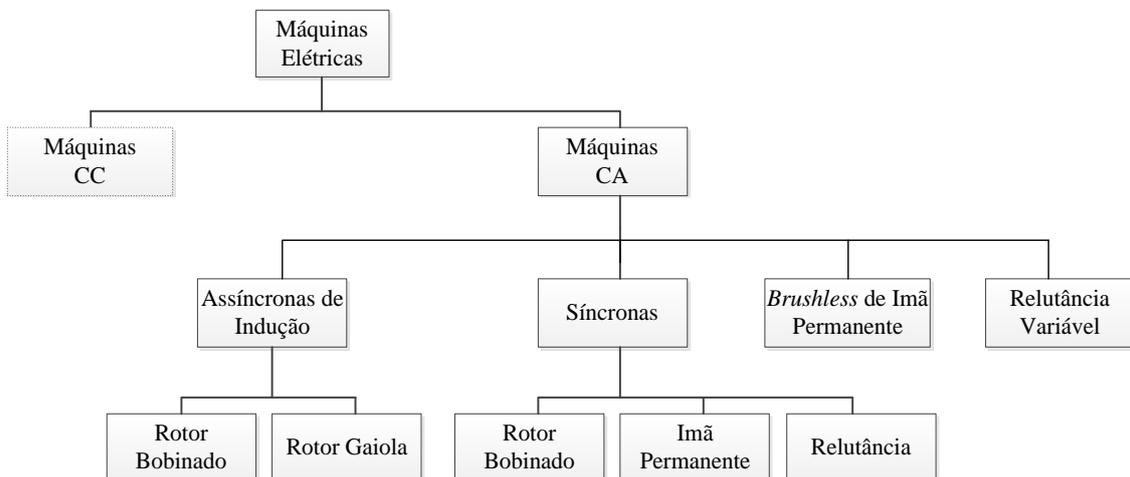
### 3.3.3 Máquinas Elétricas

Máquinas elétricas são máquinas que utilizam dos fenômenos do eletromagnetismo para seu funcionamento, produzindo transformações de energia. Um destes fenômenos é a indução eletromagnética e outro é a força eletromagnética. Esses fenômenos foram

comprovados por Michael Faraday, que disse que todo material condutor ao ser percorrido por uma corrente elétrica gera em torno de si um campo magnético de intensidade e sentido proporcional a esta corrente, e por Heinrich Lenz, que por outro lado comprovou que a exposição destes condutores a um campo magnético variável faz surgir uma tensão induzida tal que esta se opõe a que a gerou.

Máquinas Elétricas utilizadas com o propósito de tração se caracterizam por possuir movimento rotativo, onde a parte fixa é conhecida como estator e a parte rotórica chamada de rotor. Essas máquinas podem trabalhar transformando energia elétrica em energia mecânica, neste caso são denominadas de motores. Outra possibilidade é transformar energia mecânica em elétrica, neste caso são chamadas de geradores. Existem diversos modelos de máquinas elétricas rotativas, que variam entre máquinas de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA). Dentre as máquinas de corrente alternada estão as máquinas de indução, as máquinas síncronas, a máquina de relutância variável e a *Brushless* de ímã permanente. A Figura 3.3-5 ilustra um diagrama com estas variações existentes.

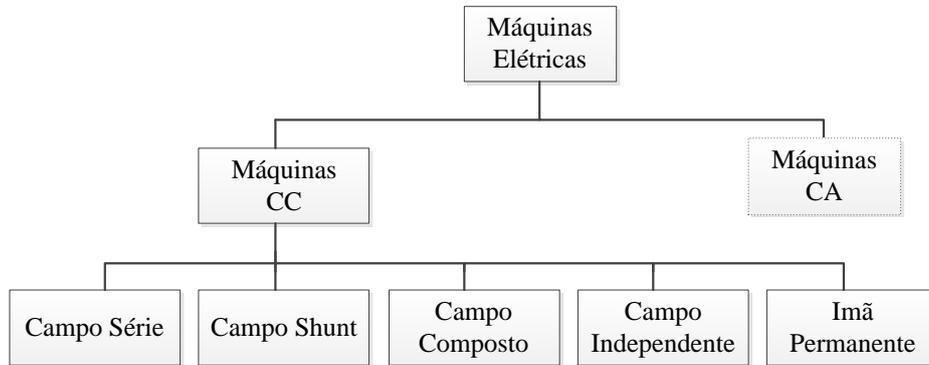
**Figura 3.3-5 – Classificação das máquinas elétricas de corrente alternada.**



Fonte: Autor.

Os diferentes tipos de máquinas CC estão apresentados abaixo pelo diagrama de blocos da Figura 3.3-6.

**Figura 3.3-6 – Classificação das máquinas elétricas de corrente contínua.**



Fonte: Autor.

As máquinas elétricas apresentam uma série de vantagens em relação aos Motores de Combustão Interna (MCI), como por exemplo, alta eficiência e independência quanto ao uso de combustíveis fósseis. Por esses e outros motivos, elas têm sido empregadas para eletrificação veicular. Estas máquinas podem operar tanto como motor quanto como gerador, motorizando o automóvel e recuperando energia de frenagem para recarregar os sistemas de armazenamento de energia do veículo.

Segundo (ZERAOUZIA, BENBOUZID e DIALLO, 2006) e (ZHU e HOWE, 2007), existem algumas características desejáveis para utilização destas máquinas em sistemas de tração veiculares, são elas:

- Alta densidade de potência e potência instantânea;
- Torques elevados em baixas velocidades e potência elevada em altas velocidades;
- Ampla faixa de velocidades, com torque e potência constante;
- Resposta rápida de torque;
- Eficiência alta em ampla faixa de velocidade;
- Eficiência alta para frenagem regenerativa;

- Robustez e confiabilidade para diferentes condições de operação;
- Custos.

Segundo (ZERAOULIA, BENBOUZID e DIALLO, 2006), as principais máquinas utilizadas em aplicações de propulsão veicular são as máquinas assíncronas de indução, síncronas de ímãs permanentes, máquinas de corrente contínua e as máquinas de relutância variável. A Tabela 3.3-1 ilustra uma comparação entre as máquinas mais utilizadas para tração. Densidade de potência, eficiência, controlabilidade, confiabilidade, grau de maturidade da tecnologia e custos são os parâmetros utilizados para avaliação comparativa.

**Tabela 3.3-1 – Comparativo entre as máquinas elétricas mais utilizadas em sistemas de propulsão veicular.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Máquinas DC</b>	<b>Assíncrona de Indução</b>	<b>Síncrona de Ímã Permanente</b>	<b>Relutância Variável</b>
Densidade de potência	2.5	3.5	5	3.5
Eficiência	2.5	3.5	5	3.5
Controlabilidade	5	5	4	3
Confiabilidade	3	5	4	5
Maturidade tecnológica	5	5	4	4
Custos	4	5	3	4
<b>Σ Total</b>	<b>22</b>	<b>27</b>	<b>25</b>	<b>23</b>

Fonte: (ZERAOULIA, BENBOUZID e DIALLO, 2006) – Traduzida.

É possível observar que as máquinas de indução apresentam a melhor pontuação dentre as demais, melhor avaliada em confiabilidade, controlabilidade, maturidade tecnológica e custos. Como características indesejadas podem ser citadas a baixa eficiência quando opera com cargas muito inferiores a nominal além do peso mais elevado (EHSANI e EMADI, 2010).

No que diz respeito à densidade de potência e eficiência, as máquinas síncronas de ímãs permanentes são melhores. A WEG apresentou um comparativo entre as máquinas de

indução e as síncronas de imã permanente, mostrando uma redução de peso e volume. A Figura 3.3-7 ilustra o comparativo.

**Figura 3.3-7 – Comparativo entre as máquinas de indução e síncronas de imãs-permanentes.**



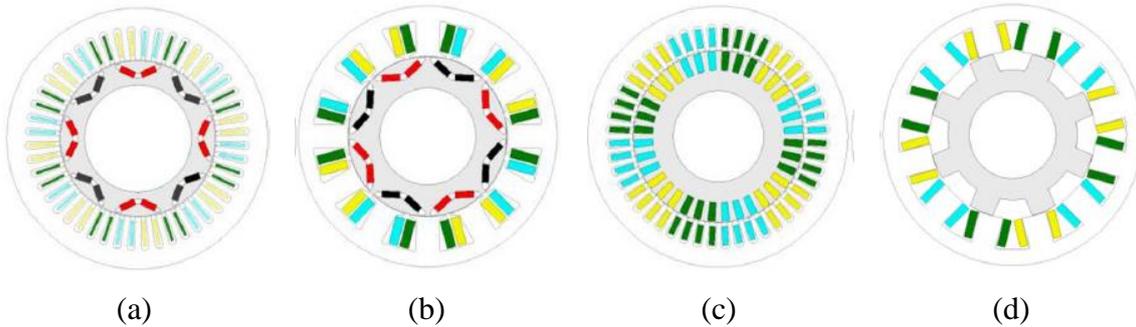
Fonte: (WEG, 2016).

Segundo (YANG, SHANG, *et al.*, 2015), as máquinas síncronas de imã permanente são as mais utilizadas hoje em dia nos VE e VEH. Porém estas máquinas apresentam limitações importantes para este tipo de aplicação, como por exemplo, o custo e a disponibilidade de terras raras utilizadas para fabricação dos seus imãs.

Segundo (ANDRADE, 2014), a China possui cerca de 40% das reservas mundiais de Terras Raras, e é líder mundial de produção deste mineral, com 89,1% de produção em 2013. Medidas ambientais aplicadas pelo governo chinês e o aumento da demanda interna por este mineral, 64% da produção, fez a disponibilidade cair, fato que provocou aumento no preço no mercado internacional. O Brasil é o segundo país com maior reserva deste mineral, 16% das reservas mundial, porém, a produção de 2013 representou 0,5%. O autor ainda ressalta sobre a descoberta de um depósito gigante de terras raras na Coreia do Norte, com reserva potencial de 200 milhões de toneladas. Essa incerteza reforça a necessidade de buscar alternativas a esta tecnologia.

A Figura 3.3-8 ilustra o corte transversal das máquinas. (a) Síncrona de Imã-Permanente com Enrolamento Distribuído (ED), (b) Síncrona de Imã-Permanente com Enrolamento Concentrado (EC), (c) Assíncrono de Indução e (d) Relutância Variável.

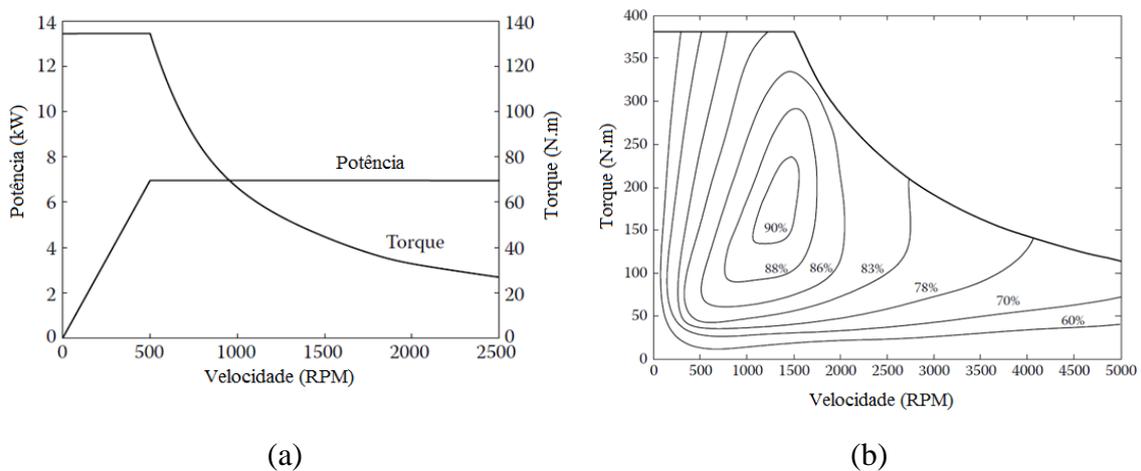
**Figura 3.3-8 – Seção transversal das máquinas (a) Síncrona de Imã-Permanente (ED), (b) Síncrona de Imã-Permanente (EC), (c) Indução e (d) Relutância Variável.**



Fonte: (YANG, SHANG, *et al.*, 2015).

As características de potência e torque das máquinas elétricas estão apresentadas abaixo pela Figura 3.3-9 (a), em (b) está apresentado o mapa de eficiência em função da curva de torque para uma máquina específica. O mapa de eficiência vai variar de acordo com o modelo da máquina elétrica.

**Figura 3.3-9 – Características de (a) Potência e Torque das máquinas elétricas e (b) regiões de eficiência na curva de torque de uma máquina específica.**



Fonte: (EHSANI e EMADI, 2010) – Traduzida.

Os autores (YANG, SHANG, et al., 2015) também avaliam as máquinas assíncronas de indução e as máquinas de relutância variável. Segundo os autores, a máquina de indução é mais robusta por não utilizar ímãs permanentes, porém, apresenta a limitação de resfriamento do calor gerado no rotor e no estator da máquina. A máquina de relutância variável também não depende de ímã permanente, além de ser mais robusta para condições severas e ainda é tolerante a falhas. Entretanto, altos ruídos e baixo fator de potência são presentes. Outra característica limitante é a necessidade de drives de acionamento específicos e maior número de cabos para alimentação das fases do estator.

### 3.3.4 Baterias

As baterias desempenham um papel fundamental para os VE e para os VEH. Esses dispositivos são responsáveis pelo armazenamento de energia do sistema. Existem diversos modelos de baterias, que variam conforme tecnologia dos materiais utilizados. A bateria embarcada no veículo é composta por um conjunto de células, que são associadas para se obter capacidade de energia e nível de tensão desejado em cada aplicação. A Figura 3.3-10 ilustra uma célula de íon-lítio (a) e o arranjo destas células para formar o módulo (b), e o Pack da bateria para embarcar no veículo (c).

**Figura 3.3-10 – Modelo de bateria de Íon-Lítio (a) Célula, (b) Módulo e (c) Pack.**



Fonte: Elaboração própria com base em pesquisas na internet.

Segundo (CASTRO e FERREIRA, 2010), em aplicações veiculares, as baterias mais utilizadas são as de Chumbo Ácido (PbA), as de Níquel Hidreto Metálico (NiMH), as de Sódio e as de Íon-Lítio. As baterias PbA são as mais utilizadas nos veículos convencionais, responsável por alimentar as cargas tradicionais destes veículos. A Tabela 3.3-2 ilustra a tecnologias de bateria embarcada em alguns dos VEH.

**Tabela 3.3-2 – Tecnologias de bateria utilizada em diferentes modelos de VEH**

<b>Veículos Elétricos Híbridos (VEH)</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Marca</b>	<b>Ano</b>	<b>Bateria</b>
X6	BMW	2010	NiMH
Malibu	Chevrolet	2010	NiMH
Altima	Nissan	2010	NiMH
Rx 450h	Lexus	2010	NiMH
S400	Mercedes Benz	2010	Íon-Lítio
Scape	Ford	2010	NiMH
Silverado 1500	Chevrolet	2010	NiMH
Insight	Honda	2014	NiMH
Prius	Toyota	2015	NiMH
Prius Plug-in	Toyota	2015	Íon-Lítio
Cívic	Honda	2015	Íon-Lítio
Fusion	Ford	2015	Íon-Lítio
Viziv	Subaro	2015	Íon-Lítio
Volt	Chevrolet	2015	Íon-Lítio
Accord	Honda	2015	Íon-Lítio

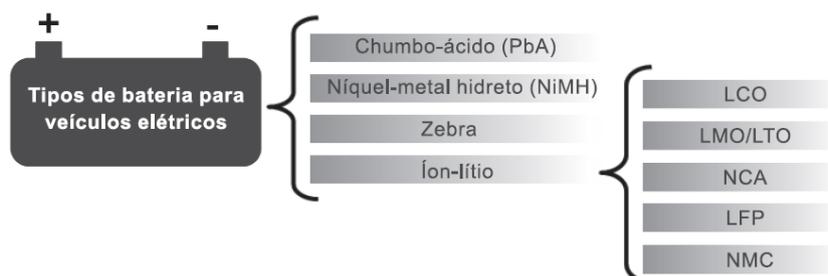
Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa na internet e em (EERE, 2010).

As baterias de NiMH apresentam uma vida útil de aproximadamente 10 anos, esse é um ponto positivo. Tem como desvantagem o peso maior, principalmente devido à presença de grandes quantidades de Níquel. Existem duas empresas japonesas fabricando estas baterias, a Panasonic, que equipa o Prius e Insight e a Sanyo (CASTRO e FERREIRA, 2010). As células recarregáveis de Íon-Lítio existem desde 1980. Estas células apresentam maior capacidade energética por volume, porém, seu custo é proporcional. A alta densidade de energia desta tecnologia contribuiu para utilização em

equipamentos eletrônicos portáteis, como notebooks e celulares (LARMINIER e LOWRE, 2003).

As baterias de Íon-Lítio são as mais promissoras atualmente e são compostas por uma família de baterias, que variam conforme os elementos utilizados. Esta variedade de modelo está apresentada na Figura 3.3-11.

**Figura 3.3-11 – Diagrama com os modelos de tecnologia das baterias.**



Fonte: (CASTRO e FERREIRA, 2010).

A denominação é definida conforme a composição dos elementos. São elas: Óxido de Lítio-Cobalto – LCO; Lítio-Manganês Spinel – LMO/LTO; Lítio-Níquel-Cobalto-Alumínio – NCA; Fosfato de Ferro-Lítio – LFP; Lítio-Níquel-Manganês-Cobalto – NMC. A Tabela 3.3-3 ilustra um comparativo entre estas tecnologias de bateria de lítio.

**Tabela 3.3-3 – Comparativo das tecnologias de bateria de lítio.**

Parâmetros de avaliação	Óxido de Lítio-Cobalto (LCO)	Lítio-Níquel-Cobalto-Alumínio (NCA)	Lítio-Níquel-Manganês-Cobalto (NMC)	Fosfato de Ferro-Lítio (LFP)
<b>Energia Wh/kg</b>	Bom	Bom	Bom	Baixo
<b>Potência</b>	Bom	Bom	Bom	Médio
<b>Vida útil</b>	Médio	Muito Bom	Bom	Médio
<b>Segurança</b>	Baixo	Baixo	Baixo	Bom
<b>Custo/kWh</b>	Muito Alto	Alto	Alto	Alto
<b>Maturidade</b>	Alto	Alto	Alto	Baixo

Fonte: (IEA, 2011) – Modificada.

Não existe um padrão bem definido de qual a melhor tecnologia de bateria e por este fato, as empresas optam por investir em uma tecnologia específica. A Tabela 3.3-4 ilustra os fabricantes das diferentes tecnologias de lítio apresentadas.

**Tabela 3.3-4 – Empresas fabricantes de baterias com tecnologia de Íon-Lítio.**

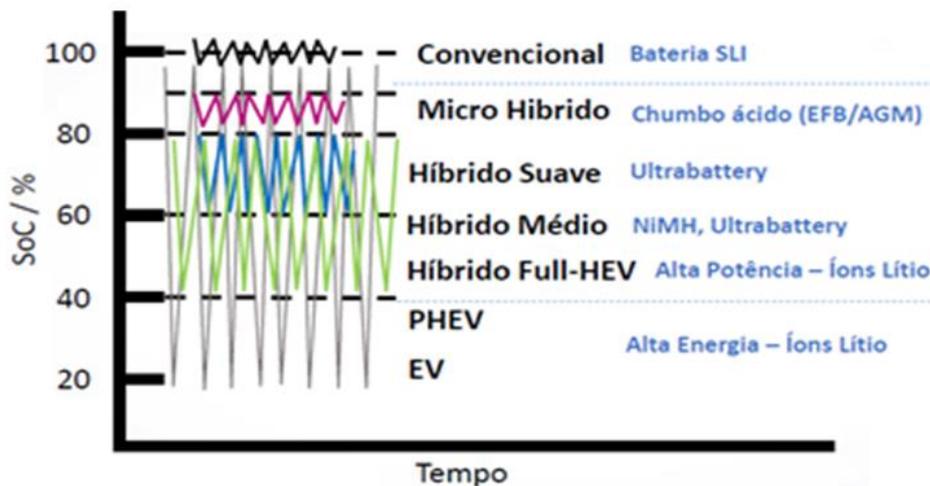
<b>Fabricantes de baterias de Íon-Lítio</b>		
<b>Pais</b>	<b>Empresa</b>	<b>Tecnologia de Baterias</b>
EUA	A123 System	LFP
China	BYD	LFP
Coreia do Sul	Compact Power Inc.	LMO
EUA	Johnson Controls	NCA
EUA	EnerDel	LMO
Japão	Toshiba	LMO
EUA	Altair Nano	LMO
Japão	Hitachi	LMO
Japão	Sanyo	LMO/NMC
Europa	GAIA	NCA/LFP
EUA	Valence	LFP

Fonte: Elaboração própria com base em pesquisa na internet, em (CASTRO e FERREIRA, 2010) e em (CASTRO, BARROS e VEIGA, 2013).

A tecnologia de bateria, seja ela qual for, precisa ser bem avaliada para obter a melhor solução para cada aplicação. Cada uma possui uma faixa ideal de operação para o ciclo de profundidade de descarga do estado de carga, também conhecido como SOC, do inglês, *State of Charge*. O estado de carga das baterias influencia diretamente na vida útil destes dispositivos, e por este motivo, existe a necessidade de controlar esse afundamento de carga. Esse regime de carga e descarga praticamente não existe, para as baterias de PbA dos veículos convencionais, em regime normal de operação. Por outro lado, os VE necessitam de uma maior capacidade de descarga, visto que as baterias são utilizadas para propulsão do veículo e que o principal meio de recarga das baterias é realizado por auxílio externo de recarga, normalmente praticado em casa e durante o período da noite.

A Figura 3.3-12 ilustra um perfil aproximado de carga e descarga das baterias com base nas características do modelo de veículo empregado. São apresentadas ainda algumas das tecnologias de baterias utilizadas em cada um dos casos com a variação do SOC.

**Figura 3.3-12 – Variação aceitável para o SOC das diferentes tecnologias de baterias.**



Fonte: (MOURA S.A., 2016).

Para os VEH com grau de hibridização muito pequeno, o chamado micro híbrido, que utilizam baterias de PbA melhorada, a variação do estado de carga está na faixa de 80 e 90%. Os VEH com grau de hibridização suave ou moderado variam o SOC entre 60 e 80%. Para os híbridos médio e completo, as baterias trabalham na faixa entre 40 e 80%. Por fim, os híbridos com auxílio de recarga externa e os puramente elétricos trabalham com SOC entre 20 e 95%.

## Conclusões

Neste capítulo é possível compreender as características dos VEH. Estes veículos utilizam sistema de tração elétrica para auxiliar o MCI com a tarefa de propulsão. Os diferentes componentes presentes nestes veículos são embarcados nos veículos

conforme a arquitetura híbrida utilizada. A hibridização possibilita melhora no desempenho, redução nos níveis de consumo de combustível e de emissão de poluentes. Quanto maior o nível de hibridização dos veículos, maior será a eficiência do veículo e a flexibilidade nos modos de operação do sistema. Os VEH

Existe uma grande variedade de opções entre os componentes utilizados, como visto, não existe um padrão bem definido de qual a melhor arquitetura e quais os melhores componentes. Sendo assim, a definição dos mesmos fica a cargo dos projetistas conforme as características e necessidades dos sistemas que se deseja construir.

## **CAPÍTULO 4 – Concepção do sistema**

Como pode ser visto até aqui, os Veículos Elétricos Híbridos (VEH) são uma tecnologia intermediária entre os veículos convencionais de Motor de Combustão Interna (MCI) e os Veículos Elétricos (VE). Estes veículos apresentam potencial de redução de consumo de combustíveis e de redução dos gases de emissão, além de proporcionar aumento da eficiência do veículo quando comparado ao similar convencional.

Nesta fase de concepção do veículo é fundamental conhecer as características do veículo convencional objeto deste estudo. A partir de então é muito importante conhecer as características dos componentes deste veículo, principalmente do MCI e do sistema de transmissão. Por fim definir os componentes do sistema de tração elétrica que se deseja implementar no veículo a fim de torná-lo híbrido.

### **4.1. Concepção do sistema de tração convencional**

#### **4.1.1 Características do veículo convencional**

O veículo convencional proposto por este trabalho é um popular compacto com MCI Flex, ou seja, que pode ser abastecido com Álcool ou Gasolina. Neste trabalho, todos os dados coletados e apresentados para o MCI são utilizando a gasolina (E-22) como combustível. O veículo conta com um sistema de transmissão manual de cinco velocidades e tração no eixo dianteiro.

A Tabela 4.1-1 apresenta os principais parâmetros que descrevem o veículo convencional a MCI.

**Tabela 4.1-1 – Características do veículo convencional.**

<b>Parâmetros do veículo nacional compacto de 999cc</b>		
Comprimento	3.692	mm
Entre-eixos	2.361	mm
Peso	825	Kg
Distribuição de peso	60/40	%
Largura	1.548	mm
Altura	1.445	mm
Distancia CG – eixo frontal	1.192	mm
Distancia CG – eixo traseiro	1.292	mm
Distancia CG – altura	690	mm
Raio do Pneu 165/70 R13	0,33	mm
Área frontal	1,81	m <sup>2</sup>
Coefficiente de arraste aerodinâmico	0,36	-
Coefficiente de resistência ao rolamento	0,009	-

Fonte: Autor com base nas informações cedidas pelo CTM/UFMG.

Estes parâmetros foram concedidos pelo Centro de Tecnologia da Mobilidade – CTM, que é vinculado ao departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Conforme apresentado no capítulo 2, estes parâmetros são a base para modelar o veículo. As equações apresentados estão implementadas no software ADVISOR.

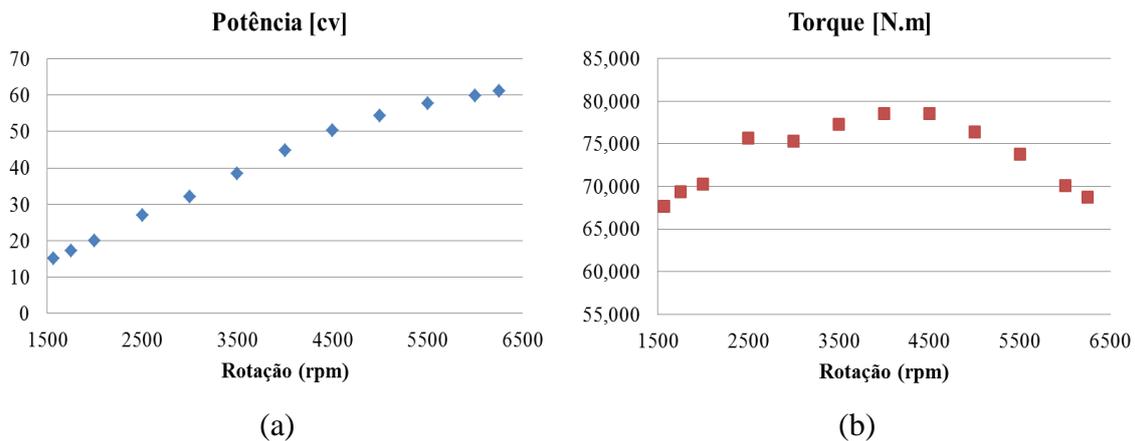
Para simulação, a gravidade considerada foi de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e a densidade do ar  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Demais informações técnicas necessárias para simulação e indisponíveis para o veículo objeto deste estudo foram preenchidas com os valores de um veículo de mesmo porte e com características semelhantes, denominado “Small Car” disponível no banco de dados do ADVISOR.

#### 4.1.2 Motor de combustão Interna (MCI)

O motor de combustão interna foi colocado em um dinamômetro de bancada com o objetivo de levantar suas características de potência, torque e consumo de combustível.

A Figura 4.1-1 ilustra as curvas de potência máxima (a) e de torque (b) máximo do MCI do veículo. A potência máxima alcançável por este MCI de 1.0L - 999cc é de aproximadamente 61,1 cv à uma velocidade de rotação de 6250 rpm. Essa potência equivale à 44,97 kW. Quanto ao torque, o pico máximo acontece em 4500 rpm, com aproximadamente 78,56 N.m, ou 8 Kgfm.

**Figura 4.1-1 – Curvas de Potência (a) e torque (b) do MCI 1.0L 44kW.**

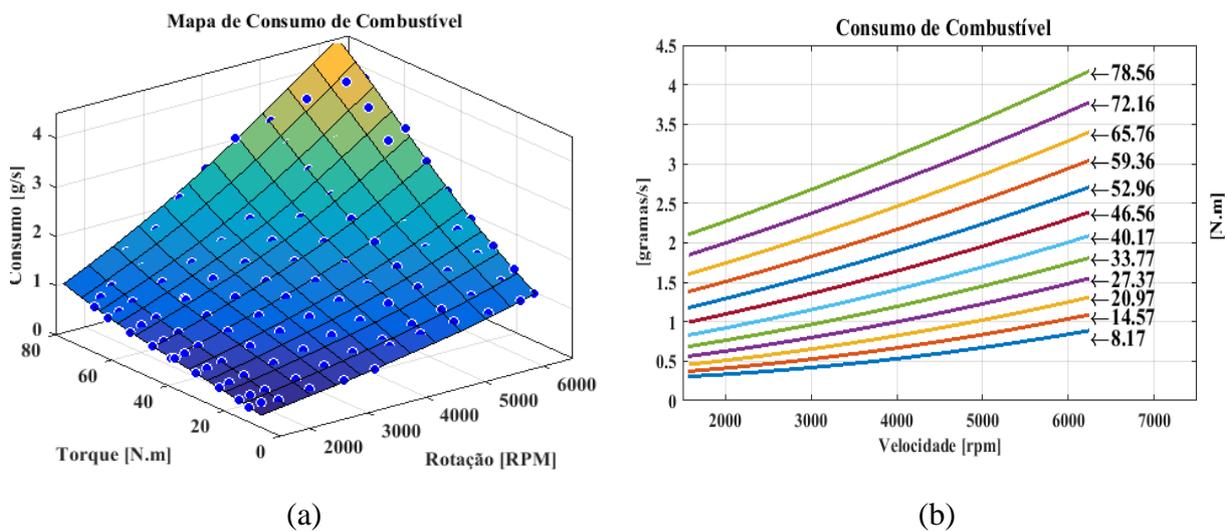


Fonte: Autor.

Dentro do range de velocidade de rotação do MCI, diferentes graus de abertura da borboleta são aplicados e o respectivo consumo de combustível é mensurado. Fazendo isso é possível obter três vetores de parâmetros, rotação, potência e consumo do MCI. A Figura 4.1-2 foi gerada a partir destes vetores de dados levantados pelo CTM/UFGM, e ilustra as características do MCI deste veículo convencional. Em (a) está ilustrado uma figura 3D que representa a matriz de consumo do MCI em gramas por segundo. É possível observar que o consumo é função do torque e da velocidade de rotação do

MCI. A maior taxa de consumo deste motor em g/s é dada na região de operação onde o torque e velocidade atinge seus valores máximos. Em (b) também está ilustrado, por uma figura 2D, o consumo em gramas por segundo. Variando a velocidade de rotação para diferentes valores de torque, é possível visualizar essas curvas de consumo de combustível.

**Figura 4.1-2 – Mapa de consumo do MCI em (a) e curvas de consumo de combustível para os valores de torque do MCI em (b).**

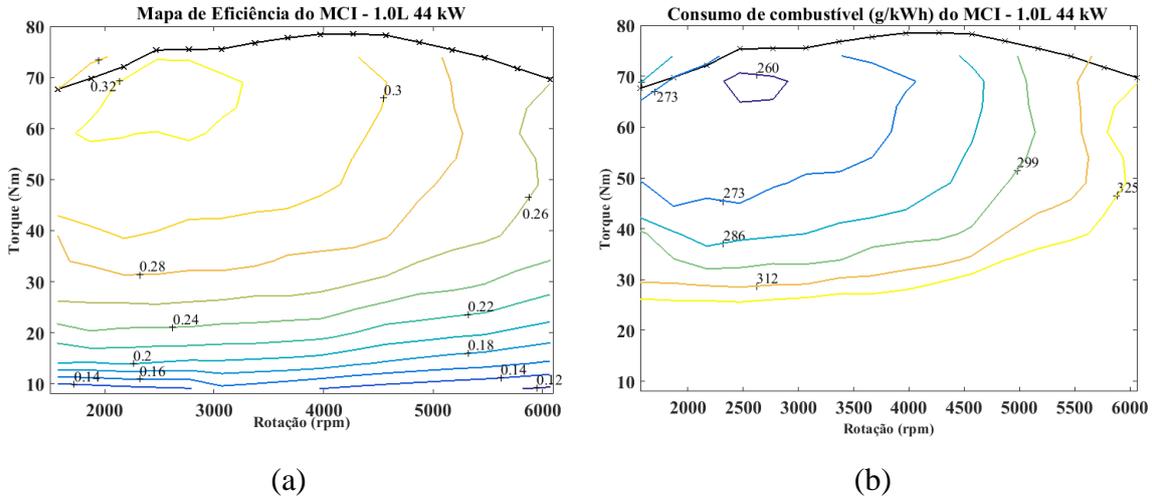


Fonte: Autor.

Estas características do MCI devem ser inseridas no software ADVISOR no formato de mapas de eficiência e de consumo de combustível. Para gerar esses mapas no formato ideal, o ADVISOR disponibiliza uma ferramenta adicional chamada Engmodel, detalhada no Anexo.

Com essa ferramenta e com os dados do MCI representados pela Figura 4.1-2 devidamente colocados nas unidades que o ADVISOR trabalha, foram gerados os mapas do MCI e ilustrados abaixo pela Figura 4.1-3.

**Figura 4.1-3 – Mapas de eficiência (a) e de consumo de combustível (b) do MCI.**



Fonte: Autor.

Estes mapas representam as regiões de operação do MCI limitada ao máximo torque disponível, onde em Figura 4.1-3 (a) as curvas de nível delimitam as regiões de eficiência. Como pode ser observada, a máxima eficiência de operação deste MCI está limitada em 32% na região ilustrada pela curva de nível amarela, entre 2000 e 3000 RPM e entre 58 e 70 N.m de torque. . Em Figura 4.1-3 (b) estas regiões representam o consumo em gramas por kWh. A região de menor consumo (g/kWh) também é observada nesta mesma região de operação, delimitada pela curva de nível em azul escuro.

#### 4.1.3 Transmissão manual de cinco velocidades

A Tabela 4.1-2 ilustra as características do sistema de transmissão do veículo que será hibridizado. O conjunto da transmissão, composto por caixa de marcha e diferencial possuem uma massa aproximada de 65 kg e uma eficiência de 94%. As relações de redução do diferencial e das marchas podem ser observadas abaixo. Estes dados também foram cedidos pelo CTM/UFG.

É importante ressaltar que o conjunto da transmissão, transfere torque do eixo do MCI para as rodas com a relação de redução da marcha que está em operação vezes a relação do diferencial. Sendo assim, a maior relação de redução é praticada com o veículo em primeira marcha, ou seja, 17,378.

**Tabela 4.1-2 – Relação de redução do sistema de transmissão do veículo convencional.**

<b>Transmissão manual de cinco velocidades</b>							
<b>G<sub>1</sub></b>	<b>G<sub>2</sub></b>	<b>G<sub>3</sub></b>	<b>G<sub>4</sub></b>	<b>G<sub>5</sub></b>	<b>Diferencial</b>	<b>Massa (Kg)</b>	<b><math>\eta</math></b>
4,273	2,238	1,444	1,029	0,838	4,067	65,0	0,94

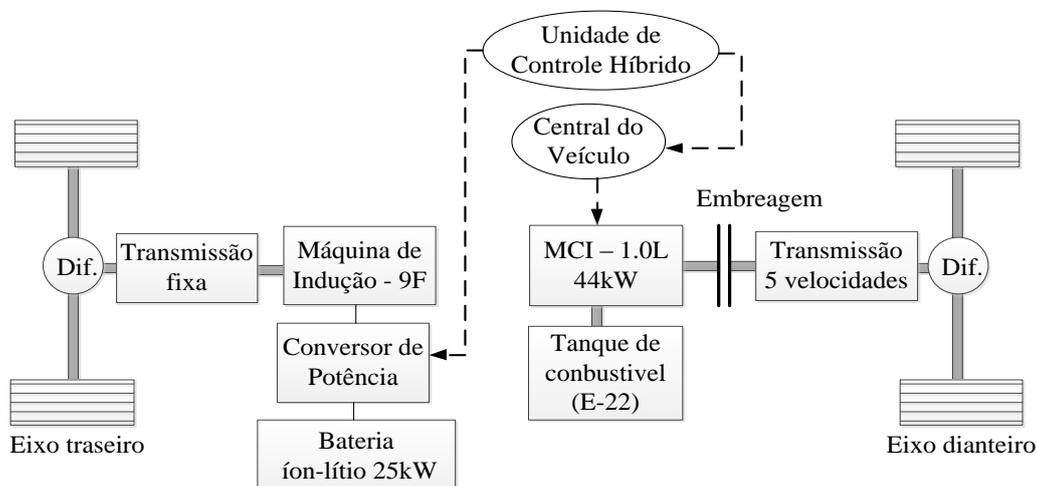
Fonte: Autor com base nas informações cedidas pelo CTM/UFMG.

## **4.2. Concepção do sistema de tração híbrido**

Mediante ao objetivo apresentado, a arquitetura híbrida paralela de eixos separados foi escolhida para hibridização do veículo convencional. Esta arquitetura como visto anteriormente no capítulo 3, possibilita inserir no eixo oposto ao eixo do MCI, o sistema de tração elétrica, neste caso no eixo traseiro do veículo. As modificações mecânicas que seriam necessárias para arranjo do sistema de tração elétrica com o MCI no eixo dianteiro não serão necessárias e a limitação de espaço físico no eixo dianteiro deixa de ser uma barreira. Sendo assim, as modificações ficam restritas, no caso deste veículo, exclusivamente ao eixo traseiro. A conexão entre estes dois sistemas de tração que compõem o sistema híbrido é feito exclusivamente por um link de controle elétrico. Como desvantagem, nessa arquitetura a frenagem regenerativa fica limitada devido ao sistema de tração estar disposto no eixo traseiro, pois na frenagem ocorre transferência de massa para o eixo dianteiro, deixando o traseiro com capacidade limitada de frenagem.

A Figura 4.2-1 ilustra as características físicas deste sistema híbrido proposto.

**Figura 4.2-1 – Arquitetura híbrida proposta e seus respectivos componentes.**



Fonte: Autor.

A conexão deste sistema híbrido é feita pela Unidade de Controle Híbrido (UCH), responsável por integrar e controlar a propulsão elétrica e a mecânica com base nas estratégias de operação definidas, comunicando com a central do veículo convencional.

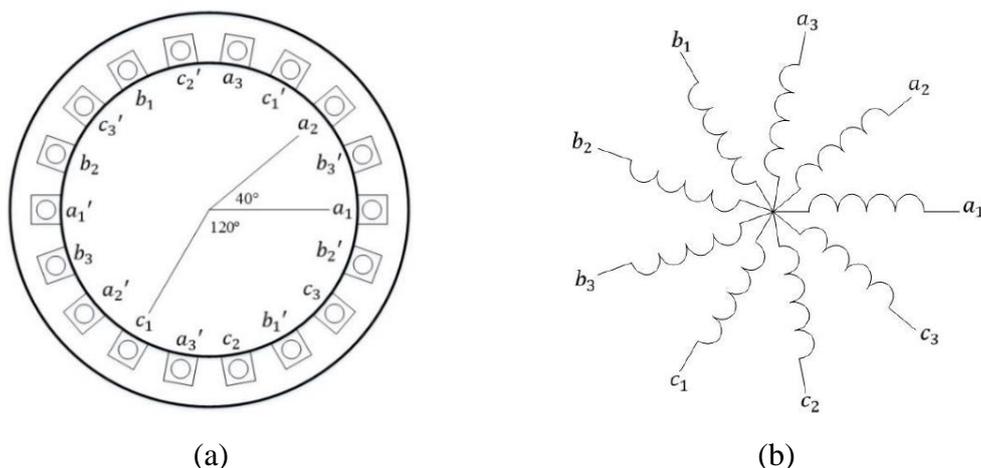
### 4.3. Definição da máquina elétrica

A máquina elétrica definida para este estudo é a de indução de nove fases com rotor gaiola de esquilo. A ideia de utilizá-la surgiu a partir de um projeto de pesquisa desenvolvido por meio da parceria entre a iniciativa privada, o departamento de Engenharia Mecânica e o laboratório Tesla - Engenharia de Potência do departamento de Engenharia Elétrica da UFMG. Neste projeto, o objetivo de utilizar esta máquina está na melhoria da tecnologia de geração de energia elétrica proveniente de Grupos Motores-Geradores. Devida a esta aplicação inicial, a máquina foi projetada para operar com velocidade base elevada com frequência nominal de 240 Hz. Esta máquina utiliza enrolamentos concentrados, passo pleno e uma ranhura por pólo por fase.

O estudo desta máquina mostrou que benefícios podem ser obtidos ao utilizá-la para aplicações em veículos elétricos e híbridos, como por exemplo, maior confiabilidade em casos de perda de fase, pois perder uma fase implica na perda de um nono da potência. Outra vantagem é a possibilidade de reduzir o nível de tensão nas fases e com isso reduzir o número de células de baterias conectadas em série. Essa redução poderia inclusive eliminar a utilização do conversor CC/CC que conecta a bateria ao inversor (BASTOS, 2015). Densidade de potência é outra característica interessante para aplicação veicular. Ainda segundo o autor, é possível obter ganhos de torque com injeção de correntes de terceiro harmônico sem a necessidade de conexão de neutro na máquina, porém, com o custo de aumentar perdas na máquina.

A máquina de indução de nove fases pode ser modelada conforme apresentado por (BASTOS, SILVA, *et al.*, 2014), no qual o autor utiliza uma metodologia análoga ao que já se faz para as de indução trifásicas, o que também é válido para o controle. Essa semelhança contribui para utilização destas máquinas. A Figura 4.3-1 ilustra as características de distribuição dos enrolamentos e a conexão das bobinas de cada uma das fases. Para facilitar a ilustração considera-se uma máquina de dois pólos.

**Figura 4.3-1 – Diagrama (a) e esquema elétrico (b) básicos da máquina de indução de nove fases utilizada neste trabalho.**

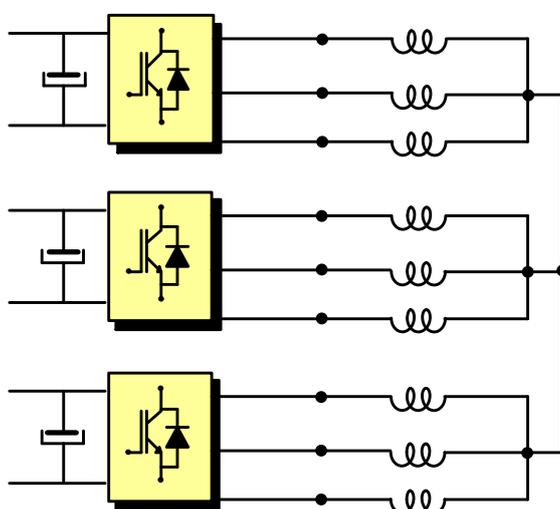


Fonte: (BASTOS, 2015).

É possível observar três sistemas trifásicos defasados de  $40^\circ$  em uma distribuição simétrica no estator da máquina. Nesse arranjo a conexão das fases forma um ponto de neutro comum entre elas.

Para alimentar essa máquina elétrica o inversor de frequência deve possuir nove braços, respectivos a cada uma das fases. Este dispositivo pode ser projetado ou pode-se optar por utilizar três inversores trifásicos. A Figura 4.3-2 ilustra de forma simplificada o inversor de alimentação desta máquina.

**Figura 4.3-2 – Alimentação das bobinas da máquina de indução de nove fases.**

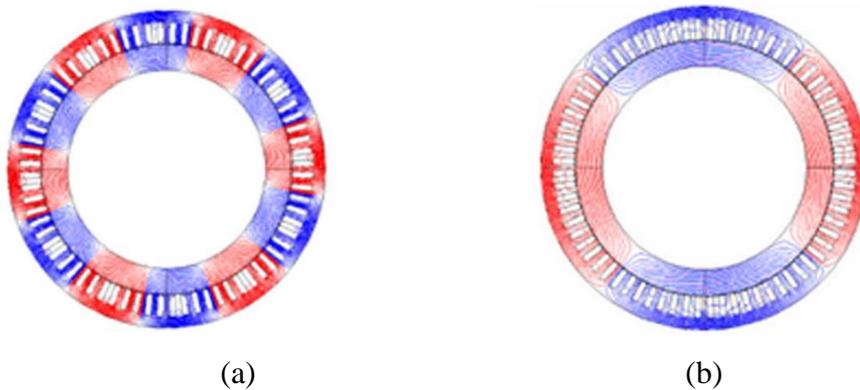


Fonte: Autor.

Outra característica interessante quanto à utilização destas máquinas é a possibilidade de mudança eletrônica do número de pólos da máquina. No caso desta máquina de indução de nove fases é possível operá-la no modo 4 pólos – 9 fases ou no modo 12 pólos – 3 fases continuamente durante a transição dos modos. (KELLY, STRANGAS e MILLER, 2003), (KELLY e STRANGAS, 2007). Essa característica é comum às máquinas multifásicas, com fases múltiplas de três. Em (OSAMA e LIPO, 1997) é apresentado uma análise da mudança eletrônica de pólos para uma máquina de indução de seis fases.

A Figura 4.3-3 ilustra a distribuição do fluxo principal da máquina nos dois modos de operação, 12 pólos – 3 fases e 4 pólos – 9 fases respectivamente.

**Figura 4.3-3 – Fluxo principal da máquina de indução de nove fases no modo (a) 12Pólos - 3Fases e (b) 4Pólos – 9Fases.**



Fonte: (ZERAOULIA, BENBOUZID e DIALLO, 2006).

A possibilidade de mudança eletrônica do número de pólos proporciona torque mais elevado em velocidades baixas. Com isso a curva de torque por velocidade da máquina se torna a resultante dos dois modos.

Assim como feito para o MCI, o modelo representativo da máquina elétrica no *software* ADVISOR é construído a partir das curvas de torque por velocidade, eficiência, potência, massa, entre outros. As características técnicas de operação da máquina utilizada na simulação estão apresentadas abaixo pela Tabela 4.3-1.

**Tabela 4.3-1 – Parâmetros técnicos da máquina de indução de nove fases.**

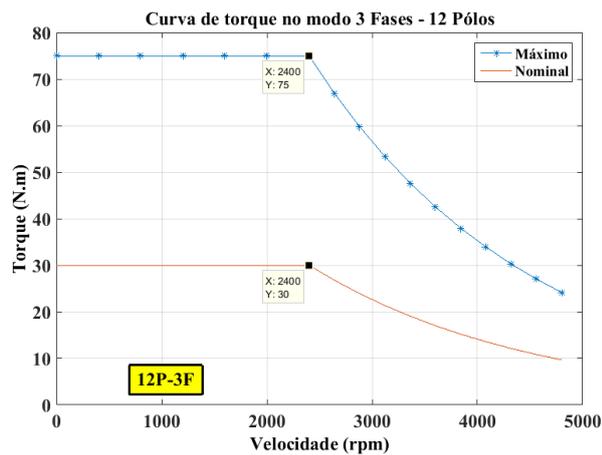
<b>Parâmetros da máquina de indução de nove fases</b>		
Potência nominal	10	kW
Peso aproximado	50	Kg
Torque nominal – 9 Fases - 4 Pólos	10	N.m
Torque máximo – 9 Fases - 4 Pólos	25	N.m
Velocidade base – 9 Fases - 4 Pólos	7.200	Rpm
Torque nominal – 3 Fases - 12 Pólos	30	N.m
Torque máximo – 3 Fases - 12 Pólos	75	N.m
Velocidade base – 3 Fases - 12 Pólos	2.400	RPM

Fonte: Autor.

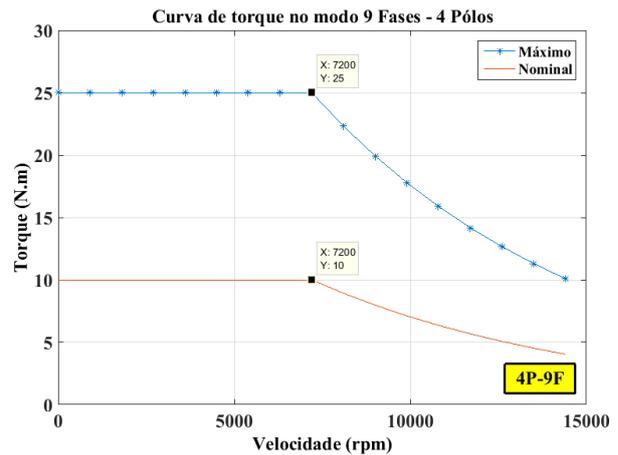
Não foi possível coletar os dados de eficiência desta máquina elétrica. Para não simular um caso ideal de eficiência, foram tomados como bases valores de eficiência de uma máquina de indução de 75 kW - Westinghouse disponível no banco de dados do ADVISOR.

Na Figura 4.3-4, em (a) e em (b), estão ilustradas as curvas de torque da máquina nos dois modos de operação, 12 pólos três fases e 4 pólos nove fases respectivamente. Em (c) está ilustrada a curva de torque integrada dos dois modos de operação e em (d) a curva de torque nos quadrantes de motorização e geração com as regiões de eficiência.

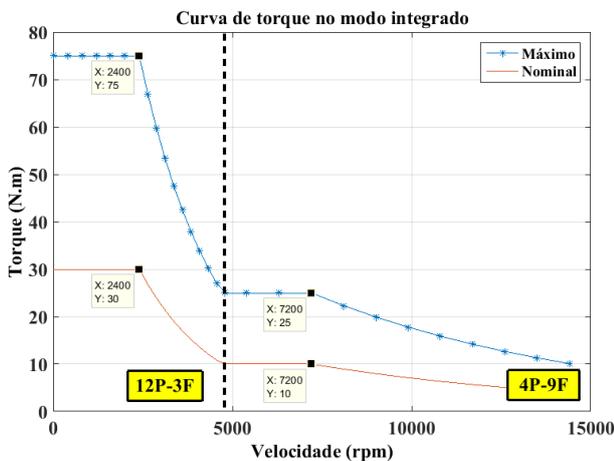
**Figura 4.3-4 – Curvas de torque nominal e máximo para a máquina elétrica nos modos 3 fases (a) e no modo 9 fases (b), o modo de operação integrado (c) e com o mapa de eficiência (d).**



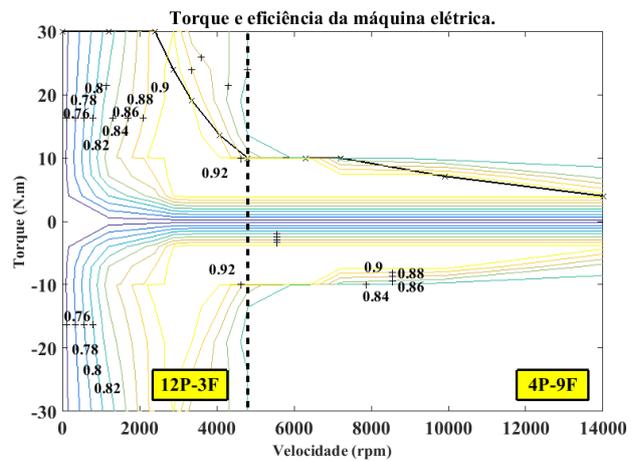
(a)



(b)



(c)



(d)

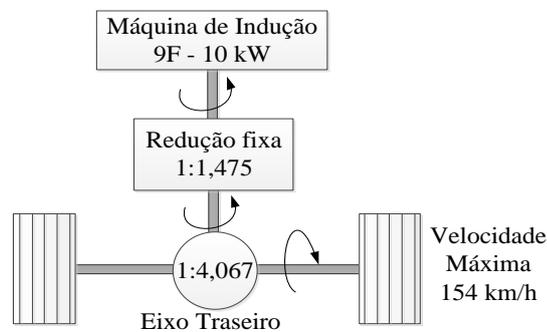
Fonte: Autor.

A partir da velocidade base nos dois modos de operação faz-se o enfraquecimento de campo, assim é possível elevar a velocidade a custo da diminuição de torque. A velocidade máxima praticada é de duas vezes a nominal, normalmente definida por limitações mecânicas da máquina.

#### 4.4. Definição da transmissão

A transmissão para o sistema de tração elétrica embarcado no eixo traseiro do veículo foi determinada com base na velocidade máxima do veículo, visto que a máquina elétrica do sistema de tração gira continuamente quando o veículo está em movimento, mesmo que não seja requerido torque para tração. A Figura 4.4-1 ilustra o sistema de tração elétrica do eixo traseiro.

**Figura 4.4-1 – Sistema de tração elétrica no eixo traseiro.**



Fonte: Autor.

Foi considerada uma relação de redução típica utilizada para o diferencial mecânico e a mesma utilizada no diferencial dianteiro do veículo convencional apresentado anteriormente, 1:4,067. A velocidade máxima alcançável pelo veículo é 154 km/h, ou 41,66 m/s. Essa velocidade linear, transformada em velocidade angular no eixo de saída do diferencial pode ser calculada conforme apresentado abaixo. Onde  $R$  é o raio da roda em metros e  $V_L$  é a velocidade linear em metros por segundo.

$$V_{ang(\frac{rad}{s})} = \frac{V_L}{R} = \frac{41,66}{0,33} = 126 \text{ rad/s}$$

**Eq. 4.4-1**

E em rotações por minuto.

$$V_{ang(RPM)} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot V_{ang(\frac{rad}{s})} = 1205,5 \text{ RPM}$$

**Eq. 4.4-2**

Sendo assim, a velocidade de rotação no eixo de saída da transmissão será 1205,5 RPM.

No eixo de entrada da transmissão está acoplada a máquina elétrica, cuja velocidade nominal é de 7200 RPM no modo 9 fases – 4 pólos. Ao permitir que esta máquina elétrica opere em velocidade nominal, a relação de redução da transmissão será estabelecida com sendo aproximadamente seis vezes. Assim sendo, o conjunto mecânico da transmissão, caixa de redução e diferencial, aplica uma redução de seis vezes na velocidade de rotação da máquina elétrica e um ganho de torque de seis vezes do eixo da máquina para o eixo das rodas traseiras do veículo.

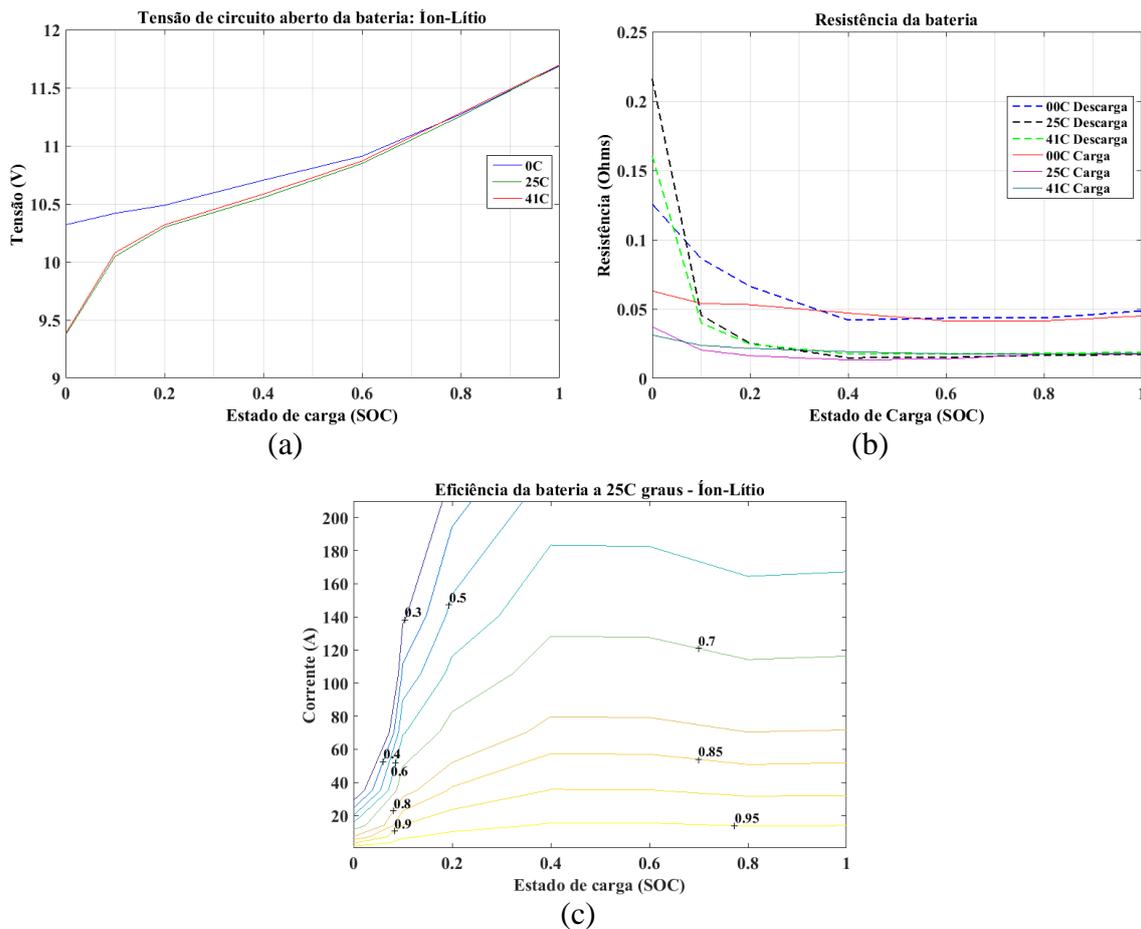
## **4.5. Definição da bateria**

Este trabalho não avalia detalhadamente o sistema de armazenamento de energia. Para simular os efeitos da hibridização do veículo convencional foi utilizado um modelo de baterias disponível no banco de dados do ADVISOR. A bateria utilizada foi do tipo íon-lítio, de 6 Ah e 25 kW e com uma massa de aproximadamente 28 kg. Optou-se por utilizar baterias de íon-lítio devido sua característica de densidade de energia, com o objetivo de obter uma solução de tração elétrica compacta. Os custos não foram considerados. O modelo da bateria está desenvolvido conforme as características apresentadas abaixo:

- A bateria é modelada por um circuito equivalente composto por uma fonte de tensão, e utiliza o dado de tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e da resistência interna ( $R_{int}$ ) disposta em série com essa fonte;
- Os parâmetros  $V_{oc}$ ,  $R_{int}$  e Potência são variáveis da equação que resolve a corrente do circuito equivalente da bateria;
- A corrente é variável utilizada para estimar o SOC da bateria.

A Figura 4.5-1 ilustra (a) a característica de tensão de circuito aberto e de (b) resistência interna em função do SOC. Estas variáveis mudam de comportamento conforme a variação de temperatura da bateria. Também está ilustrada a (c) eficiência da bateria em função do estado de carga e da corrente elétrica demanda.

**Figura 4.5-1 – Características de tensão (a) e resistência (b) da bateria**



Fonte: Autor.

## 4.6. Modos operacionais

As Estratégias de Gerenciamento de Potência (EGP) utilizadas para controle dos modos operacionais tem como função gerenciar a distribuição de potência proveniente das fontes de energia existentes nos sistemas de tração elétrico e mecânico a MCI. O uso combinado destas fontes energéticas é uma tarefa complicada e requer a análise de um grande número de variáveis. Existem métodos capazes de definir a escolha ótima que produzirá o menor consumo de combustível. No entanto são algoritmos que requerem a predição futura ou conhecimento total do problema. Métodos menos complexos podem ser alcançados por algoritmos determinísticos. Detalhar e avaliar esses diferentes métodos não está no escopo deste trabalho. Maiores detalhes podem ser obtidos em (SHEN, SHAN e GAO, 2011), (EHSANI e EMADI, 2010), entre outras.

Os autores (FALLAHI e NIASAR, 2014) avaliam duas estratégias de controle para hibridização paralela de eixos separados utilizando o software ADVISOR. A primeira estratégia é conhecida como On/Off e a segunda estratégia utilizada é baseada em lógica Fuzzy. Apesar de mais complexa, a estratégia baseada em lógica Fuzzy apresentou melhores resultados de consumo e emissão de poluentes. Neste trabalho de dissertação é utilizada a estratégia On/Off do ADVISOR modificada para a arquitetura Paralela-ES, optou-se por utilizar um método menos complexo.

A estrutura de controle é composta por uma Unidade de Controle Híbrida (UCH), que recebe sinais de controle de vários subsistemas do conjunto para serem processados e gerar referências de saídas. A propulsão do veículo está então vinculada a UCH, que acionará o sistema propulsor com as demandas de torque necessárias a cada um.

### 4.6.1 Modos de Operação do VEH Paralelo – ES

Os modos de operação do VEH que estão sendo propostos por este trabalho estão descrito pelos tópicos abaixo.

- Propulsão puramente a Motor de Combustão: Neste modo de operação o MCI é o único a prover a propulsão ao veículo, no caso, no eixo dianteiro do veículo. O sistema de tração elétrica neste caso não fornece torque para motorizar as rodas do eixo traseiro;
- Propulsão híbrida: Neste modo tanto o sistema de tração a MCI do eixo dianteiro quanto à tração elétrica no eixo traseiro atuam para suprir as demandas de torque motor do ciclo de condução. Este modo de operação proporciona tração nas quatro rodas do veículo, isso porque a arquitetura utilizada é a paralela de eixos separados;
- Frenagem regenerativa: O sistema de propulsão elétrica atua para aproveitar a energia cinética do veículo durante a desaceleração, assim, a máquina elétrica opera em modo gerador sempre que há desaceleração;
- Recarga das baterias por tração do sistema a MCI: Este modo de operação pode prover recarga ao sistema de armazenamento de energia quando o MCI está tracionando o veículo. Neste caso é permitido um aumento de 10% da demanda de torque do MCI para suprir essa recarga, caso necessário. Este modo possibilita recarregar as baterias enquanto o veículo é movido pelo MCI e o SOC está baixo. Porém, com o veículo parado isso não é possível.

O modo de operação em que ocorre tração puramente elétrica não é factível neste caso. Esta limitação se deve as características do veículo convencional proposto a ser hibridizado. Neste veículo, todas as cargas mecânicas do veículo, como por exemplo, compressor do ar condicionado, direção hidráulica, freios, alternador do sistema elétrico e as demais cargas elétricas como faróis e rádios dependem do MCI em operação. Outro fator limitante é o sistema de transmissão manual do veículo com acoplamento de embreagem demandada pelo motorista.

## Conclusões

Como visto, este capítulo apresenta a concepção do sistema proposto para hibridização de um veículo convencional a MCI com características de um compacto nacional. A proposta é tornar o veículo em um VEH sem que grandes modificações sejam necessárias ao sistema e a estrutura do convencional, por isso foi estabelecida a utilização da arquitetura paralela de eixos separados. A relativa facilidade de hibridização do veículo utilizando esta arquitetura somada à disponibilidade de tração nas quatro rodas motivou o estudo, mesmo diante da limitada capacidade de recuperação de energia por frenagem do sistema de tração elétrica no eixo traseiro.

As informações técnicas do veículo e os componentes que o compõe foram coletadas por meio de ensaios realizados em laboratório e em pista de testes pelo CTM/UFMG, fato que possibilitou gerar as informações necessárias para modelar os componentes e os veículos no ambiente de simulação do ADVISOR. Essa representação é realizada principalmente por meio das características de torque, potência e eficiência dos componentes, além do peso.

A máquina de indução de nove fases foi escolhida devido a sua confiabilidade em caso de falhas por perda de fases, pela capacidade de produzir torques extras com injeção de correntes de terceiro harmônico, pela possibilidade de mudança do número de pólos eletronicamente. Outros benefícios podem ser obtidos com a utilização desta máquina, como por exemplo, a possibilidade de reduzir o nível de tensão nas fases e o número de células de bateria em série e a possível eliminação do conversor CC/CC entre o inversor e a bateria. Todos estes atrativos contribuem para compactar o sistema de tração a ser embarcado no eixo traseiro. Necessidade que também justifica a escolha do modelo de bateria de íon-lítio.

A partir da velocidade máxima alcançável pelo veículo convencional e a velocidade base da máquina elétrica no modo 4 pólos – 9 fases foi definida a redução do sistema de transmissão do propulsor elétrico, composto por uma caixa de redução e pelo diferencial mecânico.

Por fim, o modo de operação do sistema de propulsão híbrida fica amarrado a arquitetura e as características do veículo convencional a ser hibridizado.

## **CAPÍTULO 5 – Implementação do modelo e simulação**

Este capítulo tem como propósito implementar o sistema proposto no capítulo 4 no *software* de simulação ADVISOR (*Advanced Vehicle Simulator*) para validar o modelo do veículo convencional e resultados com a hibridização paralela de eixo separados. Esta ferramenta de simulação de veículos foi desenvolvido nos EUA por uma parceria entre a comunidade acadêmica, o Laboratório Nacional de Energia Renovável (*NREL – National Renewable Energy Laboratory*) e o departamento de energia dos Estados Unidos. O *software* foi descontinuado a partir de 2013, mas a última versão está disponível grátis para download no site.

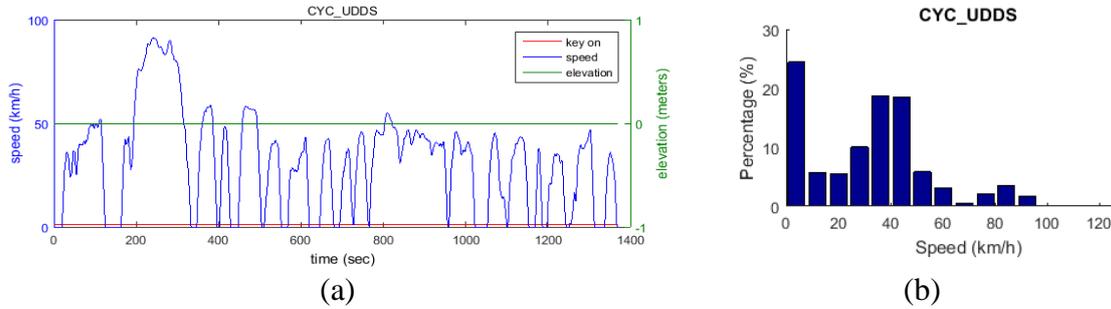
### **5.1. Ciclos de condução**

Os ciclos de condução são classificados em dois tipos, os que possuem características de condução urbana e os de tráfego extra urbano, também chamados de ciclos de condução rodoviária. Estes ciclos normativos são utilizados para certificar o consumo de combustível e a emissão dos veículos das diversas montadoras. O resultado destas análises pode ser encontrado no catálogo do programa brasileiro de etiquetagem de veículos leves do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Em 2015, 36 marcas e 692 modelos foram avaliadas (INMETRO, 2015).

Para avaliar os veículos deste trabalho foram utilizados testes de desempenho e de consumo de combustível. Para os testes de consumo foram utilizados os ciclos de condução urbano FTP-75 e o ciclo rodoviário HWFET, ambos são ciclos Norte Americanos adotados também pela ABNT para certificação no Brasil. A Figura 5.1-1

(a) ilustra o ciclo de condução urbano FTP-75 e em (b) o histograma de porcentagem do tempo em que o veículo opera nas velocidades.

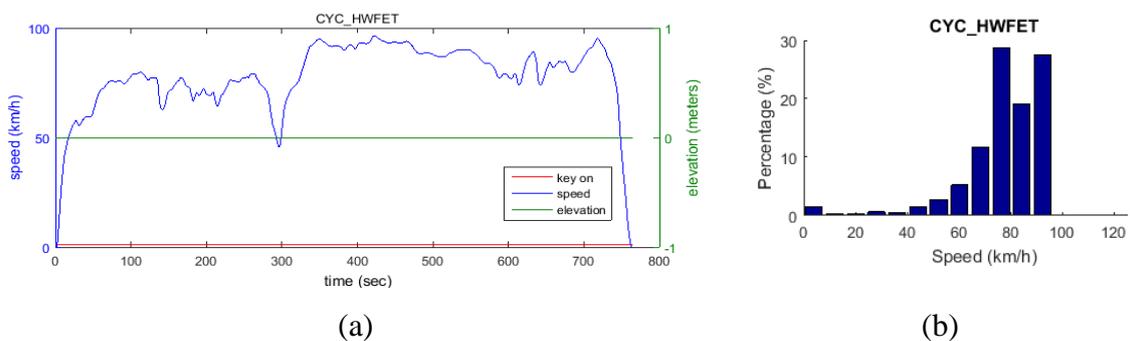
**Figura 5.1-1 – Ciclo de condução Urbano FTP-75.**



Fonte: Autor.

O ciclo de condução ilustra o perfil de velocidade (km/h) no tempo (s) no qual o veículo é submetido. Os ciclos também impõem ao veículo uma troca de marcha em função da velocidade. A partir do perfil definido pelo FTP-75, é possível observar que a velocidade demandada ao veículo é zero em diversos momentos, no total de 17 paradas, representando a característica comum das vias urbanas. Essa característica também pode ser observada no histograma. A máxima velocidade que o veículo alcança é aproximadamente 90 km/h, em um trajeto de 12 km. Assim como apresentado para o FTP-75. A Figura 5.1-2 (a) ilustra o ciclo de condução rodoviário HWFET e em (b) o histograma.

**Figura 5.1-2 – Ciclo de condução Rodoviário HWFET.**



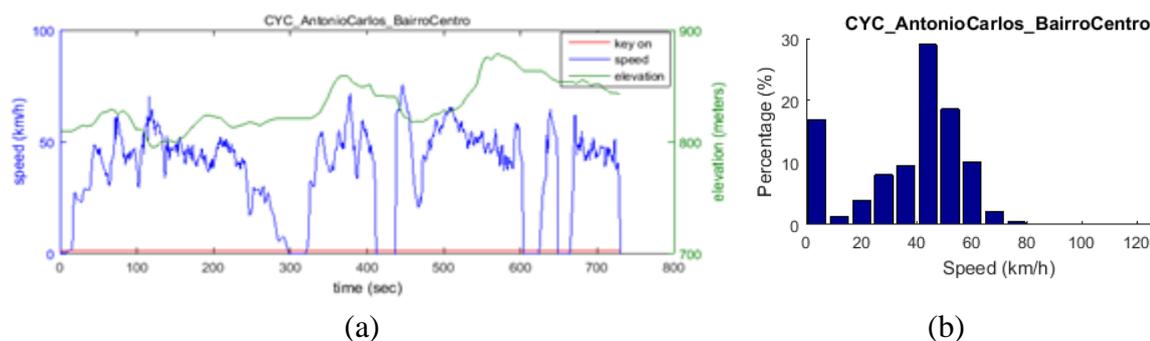
Fonte: Autor.

É possível observar claramente que o veículo opera com velocidade superior a 50 km/h, atingindo a 0 km/h apenas no final do ciclo. Observa-se, pelo histograma em (b), que a maior parte do tempo o veículo trafega na faixa entre 70 e 90 km/h.

Para ambos os ciclos de condução apresentados, considera-se que não existe elevação de pista. Esta variável influencia no consumo e no desempenho. Para avaliar o veículo em um ciclo de condução real com elevação na pista, uma medição foi realizada com um veículo em um dos principais corredores de Belo Horizonte – MG, a av. Presidente Antônio Carlos no sentido bairro centro, um percurso de aproximadamente 8 km. Essa medição foi feita com auxílio de um *smartphone* e do aplicativo “GpsTracker”. A medição foi realizada fora do horário de pico.

A Figura 5.1-3 (a) ilustra o perfil de velocidade medido ao longo da avenida, onde é possível observar a elevação ao longo do trajeto, ilustrada pela curva em verde. As taxas de aceleração impostas por este ciclo são maiores que as do FTP-75.

**Figura 5.1-3 – Ciclo de condução Urbano real medido na Av. Antônio Carlos sentido Bairro-Centro.**



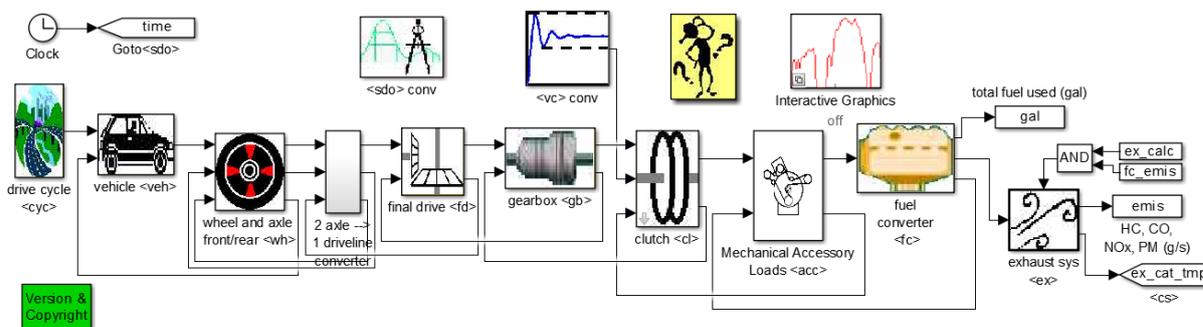
Fonte: Autor.

Observa-se em (b) que o veículo permanece grande parte do tempo parado, de um total de cinco paradas e uma condução em grande parte do tempo em velocidades próximas a 50 km/h.

## 5.2. Modelo do veículo convencional

O diagrama de blocos do modelo do veículo convencional no ADVISOR está ilustrado abaixo pela Figura 5.2-1. Da esquerda pra direita, o primeiro bloco ilustrado contém todas as informações e demandas impostas pelo ciclo de condução. O bloco seguinte possui as características aerodinâmicas do veículo. Este bloco calcula a força e a velocidade requerida aos pneus, além das forças contrárias ao movimento do veículo.

**Figura 5.2-1 – Diagrama de blocos do modelo do veículo convencional no ADVISOR.**



Fonte: Autor.

O bloco seguinte é denominado como *wheel and axle*. Neste bloco os eixos ativos são verificados e as variáveis de escorregamento, perdas, forças de tração nos eixos, forças de frenagem nas rodas, entre outras, são determinadas. Este bloco é responsável por calcular as forças de tração e velocidade nos eixos do veículo, tanto a requerida ao sistema de tração do eixo quanto a disponível. O bloco seguinte tem a função única de informar qual o eixo de tração do veículo está ativo, se é o frontal o traseiro, ou ambos. Os demais blocos na sequência representam os componentes do veículo, como por exemplo, diferencial, caixa de marcha, embreagem, Motor de Combustão Interna (MCI) e as cargas mecânicas do MCI, organizados de acordo com o modelo e arquitetura do veículo. Além destes blocos, o bloco de controle está ilustrado pelo bloco cuja imagem é uma forma de onda típica de controle.

### 5.3. Validação do veículo convencional

Para avaliar o grau de representatividade do modelo simulado com os resultados obtidos com o veículo convencional real, alguns parâmetros de desempenho e de consumo foram testados. Posteriormente o veículo convencional é simulado operando nos ciclos de condução para avaliar o comportamento e consumo de combustível.

#### 5.3.1 Testes de desempenho do veículo.

A Tabela 5.3-1 apresenta o resultado dos testes de desempenho que medem tempo de aceleração e velocidade máxima do veículo, além dos testes de consumo de combustível em velocidades constantes e na velocidade máxima. Estão representados os resultados dos testes realizados com o veículo real em pista e o com o veículo simulado no ADVISOR.

**Tabela 5.3-1 – Resultado dos testes experimental e simulado para o veículo convencional a MCI.**

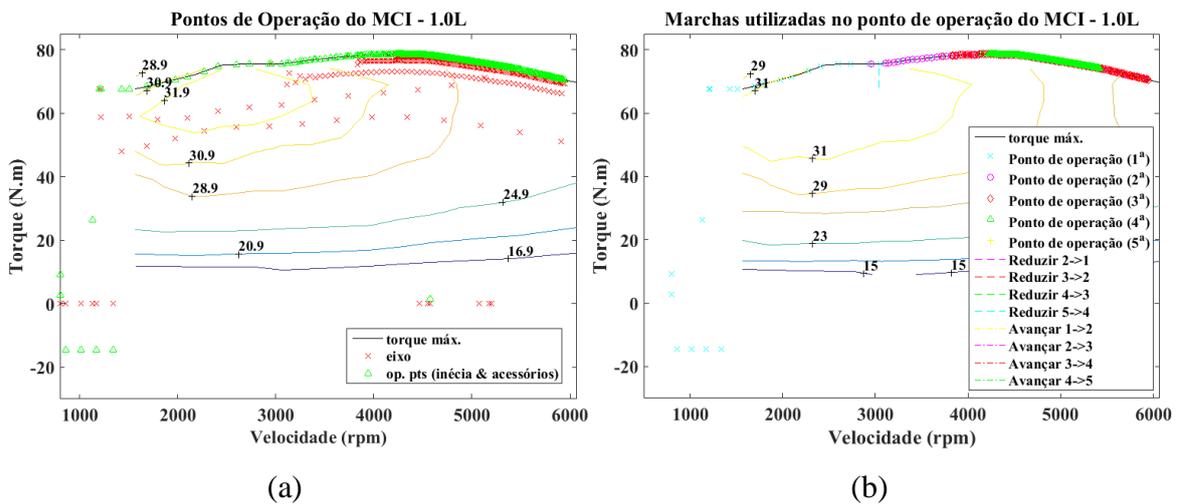
Testes de Desempenho	Experimental	Simulado	Erro (%)
Aceleração (0 - 100 km/h)	16,2 s	16,6 s	2,47
Aceleração (0 - 400 m)	20,2 s	20,5 s	1,49
Velocidade máxima	151,3 km/h	157,9 km/h	4,36
Velocidade constante (64 km/h) 4 <sup>a</sup> Marcha	24,2 km/L	25,64 km/L	5,95
Velocidade constante (90 km/h) 5 <sup>a</sup> Marcha	19 km/L	21,73 km/L	14,37
Velocidade constante (120 km/h) 5 <sup>a</sup> Marcha	13,4 km/L	15,62 km/L	16,57
Velocidade máxima (151,3 km/h) 4 <sup>a</sup> Marcha	10,2 km/L	9,61 km/L	5,78

Fonte: Autor.

Como pode ser observado, o resultado obtido com o modelo simulado se aproxima do resultado real obtido com veículo em pista.

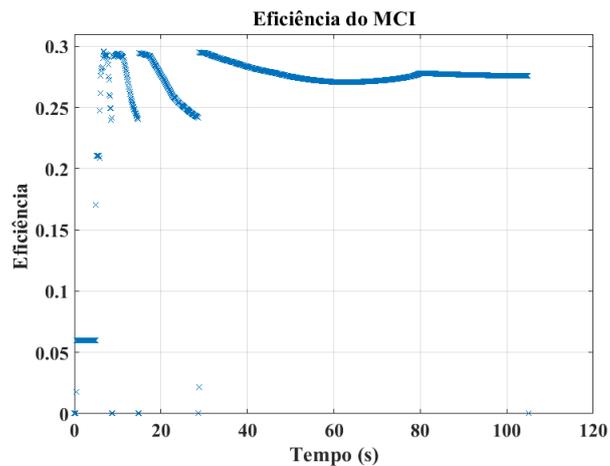
No teste de aceleração é aplicado um degrau de velocidade superior à máxima velocidade alcançável, aproximadamente 300 km/h neste caso. Neste teste a máxima potência e torque são exigidos do MCI, fato que pode ser observado pela Figura 5.3-1. Na Figura 5.3-1 (a) são apresentados os pontos de operação do MCI, enquanto na Figura 5.3-1 (b) estão representadas com as marchas engrenadas referentes a esses pontos de operação. É possível observar que de fato o MCI operou no seu limite máximo de torque disponível. Na Figura 5.3-1 (c) estão ilustrados os pontos de eficiência do MCI, onde é possível perceber os momentos de troca de marcha.

**Figura 5.3-1 – Mapas do MCI com os pontos de operação (a), as marchas respectivas (b) e os pontos de eficiência em que o MCI operou – Teste de Aceleração.**



(a)

(b)



(c)

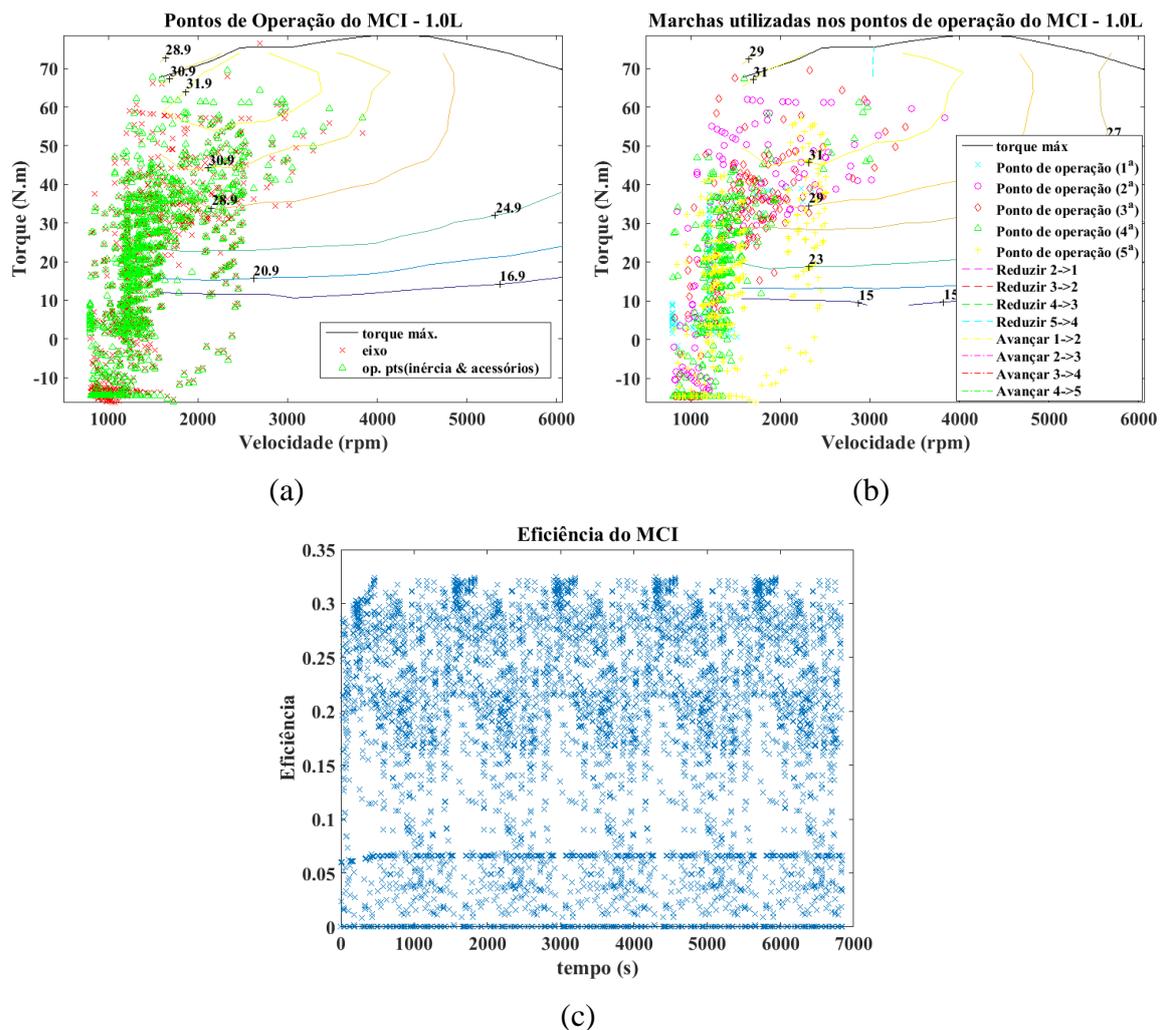
Fonte: Autor.

### 5.3.2 Testes de consumo em ciclos de condução

Após analisar os dados de desempenho do veículo convencional real e simulado e verificar a proximidade dos resultados, é realizado aqui uma análise das características do comportamento do veículo quando submetidos aos ciclos de condução.

O veículo foi submetido primeiramente ao ciclo de condução urbano FTP-75. Os resultados de operação do MCI para o ciclo estão apresentados na Figura 5.3-2.

**Figura 5.3-2 – Mapas do MCI com os pontos de operação (a), as marchas respectivas (b) e os pontos de eficiência em que o MCI operou – Ciclo FTP-75.**



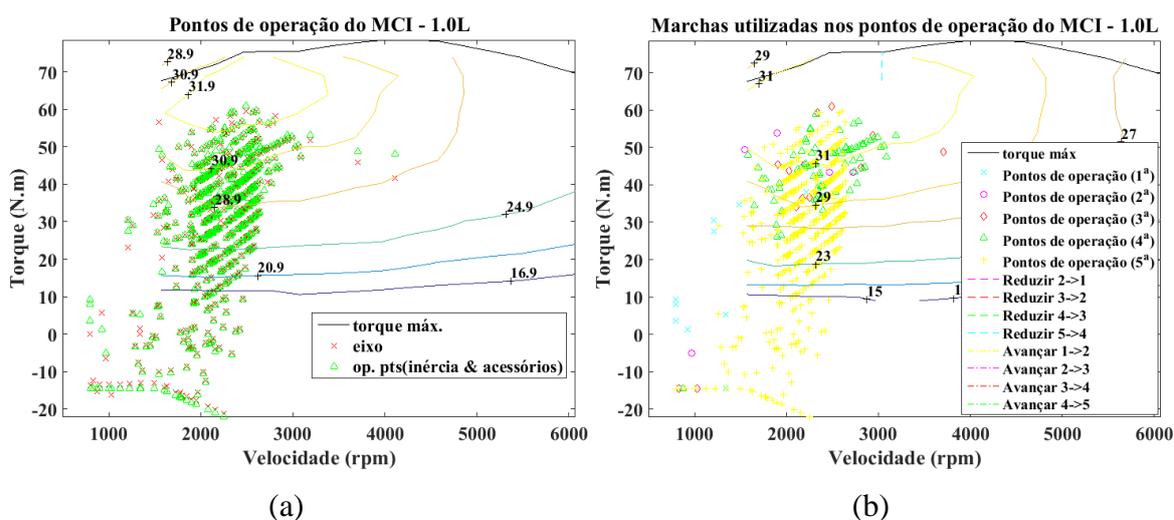
Fonte: Autor.

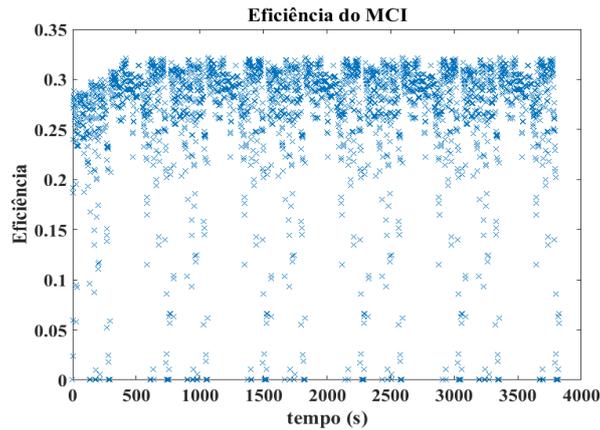
É possível observar que para ciclos de condução FTP-75 o MCI opera em velocidades de rotação relativamente baixas e em regiões de baixa eficiência. É importante observar ainda que nesta região de baixa velocidade, a disponibilidade de torque do MCI é inferior. A Figura 5.3-2 (c) ilustra bem as regiões de eficiência em que o MCI operou. Essas características observadas, normalmente são inerentes dos ciclos de condução urbana. Também é possível observar, pela Figura 5.3-2 (a) e (b), que o MCI opera em regiões de torque negativo em determinados momentos. Isso ilustra o comportamento de frenagem do MCI.

Em ciclos de condução rodoviários os veículos normalmente trafegam em velocidades mais altas e não atinge 0 km/h ao longo do trajeto, além das taxas de aceleração serem menores. Nesta condição o MCI naturalmente tende a operar em uma região mais eficiente e econômica. A Figura 5.3-3 (a) e (b) ilustra os pontos de operação dentro do mapa do MCI. É possível observar que as demandas de torque ao MCI são menores e que opera em regiões mais eficientes.

Na Figura 5.3-3 (c) estão ilustrados os pontos de eficiência em do MCI, onde é possível perceber que a operação foi predominantemente nas regiões de eficiência de 20 a 31%.

**Figura 5.3-3 – Mapas do MCI com os pontos de operação (a), as marchas respectivas (b) e os pontos de eficiência em que o MCI operou – Ciclo HWFET.**



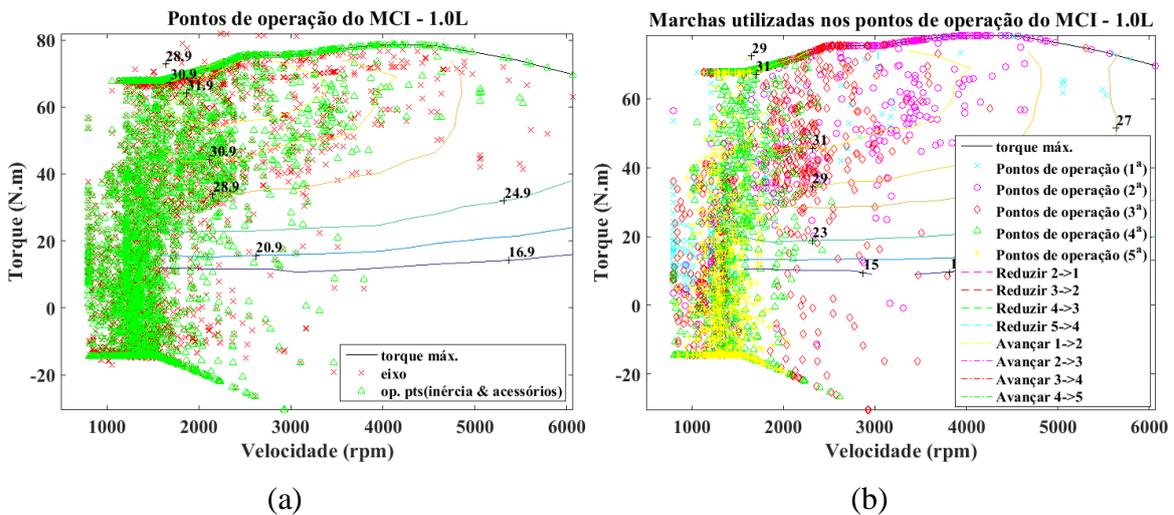


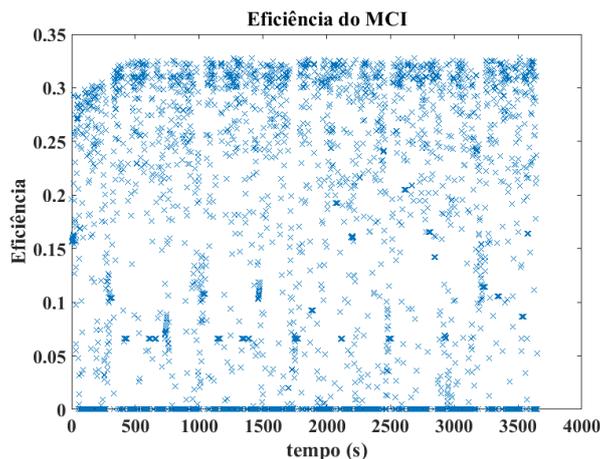
(c)

Fonte: Autor.

Para ambos os ciclos de condução normatizados adotados pela ABNT, é considerado que a pista não possui elevação. Para analisar o comportamento do veículo quando submetido a um ciclo com inclinação e próximo da realidade da cidade, medido na Av. Antônio Carlos, foi utilizado para também avaliar o veículo convencional. A Figura 5.3-4 ilustra os pontos de operação e eficiência do MCI para este ciclo.

**Figura 5.3-4 – Mapas do MCI com os pontos de operação (a), as marchas respectivas (b) e os pontos de eficiência em que o MCI operou – Ciclo Av. Antônio Carlos.**





(c)

Fonte: Autor.

Observa-se que o MCI teve demandas mais altas de torque devido à elevação do trajeto e pelas taxas de aceleração, maiores neste ciclo do que no FTP-75. É possível observar que o MCI operou com velocidades de rotação superiores e uma região mais abrangente do mapa do motor, o que também influencia no consumo de combustível.

A Tabela 5.3-2 apresenta os resultados comparativos de eficiência média do MCI, do veículo e de consumo de combustível (E-22) para os testes apresentados com os três ciclos de condução.

**Tabela 5.3-2 – Eficiência e consumo de combustível do veículo convencional simulado nos três diferentes ciclos de condução.**

<b>Veículo Convencional Simulado</b>			
<b>Ciclo de Condução</b>	<b>Eficiência média do MCI</b>	<b>Eficiência do Veículo</b>	<b>Consumo (E-22)</b>
Av.AC	20,85%	5,80%	12,91 km/L
FTP-75	17,93%	8,00%	15,87 km/L
HWFET	27,25%	21,00%	24,39 km/L

Fonte: Autor.

O pior resultado de consumo e de eficiência do veículo foi obtido rodando no ciclo de condução urbano Av.AC. O que já era esperado devido às acelerações mais elevadas e a elevação de pista inerente ao trajeto. A eficiência média do MCI razoavelmente boa, 20,85%, é fruto da operação em regiões de maior eficiência no mapa, conforme foi ilustrado pela Figura 5.3-4 (a) e (b).

Comparado o consumo de combustível do veículo convencional experimental e simulado avaliado no ciclo de condução FTP-75, percebe-se um erro envolvido. A Tabela 5.3-3 apresenta estes resultados.

**Tabela 5.3-3 – Comparativo do consumo (E-22).**

<b>Consumo de combustível (E-22) no ciclo FTP-75</b>		
<b>Experimental</b>	<b>Simulado</b>	<b>Erro (%)</b>
12,8 km/L	15,87 km/L	23%

Fonte: Autor.

Os resultados comparativos de desempenho entre o veículo real e o modelo simulado foram próximos e por isso considerado positivo. Do ponto de vista de consumo de combustível no ciclo FTP-75, observa-se uma diferença maior. Para análise comparativa a fins de avaliar os efeitos da hibridização no veículo simulado, considera-se aceitável este erro embutido entre o real e o modelo simulado.

Os ciclos de condução impõem condições específicas à operação, influenciando tanto no consumo e na eficiência do MCI quanto no veículo como um todo. Como visto nos ciclos urbanos, o consumo de combustível aumenta e a eficiência cai. Isso acontece porque o MCI opera em regiões de baixa eficiência dentro do mapa. O contrário acontece em ciclos de condução rodoviários.

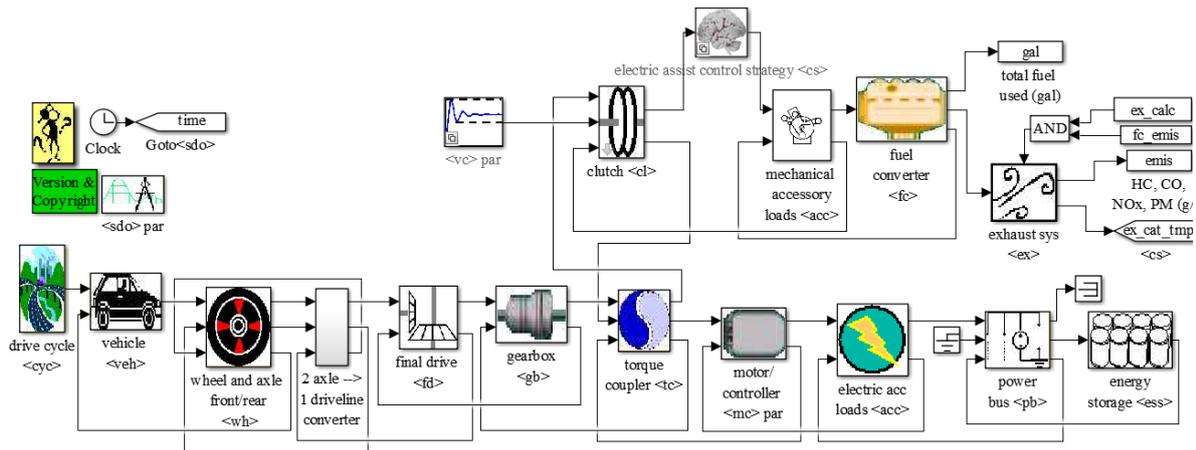
A situação ideal de consumo e eficiência dos MCI seria coloca-lo para operar apenas em sua região de maior eficiência, mas sem o auxílio de um sistema de propulsão auxiliar isso não é possível.

## 5.4. Modificação no ADVISOR para a arquitetura Paralela-ES

O *software* ADVISOR não contempla a arquitetura híbrida paralela de eixos separados, por este motivo, foi necessário realizar modificações em sua estrutura para implementar o diagrama de blocos desta arquitetura. A maneira menos complexa encontrada para inseri-la foi trabalhar em modificações sobre a arquitetura híbrida paralela convencional, onde o sistema de tração elétrica opera juntamente com o MCI no mesmo eixo de tração.

Nesta arquitetura híbrida, os sistemas de tração mecânica e elétrica estão acoplados a caixa de marcha e ao diferencial por meio de um conversor de torque. A Figura 5.4-1 ilustra o diagrama de blocos do ADVISOR para esta arquitetura Paralela convencional, apresentada anteriormente pela Figura 3.2-2. Os blocos do sistema de tração mecânica estão dispostos à direita na parte superior do diagrama. Neste sistema o MCI está conectado ao acoplamento mecânico de torque por meio da embreagem. O bloco entre a embreagem e o MCI é de demanda de potência das cargas mecânicas do veículo.

**Figura 5.4-1 – Diagrama de blocos da arquitetura híbrida paralela no ADVISOR.**



Fonte: Autor.

A direita do bloco do MCI observam-se os blocos que calculam os níveis de emissão de poluentes e do consumo de combustível. Dois blocos de controle do sistema híbrido

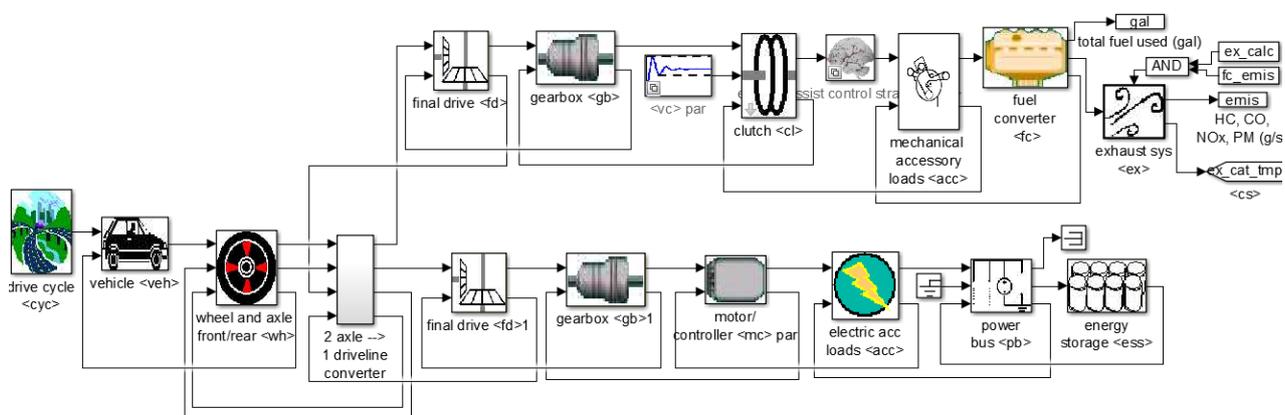
também podem ser observados, onde o primeiro manda referências pra o bloco do sistema de embreagem e o segundo controla as demandas de potência e torque do MCI, disposto entre o bloco de embreagem e MCI.

A máquina de tração elétrica também é conectada ao acoplamento de torque mecânico junto com o sistema do MCI. Este acoplamento conecta os motores de tração ao sistema de transmissão. Os blocos deste sistema de tração podem ser observados a direita do conversor de torque. Na sequência estão os blocos da máquina elétrica e do drive de controle do acionamento, integrados no mesmo bloco. À direita estão as cargas elétricas do veículo, o conversor de potência e o sistema de armazenamento de energia.

#### 5.4.1 Modelo do veículo convencional hibridizado – Paralelo-ES

O desacoplamento dos sistemas de tração, colocados em eixos diferentes foi obtido modificando o bloco de seleção e verificação dos eixos de tração ativos e inserindo dois novos blocos ao diagrama. O bloco do acoplamento de torque também foi retirado. A Figura 5.4-2 ilustra o diagrama de blocos da arquitetura Paralela-ES implementada.

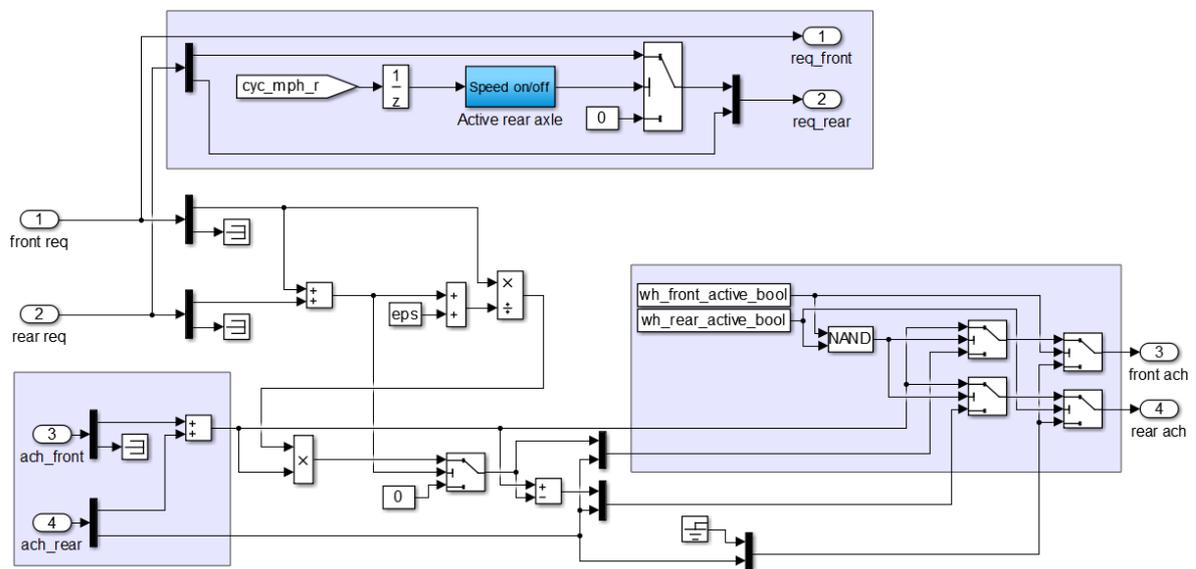
**Figura 5.4-2 – Diagrama de blocos do modelo do VEH paralelo de eixo separado implementado no ADVISOR.**



Fonte: Autor.

O bloco que representa as rodas e os eixos do veículo gera referência de demanda de torque e velocidade para o sistema de tração do eixo dianteiro e traseiro. Porém, o bloco de seleção verifica qual o eixo ativo, dianteiro ou traseiro e direciona a demanda para o diferencial do sistema de tração. Esse bloco foi modificado para gerar demanda aos dois eixos de tração do veículo, por isso foi adicionada uma entrada e uma saída, referentes a cada um dos dois diferenciais de tração do veículo. A Figura 5.4-3 ilustra o diagrama interno do bloco.

**Figura 5.4-3 – Diagrama de blocos do bloco de seleção do eixo de tração**



Fonte: Autor.

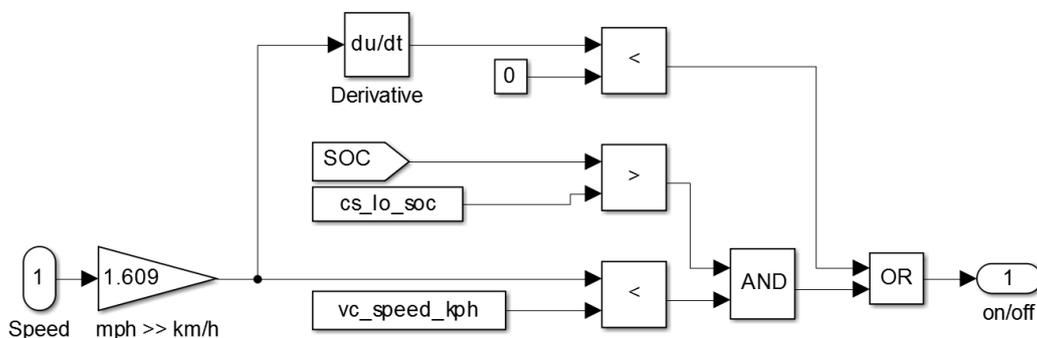
Conforme pode ser observado, as saídas 1 e 2 do bloco de seleção e ativação dos eixos, determinam a velocidade e o torque requerido na saída do diferencial de tração, enquanto as entradas 1 e 2 recebem a velocidade e o torque disponível.

As áreas destacadas em azul foram inseridas e ou modificadas neste bloco para realizar a separação das demandas de torque e velocidade em cada eixo de tração do veículo. O bloco de cor azul contém a lógica de ativação de demanda de torque para o eixo traseiro. A demanda de torque para o sistema de tração elétrica, eixo traseiro, é ativada

sempre que a velocidade do veículo está abaixo da uma pré-determinada e o estado de carga da bateria está acima do limite mínimo pré-definido. Independente da velocidade que o veículo está, a demanda de torque ao eixo traseiro também é ativada quando o veículo está desacelerando, neste caso, para recuperar energia na frenagem.

A Figura 5.4-4 ilustra o diagrama interno deste bloco, implementado para realizar a função de ativação da demanda de torque ao eixo traseiro.

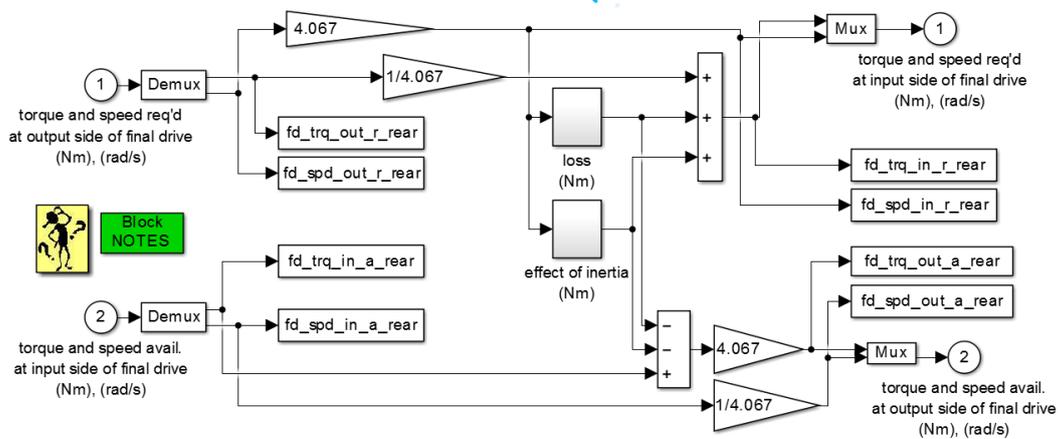
**Figura 5.4-4 – Diagrama de blocos do bloco de controle de ativação do sistema de tração elétrica.**



Fonte: Autor.

Conforme ilustrado pela Figura 5.4-2, os blocos de diferencial e caixa de marcha do sistema de tração mecânica foram duplicados para desacoplar os dois eixos de tração do veículo. O bloco do diferencial utilizado foi o mesmo, com mesma relação de redução do veículo convencional, aproximadamente quatro vezes. A função deste bloco é aplicar o fator de redução na velocidade e de ganho para o torque. Também é feito o cálculo das perdas deste conjunto mecânico. A Figura 5.4-5 ilustra o diagrama do bloco do diferencial mecânico.

**Figura 5.4-5 – Diagrama de blocos do bloco do diferencial do sistema de tração elétrica**

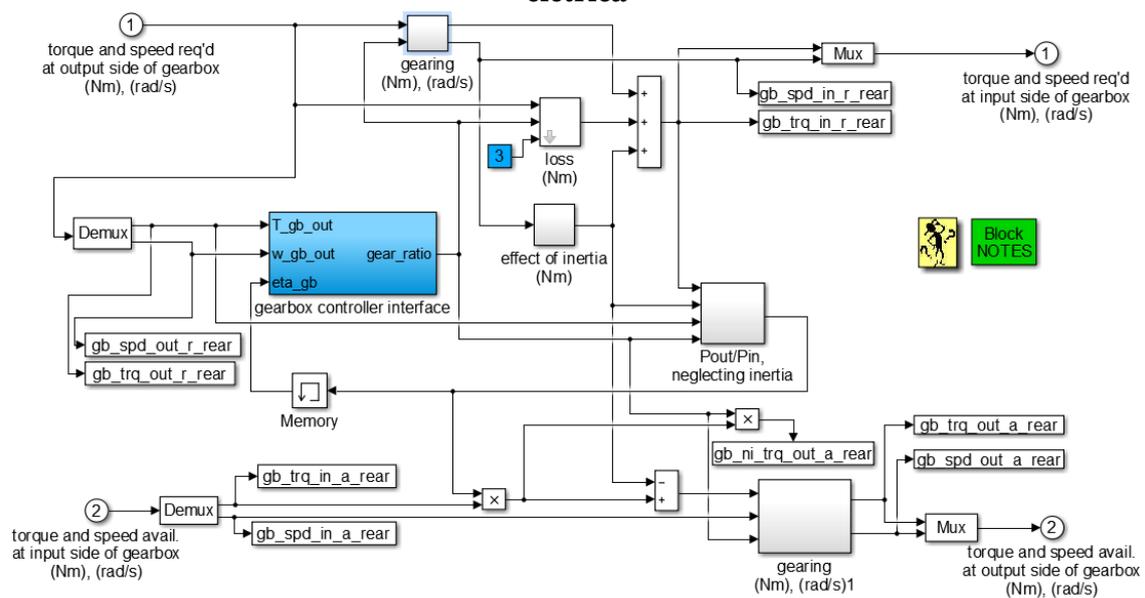


Fonte: Autor.

A caixa de marcha do sistema de propulsão elétrica foi modificada para contemplar apenas uma relação de redução, ao invés de cinco. Como apresentado na seção 4.4, o conjunto da transmissão deste sistema de tração possui uma redução de seis vezes.

A Figura 5.4-6 ilustra o diagrama do bloco da caixa de marcha do sistema de transmissão para o sistema de tração elétrica do eixo traseiro.

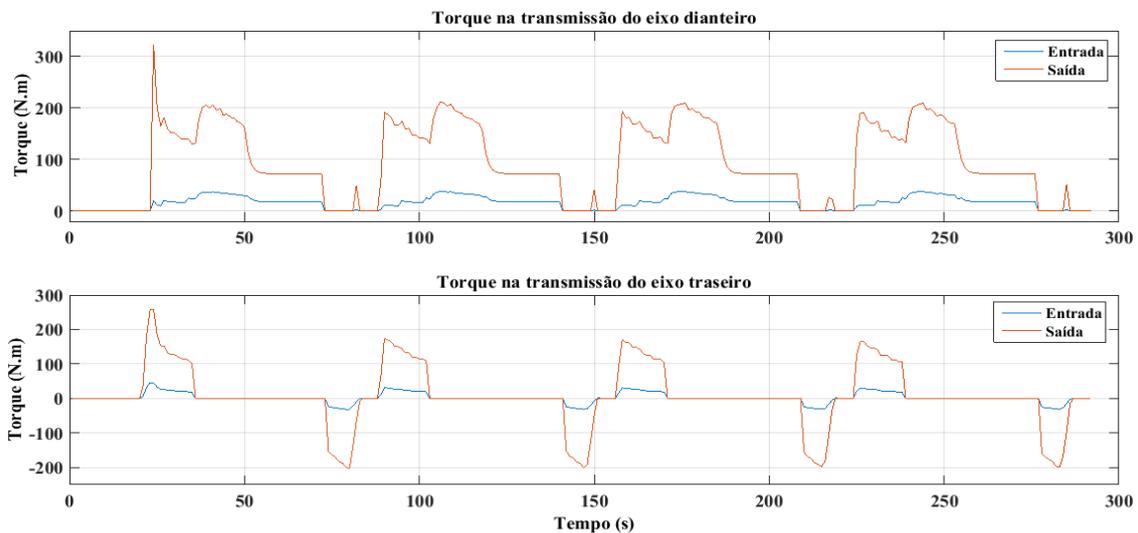
**Figura 5.4-6 – Diagrama de blocos da caixa de redução do sistema de tração elétrica**



Fonte: Autor.

Os blocos destacados pela cor azul foram modificados. Foram retirados os blocos responsáveis por fazer as mudanças de relação de redução das cinco respectivas velocidades da caixa convencional. As modificações realizadas garantem relação de redução de seis vezes desejada para a velocidade. O torque é inversamente proporcional à velocidade, assim como consequência da redução de velocidade, o torque de saída é seis vezes maior que o da entrada. A Figura 5.4-7 ilustra a formas de onda do torque de entrada e saída nas transmissões dos dois eixos, dianteiro e traseiro respectivamente.

**Figura 5.4-7 – Torque de entrada e saída nas transmissões do eixo dianteiro e traseiro.**

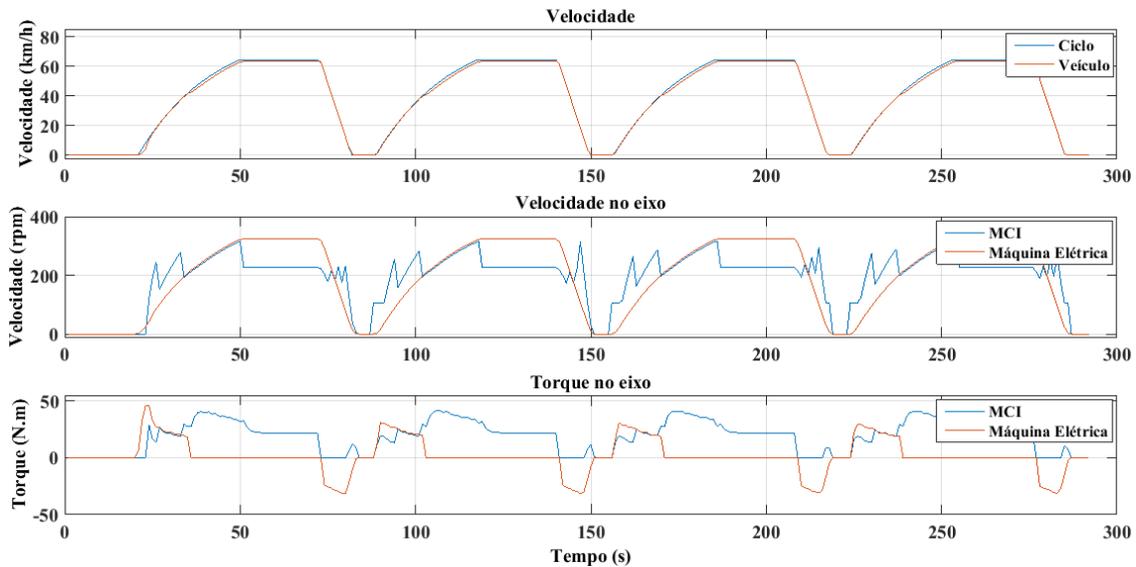


Fonte: Autor.

Neste caso a máquina elétrica desenvolve torque motor para velocidades inferiores a 40 km/h, a partir daí o MCI desenvolve o torque necessário para atender a demanda do ciclo. O torque negativo desenvolvido pela máquina é realizado nos momentos de desaceleração, com o propósito de recuperar energia para o sistema de armazenamento de energia.

Os efeitos das relações de redução da transmissão também podem ser percebidos no perfil de velocidade do MCI. A Figura 5.4-8 ilustra o perfil de velocidade e torque do MCI e da máquina elétrica para um determinado ciclo de condução urbana.

**Figura 5.4-8 – Perfil de velocidade e torque do MCI e da máquina elétrica para um determinado ciclo de condução urbana.**



Fonte: Autor.

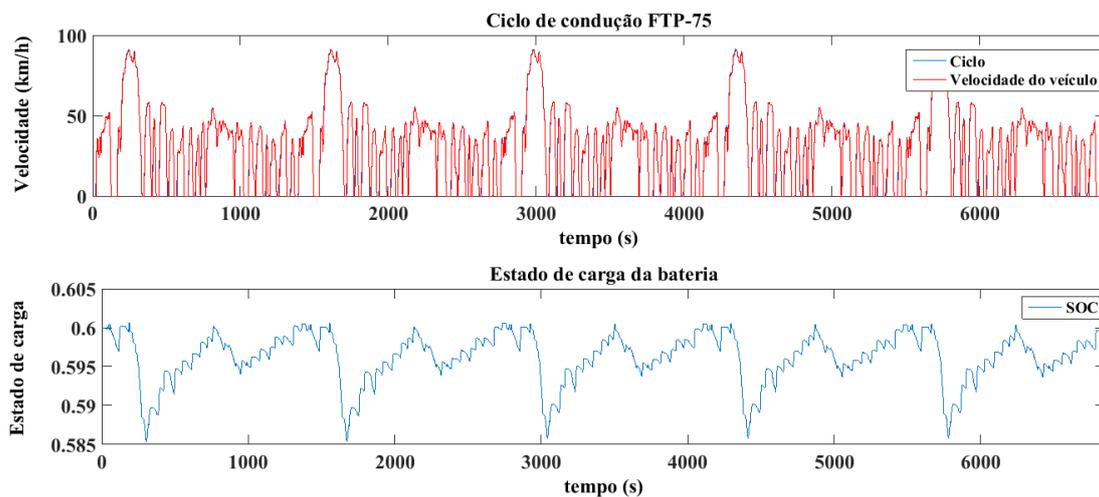
É possível observar que a máquina elétrica gira conforme o ciclo de condução, o que ilustra o desacoplamento mecânico dos eixos de tração. O MCI opera com velocidade em função das marchas engrenadas na transmissão, por isso as cristas no perfil ilustrado em azul. Observa-se ainda que MCI não desenvolve torque negativo, pois esta tarefa é transferida para a máquina elétrica. Na simulação isso acontece devido ao desacoplamento do MCI pelo sistema de embreagem, melhoria que ainda deve ser implementada. Na prática, para este veículo cuja transmissão é manual e o sistema de embreagem é comandado pelo motorista, isso não vai acontecer. Sendo assim, o MCI vai contribuir em partes com a frenagem do veículo.

## 5.5. Análise comparativa dos veículos Convencional e Paralelo-ES

Diante dos modelos dos veículos implementados no ambiente de simulação é possível avaliar comparativamente os efeitos da hibridização paralela de eixos separados. Para fazer esta análise o VEH Paralelo-ES foi simulado no FTP-75 cinco vezes consecutivas com o objetivo de ilustrar a condição de estado de carga sustentado. Esta é uma metodologia utilizada para avaliar o consumo de VEH sem auxílio de recarga externa (N.549, 2012). Neste caso o estado de carga inicial da bateria foi pré-definido em 60%.

A Figura 5.5-1 ilustra o ciclo de condução FTP-75, imposto aos veículos, repetido cinco vezes consecutivas. Também está ilustrado o comportamento do estado de carga da bateria para este ciclo, que se manteve sustentado em torno do valor mínimo estabelecido.

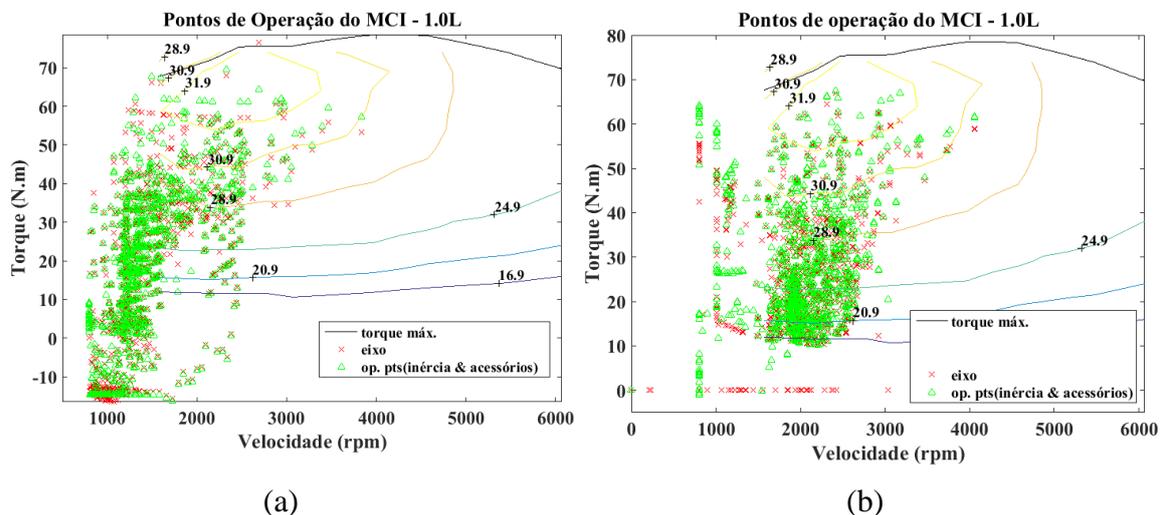
**Figura 5.5-1 – Ciclo FTP-75 repetido cinco vezes e o estado de carga da bateria do VEH Paralelo-ES.**



Fonte: Autor.

A Figura 5.5-2 ilustra os pontos de operação do MCI do veículo convencional (a) e do híbrido Paralelo ES (b) para as condições do ciclo e do estado de carga apresentados. É possível observar que o VEH não operou com torque negativo auxiliando com frenagem, pois esta tarefa agora é transferida para a máquina elétrica. Observa-se também que o MCI praticamente não operou na região de torque entre 0 e 10 N.m, região onde a eficiência é inferior a 16,9%.

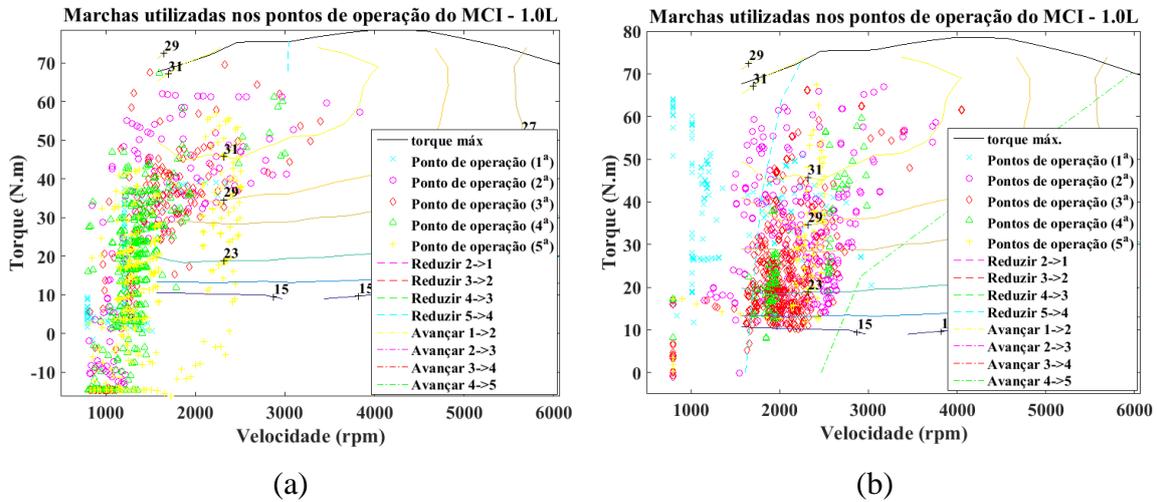
**Figura 5.5-2 – Mapas do MCI com os pontos de operação para o veículo convencional (a), e para o Paralelo-ES (b) – Ciclo FTP-75.**



Fonte: Autor.

A Figura 5.5-3 ilustra as marchas utilizadas nos respectivos pontos de operação para o veículo convencional (a) e para o VEH (b). Observa-se que a concentração dos pontos está em uma região de velocidade superior quando comparado ao veículo convencional.

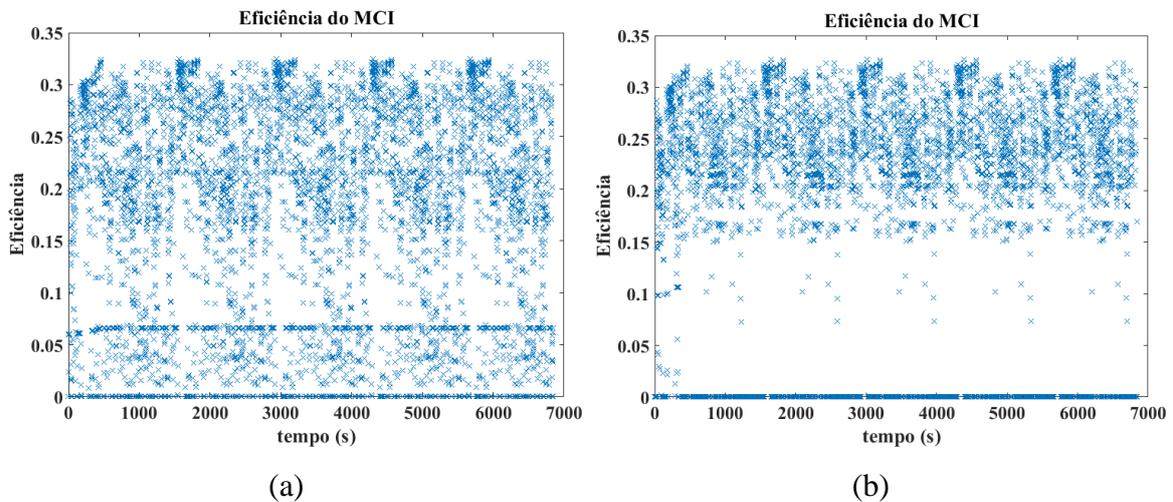
**Figura 5.5-3 – Mapas do MCI com as respectivas marchas nos pontos de operação para o veículo convencional (a), e para o Paralelo-ES (b) – Ciclo FTP-75.**



Fonte: Autor.

A Figura 5.5-4 ilustra os pontos de eficiência do MCI para os dois veículos simulados. É possível observar que o MCI do VEH (b) operou em uma região de maior eficiência. Essa melhora se deve em partes aos 10% de torque adicional demandado ao MCI para recarga da bateria. Como o SOC inicial da bateria já estava próximo do limite mínimo, o MCI auxilia a recarga da bateria.

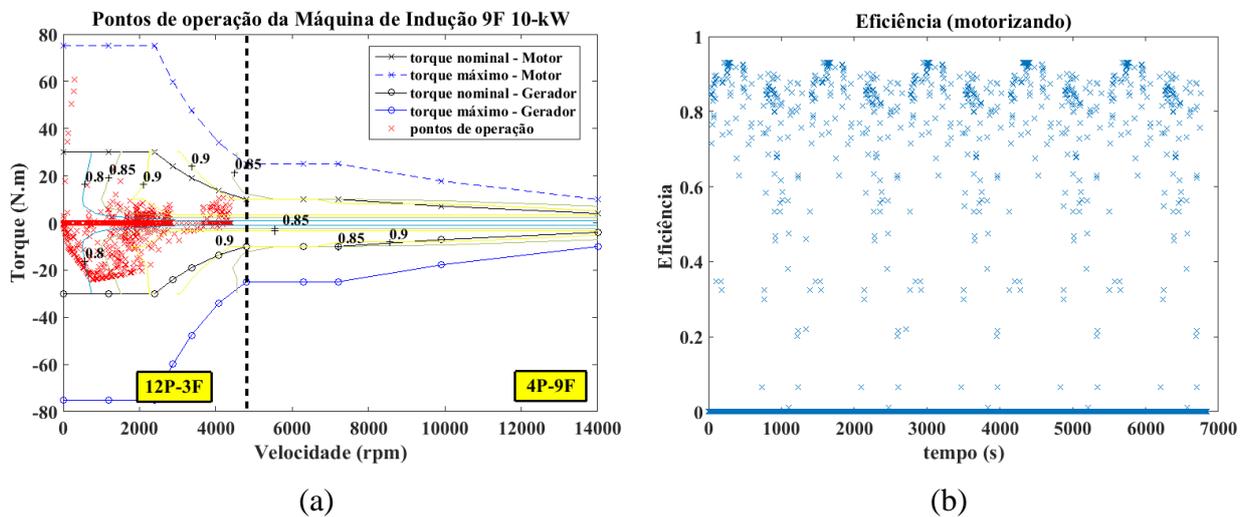
**Figura 5.5-4 – Mapas do MCI com os pontos de eficiência em que o MCI operou no veículo convencional (a), e no Paralelo-ES (b) – Ciclo FTP-75.**



Fonte: Autor.

A Figura 5.5-5 ilustra as curvas de torque da máquina elétrica com os pontos de operação em (a) a eficiência de operação no modo motor em (b). A máquina elétrica opera na maior parte do tempo no quadrante de geração do que de motorização, conforme pode ser observado. Este fato também é justificado pelo SOC inicial da bateria estar muito próximo do limite definido. Observa-se ainda que a máquina praticamente não operou com torque superior ao nominal, pois esbarra no limite de mínimo SOC.

**Figura 5.5-5 – Mapa da máquina elétrica com os pontos de operação (a) e os pontos de eficiência em que operou.**



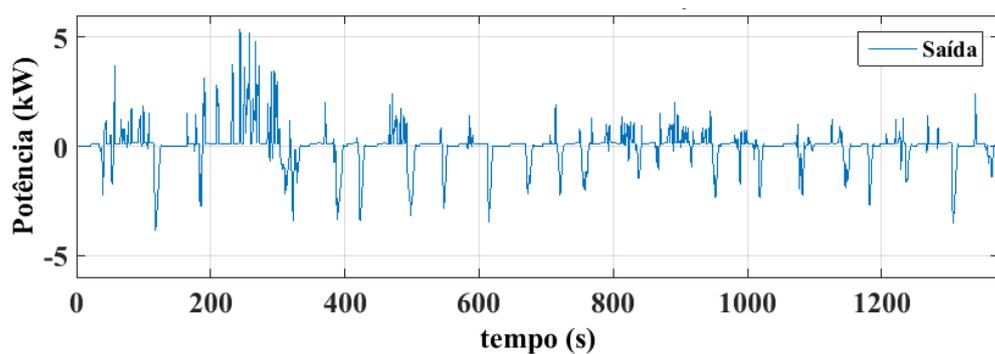
Fonte: Autor.

No modo gerador o torque máximo desenvolvido foi de aproximadamente 25 N.m. Neste modo, a máquina não operou com torque superior ao nominal, porém, essa limitação é imposta pelas taxas de aceleração do ciclo de condução.

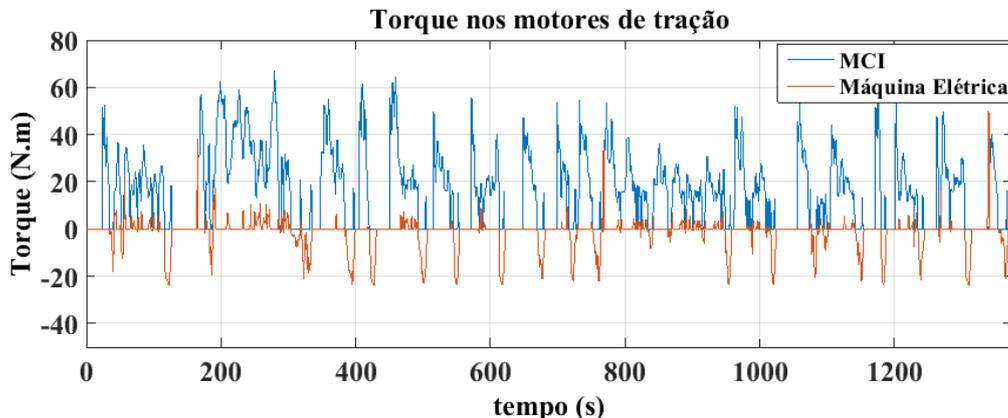
O ciclo de condução também limita a velocidade de operação da máquina. No caso do ciclo FTP-75, a velocidade máxima alcançável pelo veículo é de 91,25 km/h, o que representa uma velocidade de rotação no eixo da máquina de 4413 rpm. Para este ciclo de condução a máquina elétrica não entrou no modo de operação de 9 fases – 4 pólos.

O perfil de potência na bateria, para esta condição de operação, está ilustrado pela Figura 5.5-6. A máxima potência drenada do sistema de armazenamento foi aproximadamente de 5 kW e acontece no instante de tempo de aproximadamente 300 segundos. A figura também ilustra o torque desenvolvido pelo MCI e pela máquina de indução de nove fases em seus eixos de tração.

**Figura 5.5-6 – Potência na bateria do sistema de tração elétrica (a) e Torque nos motores de tração – Ciclo FTP-75.**



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Na Figura 5.5-6 (a) é possível observar que a potência demandada ao sistema de armazenamento de energia foi muito inferior aos 25 kW de capacidade da bateria utilizada. Na Figura 5.5-6 (b) é possível observar que a tração do veículo acontece principalmente pelo MCI. Também fica claro que a máquina elétrica trabalha mais no

modo gerador, recuperando energia por frenagem, do que auxiliando o MCI com tração para o veículo.

A Tabela 5.5-1 ilustra os resultados de eficiência média do MCI, de eficiência total do veículo e do consumo de combustível obtidos para os veículos convencional e híbrido paralelo de eixos separados operando no ciclo FTP-75.

**Tabela 5.5-1 – Eficiência e consumo de combustível dos veículos Convencional e Paralelo-ES simulados no ciclo de condução FTP-75.**

<b>Veículo Simulado</b>	<b>Eficiência média do MCI (%)</b>	<b>Eficiência do Veículo (%)</b>	<b>Consumo E-22 (km/L)</b>
Convencional	17,93	8	15,87
Paralelo-ES	25,63	10,5	20
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>39,43%</b>	<b>31,25%</b>	<b>28,28%</b>

Fonte: Autor.

O híbrido Paralelo ES apresentou uma melhoria significativa na eficiência e no consumo de combustível. A eficiência média do MCI melhorou 39,43% e a eficiência total do veículo melhorou 31,25% quando comparado com o convencional. O ganho em consumo de combustível foi de aproximadamente 28,28%. Para uma rodagem anual média de 15.000 km e o preço médio da gasolina em R\$ 3,68 o ganho em redução de consumo é de 195,17 litros/ano, o que representa uma economia anual de R\$ 718,26.

#### 5.5.1 Emissão de poluentes com o sistema híbrido

É importante ressaltar que outros ganhos também são obtidos com a hibridização do veículo, como por exemplo, redução dos gases poluentes lançados à atmosfera, disponibilidade de tração nas quatro rodas do veículo, no caso da hibridização paralela

de eixos separados, e melhora nos desempenho de aceleração e capacidade de subida. No que diz respeito à emissão de gases poluentes, não foi possível obter os ganhos de redução, pois não se tinha informações técnicas do MCI ensaiado para inserir no modelo simulado. Uma maneira encontrada para avaliar a redução da emissão de poluentes com a hibridização paralela de eixos separados foi utilizar os dados de emissão de um MCI de mesmo porte e com características semelhantes ao proposto por este estudo, disponível no banco de dados do ADVISOR. Simular o veículo convencional e o veículo híbrido Paralelo-ES utilizando esses dados de emissão no ciclo FTP-75 foi possível obter um valor de redução percentual. A Tabela 5.5-2 ilustra esses resultados.

**Tabela 5.5-2 – Emissão de gases poluentes dos veículos simulados no ciclo FTP-75.**

<b>Emissão de gases poluentes (g/km)</b>			
<b>Veículo simulado</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>
Convencional	0,359	1,449	0,231
Híbrido Paralelo-ES	0,331	1,35	0,217
<b>Redução (%)</b>	<b>7,67</b>	<b>6,85</b>	<b>5,96</b>

Fonte: Autor.

Com o veículo hibridizado com arquitetura Paralela-ES, sob as condições de simulação apresentadas, foi possível obter reduções de 7,67% na emissão de hidróxidos de carbono, 6,85% em monóxido de carbono e 5,96% nos gases NOx.

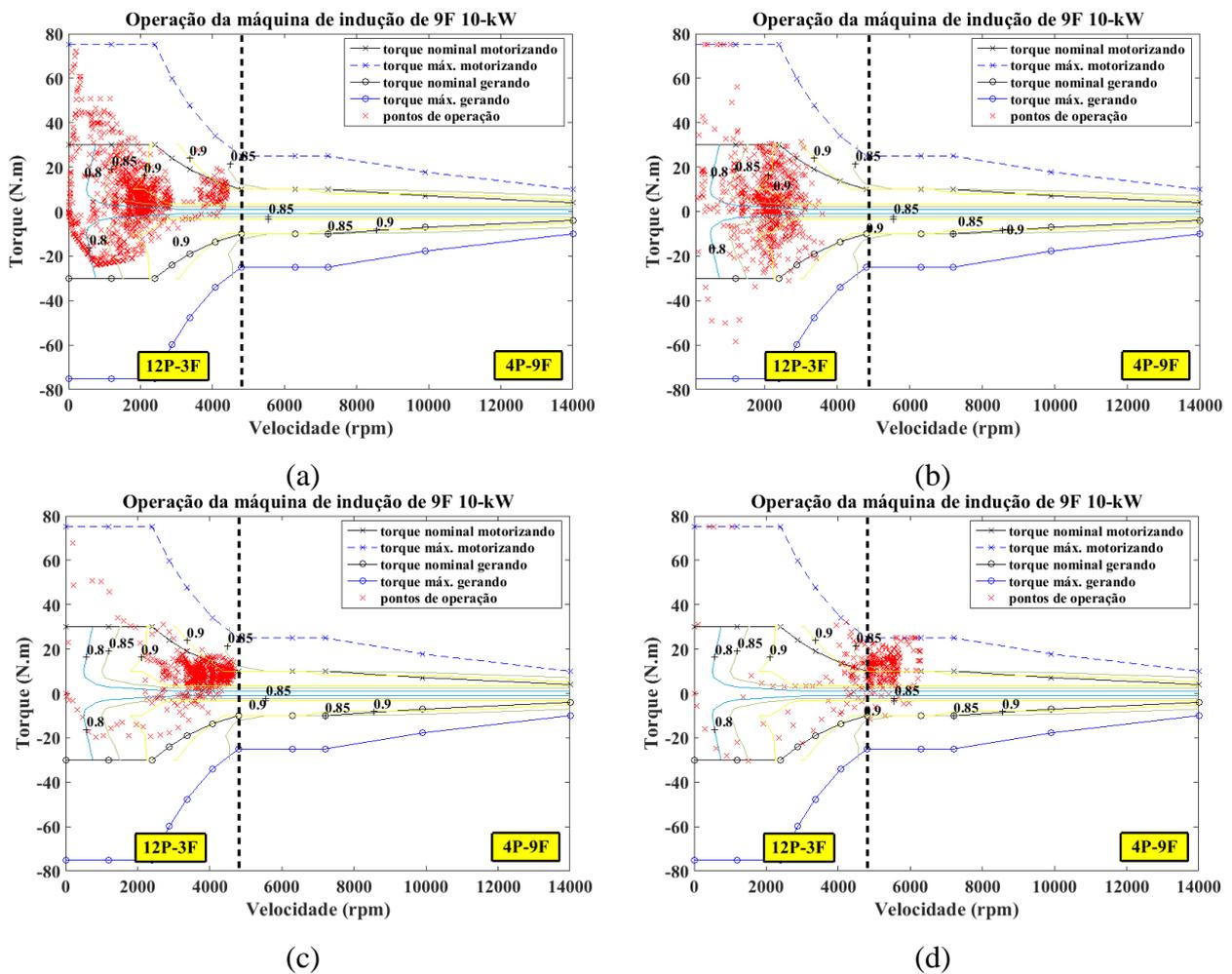
### 5.5.2 Operação da MI9F na arquitetura Paralela-ES

Conforme visto, as limitações do SOC da bateria, as taxas de aceleração e a velocidade imposta ao veículo pelos ciclos definem a operação da máquina. Aumentar a capacidade de recuperação de energia e assim o range do SOC da bateria possibilita aumentar o faixa de operação da máquina elétrica em torque e em velocidade.

Para verificar esse fato, o range de atuação do sistema de tração elétrica, antes limitado a velocidade de 40 km/h do veículo, passou a ser definido em 140 km/h. O SOC inicial foi aumentado para 95% e o limite mínimo definido em 20%.

A Figura 5.5-7 ilustra a operação da máquina de indução de nove fases para diferentes ciclos de condução. A linha tracejada na vertical na divide as regiões de operação nos modos 12Pólos – 3Fases e 4Pólos – 9Fases.

**Figura 5.5-7 – Operação da máquina de indução de 9 fases: (a) FTP-75, (b) Av. Antônio Carlos, (c) HWFET e (d) US06-HWY.**



Fonte: Autor.

Com maior disponibilidade do SOC da bateria, observa-se na Figura 5.5-7 (a) que a máquina operou na região de motorização com torques superiores ao nominal. A operação no quadrante de geração não mudou porque as taxas de aceleração do ciclo FTP-75 impõem essa limitação.

Na Figura 5.5-7 (b) o veículo rodou no ciclo de condução urbano da Av. Antônio Carlos. Como visto anteriormente na subseção 5.1, este ciclo possui taxas de aceleração maiores e considera elevação da pista, fato que exige mais dos veículos. Nesta análise é possível observar que a máquina operou em alguns momentos com o limite de torque máximo no quadrante de motorização e com torque superior ao nominal no quadrante de geração.

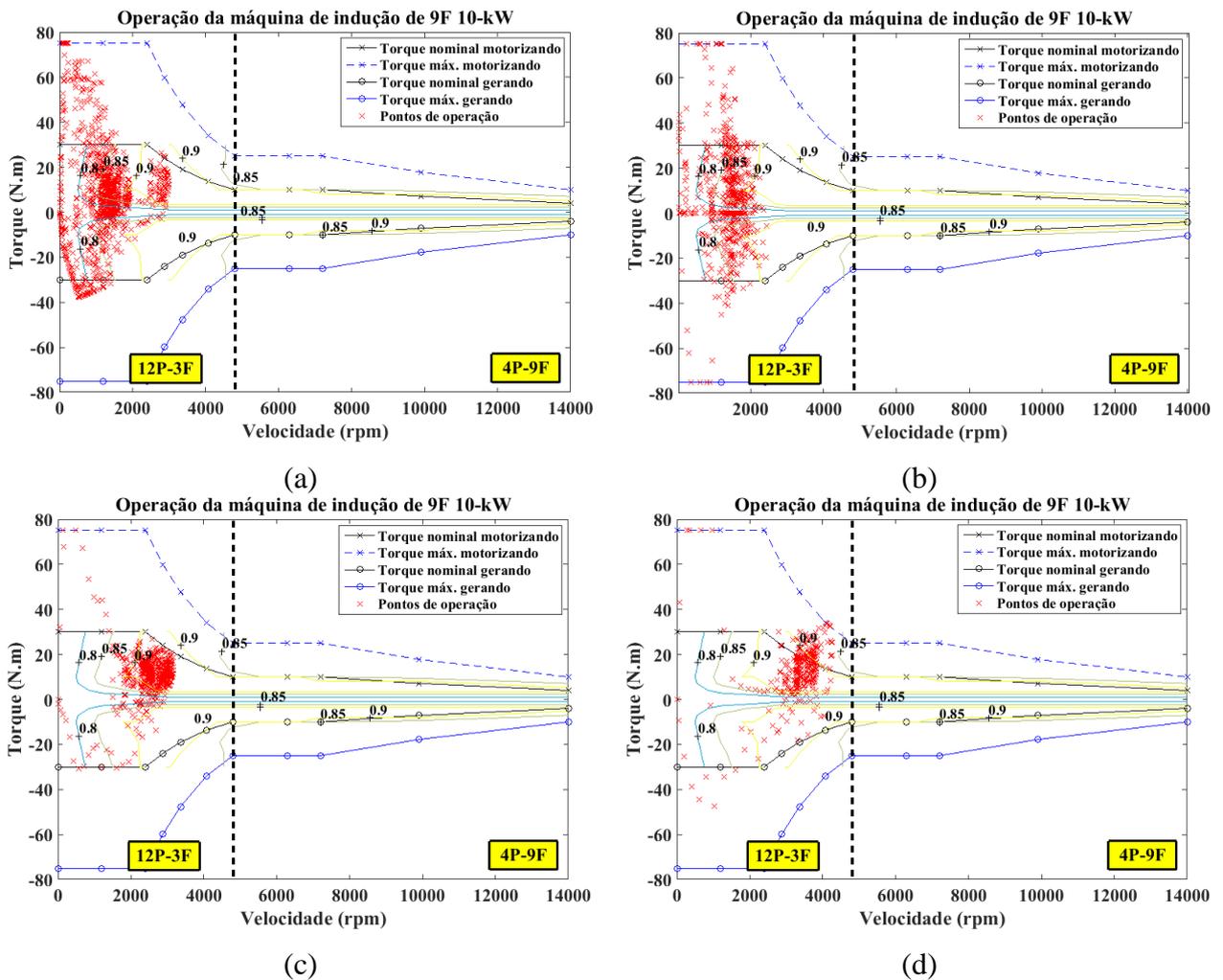
É possível observar que no ciclo de condução urbano real da av. Antônio Carlos, onde as taxas de aceleração são maiores e existe elevação na pista, os pontos de operação da máquina foram equilibrados nos dois quadrantes, diferente do apresentado na Figura 5.5-7 para o FTP-75, onde a máquina opera mais como motor do que como gerador.

Os ciclos utilizados na Figura 5.5-7 (a) e (b) são ciclos urbanos e por este motivo a máquina elétrica operou em velocidades inferiores a 4200 rpm e na região do mapa onde a máquina opera apenas no modo 3 fases 12 pólos.

Tanto nos resultados apresentados pela Figura 5.5-7 (c) quanto em (d) a operação da máquina está sendo avaliada em ciclos de condução rodoviários, no caso o HWFET, já apresentado na subseção 5.1, e o US06-HWY, cujas velocidades impostas ao veículo são superiores as impostas pelo HWFET. É possível observar na Figura 5.5-7 (c), que o ponto de operação da máquina está concentrado próximo de 4200 rpm e que a mesma operou com torque de motorização superior ao nominal. Na Figura 5.5-7 (d), o ciclo US06-HWY impõe ao veículo velocidades que atingem até 129 km/h. É possível observar que a máquina opera na região onde atua no modo 4 Pólos – 9 Fases e com demandas de torque superior ao nominal. Nos ciclos rodoviários pouca ou nenhuma energia é recuperada por frenagem devido ao perfil relativamente constante de velocidade.

Para essas mesmas condições de simulação, utilizando os quatro ciclos de condução apresentados pela Figura 5.5-7, foi considerado agora que a máquina elétrica está conectada diretamente no diferencial do sistema de tração elétrica. Com isso a caixa de redução deste sistema é eliminada e a redução do sistema de transmissão fica exclusivamente definida no diferencial, ou seja, aproximadamente 4 vezes. Fazendo isso o demanda de torque na máquina será maior. Por outro lado a velocidade de rotação da máquina diminui na mesma proporção. A Figura 5.5-8 ilustra os resultados de operação da máquina elétrica com o veículo submetido aos ciclos de condução urbana (a) FTP-75 e (b) Av. Antônio Carlos e os ciclos rodoviários (c) HWFET e (d) US06-HWY.

**Figura 5.5-8 – Operação da máquina de indução de 9 fases - apenas diferencial mecânico: (a) FTP-75, (b) Av. Antônio Carlos, (c) HWFET e (d) US06-HWY.**



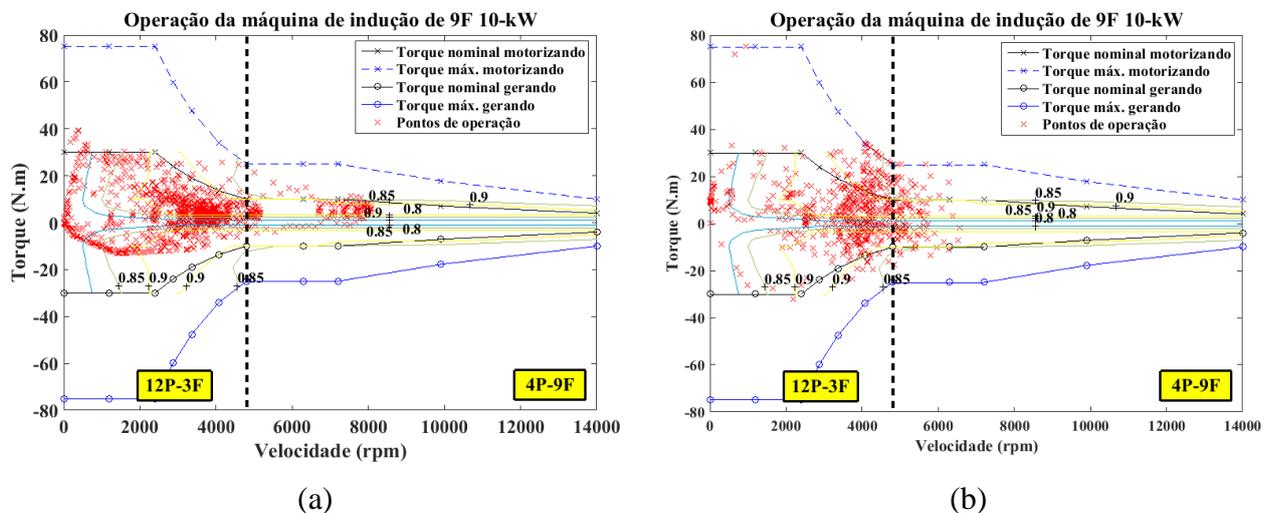
Fonte: Autor.

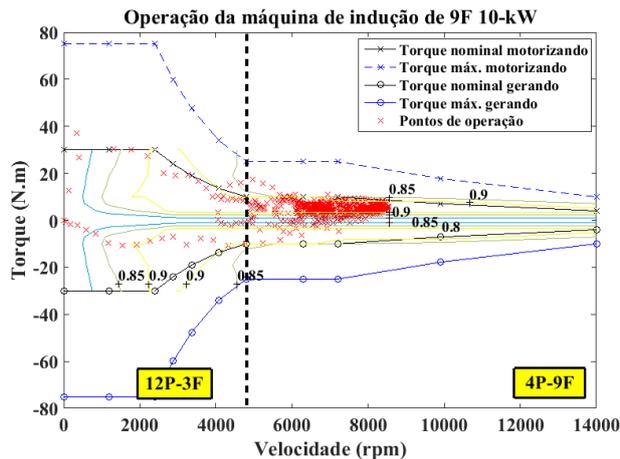
Conforme esperado, reduzir a relação de redução do sistema de tração elétrica fez com que a demanda de torque no eixo da máquina elétrica fosse maior. É possível observar nos ciclos FTP-75 e da Av. Antônio Carlos, ilustrados pela Figura 5.5-8 (a) e (b), que a máquina desenvolve torque superior ao nominal nos dois quadrantes de operação, tanto no modo motor como no modo gerador.

Nos ciclos de condução rodoviários, as demandas de torque praticamente não mudaram em relação ao apresentado anteriormente pela Figura 5.5-7. A mudança mais significativa foi o deslocamento dos pontos de operação para regiões de rotação mais baixa, restringindo a operação no modo 12Pólos – 3Fases.

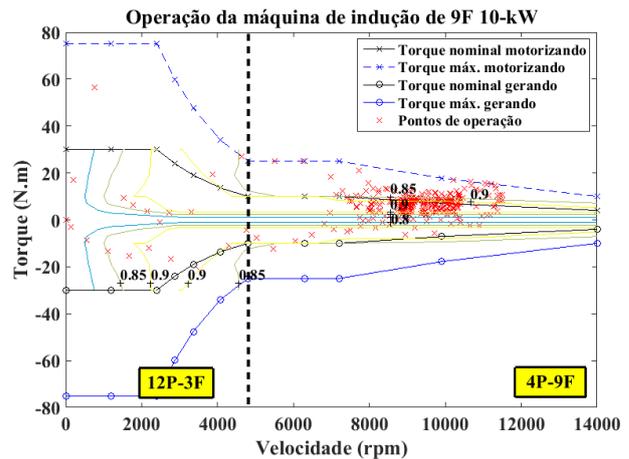
Para que a máquina opere em todas as faixas de velocidade, ou seja, até aproximadamente 14.000 rpm, faz se necessário aumentar a relação de redução do sistema de transmissão da tração elétrica. Para avaliar este cenário a relação de redução foi modificada para que a máxima velocidade alcançável pelo veículo representasse a máxima velocidade de rotação da máquina elétrica, ou seja, um ganho de aproximadamente onze vezes. As mesmas condições de simulação aplicadas nessa subseção também são utilizadas aqui. A Figura 5.5-9 ilustra os resultados de operação desta máquina elétrica para os quatro ciclos de condução utilizados.

**Figura 5.5-9 – Operação da máquina de indução de 9 fases com redução de onze vezes: (a) FTP-75, (b) Av. Antônio Carlos, (c) HWFET e (d) US06-HWY.**





(c)



(d)

Fonte: Autor.

É possível observar que a máquina operou desenvolvendo torque nos dois modos de operação, 12P-3F e no 4P-9F, mesmo quando o veículo rodava em ciclo de condução urbana. Neste caso a demanda de torque extra foi mais utilizada no ciclo de condução da Av. Antônio Carlos. Vale lembrar que a máquina desenvolveu torque operando no modo 4P-9F porque a faixa de atuação do sistema de tração elétrica, antes limitado à velocidade de 40 km/h do veículo, passou a ser definido em 140 km/h.

## 5.6. Análise comparativa dos veículos Paralelo-ES e Paralelo-SA

Assim como a arquitetura paralela de eixos separados, a paralela de assistência possui sistema de tração elétrica com menor grau de liberdade do que na arquitetura paralela convencional. Com a finalidade de entender melhor o sistema híbrido proposto por este trabalho, foi realizada também uma simulação com essa outra variação da arquitetura paralela.

Conforme apresentado no capítulo 3, na arquitetura Paralelo-SA a máquina elétrica está acoplada ao MCI no eixo dianteiro do veículo, e juntos isolados do sistema de

transmissão pela embreagem. Esse acoplamento mecânico e a disposição do sistema no eixo dianteiro favorecem a recuperação de energia na frenagem e também por meio do MCI. Esse arranjo também possibilita o uso da máquina elétrica como motor de partida do MCI, fazendo a função *start/stop*.

Para aproximar a comparação entre as duas arquiteturas, a simulação com o veículo modificado para a arquitetura Paralela-SA considera as mesmas condições de SOC inicial da bateria, 60%, o mesmo ciclo de condução, FTP-75, e limitação da demanda de carga requerida ao MCI para auxílio de recarga da bateria, 10%.

A Tabela 5.6-1 apresenta os seguintes resultados: eficiência média do MCI, a eficiência total do veículo e o consumo de combustível, que foram obtidos sob as condições estabelecidas para a simulação.

**Tabela 5.6-1 – Eficiência e consumo de combustível dos veículos Paralelo-SA e Paralelo-ES simulados no ciclo de condução FTP-75 – Limite de 10% de torque do MCI para recuperação.**

<b>Veículo Simulado</b>	<b>Eficiência média do MCI (%)</b>	<b>Eficiência do Veículo (%)</b>	<b>Consumo E-22 (km/L)</b>
Paralelo-AS	28,08	10,2	19,6
Paralelo-ES	25,63	10,5	20
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>8,72%</b>	<b>2,94%</b>	<b>2,04%</b>

Fonte: Autor.

Observa-se que os resultados obtidos entre as duas arquiteturas são relativamente próximos. Porém a arquitetura Paralela-SA é mais eficiente na recuperação de energia por auxílio do MCI e por frenagem. É possível melhorar a redução de consumo de combustível permitindo uma demanda de carga de até 25% adicional de torque ao MCI para recarga. A Tabela 5.6-2 apresenta os resultados obtidos para a nova simulação

considerando esse limite superior de demanda de torque ao MCI, apenas para o Paralelo-SA.

**Tabela 5.6-2 – Eficiência e consumo de combustível dos veículos Paralelo-SA e Paralelo-ES simulados no ciclo de condução FTP-75 - Limite de 25% de torque do MCI para recuperação (Apenas para o Paralelo-SA).**

<b>Veículo Simulado</b>	<b>Eficiência média do MCI (%)</b>	<b>Eficiência do Veículo (%)</b>	<b>Consumo E-22 (km/L)</b>
Paralelo-SA	27,97	12,2	23,28
Paralelo-ES	25,63	10,5	20
<b>Porcentagem (%)</b>	<b>8,36%</b>	<b>13,93%</b>	<b>14,08%</b>

Fonte: Autor.

Observa-se que o ganho em redução de consumo foi aproximadamente 14% superior, com melhoria também na eficiência total do veículo, 13,98%.

## **Conclusões**

O resultado comparativo do teste de desempenho do veículo convencional simulado e o experimental obtido foi bastante aproximado, considerado bom e o suficiente para validação do modelo implementado no ADVISOR. O resultado de consumo de combustível do veículo convencional nos testes experimental e simulado apresentou uma diferença, mas para fins de comparação entre o convencional e híbrido paralelo de eixos separados simulados, é considerado um resultado satisfatório.

Os ciclos de condução urbana e rodoviária definidos pela ABNT ilustram um perfil de condução imposta aos veículos para certificação do consumo e emissão dos veículos.

Nestes ciclos é considerado que a pista é plana, porém em condições reais de utilização do veículo a influência da elevação de pista e do trânsito afeta de forma significativa o consumo de combustível. A simulação com o veículo convencional nos ciclos ABNT e no ciclo de condução medido na Av. Presidente Antônio Carlos ilustrou isso.

As modificações realizadas no ADVISOR, com a finalidade de inserir a arquitetura híbrida paralela de eixos separados, foram realizadas a partir da arquitetura paralela padrão já existente no *software*. Os resultados mostraram o desacoplamento mecânico entre os dois sistemas de tração e as características de operação dos motores de tração, o MCI e a máquina de indução de nove fases.

Os resultados obtidos com o VEH Paralelo-ES ilustra o potencial de redução de consumo de combustível em relação ao veículo convencional. Diante da limitação de recuperação imposta pela arquitetura, foi possível utilizar o MCI como fonte de recarga auxiliar para as baterias. Ainda assim a máquina elétrica operou mais no modo gerador que no modo de motorização. Foi possível constatar também, a capacidade de redução de emissão de poluentes utilizando dados de emissão de um MCI de mesmo porte.

A capacidade reduzida de recuperação por frenagem limita a utilização da propulsão elétrica do sistema, assim como as taxas de desaceleração impostas pelo ciclo. O perfil de velocidade dos ciclos também irá definir a velocidade de rotação da máquina, que no caso do FTP-75, acabou restringindo a operação da máquina de nove fases no modo 12 Pólos – 3 Fases. As demandas de torque ficaram restritas ao limite de torque nominal.

Modificar a relação de redução do sistema de transmissão elétrica faz com que a máquina opere no modo 4P-9F, porém a máquina só desenvolve torque nessa região se a faixa de operação do sistema de tração elétrica for estendida para toda a faixa de velocidade desenvolvida pelo veículo. A capacidade de recuperação de energia é um fator que limita a utilização desta máquina em todas as faixas de velocidade do veículo. O conjunto da transmissão do sistema de tração elétrica com redução de 11 vezes faz com que a máquina opere no modo 4P-9F, porém, do ponto de vista prático se torna inviável devido a alta velocidade de rotação, disponibilizando 14.000 rpm no eixo de entrada.

Sob todas as condições definidas para simulação do Paralelo-ES, com as limitações impostas, foi possível obter uma redução de consumo considerável.

Conforme apresentado, aumentar a capacidade de recuperação de energia pode proporcionar maior disponibilidade da tração elétrica, demanda torque extra ao nominal desta máquina elétrica avaliada e amplia o modo de tração 4x4 em toda a faixa de operação de velocidade do veículo.

A comparação realizada com o veículo convencional hibridizado pela arquitetura Paralela-ES e pela arquitetura Paralela-SA, mostra que o híbrido SA é mais eficiente no que diz respeito à recuperação de energia, pois a conexão entre os motores de tração é feita mecanicamente e ambos estão no eixo dianteiro do veículo. Porém, quando foi imposta ao Paralelo-SA a limitação do Paralelo-ES de 10% do torque de carga ao MCI para auxílio de recarga das baterias, os resultados obtidos ficam próximos.

## CAPÍTULO 6 – Conclusões

A preocupação global com os níveis de emissão de poluentes lançados à atmosfera tem feito com que os países definam metas para redução. Os veículos elétricos híbridos são uma opção potencial para redução do consumo e da dependência de combustível fóssil na mobilidade, além dos benefícios de redução de emissão de gases poluentes lançados à atmosfera e pelos custos e danos causados à saúde da população dos grandes centros urbanos.

Não existe um padrão bem definido de qual a melhor tecnologia híbrida para cada aplicação e os custos da tecnologia eleva o preço dos veículos híbridos em relação aos veículos convencionais. O governo tem papel importante na criação de projetos de lei que incentivam a população e a iniciativa privada a desenvolver projetos, pesquisa e o uso destes modelos de veículos. As medidas de incentivo implantadas pelo governo para o mercado nacional ainda são tímidas se comparadas aos grandes países do mundo, mas passos importantes foram dados e projetos importantes estão em fases de discussão no Senado Federal.

A proposta de hibridizar um veículo popular compacto de baixa cilindrada do mercado nacional sem que grandes modificações mecânicas sejam necessárias é algo interessante que motiva o estudo. A característica do veículo convencional utilizado como objeto de estudo desta dissertação já apresenta limitação para transformá-lo em um híbrido. O custo final do veículo para o cliente deve continuar baixo, pois estes modelos são veículos de entrada das montadoras. Estudos mais completos devem ser realizados, mas a arquitetura Paralela-ES possibilita hibridizar o veículo sem que grandes modificações sejam necessárias, agregando diversas vantagens aos veículos. Foi visto que mesmo diante das limitações de recuperação de energia do sistema de tração, os ganhos obtidos

com redução de consumo de combustível e de emissão são atraentes. O desempenho do híbrido Paralelo-ES proposto ainda pode ser melhorado aumentando a capacidade de recuperação de energia. Estudos de continuidade a este trabalho devem ser realizados para tal.

Como visto, os ciclos de condução definem as características de operação do sistema de tração elétrica, principalmente pela capacidade limitada de recuperação de energia por frenagem. No caso da máquina de assíncrona de indução de nove fases, a operação ficou restrita ao modo de operação 12 Pólos – 3 Fases. Esta limitação também restringiu a disponibilidade de utilização do torque extra desta máquina, isso porque as relações de redução foram definidas conforme a máxima alcançável pelo veículo e a velocidade base da máquina no modo 4 Pólos – 9 Fases. Se a caixa de redução da transmissão fosse retirada e essa máquina fosse acoplada diretamente ao diferencial, o torque demandado da máquina atingiria a disponibilidade extra. Fazer isso trás o benefício de reduzir um componente do sistema de tração elétrica, mas com isso, a redução do sistema será de aproximadamente 4 vezes ao diferencial, mas ainda assim a máquina estaria com a operação restrita ao modo 12 Pólos – 3 Fases. Aumentar a relação de redução faz com que essa máquina elétrica opere em ciclos urbanos no modo 4 Pólos – 9 Fases, mas a limitação de recuperação de energia acaba limitando o uso nessa região.

A máquina elétrica utilizada neste trabalho foi projetada para outra aplicação, onde operar com frequência nominal de 240 Hz e com alta velocidade de rotação é necessário. Esta característica é bastante apropriada para a arquitetura Paralela-SA, onde a máquina é acoplada diretamente ao MCI. Para os VE, esta característica é ainda mais interessante, assim como a possibilidade de mudança eletrônica do número de pólos da máquina. Porém, na arquitetura Paralela-ES, a máquina não operou no modo 4P-9F, e por este motivo, pode ser considerado ainda, o projeto da máquina para operar em frequências menores, como por exemplo, 120 Hz, ao custo de aumentar o volume da máquina por utilizar frequências menores.

## 6.1. Trabalhos Futuros

Diante dos resultados obtidos com o modelo desenvolvido no ambiente de simulação do ADVISOR é possível analisar os veículos convencionais e os VEHs. No entanto, outras estratégias de gestão do sistema híbrido podem melhorar os resultados para a arquitetura Paralela-ES. Para continuidade do trabalho, são sugeridos também outros aspectos para investigação:

- Realizar simulação de desempenho no ADVISOR com o veículo hibridizado pela arquitetura Paralela-ES em relação ao veículo convencional para avaliar melhoria nos testes de aceleração;
- Realizar modificação da estratégia de acionamento do sistema de embreagem no ADVISOR para melhorar a representação do veículo real hibridizado;
- Utilizar o recurso disponível de Co-Simulação entre o ADVISOR e outros softwares, como por exemplo, o SABER e o SIMPLORER, com a finalidade de avaliar com mais detalhes os componentes do sistema de tração elétrica e do conjunto híbrido;
- Realizar um estudo econômico para implantar a hibridização Paralela-ES do veículo convencional;
- Avaliar modificações mecânicas necessárias ao eixo traseiro do veículo convencional;
- Avaliar a possibilidade de inserir um sistema start/stop no veículo hibridizado pela arquitetura Paralela-ES. Este é um ponto interessante que pode contribuir para obter resultados melhores;
- Especificação dos componentes do sistema de tração elétrica necessários para hibridização Paralela-ES.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, R. H. P. **Terras Raras**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. MS, p. 2. 2014.

AUTOMOTIVE Business, 30 maio 2016. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/24025/grupo-psa-promete-quatro-carros-eletricos-ate-2021>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

AUTOMOTIVE Business, 14 mar. 2016. Disponível em: <<http://automotivebusiness.com.br/noticia/23605/brasil%ADe%ADalemanha%ADfirmam%ADacordo%ADpor%ADcarro%ADeletrico2/5>>. Acesso em: 27 maio 2016.

BASTOS, R. **Estudo de uma máquina de indução de nove fases**. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte - MG, p. 142. 2015.

BASTOS, R. R. et al. Modelagem de uma máquina de indução de nove fases. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática - CBA**, Belo Horizonte - MG, 20 a 24 Setembro 2014.

BRAVO, D. M.; MEIRELLES, P. S.; GIALONARDO, W. Análise dos desafios para a difusão dos veículos elétricos e híbridos no Brasil. **XXII Seminário Internacional de Engenharia Automotiva**, 1, set. 2014.

CARRO Barato, 08 fev. 2016. Disponível em: <<http://www.carrobarato.org/2016/05/14/japao-pontos-para-recarga-eletrica-ja-ultrapassam-postos-de-combustivel/>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

CARROS Uol. **Uol**, 27 out. 2015. Disponível em: <<http://carros.uol.com.br/noticias/redacao/2015/10/27/carro-eletrico-se-livra-do-imposto-de-importacao-a-partir-desta-terca.htm>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

CASTRO, B. H. R.; BARROS, ; VEIGA, S. G. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES**, mar. 2013. 54.

CASTRO, B. H. R.; BARROS, D. C.; VAZ, L. F. H. Veículos Híbridos e Elétricos: Sugestões de Políticas Públicas para o Segmento. **Biblioteca Digital BNDES - Setorial 41**, mar. 2015. 295-344.

CASTRO, B. H. R.; FERREIRA, T. T. Veículos Elétricos: Aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **Biblioteca digital do BNDES, setorial 32**, 2010. 267-310.

EERE. **Vehicle Buyer's Guide: Clean Cities**. U.S. Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy. [S.l.], p. 30. 2010.

EHSANI, M. G.; EMADI, A. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. 2nd. ed. [S.l.]: CRC Press, 2010.

FALLAHI, N.; NIASAR, A. H. Intelligent Energy Management Strategy for a Separated-Axle Parallel Hybrid Electric Vehicle. **Intelligence Systems in Electrical Engineering**, Winter 2014. 12.

FAPESP, 21 out. 2013. Disponível em:

<[http://agencia.fapesp.br/centro\\_de\\_pesquisas\\_em\\_engenharia\\_planeja\\_desenvolver\\_motor\\_a\\_etanol\\_com\\_melhor\\_desempenho/18076/](http://agencia.fapesp.br/centro_de_pesquisas_em_engenharia_planeja_desenvolver_motor_a_etanol_com_melhor_desempenho/18076/)>. Acesso em: 12 fev. 2016.

IEA. **International Energy Agency - Transport, Energy and CO2**. IEA/OECD., 2009. Disponível em:

<<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2015.

IEA. **Technology Roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles**.

International Energy Agency - IEA. [S.l.], p. 52. 2011.

INMETRO. **Tabelas de Consumo/Eficiência Energética de Veículos Automotores Leves**. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO. [S.l.], p. 32. 2015.

INOVARAUTO. [http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/login.jspx?\\_adf.ctrl-state=1cb7m8fzзу\\_9](http://inovarauto.mdic.gov.br/InovarAuto/public/login.jspx?_adf.ctrl-state=1cb7m8fzзу_9). **inovarauto.mdic.gov.br**, 2017. Acesso em: 25 Janeiro 2017.

JENE, H.; SCHEID, E.; KEMPE, H. Hybrid Electric Vehicle (HEV) Concepts - Fuel Savings and Costs. **International Conference on Automotive Technologies**, 2009.

KARDEN. Requirements for future automotive batteries - a snapshot. **Jornal of Power Sources**, p. 505-512, 2005.

KELLY, J. W.; STRANGAS, E. G.; MILLER, J. M. Control of a Continuously Operated Pole-Changing Induction Machine. **IEEE**, 2003.

KELLY, J. W.; STRANGAS, E. G. Torque Control during Pole-Changing Transition of 3:1 Pole Induction Machine. **Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems**, Seoul, Korea, 8 - 11 October 2007.

LARMINIER, J.; LOWRE, J. **Electric Vehicle Technology Explained**. [S.l.]: Jhon Wiley & Sons, Ltd., 2003.

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

MOURA S.A. Apresentação disponibilizada para os participantes do evento.

**Apresentação realizada no 12 Salão Latino Americano de Veículo Elétrico**, 2016. Acesso em: 2 e 3 Setembro 2016.

N.549, A. À. P. **Medição de Emissão e Consumo em Veículos Elétricos Híbridos Leves**. [S.l.], p. 53. 2012. Disponível em: [http://docplayer.com.br/4118277-Figura-1-quantidades-de-energia-antes-e-depois-do-ensaio-1-escopo.html#show\\_full\\_text](http://docplayer.com.br/4118277-Figura-1-quantidades-de-energia-antes-e-depois-do-ensaio-1-escopo.html#show_full_text).

OSAMA, ; LIPO,. Modeling and Analysis of a Wide-Speed-Range Induction Motor Drive Based on Electronic Pole Changing. **IEEE Transactions on Industry Applications**, September/October 1997.

PLANETCARZ , 06 abr. 2016. Disponível em:  
<<http://planetcarsz.com/artigo/hyundai-kia-lancara-26-modelos-eletrificados-ate-2020>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

SENADO Federal, 01 jun. 2016. Disponível em:  
<<http://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/118247>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

SENADO Federal, 10 maio 2016. Disponível em:  
<<http://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/124442>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

SHEN, C.; SHAN, P.; GAO, T. A. Comprehensive Overview of Hybrid Electric Vehicles. **International Journal of Vehicular Technology**., 2011. 7.

SILVA, R. Á.; PIRES, I. A. Aspectos Tecnológicos e Oportunidades para Veículos Elétricos e Híbridos no Mercado Nacional. **XII Salão Latino Americano de Veículos Elétricos**, São Paulo, 2 e 3 Setembro 2016.

WEG. **WEG**, 18 maio 2016. Disponível em:  
<<http://static.weg.net/medias/downloadcenter/h16/h01/WEG-w22-magnet-drive-system-50015189-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2016.

YANG, Z. et al. Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, October 2015. 10.

ZERAOULIA, M.; BENBOUZID, M. E. H.; DIALLO, D. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A comparative study. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 6 November 2006.

ZHU, Z. Q.; HOWE, D. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles. **Proceedings of the IEEE**, 04 April 2007.

ZULKIFLI, S. A. et al. Development of a Retrofit Split-Axle Parallel Hybrid Electric Vehicle with In-Wheel Motors. **4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems - ICIAS**, 2012. 6.

## ANEXO A – Considerações utilizadas nas simulações

### A. Lista de considerados utilizados nas simulações

Este anexo tem o objetivo de deixar mais claro para os leitores as considerações utilizadas para implementar o modelo de simulação dos veículos no *software* ADVISOR, bem como apresentar dados importantes que não foram descrito no decorrer dos capítulos desta dissertação.

Para gerar os mapas de consumo, eficiência e emissão do Motor de Combustão Interna (MCI), foi utilizado a ferramenta auxiliar do ADVISOR, o “*Engmodel*”, no qual está detalhado no Anexo B.

Na Tabela A-1 estão apresentadas as considerações de algumas variáveis necessárias para gerar os mapas do MCI, necessários para representá-los no ADVISOR.

**Tabela A-1 – Considerações utilizadas para o MCI e para o Combustível utilizado.**

<b>Motor de Combustão Interna - MCI</b>		
Temperatura fria	25	°C
Inércia rotacional	0,1	Kg.m <sup>2</sup>
<b>Combustível E-22</b>		
Densidade	749	g/l
Poder calorífico inferior	42600	J/g

Fonte: Autor.

A forma de representar os componentes que compõe os veículos é individual e organizado conforme sua arquitetura. Sendo assim o peso do veículo é quantificado pelo peso dos seus componentes. A Tabela A-2 ilustra algumas considerações de perda,

inércia e peso dos componentes do sistema de transmissão do veículo utilizado como base neste estudo. É importante ressaltar que estes valores de peso foram estimados e por isso não são dados exatos.

**Tabela A-2 – Considerações utilizadas para as transmissões dos sistemas de tração.**

<b>Transmissão</b>		
Peso da caixa de marcha	40	Kg
Inercia da caixa	0	Kg.m <sup>2</sup>
Peso do diferencial	25	Kg
Inercia do diferencial	0	Kg.m <sup>2</sup>
Perda de torque no diferencial	0	N.m

Fonte: Autor.

Com a hibridização Paralela de Eixos Separados, Paralela-ES, os novos componentes do sistema de tração elétrica embarcado no eixo traseiro agregam um aumento de massa de aproximadamente 123 Kg ao veículo. O valor de massa considerado para os componentes está apresentado abaixo pela Tabela A-3. O peso da bateria do sistema de propulsão foi definido conforme o modelo de bateria disponível no banco de dados do ADVISOR. Os demais valores foram estimados.

**Tabela A-3 – Peso adicionado ao veículo devido ao sistema de tração elétrico.**

<b>Peso adicionado ao veículo</b>		
Caixa de redução	20	Kg
Diferencial	25	Kg
Máquina de indução	50	Kg
Bateria de íon-lítio	28	Kg
<b>TOTAL</b>	<b>123</b>	<b>Kg</b>

Fonte: Autor.

O ADVISOR é uma ferramenta muito completa e está detalhada no Anexo B. Devido a este fator e a indisponibilidade de ferramentas de laboratório capazes de realizar levantamento mais profundo impossibilitou que algumas variáveis utilizadas pelo

ADVISOR para melhorar a representação dos veículos não fossem obtidas. Por este motivo, o modelo do veículo utilizado nesta dissertação foi escrito sobre o modelo de um automóvel de mesmo porte e com características semelhantes, disponível no banco de dados do *software*. A Tabela A-4 apresenta esses arquivos utilizados como base para criar os modelos utilizados neste trabalho.

**Tabela A-4 – Descrição dos arquivos utilizados como base para implementar os modelos do veículo deste trabalho.**

<b>Arquivos do veículo SMALLCAR – Banco de dados do ADVISOR</b>	
<b>Descrição do arquivo “.m” do componente</b>	<b>Nome</b>
Modelo do veículo	VEH_SMCAR.m
Modelo de rodas e eixo do veículo	WH_SMCAR.m
Modelo do Motor de combustão interna	FC_SI41_emis.m
Modelo do escapamento	EX_SI.m
Modelo da transmissão manual de 5 velocidades	TX_5SPD.m
Modelo de uma máquina de indução 75 kW	MC_AC75.m
Modelo do sistema de armazenamento de energia	ESS_LI7_temp.m

Fonte: Autor.

O modelo do sistema de exaustão *default* do arquivo “EX\_SI.m” foi inteiro utilizado no modelo do veículo nacional implemento nesta dissertação.

As simulações realizadas neste trabalho com o auxílio do ADVISOR levam em conta algumas considerações importantes, que na prática não acontece. A Tabela A-5 apresenta os valores utilizados para as constantes físicas.

**Tabela A-5 – Considerações utilizadas para constantes físicas.**

<b>Constantes físicas</b>		
Gravidade (constante)	9,81	m/s <sup>2</sup>
Densidade do ar (constante)	1,2	Kg/m <sup>3</sup>
Temperatura ambiente (constante)	25	°C

Fonte: Autor.

É considerado que a temperatura ambiente, a densidade do ar e a gravidade não variam no decorrer da simulação. Neste modelo de simulação do software considera-se também que o veículo trafega em uma pista reta, ou seja, apesar de considerar a elevação no trajeto, as curvas não existem.

## ANEXO B – *Software* de simulação ADVISOR

### B. Tutorial básico para inicialização do *software*

O ADVISOR é um *software* de simulação de veículos, desenvolvido sobre o ambiente MATLAB/Simulink, pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (*NREL – National Renewable Energy Laboratory*) dos Estados Unidos. O foco principal do ADVISOR é a simulação de veículos elétricos (VE), híbridos (VEH) e os movidos a hidrogênio, de forma a permitir análises, validação de testes experimentais e comparações destes veículos, principalmente em relação ao automóvel convencional. É possível também avaliar o efeito de alguns componentes, tais como bateria e sistema de armazenamento de energia, motor de combustão interna ou sistema de controle, sobre a eficiência do conjunto ou sobre as emissões de poluentes.

Este simulador conta com um banco de dados que inclui arquiteturas dos veículos elétricos, híbridos (com exceção de algumas variantes como, por exemplo, a que foi desenvolvida por este trabalho, a paralela de eixos separados), mapas de eficiência dos MCI, ciclos urbanos e rodoviários e outros parâmetros de modelagem veicular.

Este *software* foi descontinuado em 2003, mas ainda está disponível grátis para download e ainda hoje é muito utilizado para pesquisas e estudos relacionados à área dos veículos elétricos e híbridos.

A Figura B-1 ilustra a janela de inicialização do software, após realizar o comando de inicialização. Esse comando é feito simplesmente digitando *advisor* no *workspace* do Matlab.

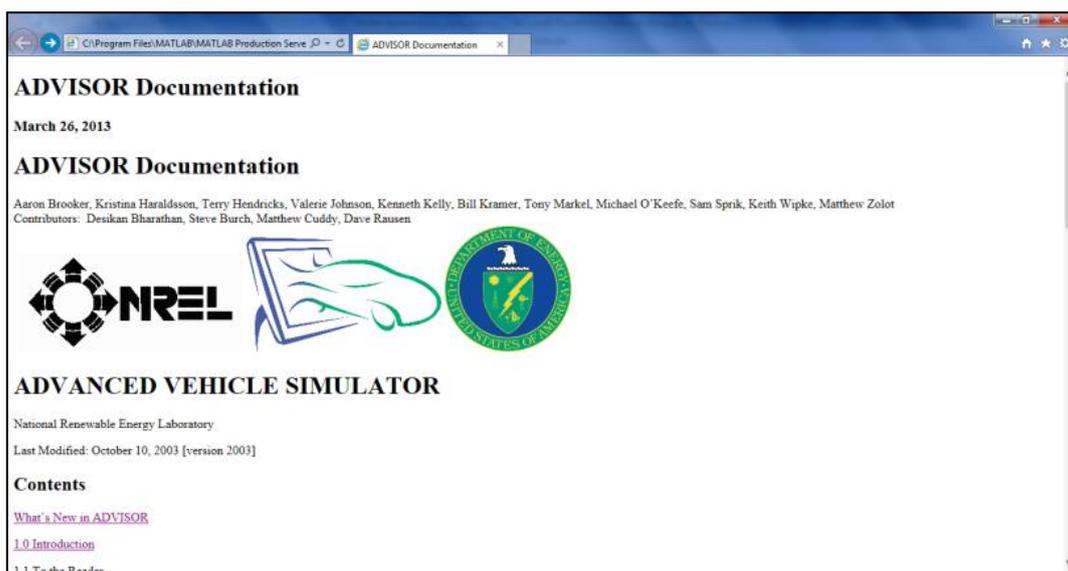
**Figura B-1 – Janela de apresentação do software ADVISOR.**



Fonte: Autor.

Essa ferramenta conta com uma documentação de texto muito completa para auxílio aos usuários e pode ser acessado em qualquer uma das janelas do ADVISOR. A Figura B-2 ilustra a janela inicial do help do programa. É importante ressaltar que esse help é acessado *off-line*.

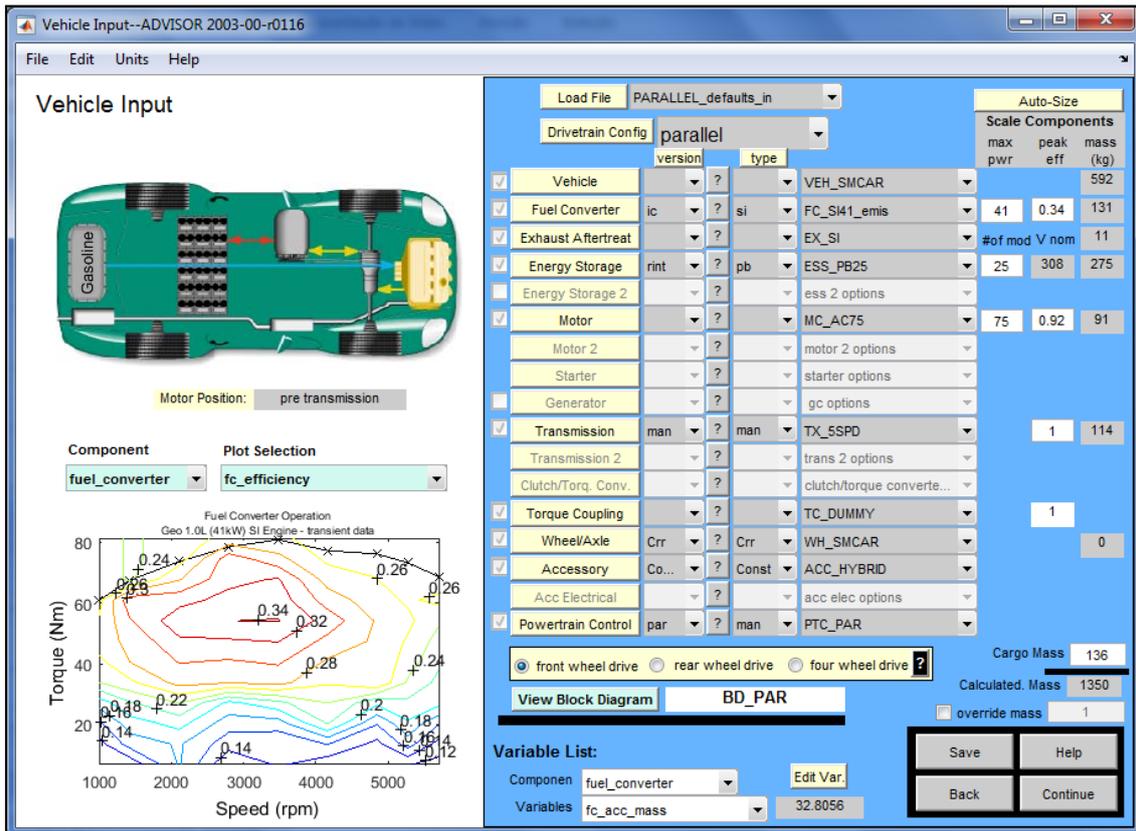
**Figura B-2 – Janela do help do ADVISOR.**



Fonte: Autor.

A janela inicial de trabalho do *software* é inicializada ao clicar em “Start” na janela de apresentação ilustrado anteriormente pela Figura B-1. A Figura B-3 ilustra a janela de trabalho inicial do ADVISOR.

**Figura B-3 – Janela de trabalho inicial do ADVISOR.**



Fonte: Autor.

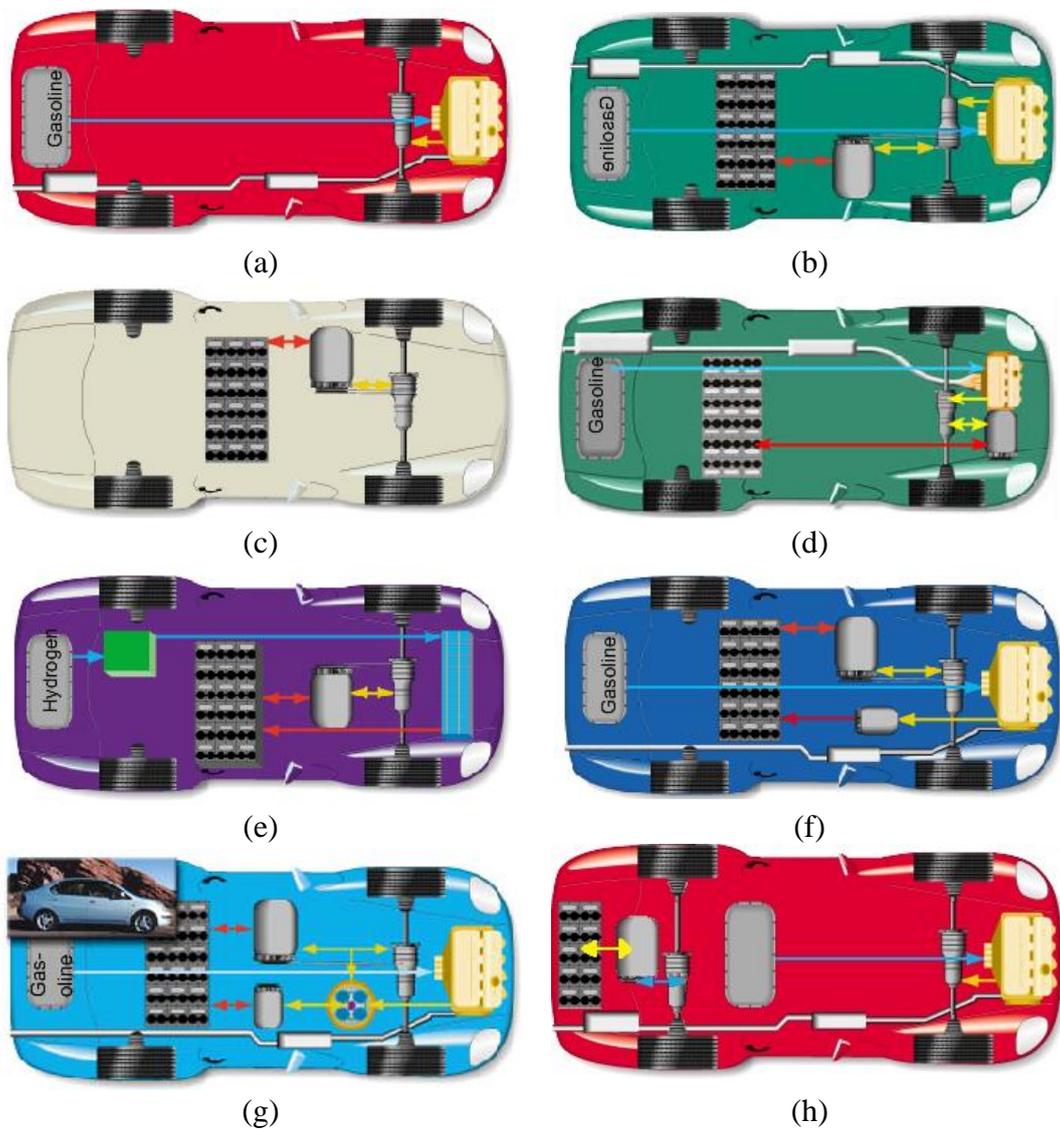
Essa é a primeira interface gráfica (*GUI - graphic user interface*) exibida pelo ADVISOR, é nela que o usuário constrói o veículo, ou seja, define os componentes e a arquitetura do veículo. O modelo do veículo é representado usando diagramas de blocos no Matlab/Simulink para definir as conexões entre os componentes.

Nesse ambiente, o usuário pode utilizar os dados existentes para alterar o tamanho, tipo e outros parâmetros de cada um dos componentes, de acordo com o interesse do usuário. Essa entrada de dados pode se feita com a modificação do diagrama de blocos no simulador ou com a modificação dos arquivos (.m) no MATLAB. Cada um dos

componentes pode ser acessado ao clicar sobre o componente na figura dos veículos no canto superior esquerdo ou clicando nas abas de seleção desta janela inicial.

A Figura B-4 ilustra os modelos *default* de veículos disponíveis no banco de dados do ADVISOR e (h) o desenvolvido por este trabalho, o Paralelo-ES.

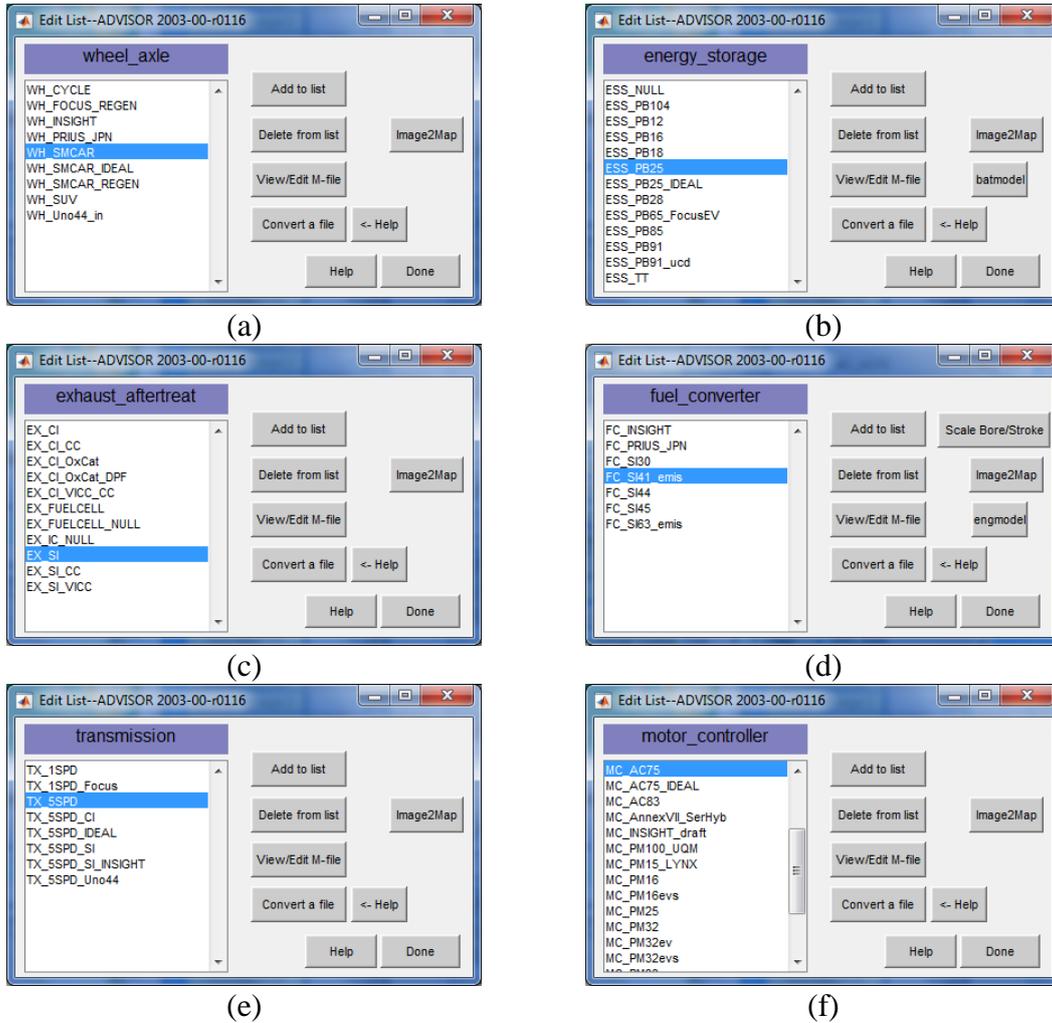
**Figura B-4 – Modelos de veículos disponíveis na biblioteca do ADVISOR, (a) Convencional, (b) Paralelo, (c) Elétrico, (d) Paralelo-SA, (e) Célula Combustível, (f) Série, (g) Série-Paralelo e (h) Paralelo-ES desenvolvido neste trabalho.**



Fonte: Autor.

Clicar nos componentes do veículo abre as janelas com as listas de opções do banco de dados para cada um dos componentes. A Figura B-5 ilustra essas janelas.

**Figura B-5 – Janelas dos componentes que constituem os veículos no ADVISOR.**



Fonte: Autor.

É possível acessar o arquivo “.m” do Matlab acessando o “View/Edit M-file”, nele estão escrita as informações dos modelos dos componentes que são escritas no diagrama de blocos do Simulink.

A Figura B-6 ilustra a janela do arquivo .m com as informações do modelo.

**Figura B-6 – Arquivo .m com os parâmetros dos modelos de cada componente dos veículos no ADVISOR.**

```

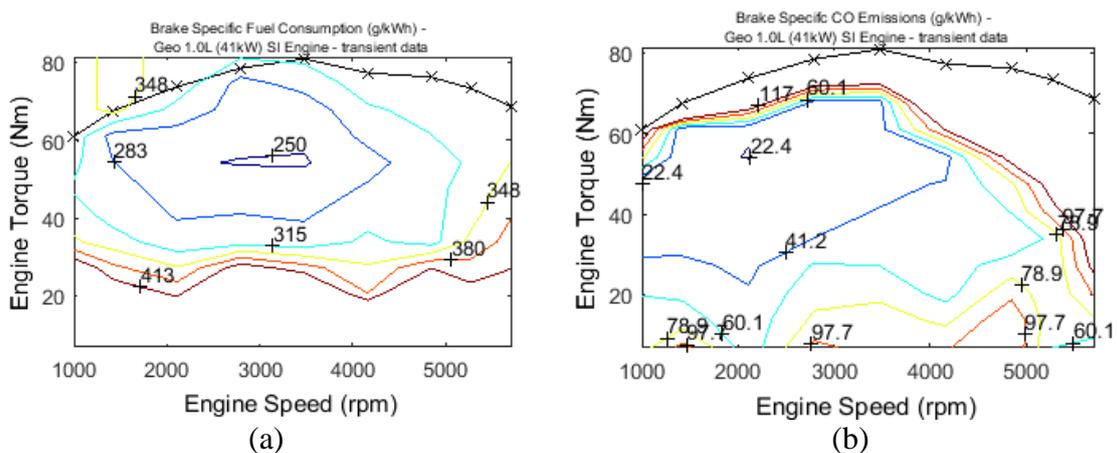
1  % ADVISOR data file: WH_SMCAR.m
2
3  % Data source:
4
5  % Data confirmation:
6
7  % Notes:
8  % Defines tire, wheel, and axle assembly parameters for use with ADVISOR 2, for
9  % a hypothetical small car.
10
11 % Created on: 23-Jun-1998
12 % By: MRC, NREL, matthew_cuddy@nrel.gov
13
14 % Revision history at end of file.
15 %*****
16
17
18 % FILE ID INFO
19 %*****
20
21 wh_description='Wheel/axle assembly for small car';
22 wh_version=2003; % version of ADVISOR for which the file was generated
23 wh_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=> proprietary, do not distribute
24 wh_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees with source data,
25 % 2=> data matches source data and data collection methods have been verified
26 disp(['Data loaded: WH_SMCAR - ',wh_description])
27
28
29 %*****
30 % FORCE AND MASS RANGES over which data is defined

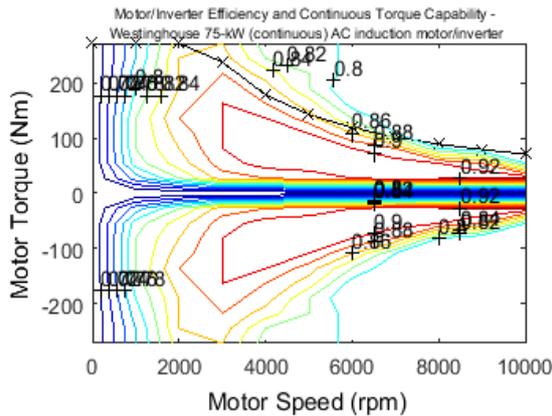
```

Fonte: Autor.

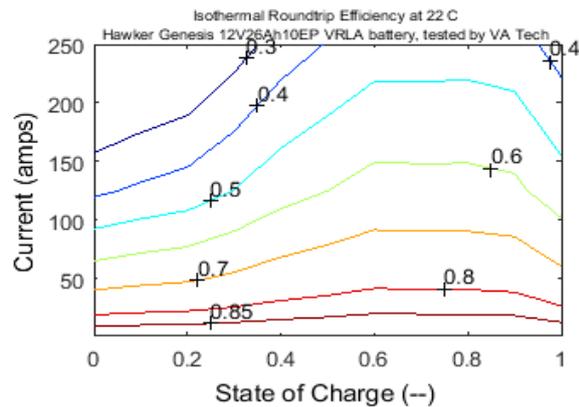
Com canto inferior esquerdo da janela inicial apresentada anteriormente pela Figura B-3 estão disponíveis para visualização os mapas do MCI, do sistema de armazenamento de energia, máquina elétrica do sistema de tração. A Figura B-7 ilustra esses mapas de eficiência, consumo e emissão de poluentes.

**Figura B-7 – Mapas de Eficiência, Consumo e Emissão de Poluentes do MCI (a) e (b), da Máquina Elétrica (c) e da Bateria (d) do ADVISOR.**





(c)

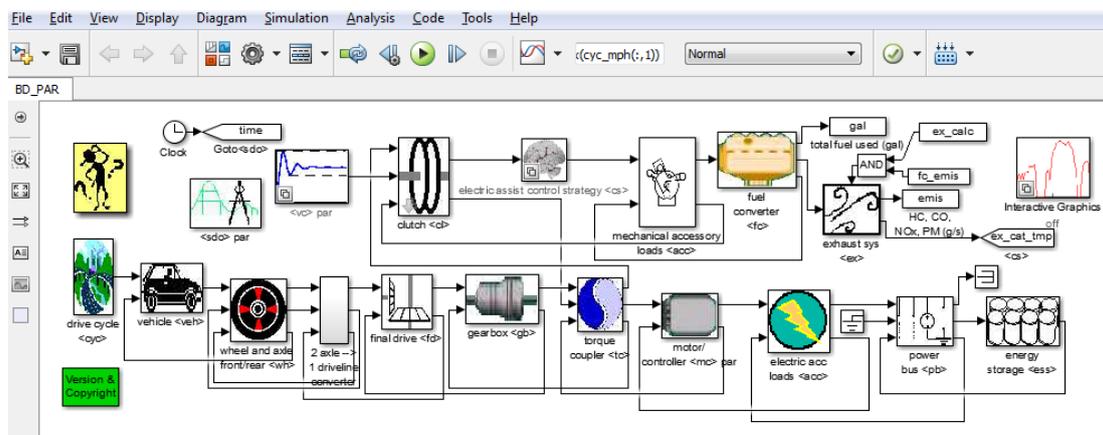


(d)

Fonte: Autor.

A Figura B-8 ilustra o diagrama de blocos de um dos modelos disponíveis no ADVISOR.

**Figura B-8 – Diagrama de blocos do veículo híbrido paralelo no ADVISOR.**



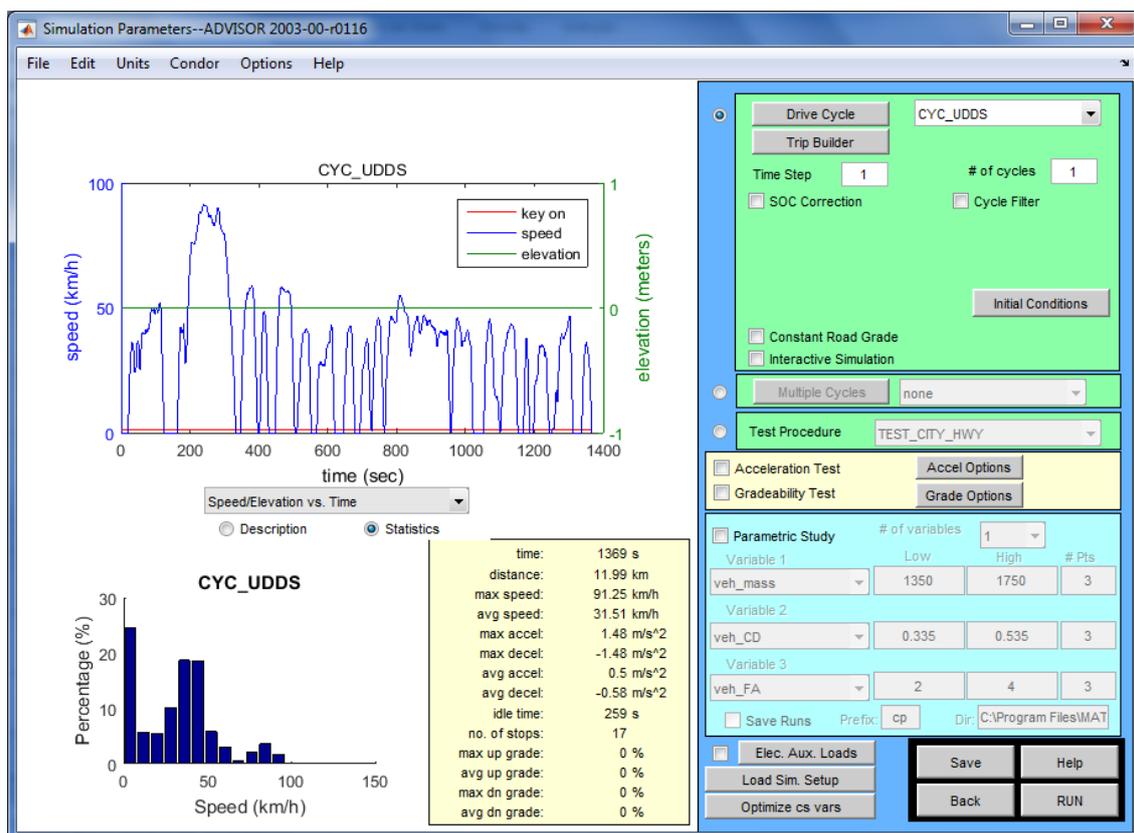
Fonte: Autor.

Definidos os componentes e o veículo a ser simulado, a próxima etapa é avançar para a janela de simulação clicando em continuar na janela inicial de trabalho apresentada pela Figura B-3.

A janela de simulação do ADVISOR contém as informações de simulação de ciclos de condução e dos testes de desempenho do veículo. Nesta janela o usuário define as

características desejadas para simulação do veículo. A Figura B-9 ilustra a janela de simulação do ADVISOR.

**Figura B-9 – Janela de parâmetros de simulação do ADVISOR.**



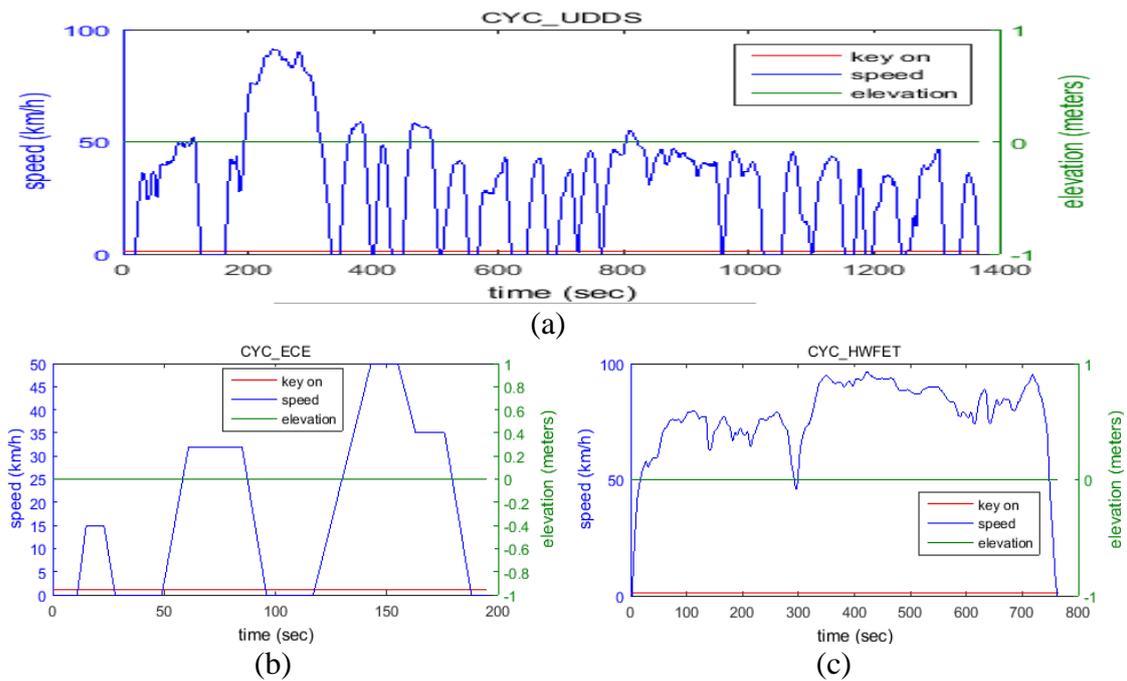
Fonte: Autor.

Nota-se o gráfico com o ciclo de condução selecionado e as informações dos ciclos abaixo. À direita no canto superior o usuário pode acessar os diferentes ciclos de condução disponíveis no banco de dados. Múltiplos ciclos podem ser simulados em sequência. O usuário também tem a opção de simular o veículo em testes de desempenho, como por exemplo, aceleração e *gradeability*.

O ADVISOR também tem como opção de simulação, o estudo paramétrico das variáveis. Nesse caso é avaliada a influência de uma variável no desempenho ao consumo de veículo.

A Figura B-10 ilustra alguns exemplos de ciclos de condução disponíveis no ADVISOR.

**Figura B-10 – Modelos de ciclo de condução disponíveis no ADVISOR (a) e (b) Urbano e (c) Extra Urbano.**

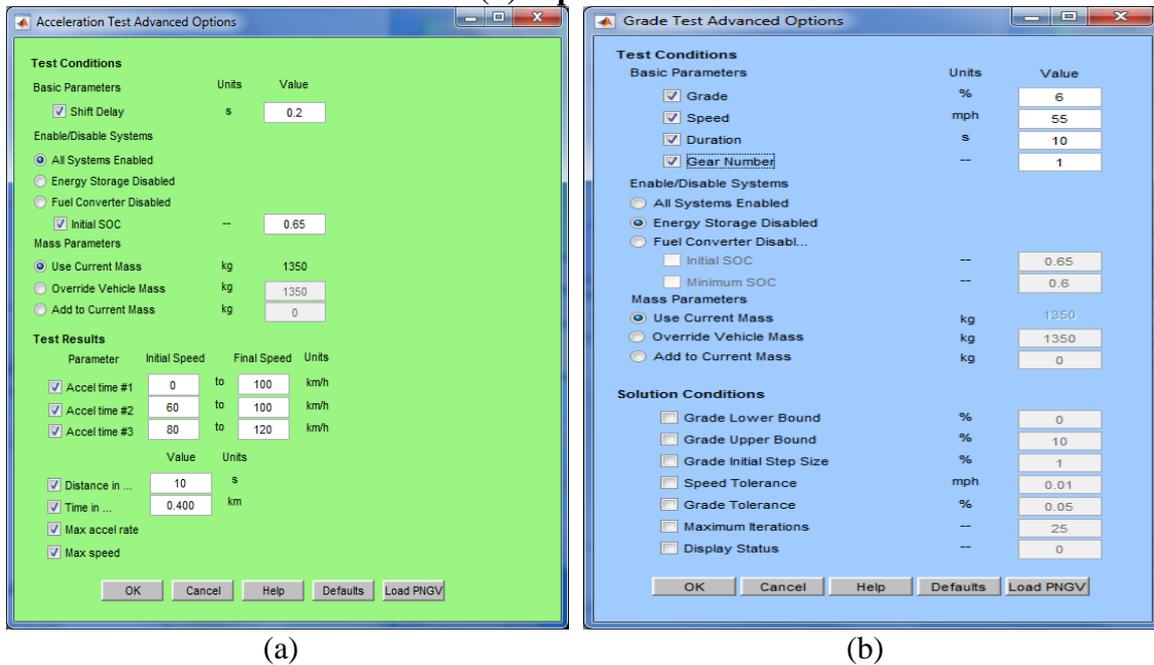


Fonte: Autor.

Se usuário optar por realizar simulação de desempenho do veículo, as janelas para definição das condições dos testes se abrem para que o usuário as defina ao clicar em “RUN”. A Figura B-11 ilustra as janelas de parâmetros da simulação.

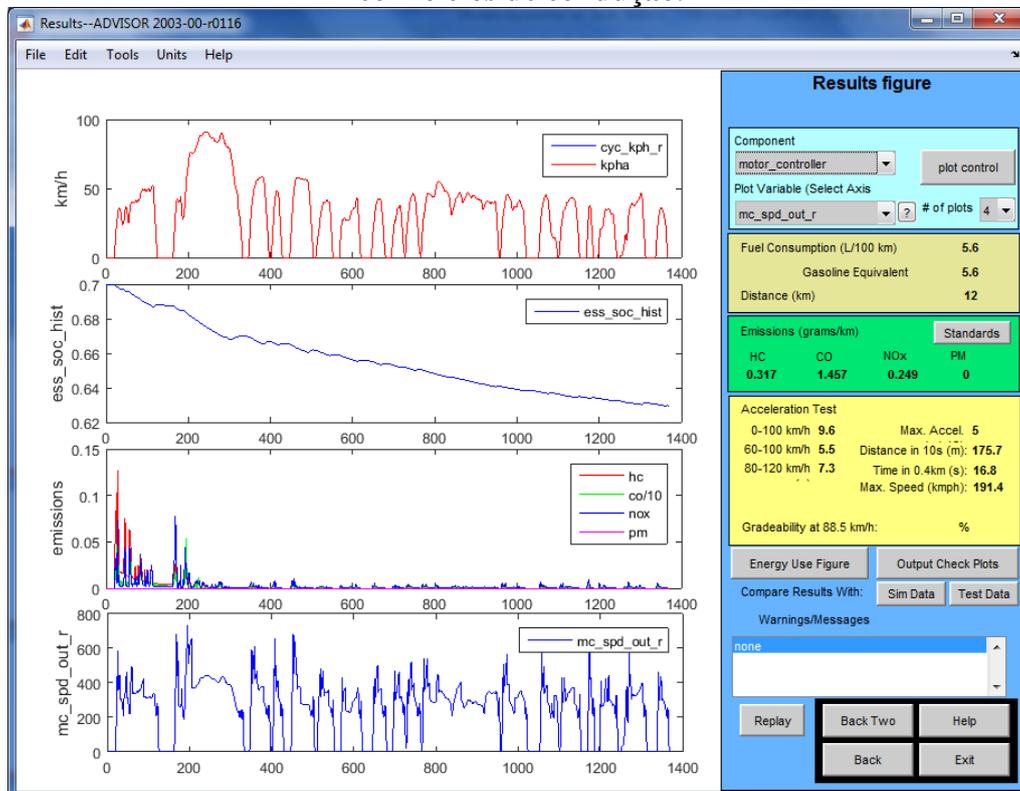
Com os dados de simulação definidos, é executada e a janela de apresentação dos resultados da simulação são exibidos na janela ilustrada pela Figura B-12.

**Figura B-11 – Janelas de configuração dos parâmetros do (a) teste de aceleração e do teste de (b) capacidade de subida.**



Fonte: Autor.

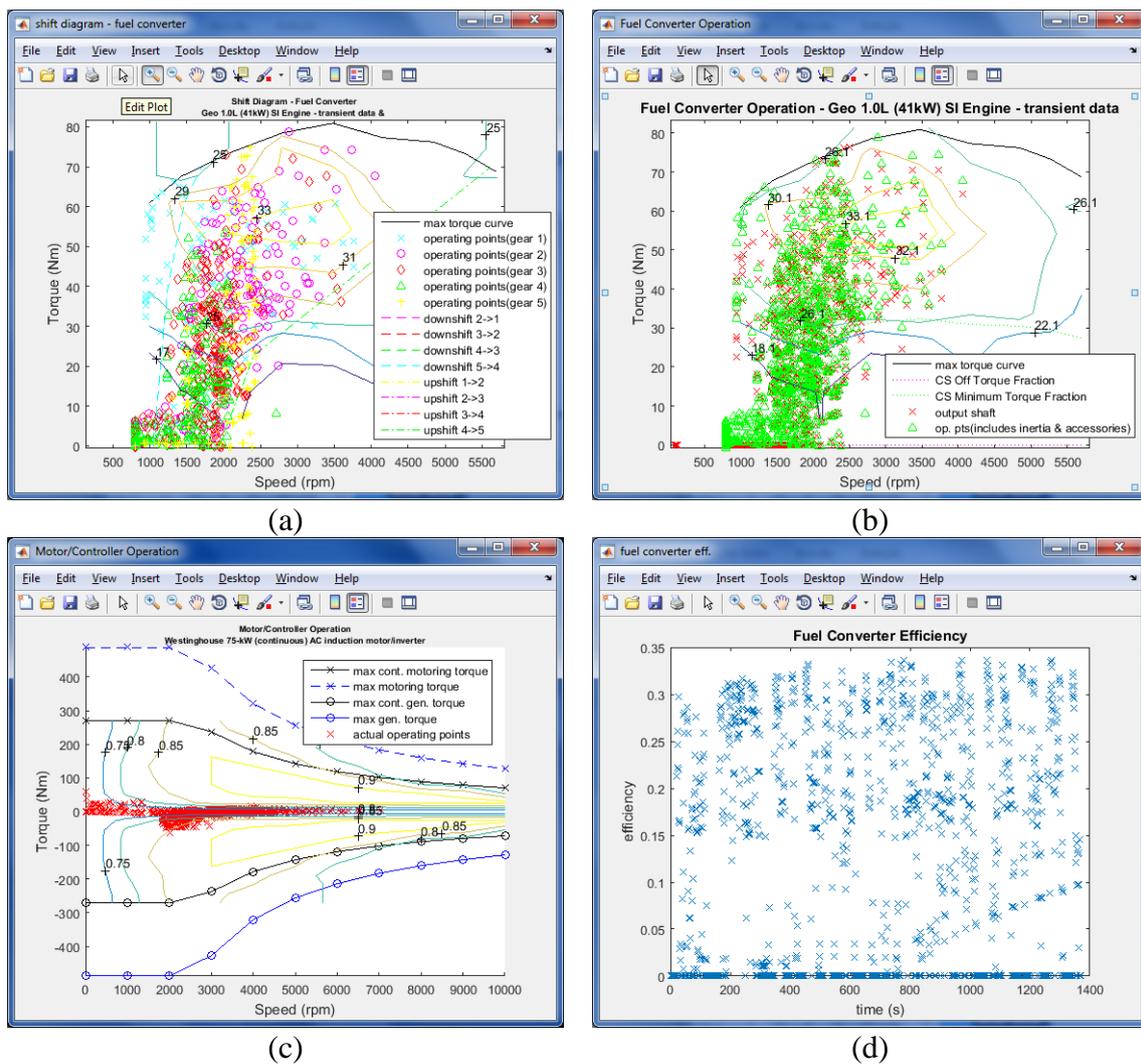
**Figura B-12 – Janela de apresentação dos resultados no ADVISOR para simulação com ciclos de condução.**

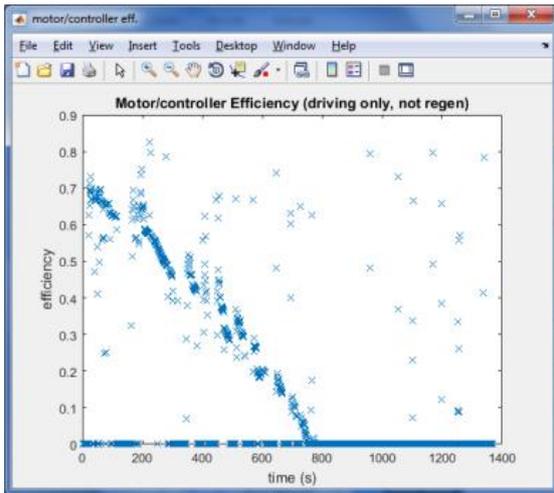


Fonte: Autor.

Na janela de apresentação dos resultados estão disponíveis os gráficos de todas as variáveis da simulação, que podem ser selecionadas para apresentação nos gráficos da janela. Estas variáveis também estão disponíveis no *workspace* do MATLAB. É possível exportar os resultados de operação dos sistemas de transmissão do veículo clicando em “*Output Check Plots*”. As figuras com os mapas de eficiência, consumo e emissão, com os pontos de operação dos motores de tração e dos demais componentes do sistema de tração são disponibilizados. A Figura B-13 ilustra estes mapas disponibilizados.

**Figura B-13 – Mapas de operação do MCI (a) e (b), da máquina elétrica (c), Pontos de eficiência em que o MCI operou (d), Pontos de eficiência da máquina elétrica e do controle (e) e do sistema de transmissão (f).**





(e)



(f)

Fonte: Autor.

Outro recurso disponível é descrição do consumo de energia do veículo e a eficiência final, apresentado abaixo pela Figura B-14.

**Figura B-14 – Distribuição de energia em (kJ) entre os componentes do veículo.**

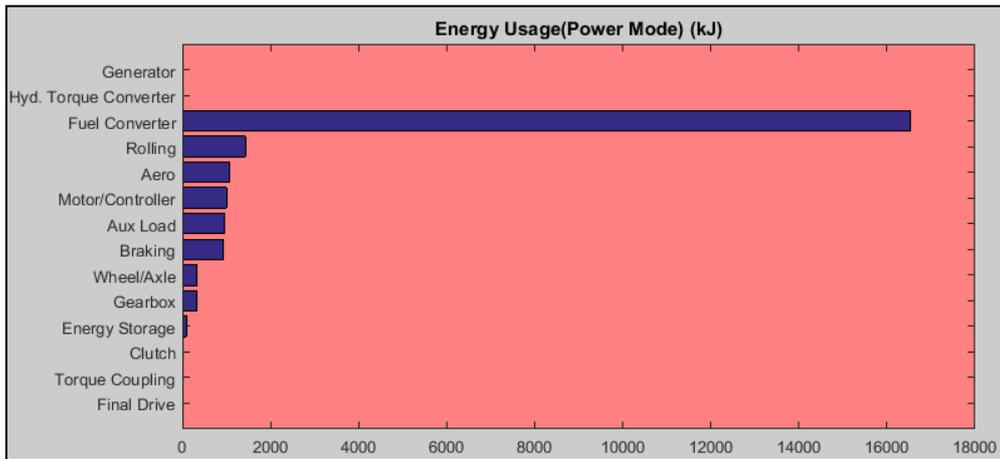
Energy Usage Table (kJ)								
	POWER MODE				REGEN MODE			
	In	Out	Loss	Eff.	In	Out	Loss	Eff.
Fuel	0	21308						
Fuel Converter	21308	4777	16531	0.22			0	
Clutch	4777	4769	8	1		0	0	
Hyd. Torque Converter								
Generator								
Torque Coupling	5203	5203	0	1	1022	1022	0	1
Energy Storage	580	2469	96	0.87				
Energy Stored	-1986							
Motor/Controlle	1640	642	998	0.39	1231	709	521	0.58
Gearbox	5203	4862	341	0.93	1106	1022	84	0.92
Final Drive	4862	4862	0	1	1106	1106	0	1
Wheel/Axle	4862	4521	341	0.93	2036	2025	12	0.99
Braking							919	
Aux Loads	958	0	958	0				
Aero								
Rolling								
			1429					

\*Overall System Efficiency  
0.107  
\*Overall energy efficiency is calculated as:

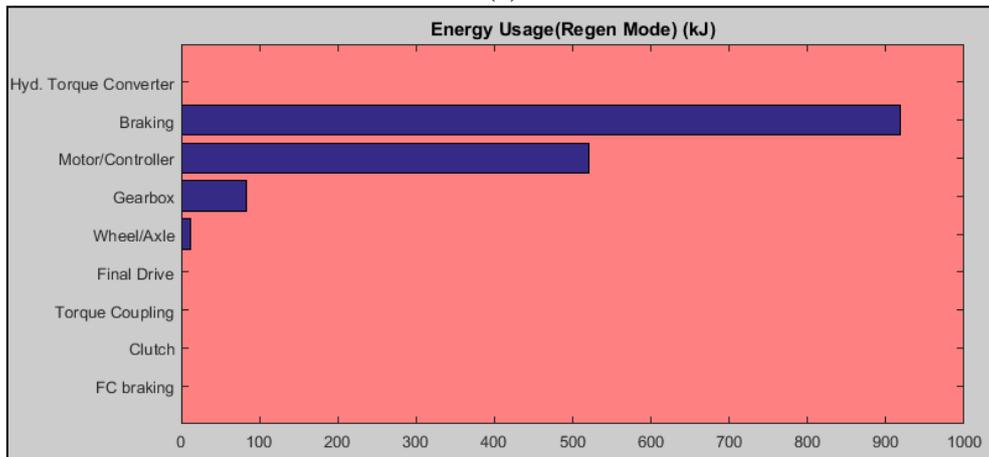
Fonte: Autor.

Essa distribuição de energia dos componentes e das perdas de resistência ao movimento do veículo pode ser apresentada no formato de gráficos de barras conforme ilustra a Figura B-15.

**Figura B-15 – Distribuição de energia em formato gráfico de barras.**



(a)



(b)

Fonte: Autor.

O ADVISOR disponibiliza uma ferramenta auxiliar para implementar o modelo do MCI em mapas de eficiência, consumo e emissão, a partir dos dados coletados em dinamômetro. Estes dados são, velocidade (rpm), torque (N.m), consumo de combustível (g/s), e os gases emitidos. Esse recurso extra é denominado Engmodel e proporciona agilidade para colocar os dados no formato demandado pelo ADVISOR.

Esta ferramenta pode ser acessada digitando “engmodel” no *workspace* do MATLAB. A Figura B-16 ilustra a janela inicial da ferramenta.

**Figura B-16 – Janela da ferramenta de auxílio para MCI do ADVISOR – Engmodel.**



Fonte: Autor.

No processamento dos dados do MCI o Engmodel leva os vetores dos dados de ensaio e gera as matrizes do consumo de combustível e de emissão de poluentes. Para converter os dados do ensaio em um arquivo ADVISOR com o Engmodel é necessário seguir os seguintes passos:

1. Converter o arquivo com os dados do MCI coletados nos teste em um arquivo “.mat”. Para converter para “.mat” o arquivo a ser carregado deve estar no formato de arquivo de texto. As vírgulas devem ser substituídas por pontos antes de serem carregados no Engmodel;
2. Carregue o arquivo de texto clicando em “*Read in text file*” na Figura B-16 para converter o arquivo de texto em um arquivo .mat do Matlab. A janela para carregar o arquivo e converter os dados está ilustrada pela Figura B-17.

**Figura B-17 – Janela de conversão de formatos para .mat.**

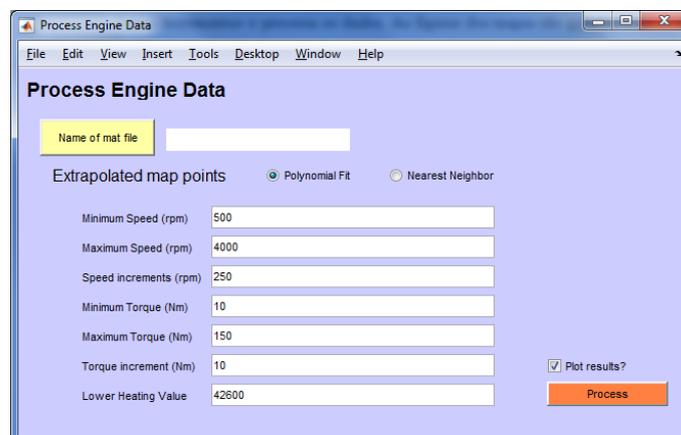


Fonte: Autor.

Os nomes das variáveis devem ter os mesmos padrões utilizados pelo ADVISOR para nomear as variáveis. Por isso é necessário consultar a lista das variáveis no anexo do *help*;

3. Definir os parâmetros/processo: Permite que o usuário especifique saída limites/incrementos e processa os dados. As figuras dos mapas são geradas e as variáveis são armazenadas no *workspace* do Matlab. A Figura B-18 ilustra a janela.

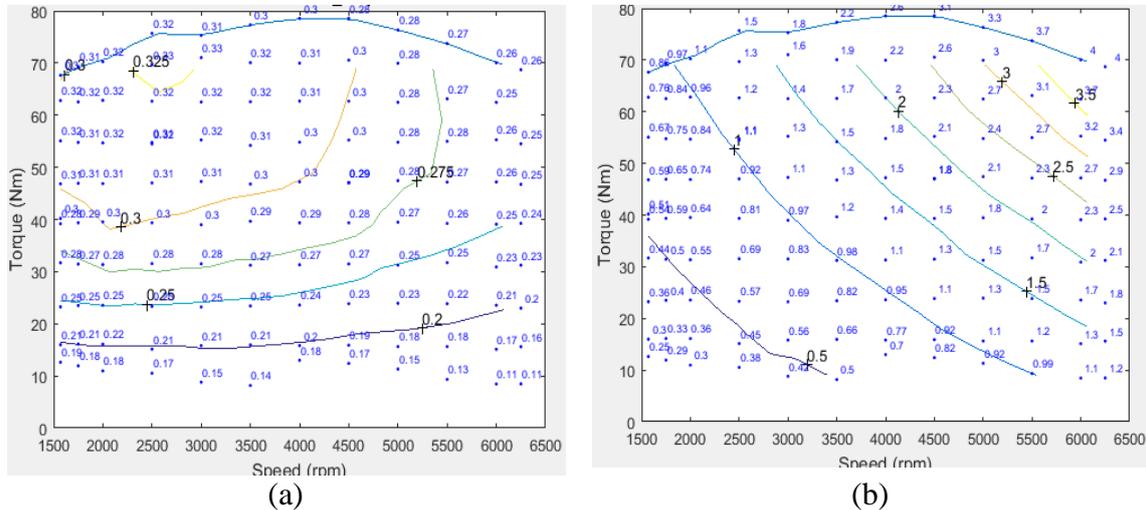
**Figura B-18 – Janela para processar os dados do MCI e gerar os mapas de consumo e eficiência e o arquivo .m para carregar no ADVISOR.**



Fonte: Autor.

Os mapas gerados estão ilustrados abaixo pela Figura B-19.

**Figura B-19 – Mapas de eficiência e consumo gerados pelo Engmodel.**



Fonte: Autor.

Dependendo das versões do ADVISOR e do Matlab, podem ocorrer erros nos *script* que são gerados.

4. Por fim, é necessário criar o arquivo “.m” para carregar no ADVISOR: Toma os dados gravados no *workspace* do Matlab na etapa anterior para gravar o arquivo. Essa etapa é realizada clicando no botão “*Create ADVISOR file*”.

Este arquivo gerado é inserido no ADVISOR.

Como vantagens evidentes, pode-se citar que o simulador é gratuito e distribuído com código aberto. Também tem a facilidade de conexão entre o Simulink e pacotes de outros softwares. Como descrito no pelos desenvolvedores, as aplicações predominantes no ADVISOR, pela indústria, se resumem na avaliação de impacto de um determinado componente sobre o veículo, de modo que os efeitos globais decorrentes de uma alteração na modelagem de um componente possam ser previstos.