



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Análise comparativa da hibridização de um veículo convencional para a arquitetura Híbrida de Eixos Paralelos

Rômulo Acerbi Marin

João Monlevade, MG
2018

Rômulo Acerbi Marin

**Análise comparativa da hibridização de um
veículo convencional para a arquitetura Híbrida
de Eixos Paralelos**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Welbert Rodrigues Alves

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2018**

M337a Marin, Rômulo Acerbi.
Análise comparativa da hibridização de um veículo convencional para a arquitetura híbrida de eixos paralelos [manuscrito] / Rômulo Acerbi Marin. - 2018.

72f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Welbert Alves Rodrigues.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Veículos elétricos. 2. Máquinas elétricas. 3. Conversores de corrente elétrica. I. Rodrigues, Welbert Alves. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.313

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



ATA DE DEFESA

Aos dezoito dias do mês de Dezembro de 2018, às 17:20 horas, no bloco H deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Rômulo Acerbi Marin, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Welbert Alves Rodrigues, Marcelo Moreira Tiago e Gabriel Azevedo Fogli. O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: **Análise comparativa da hibridização de um veículo convencional para a arquitetura Híbrida de Eixos Paralelos**. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela Aprovado do (a) candidato (a), com a nota média 9,8, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando (a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Welbert Alves Rodrigues	9,8
Marcelo Moreira Tiago	9,8
Gabriel Azevedo Fogli	9,8
Média	9,8

João Monlevade, 18 de Dezembro de 2018.

Welbert Alves Rodrigues
Professor (a) Orientador (a)

Rômulo Acerbi Marin
Aluno (a)

Marcelo Moreira Tiago
Professor (a) Convidado (a)

Gabriel Azevedo Fogli
Professor (a) Convidado (a)

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por tudo, em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais e meus irmãos, por sempre me apoiarem e estarem ao meu lado em todos os momentos e por proporcionarem as condições para a realização de meus sonhos.

A República Sparta JM pelo companheirismo, amizade e apoio durante esta etapa tão importante da minha vida.

A todos que, de alguma maneira, colaboraram para que fosse possível a conclusão desta graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Ouro Preto, um sonho que neste momento se torna realidade.

Agradeço ao meu orientador, o prof. Welbert Alves Rodrigues, pela confiança depositada em mim para a realização deste trabalho e pelo apoio na resolução e conclusão de dúvidas que surgiram ao longo do seu desenvolvimento.

"Eu vim, eu vi, eu conquistei"
– *Julius Caesar*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	5
1.2	Objetivos do trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Fundamentos de propulsão dos automóveis	7
2.1.1	Descrição geral do movimento de um veículo	7
2.1.2	Resistência ao movimento do veículo	7
2.1.2.1	Resistência ao rolamento	9
2.1.2.2	Resistência aerodinâmica	10
2.1.3	Dinâmica do movimento	11
2.1.3.1	Força máxima de tração	12
2.1.3.2	Força máxima de frenagem	14
2.1.4	Desempenho dos veículos	15
2.1.4.1	Velocidade máxima	15
2.1.4.2	Capacidade de subida	16
2.1.4.3	Desempenho de aceleração	17
2.2	Veículos elétricos híbridos	18
2.2.1	Conceitos da arquitetura híbrida e níveis de hibridização	19
2.2.2	Veículos Elétricos Híbridos Série	20
2.2.3	Veículos Elétricos Híbridos Paralelos	21
2.2.4	Veículos Elétricos Híbridos Série-Paralelo	23
2.2.5	Elementos construtivos	24
2.2.5.1	Motor de Combustão Interna	24
2.2.5.2	Sistema de transmissão	28
2.2.5.3	Frenagem regenerativa	30
2.2.5.4	Sistemas de armazenamento de energia	32
2.2.5.5	Bancos de baterias	32
2.2.5.6	Conversores e retificadores	36
2.2.5.7	Máquinas elétricas	37
2.3	Softwares utilizados	40
2.3.1	ADIVISOR	40
3	METODOLOGIA	42
3.1	Modelagem do veículo convencional	42
3.1.1	Motor de combustão interna	43

3.1.2	Sistema de transmissão	44
3.2	Modelagem do veículo elétrico híbrido (VEH)	45
3.2.1	Máquina elétrica	47
3.2.2	Sistema de armazenamento de energia	47
3.3	Ciclos de condução	49
4	IMPLEMENTAÇÃO E SIMULAÇÃO	52
4.1	Modelo de veículo convencional	52
4.1.1	Simulações de desempenho	53
4.1.2	Simulações em ciclos de condução	54
4.2	Modelo de veículo híbrido	55
4.2.1	Simulações de desempenho	57
4.2.2	Simulações em ciclos de condução	60
4.3	Análise comparativa e resultados	65
5	CONCLUSÃO	67
5.1	Trabalhos Futuros	68
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXO A – PARÂMETROS ADOTADOS PARA AS SIMULAÇÕES	72

Lista de ilustrações

Figura 1 – Emissões globais de CO ₂ por transportes em 1960.	2
Figura 2 – Emissões globais de CO ₂ por transportes em 2013.	3
Figura 3 – Ilustrativo de forças atuantes em um veículo sob um piso inclinado. . .	8
Figura 4 – Distribuição da pressão por área em um pneu estático.	9
Figura 5 – Representação do torque de resistência ao rolamento.	10
Figura 6 – Representação do Efeito de Arrasto.	11
Figura 7 – Relação Força de Tração com a Resistência ao deslocamento (A) Trans- missão de múltiplas velocidades (B) Transmissão de uma velocidade. . .	16
Figura 8 – Classificação dos VEH quanto ao grau de Híbridização.	19
Figura 9 – <i>Layout</i> de um modelo híbrido série.	20
Figura 10 – <i>Layout</i> de um modelo híbrido paralelo.	22
Figura 11 – <i>Layout</i> de um modelo híbrido série-paralelo.	24
Figura 12 – Estrutura de um MCI de ignição por centelha de quatro tempos. . . .	25
Figura 13 – Ciclos de um MCI de quatro tempos.	26
Figura 14 – Curvas características de torque, potência e consumo específico de combustível de um MCI, operando em máximo desempenho.	26
Figura 15 – 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.	27
Figura 16 – Curva de consumo de um motor combustão de interna.	28
Figura 17 – Mapa esquemático de eficiência motor de combustão interna.	29
Figura 18 – Característica de torque de MCI com transmissão de várias velocidades e Motores Elétricos de única velocidade.	30
Figura 19 – Diagrama de Ragone para baterias e supercapacitores.	32
Figura 20 – Célula individual de um UC.	34
Figura 21 – Célula de Combustível.	34
Figura 22 – Configuração Convencional de um SAEH.	35
Figura 23 – Conversor <i>Buck-Boost</i> Bidirecional.	36
Figura 24 – Retificador trifásico em ponte.	37
Figura 25 – Classificação das máquinas elétricas de corrente alternada.	38
Figura 26 – Classificação das máquinas elétricas de corrente contínua.	39
Figura 27 – Comparativo entre as máquinas de indução e síncronas de ímãs-permanentes da fabricante WEG.	40
Figura 28 – Características de (A) Potência e Torque das máquinas elétricas e (B) regiões de eficiência na curva de torque de uma máquina específica. . .	41
Figura 29 – Mapa de eficiência do MCI.	43
Figura 30 – Mapa de consumo de combustível do MCI.	44

Figura 31 – <i>Layout</i> de um modelo híbrido paralelo.	46
Figura 32 – Curva característica de torque x velocidade da máquina elétrica.	48
Figura 33 – Conceito do modelo de bateria implementada no ADVISOR.	48
Figura 34 – Características de tensão (a), da resistência (b) e do Estado de Carga (c) da bateria.	49
Figura 35 – Perfil de velocidades definido pela norma NBR6601 (ciclo urbano).	50
Figura 36 – Perfil de velocidades definido pela norma NBR7024 (ciclo rodoviário).	51
Figura 37 – Diagrama de blocos do modelo do veículo convencional no ADVISOR.	52
Figura 38 – Resposta do veículo convencional - Teste de Aceleração.	54
Figura 39 – Mapa do MCI com os pontos de operação - Teste de Aceleração.	54
Figura 40 – Mapas do MCI com os pontos de operação e os pontos de eficiência em que o MCI operou - NBR6601.	55
Figura 41 – Mapas do MCI com os pontos de operação e os pontos de eficiência em que o MCI operou - NBR7024.	56
Figura 42 – Diagrama de blocos do veículo híbrido com arquitetura paralela no ADVISOR.	56
Figura 43 – Resposta do veículo apenas com tração elétrica.	57
Figura 44 – Iteração das potências da máquina elétrica e do MCI durante as trocas de marchas.	59
Figura 45 – Iteração das potências da máquina elétrica e do MCI durante as trocas de marchas.	59
Figura 46 – Iteração do torque entregue as rodas pelo MCI e máquina elétrica para uma velocidade constante.	60
Figura 47 – Ciclo NBR6601 testado cinco vezes seguido pelo estado de carga do banco de baterias.	61
Figura 48 – Eficiência no processo de descarga da bateria (esquerda) e na conversão de energia pela máquina elétrica (direita).	61
Figura 49 – Mapas do MCI com os pontos de operação para o veículo convencional (esquerda) e para o VEH de eixos paralelos (direita) – Ciclo NBR6601.	62
Figura 50 – Mapas do MCI com os pontos de eficiência em que o MCI operou no veículo convencional (esquerda) e no VEH de eixos paralelos (direita) – Ciclo NBR6601.	62
Figura 51 – Operação da máquina elétrica e do MCI no ciclo de condução Urbano - NBR6601.	63
Figura 52 – Mapas do MCI com os pontos de operação para o veículo convencional (esquerda) e para o VEH de eixos paralelos (direita) – Ciclo NBR7024.	64
Figura 53 – Mapas do MCI com os pontos de eficiência em que o MCI operou no veículo convencional (esquerda) e no VEH de eixos paralelos (direita) – Ciclo NBR7024.	64

Lista de tabelas

Tabela 1 – Metas para redução de emissão de CO ₂ adotada por alguns países.	4
Tabela 2 – Topologias utilizadas em VEH no mercado.	24
Tabela 3 – Comparativo entre as máquinas elétricas mais utilizadas em sistemas de tração veicular.	39
Tabela 4 – Características do veículo convencional.	42
Tabela 5 – Características do veículo convencional.	45
Tabela 6 – Parâmetros técnicos da máquina elétrica.	47
Tabela 7 – Parâmetros técnicos do ciclo de teste urbano.	50
Tabela 8 – Parâmetros técnicos do ciclo de teste urbano.	51
Tabela 9 – Resultado dos testes simulados para o veículo convencional a MCI.	53
Tabela 10 – Resultados obtidos nos testes de desempenho após a hibridização - tração elétrica.	57
Tabela 11 – Comparativo entre os resultados nos testes de desempenho antes e após a hibridização.	58
Tabela 12 – Eficiência e consumo de combustível no ciclo NBR6601.	65
Tabela 13 – Eficiência e consumo de combustível no ciclo NBR7024.	65
Tabela 14 – Emissão de gases poluentes dos veículos simulados no ciclo NBR6601.	66
Tabela 15 – Emissão de gases poluentes dos veículos simulados no ciclo NBR7024.	66
Tabela 16 – Considerações utilizadas para o MCI e para o Combustível utilizado.	72
Tabela 17 – Peso adicionado ao veículo devido ao sistema de tração elétrico.	72
Tabela 18 – Descrição dos arquivos utilizados como base para implementar os modelos do veículo deste trabalho.	73
Tabela 19 – Descrição dos arquivos utilizados para simular os modelos do veículo deste trabalho.	73
Tabela 20 – Considerações utilizadas para as constantes físicas.	73

Lista de abreviaturas e siglas

ADVISOR	<i>Advanced Vehicle Simulator</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
c.a.	Corrente Alternada
c.c.	Corrente Contínua
CG	Centro de Gravidade
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CTM	Centro de Tecnologia da Mobilidade
DOH	<i>Degree of Hybridization</i>
E-22	Combustível - Gasolina
FC	<i>Fuel Cells</i>
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
HC	Hidróxido de Carbono
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MCI	Motor de Combustão Interna
ME	Máquina Elétrica
NiMH	Níquel Hidreto Metálico
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
PbA	Chumbo Ácido
SAE	Sistema de Armazenamento Elétrico
SAEH	Sistema de Armazenamento Elétrico Híbrido
SOC	<i>State of Charge</i>

VE	Veículos Elétricos
VEH	Veículos Elétricos Híbridos
UC	Ultracapacitors

Lista de símbolos

a	Aceleração [m/s^2]
A_f	Área frontal do veículo [m^2]
C_D	Coefficiente de resistência aerodinâmica
C_e	Consumo específico de combustível [g/kWh]
C_l	Volume consumido de combustível [m^3]
C_{nom}	Capacidade nominal do banco de baterias [Ah]
d	Fator de desempenho do veículo durante uma subida
F_{bf}	Força de frenagem no eixo frontal [N]
F_{br}	Força de frenagem no eixo traseiro [N]
F_g	Força causada pela gravidade [N]
f_r	Coefficiente de resistência ao rolamento
F_r	Força de resistência ao movimento [N]
F_t	Força de tração disponível nas rodas [N]
F_{tf}	Força de tração disponível nas rodas dianteiras [N]
F_{tr}	Força de tração disponível nas rodas traseiras [N]
F_w	Força de arraste aerodinâmico [N]
F_x	Força máxima de tração dos pneus considerando escorregamento [N]
g	Aceleração da gravidade [m^2]
h_g	Altura do centro de gravidade para o piso [m]
h_w	Altura do ponto de aplicação da força de arraste aerodinâmico [m]
i_0	Relação entre a velocidade de entrada e saída do diferencial
i_g	Razão entre a velocidade de entrada e saída da transmissão
I_p	Inércia angular do motor [Kg/m^2]
I_W	Inércia angular das rodas [Kg/m^2]

j	Desaceleração do veículo [m/s^2]
K_g	Relação de redução da transmissão
L	Distância total do entre eixos [m]
L_a	Distância do eixo frontal ao centro de gravidade [m]
L_b	Distância do eixo traseiro ao centro de gravidade [m]
M	Massa equivalente total do veículo [Kg]
P	Força resultante normal (veículo estático) [N]
r	Raio do pneu [m]
r_d	Raio da roda [m]
S_a	Distância percorrida na fase de aceleração [m]
S_t	Coefficiente de escorregamento dos pneus para regime de propulsão
S_b	Coefficiente de escorregamento dos pneus para regime de frenagem
t	Tempo [s]
T_b	Torque de frenagem [Nm]
T_{rf}	Torque de resistência ao rolamento dos pneus do eixo frontal [Nm]
T_{rr}	Torque de resistência ao rolamento dos pneus do eixo traseiro [Nm]
V	Velocidade do veículo [m/s]
V_w	Velocidade do vento [m/s]
W_f	Força normal aplicada sobre o eixo frontal [N]
W_r	Força normal aplicada sobre o eixo traseiro [N]
α	Inclinação da pista [rad]
δ	Inércia rotacional
ρ	Densidade do ar [Kg/m^3]
ρ_c	Massa específica do combustível a 20 °C [Kg/m^3]
η_t	Eficiência do conjunto de transmissão
ω	Velocidade angular das rodas [rad/s]

Resumo

A sociedade moderna é extremamente dependente da mobilidade e deve grande parte do que se tornou a evolução contínua dos transportes. Veículos de pequeno porte têm sido a principal opção adotada em todo o mundo e graças a isso, as emissões de gases estufa efetuadas pelo setor de transportes só não são maiores que as dos setores industriais. Os veículos elétricos híbridos surgem como uma tecnologia de transição para a redução dos impactos gerados pela utilização em massa de motores de combustão interna. Entretanto, os custos da hibridização ainda são altos quando comparados a veículos convencionais. Assim, este trabalho visa apresentar as arquiteturas de veículos elétricos híbridos que são foco de estudos atuais e detalhar seus princípios de funcionamento. São apresentados os ganhos obtidos por meio de simulações realizadas no *software* ADVISOR com a arquitetura híbrida de eixos paralelos. Como resultado houve uma redução no consumo de combustível e nas emissões de gases estufa, sendo todos os testes conduzidos em cenários normatizados.

Palavras-chave: Veículo Elétrico Híbrido, Eficiência, Conversores, Máquinas Elétricas, ADVISOR.

Abstract

The modern society is extremely dependent on mobility and owes much of what has become the continuous evolution of transports. Small vehicles have been the main option adopted around the world and thanks to this, the emissions of greenhouse gases made by the transport sector are only not greater than those of the industrial sectors. Hybrid electric vehicles appear as a transition technology to reduce the impacts generated by the mass use of internal combustion engines. However, the costs of hybridization are still high when compared to conventional vehicles. Thus, this work aims to present the hybrid electric vehicle architectures that are the focus of current studies and to detail their operating principles. The obtained gains are presented through simulations carried out in the software ADVISOR with the hybrid architecture of parallel axes. As a result, there was a reduction in fuel consumption and greenhouse gas emissions, with all tests conducted in standardized scenarios.

Keywords: Hybrid electric vehicle, Efficiency, Converters, Electric Machines, ADVISOR.

1 Introdução

Os primórdios da aplicação da eletricidade em veículos ocorreram logo após as descobertas dos processos de transformação de energia elétrica em energia eletromecânica, sendo mais tarde substituída pelo mercado dos combustíveis fósseis (HUSAIN, 2011).

A primeira demonstração de um veículo elétrico se deu em 1830 e modelos com esse tipo de tecnologia continuaram a ser fortemente comercializados até o fim do século XIX. Entretanto, com o avanço dos veículos equipados com motores a combustão interna (MCI), especialmente por conta da inserção da partida elétrica no início do século XX, os Veículo Elétrico (VE) perderam uma grande parcela do mercado, principalmente pelo fato de possuírem uma menor autonomia. Embora menos prejudiciais ao meio ambiente, comercialmente não estavam a altura de competir por conta da falta de tecnologia (TANAKA, 2013; LARMINIE; LOWRY, 2012).

O advento dos transportes ajudou a moldar a sociedade moderna, contudo, o uso em larga escala de derivados do petróleo acarretou alguns problemas. Estudos relacionados à exploração do petróleo apresentam números preocupantes quanto à quantidade das reservas globais. A cada ano uma quantidade menor de óleo bruto é descoberta e uma demanda de consumo maior é solicitada pelo mercado. Um dos fatores para o aumento no consumo é que a quantidade de veículos movidos por motores de combustão cresceu de maneira alarmante nas últimas décadas. A eletrificação do setor de transportes é uma possibilidade viável para reduzir o consumo de petróleo em escala global (BARAN; LEGEY, 2011).

Ressalvadas algumas exceções, todos os veículos fazem uso da combustão de combustíveis criados a partir de hidrocarbonetos para obter a energia de propulsão necessária para a tração. O produto dessa reação entre o combustível e o ar gera calor e subprodutos de combustão. O calor é convertido em potência mecânica e os subprodutos do processo são liberados na atmosfera. Monóxido de Carbono (CO) e Óxido de Nitrogênio (NO_x) são os dois principais subprodutos desse processo, ambos são classificados como gases estufa. Esses gases existem naturalmente na atmosfera, porém a grande quantidade desses elementos liberada nas últimas décadas, está causando danos ao ecossistema da Terra (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

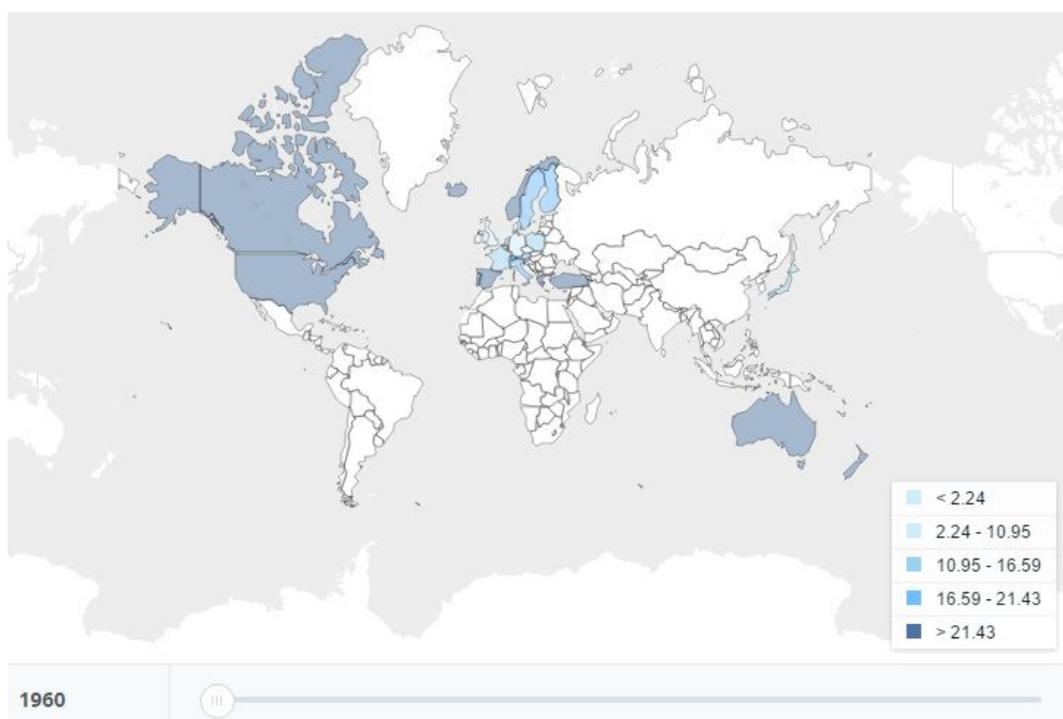
O impacto dos transportes no clima global não é só limitado às emissões veiculares, mas também à produção e distribuição do óleo combustível. Por exemplo, o somatório das emissões totais de CO_2 de um carro popular são da ordem de 76% referentes ao uso de combustível, 9% referentes a fabricação e 15% provenientes de emissões e perdas por conta do sistema de distribuição de combustível (POTTER, 2003).

Muitas soluções para a redução das emissões veiculares vem sendo propostas, como a intensificação do uso de transportes coletivos, redução do número de veículos, implementação de transportes alternativos como trens, hidrovias, etc (CHAPMAN, 2007). Dentre

as ideias apresentadas está a modernização dos veículos convencionais propulsionados por MCI. A hibridização dos transportes surge como uma saída viável para o problema, graças recentes aos avanços tecnológicos.

A *International Energy Agency* (IEA) tem acompanhado a evolução da participação do setor de transportes nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). A Figura 1 apresenta as emissões de CO_2 causadas por reações de combustão referidas a todo o setor de transportes em 1960, com exceção de atividades marítimas internacionais e aviação internacional. Já a Figura 2 apresenta a mesma relação de emissões com relação ao ano de 2013. Com a mesma legenda característica, porém com valores diferentes, as Figuras 1 e 2 demonstram como as emissões de CO_2 evoluíram nas últimas décadas.

Figura 1 – Emissões globais de CO_2 por transportes em 1960.



Fonte: IEA Statistics © OECD/IEA 2014.

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; 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 contribuiria para uma redução de cerca de 80% nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono (CO_2) (BRAVO; MEIRELLES; GIALONARDO, 2014).

Figura 2 – Emissões globais de CO₂ por transportes em 2013.

Fonte: IEA Statistics © OECD/IEA 2014.

Os maiores impactos dessas emissões podem ser observados nos grandes centros urbanos, onde os efeitos dessa poluição são intensificados. Em muitos casos, estão diretamente 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; GIALONARDO, 2014).

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 CO₂ 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 ilustra os limites de emissão definidos pelos países e os ciclos de condução adotados. Os cenários de testes normatizados, permitem mensurar o comportamento de diferentes veículos em

condições que reproduzem uma rotina de operação tanto urbana como rodoviária.

Países	Tipo de Veículos	Ciclo de Teste	Meta Atual	
			g CO_2/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

Tabela 1 – Metas para redução de emissão de CO_2 adotada por alguns países.

Os fatores apresentados têm difundido a ideia de que os Veículos Elétricos Híbridos (VEH) são 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). Apesar de os VEH's serem 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.

Até outubro de 2015, no Brasil, os veículos elétricos e os híbridos não possuíam 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 tornou 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; 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 deem condições para a iniciativa privada 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.

1.1 Motivação

Existem três principais fatores relacionados ao uso de VE. O primeiro fator é o ambiental, a energia elétrica é cada vez mais, proveniente de fontes renováveis, reduzindo assim, as emissões causadas pelo uso de um MCI. Em segundo lugar, a eficiência energética, uma vez que, os motores elétricos apresentam valores da ordem de 90% de eficiência contra os estimados 40% do MCI. Por fim o fator comercial, representando um dos maiores desafios na implementação de veículos baseados em tecnologia de tração elétrica (VAZ; BARROS; CASTRO, 2015; BARAN; LEGEY, 2011).

Devido a limitações tecnológicas ocorre um agravamento do fator comercial, tornando inviável a eletrificação total dos transportes atuais. Porém, o veículo elétrico híbrido (VEH) pode ser visto como uma transição do MCI para uma motorização totalmente baseada em máquinas elétricas. Pesquisas e investimentos têm sido amplamente aplicados ao desenvolvimento de novas baterias e estratégias de controle, bem como diversos países têm criado políticas públicas de incentivo ao uso da tecnologia híbrida (VAZ; BARROS; CASTRO, 2015).

1.2 Objetivos do trabalho

O objetivo deste trabalho é avaliar os ganhos obtidos por meio de um processo de hibridização de um veículo convencional compacto para uma arquitetura híbrida de eixos paralelos.

Objetivos específicos

1. Apresentar a situação atual dos transportes no mundo do ponto de vista dos impactos negativos gerados pela alta quantidade de veículos movidos a MCI.
2. Embasamento das principais arquiteturas de Veículos Elétricos Híbridos bem como os diferentes graus de hibridização.
3. Relação dos principais Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) utilizados atualmente, bem como suas características específicas.
4. Descrição dos componentes que compõe o sistema de tração, suas combinações e estratégias de controle.
5. Estudo e Simulação via *software* do funcionamento de uma das arquiteturas mais usadas em Veículos Elétricos Híbridos.

6. Estudo dos ganhos concebidos pela hibridização de um veículo convencional.

Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

1. Aplicação do modelo representativo de um veículo nacional compacto em ambiente de simulação, o que possibilita avaliar os efeitos da hibridização.
2. Avaliação dos efeitos da hibridização para a arquitetura de eixos paralelos na redução do consumo e da emissão de poluentes.
3. Introdução da ferramenta de simulação ADVISOR, como ponto de partida para futuros trabalhos relacionados ao tema de veículos elétricos híbridos e áreas afins. Uma vez que, o *software* possui um vasto banco de dados, fica relativamente simples realizar comparação entre diferentes modelos e arquiteturas, não só de veículos convencionais, mas também de modelos maiores, como ônibus e caminhões.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentos de propulsão dos automóveis

Descrever o comportamento e os fundamentos de operação de um veículo requer a aplicação dos princípios gerais da mecânica. Um veículo automotivo, seja ele convencional, híbrido ou totalmente elétrico, consiste em um aglomerado de milhares de componentes, formando um sistema complexo. Com tamanha abrangência de variáveis, o uso de métodos computacionais para a análise e desenvolvimento desses sistemas é útil, principalmente por permitir avaliar dinamicamente o seu comportamento. Neste capítulo, serão apresentadas as equações matemáticas que regem o movimento e as forças de resistência que atuam sobre um veículo conforme formulação do autor (EHSANI; GAO; EMADI, 2009). Tal embasamento matemático visa desmistificar a metodologia utilizada pelos modelos de simulação do ADVISOR.

2.1.1 Descrição geral do movimento de um veículo

Com o intuito de colocar um veículo em movimento, o somatório da força de tração F_t , que existe na área de contato entre os pneus e a superfície da estrada, deve possuir um valor superior ao somatório de todas as forças de resistência F_r ao movimento. As forças de resistência consistem primordialmente no arraste aerodinâmico, inclinação da superfície de contato e por atritos variados.

Para descrever a aceleração de um veículo, partimos da segunda Lei de Newton sendo a Equação 2.1.

$$a = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\partial M} \quad (2.1)$$

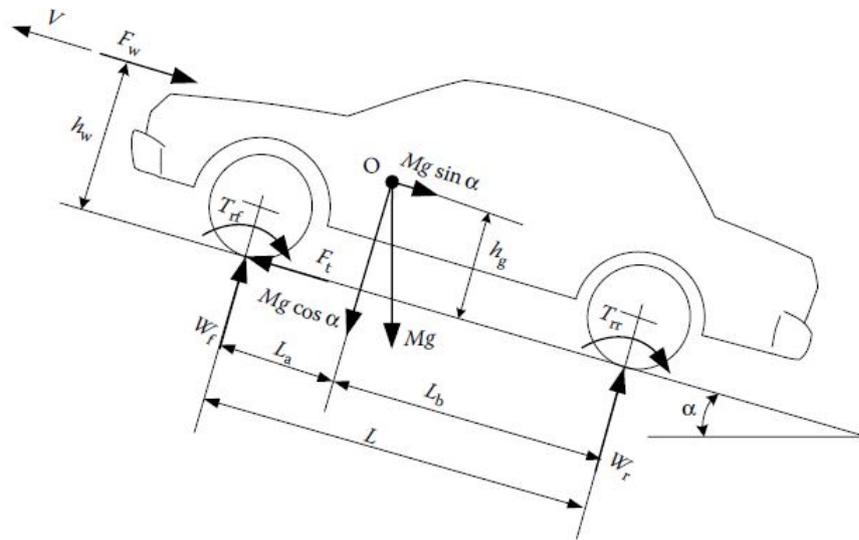
Sendo que, V é a velocidade, M se trata da massa do veículo a ser acelerada e ∂ é o fator de massa responsável por converter as inércias de rotação e dos componentes de massa translacional.

2.1.2 Resistência ao movimento do veículo

Durante o movimento, um veículo está sujeito a diversas forças resistivas, essas forças são ilustradas na Figura 3. O torque de resistência ao rolamento dos pneus no solo é contabilizado separadamente em cada eixo, sendo o $T_{r,f}$ no eixo frontal e o $T_{r,r}$ no eixo traseiro. O arraste aerodinâmico é representado por F_w e a influência da força gravitacional

é dada pelo produto Mg , sendo que a inclinação do piso leva o deslocamento de massa vertical para $Mg \cdot \sin \alpha$.

Figura 3 – Ilustrativo de forças atuantes em um veículo sob um piso inclinado.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

As variáveis da Figura 3 representam,

V - velocidade;

F_w - força de arraste aerodinâmico;

h_w - altura do ponto de aplicação da força de arraste aerodinâmico;

T_{rf} - torque de resistência ao rolamento dos pneus do eixo frontal;

W_f - força normal aplicada sobre o eixo frontal;

F_t - força de tração;

M - massa do veículo;

g - aceleração da gravidade;

α - inclinação da pista;

L - distância total do entre eixo;

L_a - distância do eixo frontal ao centro de gravidade CG;

L_b - distância do eixo traseiro ao centro de gravidade CG;

W_r - força normal aplicada sobre o eixo traseiro;

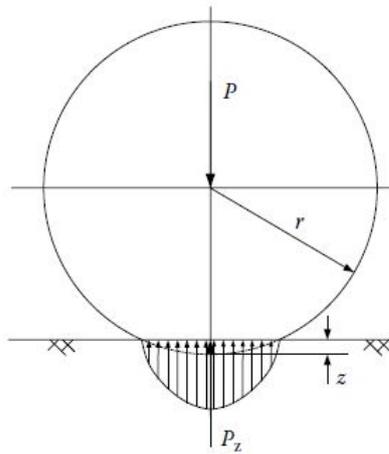
T_{rr} - torque de resistência ao rolamento dos pneus do eixo traseiro;

h_g - altura do centro de gravidade para o piso.

2.1.2.1 Resistência ao rolamento

O principal responsável pela resistência ao rolamento é o contato direto dos pneus com o solo, porém, todo o conjunto mecânico do veículo formado por engrenagens e rolamentos, também tem influência. A partir do momento que uma força de tração é aplicada, uma deformação se forma no material do pneu (EHSANI; GAO; EMADI, 2009). Com o veículo totalmente estático, sob uma superfície plana, existe uma distribuição simétrica da pressão dos pneus, gerando uma resultante de força normal dada por P , isso é apresentado na Figura 4. Isso acontece por conta da relação de proporcionalidade entre a massa do veículo e a gravidade, conforme expresso pela Equação 2.2.

Figura 4 – Distribuição da pressão por área em um pneu estático.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$P = M.g \quad (2.2)$$

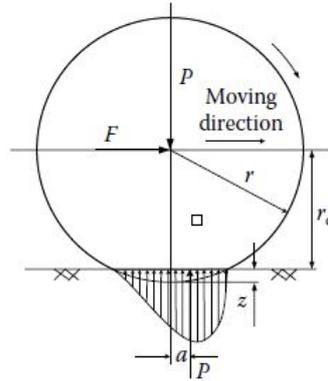
A deformação do pneu e a distribuição de pressão sobre o mesmo estão diretamente ligados ao material do pneu e ao tipo de solo. O torque de resistência ao rolamento do pneu é apresentado na Figura 5 e pode ser definido como $T_r = Pa$.

Já a força a ser aplicada ao centro da roda, necessária para equilibrar essa resistência, é dada conforme descreve a Equação 2.3.

$$F_r = \frac{T_r}{r_d} = \frac{Pa}{r_d} = P.f_r \quad (2.3)$$

Onde r_d é o raio da roda e $f_r = \frac{a}{r_d}$ o coeficiente de resistência ao rolamento. A variável F_r representa a força horizontal do torque T_r .

Figura 5 – Representação do torque de resistência ao rolamento.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Para se obter o coeficiente de resistência ao rolamento são levados em conta diversos parâmetros, como o tipo de solo, as irregularidades e presença de líquidos, o material do pneu, a estrutura geométrica e a pressão dos pneus. Esta variável é constante e tabelada conforme as características descritas. Para um carro de passageiros convencional, sob uma superfície de concreto, o coeficiente de resistência de rolamento pode ser obtido por meio da Equação 2.4 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$f_r = f_0 + f_s \left(\frac{V}{100} \right)^{2.5} \quad (2.4)$$

Os coeficientes f_0 e f_s possuem valores vinculados a 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 2.5. É importante ressaltar que a Equação 2.5 apresenta valores aceitáveis de f_r considerando velocidades V de até 128 Km/h. Para veículos de passeio que trafegam em piso de concreto ou asfalto é considerado um coeficiente de resistência ao rolamento de 0,013 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

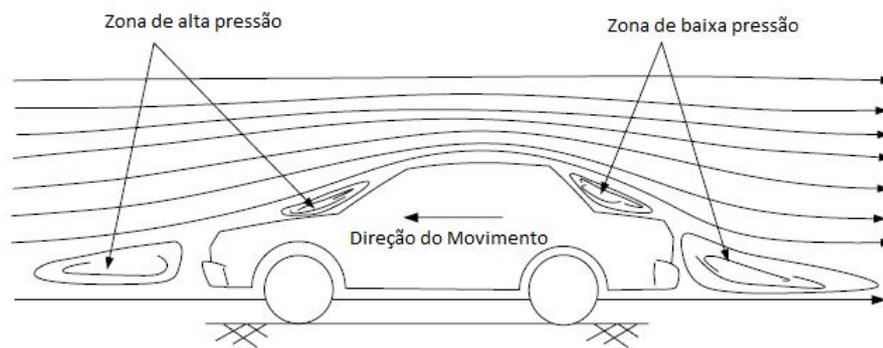
$$f_r = 0.01 \left(\frac{V}{160} \right) \quad (2.5)$$

2.1.2.2 Resistência aerodinâmica

Um veículo viajando com velocidade constante, está sujeito a uma força de resistência ao seu movimento, essa força é como resistência aerodinâmica. Resulta principalmente de dois componentes: forma de arrasto e atrito da superfície.

Quando um veículo se move em uma dada direção, ele empurra o ar à sua frente, criando uma zona de alta pressão. Somado a isso, o ar na parte de trás do veículo não consegue preencher de forma instantânea o vácuo gerado, criando uma zona de baixa pressão. Esse efeito de arrasto pode ser visualizado na Figura 6. Em contrapartida, o atrito de superfície é gerado pela diferença de velocidade entre as moléculas de ar que estão próximas a superfície do veículo e as que se encontram mais distantes.

Figura 6 – Representação do Efeito de Arrasto.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Essa força cresce à medida que a velocidade de deslocamento do veículo aumenta e é função de fatores como a área frontal do veículo e densidade do ar. Essa força de arraste aerodinâmico F_w pode ser calculada pela Equação 2.6 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$F_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot C_D (V - V_w)^2 \quad (2.6)$$

Sendo ρ a densidade do ar, A_f a área frontal do veículo, C_D o coeficiente de resistência aerodinâmica, V a velocidade do veículo e V_w a velocidade do vento.

2.1.3 Dinâmica do movimento

Existem três forças principais que atuam sobre o movimento do veículo, são elas: o atrito proveniente da resistência ao rolamento, F_r , a força de tração, F_t , e a força de arrasto aerodinâmico F_w . A maioria dos veículos convencionais de passageiros é contemplada com um sistema de tração aplicada unicamente em um eixo, seja ele frontal ou traseiro, sendo assim, a força do sistema de propulsão no eixo oposto é igual à zero. O movimento, de uma forma geral, pode ser expressado conforme a Equação 2.7 e compreende o somatório de todas as forças aplicadas nos eixos do veículo.

$$M \cdot \frac{\partial V}{\partial T} = M \cdot a = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_w + F_g) \quad (2.7)$$

Onde, F_{rf} e F_{rr} representam a resistência de rolamento dos pneus frontais e traseiros, respectivamente.

Fica exposto na equação 2.7, que no intuito de se produzir uma aceleração, as forças de tração devem ser superiores às forças de resistência a esse movimento. Existem parâmetros que devem ser respeitados no que diz respeito ao limite máximo de tração aplicada às rodas, uma vez que, é um parâmetro de segurança importante, pois, neste caso, existe perda de aderência entre os pneus e o solo, com isso o veículo perde estabilidade. Outro limite importante que deve ser respeitado é a força máxima de frenagem aplicada às rodas, que quando excedida pode levar a perda de estabilidade do veículo.

2.1.3.1 Força máxima de tração

Com o intuito de obter a força máxima de tração aplicável, deve-se dimensionar as cargas que atuam sobre os eixos de tração do veículo. Para se obter este valor é necessário realizar um somatório dos respectivos torques de tração. A Equação 2.8 e a Equação 2.9 descrevem as forças normais para os eixos dianteiro W_f e traseiro W_r , respectivamente (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$W_f = \frac{M.g.L_b.\cos(\alpha) - \left(T_{rf} + T_{rr} + F_w.h_w + M.g.h_g.\sin(\alpha) + M.h_g.\frac{\partial V}{\partial t}\right)}{L} \quad (2.8)$$

$$W_r = \frac{M.g.L_a.\cos(\alpha) - \left(T_{rf} + T_{rr} + F_w.h_w + M.g.h_g.\sin(\alpha) + M.h_g.\frac{\partial V}{\partial t}\right)}{L} \quad (2.9)$$

Como o foco do estudo são veículos convencionais, 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 . A força de tração total é dada pela soma das forças de tração de cada eixo, $F_t = F_{tf} + F_{tr}$. Levando em conta essas considerações, as Equações 2.8 e 2.9 podem ser simplificadas como apresentado abaixo pela Equação 2.10 e pela Equação 2.11 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$W_f = \frac{L_b}{L}.M.g.\cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \left(F_w + F_g + M.g.f_r.\frac{r_d}{h_g}.\cos(\alpha) + M.\frac{\partial V}{\partial t}\right) \quad (2.10)$$

$$W_r = \frac{L_a}{L}.M.g.\cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \left(F_w + F_g + M.g.f_r.\frac{r_d}{h_g}.\cos(\alpha) + M.\frac{\partial V}{\partial t}\right) \quad (2.11)$$

Como resultado final temos que,

$$W_f = \frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \left(F_t - F_r \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \quad (2.12)$$

$$W_r = \frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \left(F_t - F_r \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \quad (2.13)$$

Sendo que F_r representa a força total de resistência ao rolamento dos pneus. Os termos $\frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha)$ e $\frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha)$, descrevem a carga estática que atua sobre os eixos quando o veículo está em repouso em uma dada superfície plana. Os termos mais a direita das equações, $\frac{h_g}{L} \left(F_t - F_r \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right)$, representam a componente dinâmica da carga sobre o eixo (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Tendo como base os conceitos acima, para calcular 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 a superfície, dado por μ . Novamente, considerando que a tração do veículo seja aplicada ao eixo dianteiro, a máxima força aplicável é dada pelas Equações 2.14 e 2.15 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$F_{tmax} = \mu \cdot W_f = \mu \cdot \left[\frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \cdot \left(F_{tmax} - F_r \cdot \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \right] \quad (2.14)$$

$$F_{tmax} = \frac{\mu \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \left[L_b + \frac{f_r \cdot (h_g - r_d)}{L} \right]}{1 + \mu \cdot \frac{h_g}{L}} \quad (2.15)$$

As equações 2.16 e 2.17 apresentam de forma similar a força total de tração para veículos com sistema de propulsão no eixo traseiro (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$F_{tmax} = \mu \cdot W_f = \mu \cdot \left[\frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \frac{h_g}{L} \cdot \left(F_{tmax} - F_r \cdot \left(1 - \frac{r_d}{h_g} \right) \right) \right] \quad (2.16)$$

$$F_{tmax} = \frac{\mu \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \left[L_a + \frac{f_r \cdot (h_g - r_d)}{L} \right]}{1 + \mu \cdot \frac{h_g}{L}} \quad (2.17)$$

Como já foi apresentado, as características da superfície onde o veículo se encontra estão diretamente ligadas ao coeficiente de aderência. Partindo desse princípio, a propulsão depende da possível força máxima longitudinal aplicável entre os pneus e o piso, e não da máxima potência que o sistema de tração do veículo pode efetivamente aplicar. A aderência dos pneus a superfície está vinculada com o valor de deslizamento dos pneus. Este deslizamento percentual para regimes de propulsão S_t e de frenagem S_b estão descritos pelas Equações 2.18 e 2.19 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$S_t = \left(1 - \frac{V}{r_d \cdot \omega}\right) \cdot 100\% \quad (2.18)$$

$$S_b = \left(1 - \frac{r_d \cdot \omega}{V}\right) \cdot 100\% \quad (2.19)$$

V se refere à velocidade de translação do centro do pneu, o raio do pneu e a velocidade angular. Como o produto é superior à velocidade, o valor de S está compreendido entre 0 e 1. A máxima força de tração do pneu é função deste escorregamento e normalmente é expressa pela Equação 2.20 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$F_x = P \cdot \mu(S) \quad (2.20)$$

2.1.3.2 Força máxima de frenagem

O sistema de frenagem automotiva tem por objetivo reduzir a velocidade do veículo quando necessário. Trata-se de uma parte essencial do projeto de um veículo, garantindo uma operação segura. Em regiões urbanas, onde o regime de operação é caracterizado por muitas partidas e paradas, o sistema de freio mecânico dissipa uma enorme quantidade de energia, perdida na forma de calor. Durante a frenagem, uma transferência de massa do eixo traseiro para o dianteiro acontece, isso altera as forças sobre os eixos e o centro de gravidade do veículo. Seja qual for o tipo de frenagem utilizada, regenerativa ou mecânica convencional, é de suma importância garantir a estabilidade do automóvel ao se aplicar uma distribuição de forças de frenagem nos eixos (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$j = \frac{F_{bf} + F_{br}}{M} \quad (2.21)$$

Sendo F_{bf} e F_{br} , as forças de frenagem atuantes nos eixos frontal e traseiro, respectivamente.

No processo de frenagem por fricção, a força de frenagem F_b , aplicada, é quantizada pela relação de atrito entre os componentes de frenagem do sistema hidráulico responsáveis por gerar um torque de frenagem dado por $T_b = r_d \cdot F_b$. Nota-se que o torque de frenagem é diretamente proporcional a força de frenagem. Sendo assim, a força de frenagem máxima aplicável está diretamente ligada a capacidade de aderência dos pneus do veículo a superfície, de maneira similar a tração. No Brasil, todos os veículos já vem de fábrica com os chamados, Sistemas de frenagem com controle de bloqueio, também conhecido como ABS (*Antilock Brake System*). Nesse sistema, a desaceleração máxima do veículo é limitada pelo coeficiente de aderência. Esse sistema garante que as rodas não travem e os pneus derrapem (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

2.1.4 Desempenho dos veículos

Para quantizar o desempenho máximo de um veículo, do ponto de vista da força de tração aplicável, deve-se levar em conta dois parâmetros fundamentais. Em primeiro lugar, tem-se o limite da força máxima de tração, que está relacionada à aderência dos pneus ao solo. Em segundo lugar, a máxima força de tração disponível nas rodas em função do torque fornecido pelo MCI. O desempenho dinâmico do veículo é delimitado pelo menor destes fatores. Para se determinar o desempenho dos veículos, são levados em conta três indicadores, velocidade máxima, capacidade de subida e aceleração (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

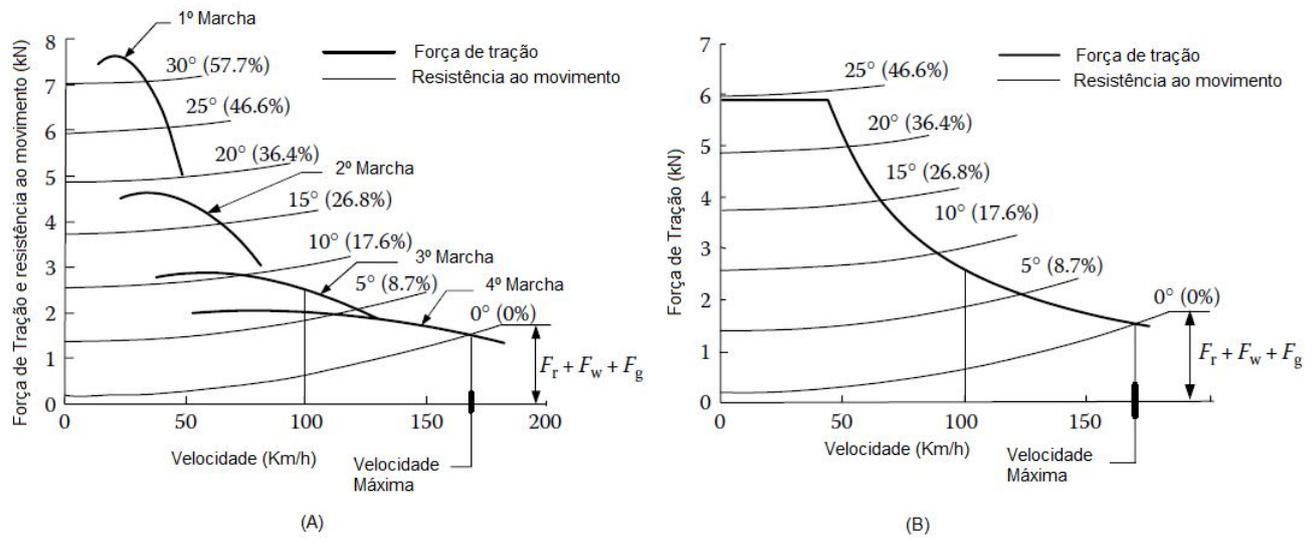
2.1.4.1 Velocidade máxima

A velocidade máxima é definida como a velocidade final constante que o veículo consegue alcançar em uma pista plana. Para essas condições o motor de tração exerce sua maior potência. Assim, essa velocidade corresponde ao momento no qual ocorre um balanceamento entre a força máxima de tração do veículo e a resistência ao deslocamento. A Figura 7 ilustra as características de força de tração dos sistemas de propulsão e das resistências (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Como apresentado na Figura 7 a resistência ao deslocamento cresce com o aumento da velocidade e da inclinação da pista. A velocidade máxima atingida em cada marcha é dada nos pontos de interseção entre as curvas de tração e resistência. Esse veículo em particular, consegue atingir um velocidade superior a 150 km/h, considerando uma pista sem nenhuma inclinação. O equilíbrio destas forças pode ser expresso conforme a equação 2.22 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} = M \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_f \cdot V^2 \quad (2.22)$$

Figura 7 – Relação Força de Tração com a Resistência ao deslocamento (A) Transmissão de múltiplas velocidades (B) Transmissão de uma velocidade.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Sendo que i_g é a razão entre velocidade de entrada e a velocidade de saída do sistema de transmissão, i_0 equivale a relação entre velocidade de entrada e saída do diferencial e η_t a eficiência de todo o conjunto. A Equação 2.22 mostra que o veículo irá atingir a velocidade máxima quando a força de tração, representada por $\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d}$, for igual à resistência ao deslocamento, representada por $M \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_f \cdot V^2$ (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Em veículos esportivos ou de desempenho elevado, onde os motores de tração possuem uma potência elevada, não existe uma interseção entre a curva de força de tração e a de resistência ao deslocamento. O que ocorre nesses casos é que a velocidade máxima alcançável pelo veículo fica limitada a velocidade do sistema de tração do veículo (EHSANI; GAO; EMADI, 2009). Isso fica evidenciado na Equação 2.23, onde n_{pmax} representa a velocidade máxima do motor do sistema de tração do veículo e i_{gmin} é a mínima relação de redução do sistema de transmissão (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$V_{max} = \frac{\pi \cdot n_{pmax} \cdot r_d}{30 \cdot i_0 \cdot i_{gmin}} [m/s] \quad (2.23)$$

2.1.4.2 Capacidade de subida

O termo *gradeability* como também é conhecida a capacidade de subida de um veículo, representa a capacidade do mesmo de se manter em uma velocidade constante, em uma pista de uma dada inclinação. Ao se deslocar em velocidade constante em pista

com inclinação baixa, a força de tração equilibra-se com as resistências, conforme descrito pela Equação 2.24 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} = M \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2 + M \cdot g \cdot i \quad (2.24)$$

Evidenciando a variável i , a Equação 2.24 se apresenta como,

$$i = \frac{\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2}{M \cdot g} = d - f_r \quad (2.25)$$

A variável d representa o fator de desempenho, podendo ser escrita como apresenta a Equação 2.26.

$$d = \frac{F_t - F_w}{M \cdot g} = \frac{\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2}{M \cdot g} \quad (2.26)$$

No caso de superfícies com grande inclinação, o fator de desempenho pode ser expresso pela relação apresentada na Equação 2.27 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{d - f_r \cdot \sqrt{1 - d^2 + f_r^2}}{1 + f_r^2} \quad (2.27)$$

2.1.4.3 Desempenho de aceleração

Para determinar esse parâmetro leva-se em consideração duas variáveis, o tempo e a velocidade. Trata-se do tempo necessário para que o veículo atinja uma dada velocidade, por exemplo, zero a 100 km/h. Esses resultados são obtidos com base em testes em uma superfície plana. Para determinar a aceleração toma-se como base a segunda Lei de Newton, como apresentado na Equação 2.28 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$a = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{F - t - F_f - F_w}{M \cdot \delta} \quad (2.28)$$

Substituindo F_t, F_f e F_w pelas suas expressões ilustradas anteriormente, pode-se reescrever a aceleração em uma forma mais completa, conforme apresentado abaixo pela Equação 2.29 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$a = \frac{\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2}{M \cdot \delta} \quad (2.29)$$

Sendo que δ representa o fator de inércia rotacional, que resulta do aumento da massa equivalente devido aos momentos angulares dos componentes rotativos. Esse fator pode ser descrito pela Equação 2.30 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$\delta = 1 + \frac{I_W}{M \cdot r_d^2} + \frac{i_0^2 \cdot i_g^2 \cdot I_p}{M \cdot r^2} \approx 1 + 0,04 + 0,0025 \cdot i_0^2 \cdot i_g^2 \quad (2.30)$$

Sendo que I_W representa o fator de inércia angular das rodas e I_p o fator de inércia angular do motor. Partindo da equação da aceleração, podem ser deduzidas as fórmulas de cálculo para o tempo de aceleração, como formulado na Equação 2.31 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

$$t_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\delta \cdot M}{\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2} dV \quad (2.31)$$

Já a distância percorrida na fase de aceleração pode ser calculada conforme a Equação 2.32.

$$S_a = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\delta \cdot M \cdot V}{\frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2} dV \quad (2.32)$$

2.2 Veículos elétricos híbridos

Um VEH possui duas ou mais fontes de energia, existindo uma enorme gama de projetos e variações deste tipo de veículo. Os modelos mais comuns combinam um MCI com algum tipo de bateria, um motor elétrico e um gerador. Existem dois arranjos básicos para os VEH, o híbrido série e o híbrido paralelo (LARMINIE; LOWRY, 2012). A presença de dois tipos de motores tem por objetivo um melhor desempenho e uma melhor economia de combustível, isso é feito por meio da combinação de componentes que apresentam melhor eficiência em diferentes pontos de operação.

2.2.1 Conceitos da arquitetura híbrida e níveis de hibridização

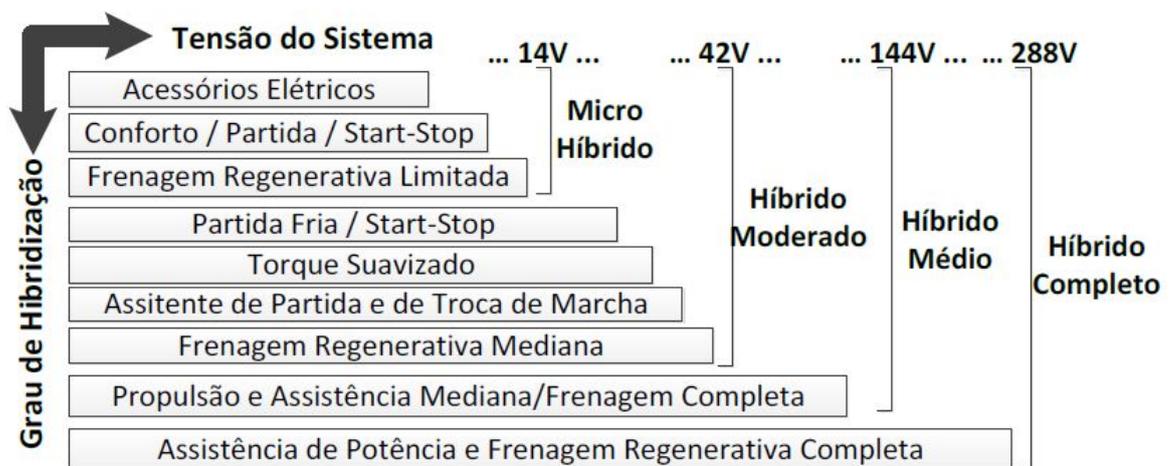
Os veículos híbridos podem ser divididos em subcategorias com base em suas características operacionais de tração. Segundo Magalhães (2014), a forma de operação do sistema de frenagem regenerativa pode influenciar diretamente na classificação. Diz-se que quanto maior a complexidade e o nível de eficiência de um sistema híbrido, maior é seu grau de liberdade. Os veículos híbridos podem ser divididos em quatro classes, sendo do menor para o maior, denominados Micro Híbrido, Híbrido Moderado, Híbrido Médio e Híbrido Completo. A Figura 8 ilustra as particularidades dessas variantes (SILVA, 2017).

Conforme se eleva o grau de hibridização, novos modos de operação e funcionalidades implicam em um sistema elétrico embarcado mais complexo e em níveis de tensão mais elevados. De acordo com Larminie e Lowry (2012), 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 2.33. 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 (SILVA, 2017).

$$DOH = \frac{Pot_{ME}}{Pot_{ME} - Pot_{MCI}} \tag{2.33}$$

Onde Pot_{ME} representa a potência do motor elétrico e Pot_{MCI} a potência do Motor de combustão interna.

Figura 8 – Classificação dos VEH quanto ao grau de Hibridização.

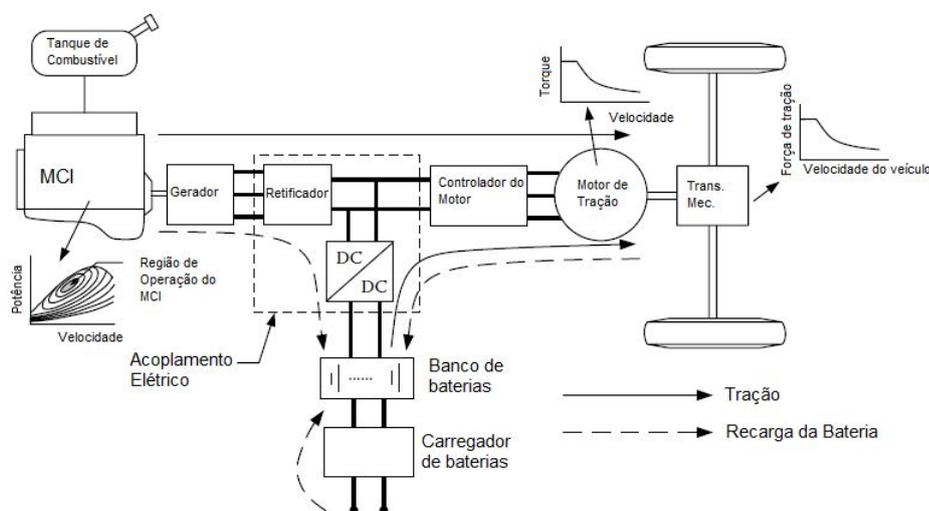


Fonte: (SILVA, 2017).

2.2.2 Veículos Elétricos Híbridos Série

O tipo híbrido série possui toda a sua força de tração provida por um ou mais motores elétricos que são alimentados tanto por um banco de baterias quanto por um gerador acionado por um MCI (LARMINIE; LOWRY, 2012). Originalmente aplicada à VE, essa arquitetura foi proposta para aumentar a autonomia do veículo. Para tanto, além do banco de baterias originalmente instalado, foi adicionado ao projeto um MCI acoplado a um gerador (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Figura 9 – *Layout* de um modelo híbrido série.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

A Figura 9 exemplifica a implementação de um VEH série, onde duas diferentes fontes de energia alimentam um barramento elétrico que proporciona a potência necessária para operar os motores de tração, estes conectados as rodas por meio de um sistema de transferência mecânica. A primeira fonte de energia é composta por um tanque de combustível, um MCI e um gerador, tratando-se de uma montagem unidirecional. A saída do gerador é conectada ao barramento *c.c.* do veículo através de um conversor eletrônico controlado (retificador). A segunda fonte de energia trata-se de um banco de baterias conectadas ao barramento *c.c.* por meio de um conversor controlado e bidirecional (conversor *c.c.-c.c.*). O barramento principal também está conectado ao controlador que gerencia a operação do motor elétrico de tração, este, por sua vez, pode assumir tanto a operação de motor, quanto a de gerador. Por fim, o banco de baterias pode precisar de uma fonte externa de energia para operar plenamente, assim um carregador fornece a opção de utilizar o sistema de potência (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Para o VEH operar como previsto, é necessária a implementação de um controlador para gerenciar a operação e o fluxo de potência, levando em conta as ações sob os pedais de freio e aceleração realizadas pelo motorista. Esse componente irá controlar a operação

do MCI, do retificador controlável, do conversor *c.c.-c.c.* e do motor de tração demandando torque de propulsão ou apresentando a frenagem regenerativa (EHSANI; GAO; EMADI, 2009). Assim, existem alguns modos de operação básicos aos quais os componentes de controle e de potência estão sujeitos durante a plena operação do veículo.

Vantagens e desvantagens

Algumas das vantagens presentes na arquitetura de um VEH série são citadas a seguir:

1. Não existe conexão mecânica entre o motor de combustão interna e as rodas. Consequentemente, o MCI pode ser potencialmente operado em qualquer ponto da curva de Torque x Velocidade (potência). Essa vantagem distinta, combinada com uma sofisticada estratégia de controle de fluxo de potência, fornece uma oportunidade de se operar o MCI em sua região de máxima eficiência, como mostrado na Figura 9.
2. Pelo fato de motores elétricos terem um perfil de torque-velocidade, que é quase ideal para aplicações de tração, existem possibilidades de se eliminar uma transmissão complexa com multi-engrenagens. Isso simplifica o projeto e acaba por diminuir os custos de implementação.
3. A estratégia de controle pode ser simplificada, comparada com outras configurações, por conta do total desacoplamento entre rodas e MCI.

Mesmo apresentando algumas vantagens significativas a arquitetura do VEH série apresenta pontos fracos, são eles:

1. A energia aplicada ao motor muda de característica duas vezes antes de atingir seu destino final (mecânica para elétrica no gerador e elétrica para mecânica no motor de tração). As ineficiências tanto por parte do gerador como por parte do motor acabam por infligir grandes perdas.
2. O gerador representa tanto um custo adicional, como também agrega mais peso ao projeto final.
3. O fato de a máquina elétrica de tração ser a única fonte de propulsão do veículo, gera a necessidade de o componente ser dimensionado para uma operação otimizada tanto em termos de desempenho na aceleração como em autonomia.

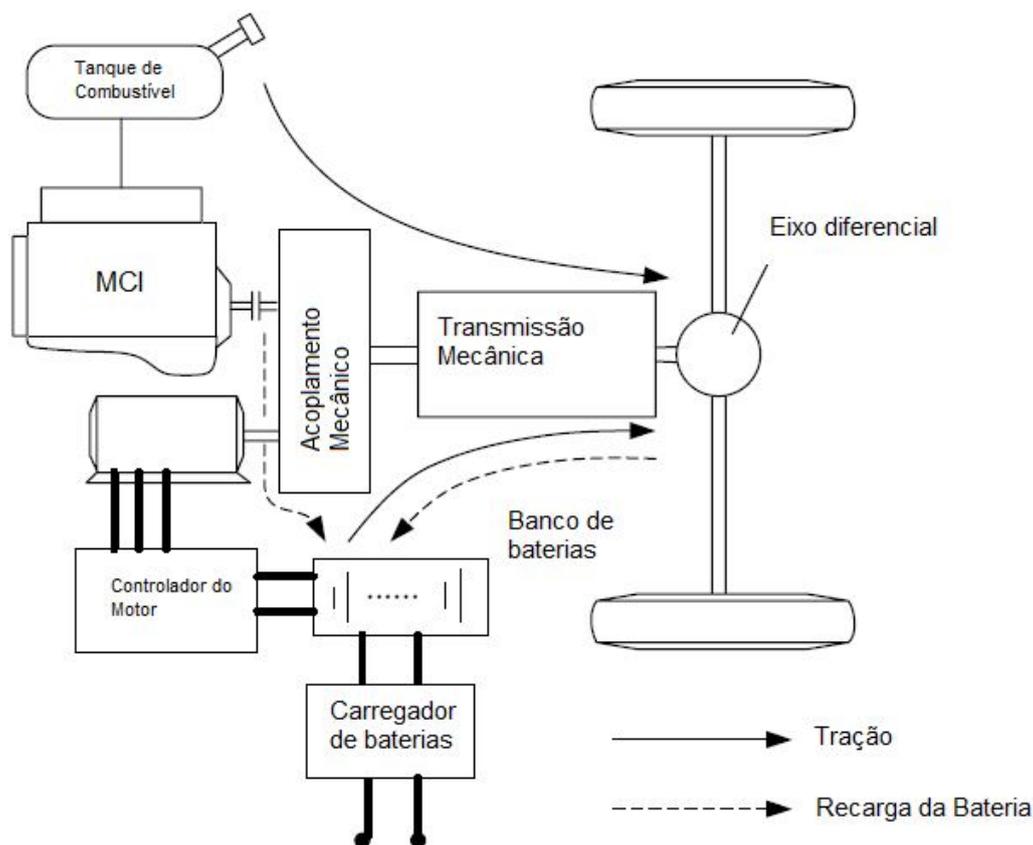
2.2.3 Veículos Elétricos Híbridos Paralelos

Por outro lado, na operação em híbrido paralelo o veículo pode ser conduzido ou por um MCI conectado diretamente ao sistema de transmissão e as rodas, ou por ambos

motores elétricos e MCI ao mesmo tempo. Como nesse modelo as máquinas elétricas não têm que converter toda a energia, elas são de menor porte e mais baratas, o que acaba por viabilizar a implementação. Todos os modos de operação presentes na configuração de um VEH série continuam efetivos (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Em um típico modo de operação em um VEH, o motor/gerador elétrico utiliza energia do banco de baterias e funciona como um motor para mover o veículo na partida e a baixas velocidades, sendo neste momento fornecida melhor relação de torque, assim, o MCI só começa a atuar em altas velocidades, onde consegue obter uma melhor eficiência. Uma vez em operação o MCI começa a carregar o banco de baterias através da máquina elétrica que agora opera como gerador (POULLIKKAS, 2015). A Figura 10 ilustra o *Layout* do VEH paralelo.

Figura 10 – *Layout* de um modelo híbrido paralelo.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Vantagens e desvantagens

As maiores vantagens de um VEH paralelo com relação ao VEH série, são:

1. Ambos, MCI e motor elétrico, fornecem torque diretamente para as rodas, não

havendo processos de conversão de energia, o que acaba por eliminar parte das perdas sofridas.

2. É mais compacto devido ao fato de não haver a necessidade de um gerador conectado ao MCI e o motor elétrico de tração é menor.

Contudo, uma das maiores desvantagens se dá por conta do acoplamento mecânico entre o MCI e as rodas, o que torna impossível fixar os pontos de operação do motor na curva característica de torque-velocidade a fim de se obter uma melhor eficiência do mesmo. Outras desvantagens são a complexa estrutura demandada e a estratégia de controle (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

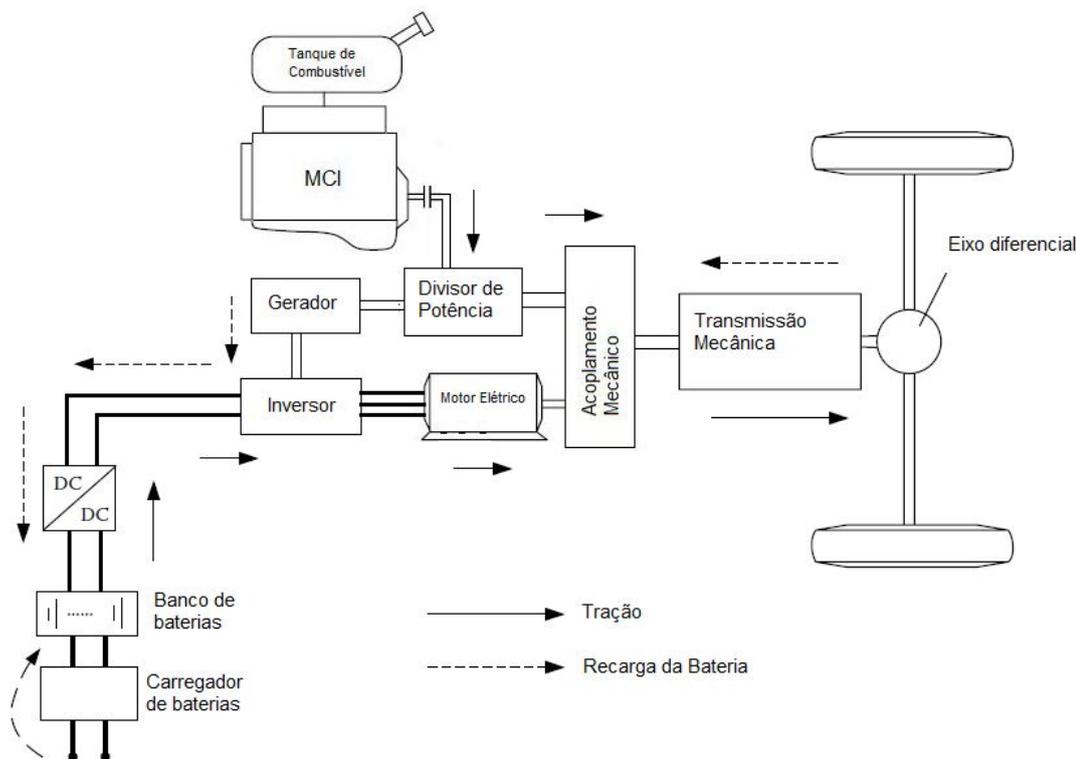
Geralmente, o acoplamento mecânico consiste de um balanceamento entre a capacidade de fornecer torque e a velocidade que o mesmo pode fornecer. Do ponto de vista do torque, o acoplamento mecânico soma as parcelas de torque vindas do MCI e do motor elétrico de tração, de modo a aplicar a resultante sobre as rodas. Cada uma das parcelas pode ser controlada de forma independente. Porém, as velocidades de ambos os meios de tração e do veículo em si devem ser sempre iguais e não podem ser controladas de maneira independente, por questões de conservação de energia (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

2.2.4 Veículos Elétricos Híbridos Série-Paralelo

Visando obter o melhor de ambas as arquiteturas, série e paralelo, os projetistas iniciaram o desenvolvimento de um veículo com a arquitetura série-paralelo. Nessa combinação o MCI é usado para fornecer tração as rodas, como para carregar as baterias. Um exemplo de modelo com essa arquitetura implementada é o Toyota Prius (HARLOW, 2005).

A figura 11 apresenta o *layout* de um VEH com a arquitetura série-paralelo. Um dispositivo divisor de potência é responsável por transferir a força de tração para as rodas, bem como para o gerador, usado para recarregar as baterias. O inversor possui uma configuração bidirecional e é usado no processo de recarga das baterias, como para alimentar o motor elétrico e transferir força de tração para as rodas. A ideia principal é garantir que tanto o MCI, como o motor elétrico, operem apenas em suas respectivas zonas de eficiência máxima (HARLOW, 2005).

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 2 apresenta as topologias de alguns dos híbridos presentes no mercado (SILVA, 2017).

Figura 11 – *Layout* de um modelo híbrido série-paralelo.

Fonte: Do autor.

Tabela 2 – Topologias utilizadas em VEH no mercado.

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

2.2.5 Elementos construtivos

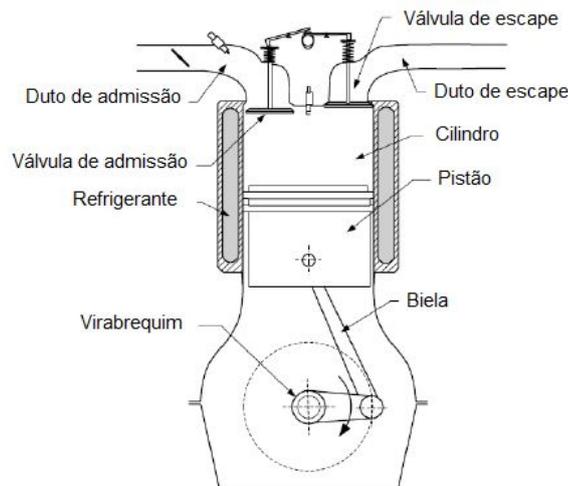
2.2.5.1 Motor de Combustão Interna

Motores de Combustão Interna (MCI) são equipamentos mecânicos capazes de converter a energia química, proveniente dos combustíveis, em energia mecânica, liberando calor no processo. O dado processo faz o uso da combustão e da expansão deste combustível. Existem dois tipos de MCI, os de ignição por compressão (Diesel) e os de ignição por centelha (Gasolina e Etanol). Cada tipo de motor é projetado para trabalhar com um ciclo

de trabalho específico, sendo que esses ciclos de trabalho, são baseados em dois tempos e em quatro tempos (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Os veículos automotores convencionais geralmente fazem uso dos motores de ignição por centelha de quatro tempos. Nesses motores de ignição por centelha, o processo de queima do combustível se dá a partir de uma centelha gerada pela vela de ignição (EHSANI; GAO; EMADI, 2009). A figura 12 apresenta a estrutura de um MCI de ignição por centelha de quatro tempos.

Figura 12 – Estrutura de um MCI de ignição por centelha de quatro tempos.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009) - Traduzida.

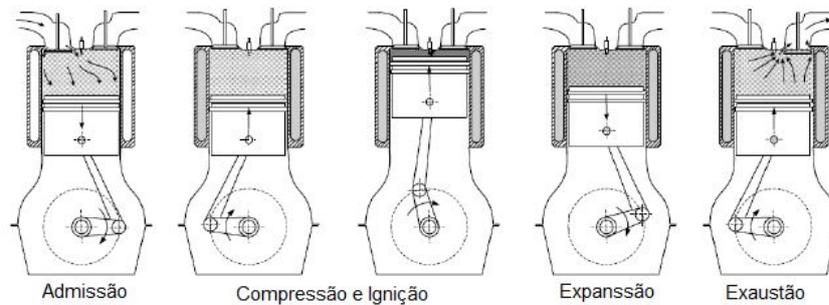
O ciclo de trabalho dos MCI de ignição por centelha compreende os seguintes passos:

1. Admissão (Primeiro tempo): A válvula de admissão se abre, assim ocorre a admissão da mistura ar e combustível para dentro da câmara de combustão. Neste momento, o pistão se posiciona na parte inferior da câmara;
2. Compressão (Segundo tempo): A válvula de admissão se fecha e o pistão inicia o deslocamento vertical em direção ao topo da câmara, comprimindo a mistura ar combustível. Essa compressão resulta em um aumento da pressão e da temperatura interna. Para gerar a explosão, a vela gera uma centelha no interior da câmara;
3. Expansão (Terceiro tempo): Nesse momento ambas as válvulas de admissão e escape se mantêm fechadas, dessa forma a explosão provocada no interior do cilindro faz com que o pistão se desloque para a parte inferior novamente;
4. Exaustão (Quarto tempo): Deslocado o cilindro para a parte inferior da câmara, a válvula de escape se abre para que os gases provenientes da queima do combustível sejam liberados. Graças a diferença de pressão entre o ambiente externo e o interior

da câmara, a exaustão acontece de forma natural. Concluído o quarto tempo o processo se reinicia.

A figura 13 apresenta um ciclo completo de um MCI por ignição de quatro tempos.

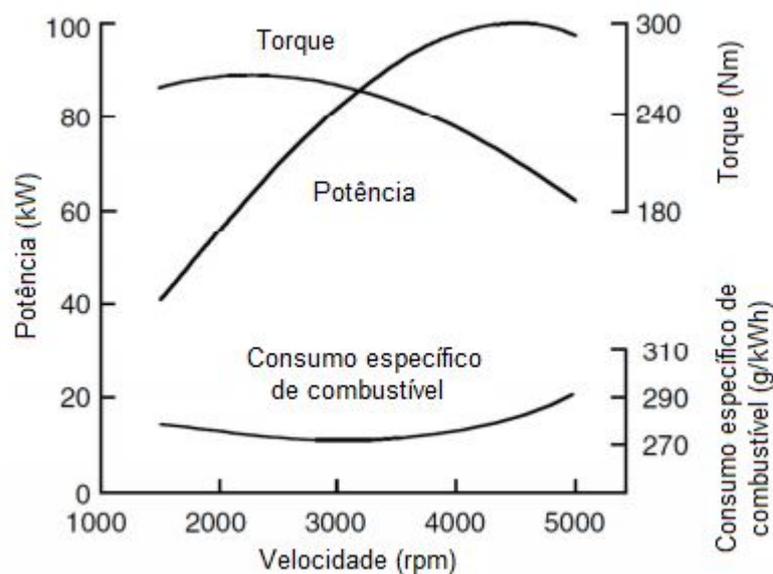
Figura 13 – Ciclos de um MCI de quatro tempos.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009) - Traduzida.

Diversas abordagens podem ser usadas no dimensionamento de um MCI. Do ponto de vista da modelagem da dinâmica longitudinal e para a estimativa de consumo de combustível, os parâmetros de interesse são: potência, torque e consumo específico de combustível (SOUZA et al., 2010). As características desses três parâmetros podem ser obtidas de um gráfico semelhante ao apresentado na Figura 14 (EMADI et al., 2005).

Figura 14 – Curvas características de torque, potência e consumo específico de combustível de um MCI, operando em máximo desempenho.

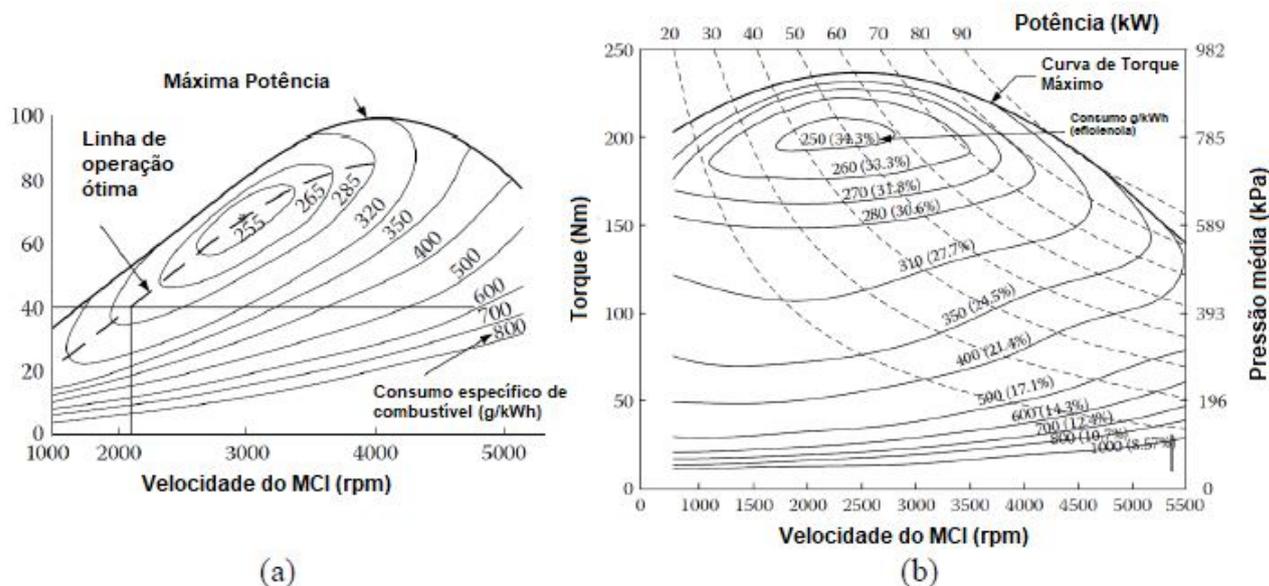


Fonte: (EMADI et al., 2005) - Traduzida.

A curva de consumo específico de combustível apresentada na Figura 14 é válida apenas para o caso em que o MCI está operando em sua condição de máximo desempenho.

Assim, para estimar o consumo de combustível de um veículo ao longo de um dado ciclo de condução, é necessário determinar o consumo específico do MCI para todas as combinações de torque e rotação, ou seja, para todos os seus pontos de operação. Para se obter essa informação são aplicados mapas de consumo como o mostrado na Figura 15. É possível observar na Figura 15 – (a) que o MCI quando operado em baixas velocidades dispõe de uma potência reduzida com baixa eficiência. Ao se aumentar a velocidade de rotação, aumenta-se também a disponibilidade de potência. Observa-se que a região de máxima eficiência ocorre nas velocidades intermediárias, bem como a região de máxima potência para velocidades próximas a máxima. De forma análoga pode-se observar a Figura 15 (b), porém o mapa de eficiência se encontra em função do torque máximo (SOUZA et al., 2010) (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Figura 15 – 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.



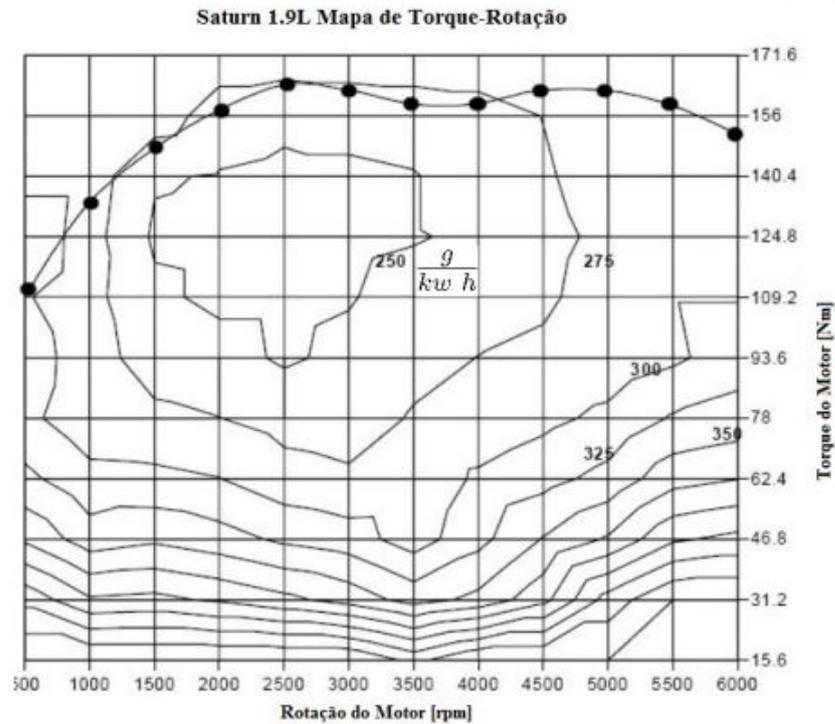
Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009) - Traduzida.

Essa ferramenta permite que sejam visualizados os contornos de eficiência e consumo específico constantes, os resultados são obtidos em laboratório que utilizam dinamômetros e medidores de vazão de combustível. Tais contornos podem ser traçados em um gráfico que pode ser de torque, potência ou pressão média efetiva, todos em função da rotação do motor (SOUZA et al., 2010).

Consumo de combustível

O consumo de combustível do veículo é estimado com base em um mapa de consumo do motor conforme a Figura 16, onde existem diversas regiões de operação do motor a combustão sendo estas dependentes do torque e rotação do mesmo.

Figura 16 – Curva de consumo de um motor combustão de interna.



Fonte: EcoMolder 2012 - Imagem adaptada.

O consumo de combustível é definido pela Equação 2.34.

$$C_l = C_e \frac{Pot \cdot dt}{\rho_c} \quad (2.34)$$

Onde C_l é o volume consumido de combustível, Pot é a potência do motor, dt o intervalo de tempo, ρ_c a massa específica do combustível.

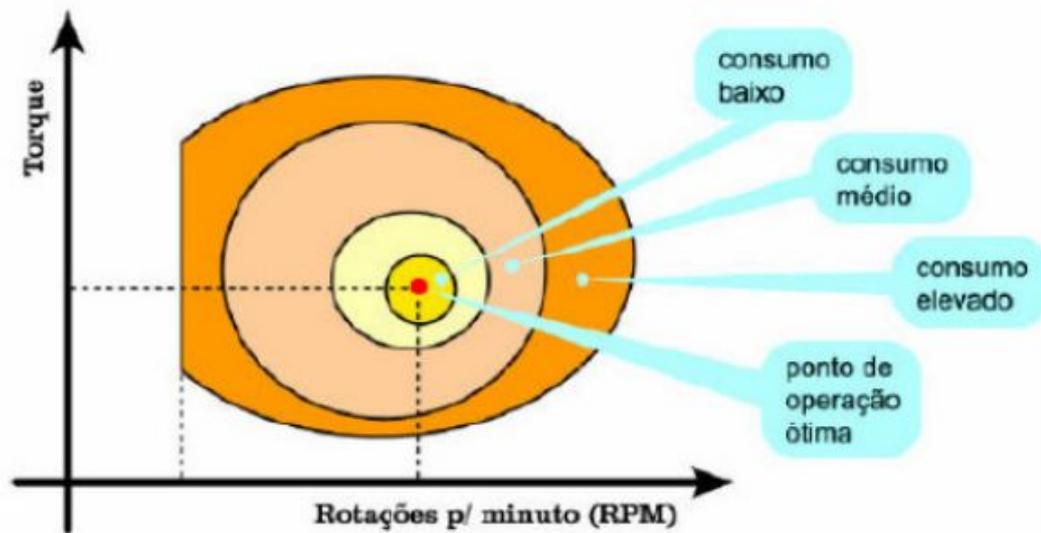
Eficiência do MCI

Otimizar o comportamento do motor significa fazê-lo operar perto do ideal para alguma dessas três características, atingindo a máxima aceleração (máximo torque), velocidades mais altas (máxima potência) e melhor economia e eficiência do motor (mínimo consumo específico). Normalmente a estratégia mais visada é a de melhor economia e eficiência (EHSANI; GAO; EMADI, 2009). A Figura 17 mostra um mapa esquemático de eficiência do motor a combustão em função do torque e rotação do mesmo.

2.2.5.2 Sistema de transmissão

Diversos modelos de transmissões manuais e automáticas estão presentes no mercado de veículos convencionais. Cada uma delas, embora executem a mesma função em

Figura 17 – Mapa esquemático de eficiência motor de combustão interna.



Fonte: (OLIVEIRA, 2005).

veículos automotores, foi desenvolvida com uma metodologia diferente. Mesmo com tanta diversidade, o modelo mais utilizado é a transmissão manual, que 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 (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

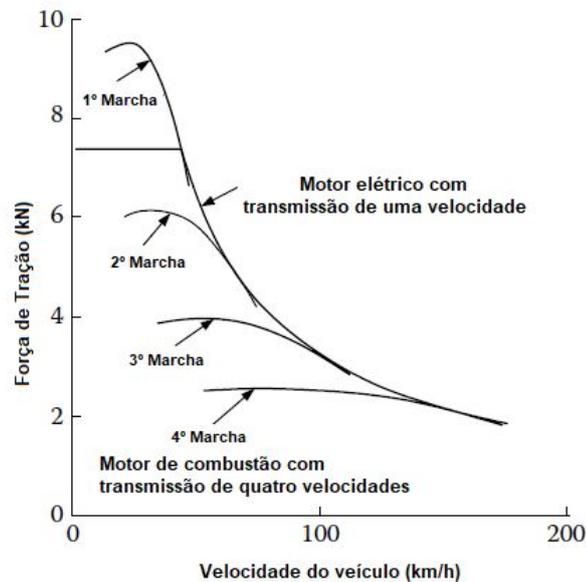
Na Figura 15 (b), o comportamento de torque por velocidade é relativamente plano. O objetivo da transmissão com múltiplas reduções de velocidades, é obter uma aproximação ao comportamento ideal desejado. Esse efeito está apresentado abaixo pela Figura 18.

As equações a seguir tem como base a formulação dos autores Ehsani, Gao e Emadi (2009). Assim, as velocidades das caixas de transmissão superiores (relações de redução inferiores) correspondem a velocidade máxima do veículo. De forma oposta, as reduções maiores correspondem a velocidades menores, contudo, as forças de tração entregues pela transmissão são superiores. A Equação 2.35 representa uma transmissão manual de cinco velocidades.

$$\frac{i_{g1}}{i_{g2}} = \frac{i_{g2}}{i_{g3}} = \frac{i_{g3}}{i_{g4}} = \frac{i_{g4}}{i_{g5}} = K_g \quad (2.35)$$

Sendo que $i_{g1}, i_{g2}, \dots, i_{g5}$ fazem referência as relações de engrenagens para cada uma das respectivas velocidades. Dessa forma, o fator K_g pode ser expresso conforme a

Figura 18 – Característica de torque de MCI com transmissão de várias velocidades e Motores Elétricos de única velocidade.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009) - Traduzida.

Equação 2.36, onde n_g é o número de velocidades da transmissão.

$$K_g = n_g \sqrt{\frac{i_{g1}}{i_{gn}}} \quad (2.36)$$

Para uma transmissão manual as relações de caixa de marcha seguem a forma apresentada abaixo pela equação 2.37. Esse é o modelo mais comum encontrado em veículos convencionais.

$$\frac{i_{g1}}{i_{g2}} > \frac{i_{g2}}{i_{g3}} > \frac{i_{g3}}{i_{g4}} > \frac{i_{g4}}{i_{g5}} > K_g \quad (2.37)$$

2.2.5.3 Frenagem regenerativa

Em sistemas de freios convencionais, a energia cinética de um veículo em movimento é dissipada na forma de calor quando se tem a necessidade de reduzir a velocidade de movimento. Uma das principais vantagens apresentadas pelos VE e VEH é a capacidade de frenagem regenerativa, nesse sistema a energia cinética é convertida em outra forma de energia que é utilizada para recarregar parcialmente os sistemas de armazenamento de energia (SAE) do automóvel (baterias, reservatórios de ar comprimido, ultracapacitores,

etc). Na arquitetura de um VEH, por exemplo, a máquina elétrica (ME) atua de forma contrária ao movimento, agindo como gerador ao mesmo tempo em que recarrega as baterias (REIF, 2014). Mesmo com todas as vantagens da frenagem regenerativa, em situações extremas o sistema de freio convencional ainda se faz necessário, isso porque as MEs não têm torque suficiente para parar o carro de forma repentina. Um outro fator limitador é a condição de carga do SAE, uma vez que, quando as baterias estão com seu estado de carga próximo de 100% ou apresentam temperaturas elevadas, o uso da frenagem regenerativa pode danificar o SAE (EHSANI; GAO; EMADI, 2009).

Segundo um estudo a respeito do potencial da aplicação da frenagem regenerativa apresentado por Santiciolli et al. (2013), uma economia de combustível da ordem de 16,5% pode ser alcançada utilizando-se apenas a frenagem regenerativa em um VEH. Para tanto, o autor considera as condições impostas pelo ciclo de condução padrão brasileiro (NBR6601), bem como, um VEH equipado com um ME de 100% de eficiência, capaz de recuperar toda a energia cinética do automóvel durante as frenagens e de utilizá-la para acelerá-lo logo em seguida. Embora o estudo seja baseado em uma condição ideal, ele comprova a influência dessa tecnologia no desempenho geral de um automóvel.

A energia dissipada nos freios de um veículo convencional em um ciclo de condução urbano, chega a representar 25% da energia total consumida para a tração do mesmo. Em áreas de grande densidade demográfica, onde os automóveis andam e param com maior frequência por conta do trânsito e de possíveis congestionamentos o valor se eleva, podendo chegar a 70% (EHSANI; GAO; EMADI, 2009). O impacto gerado pelo uso da frenagem regenerativa pode reduzir significativamente o consumo de combustível de um veículo. Um outro ponto positivo é a diminuição da utilização dos componentes do sistema de freio convencional, aumentando sua vida útil (FUHS, 2008).

Exitem no entanto, alguns pontos que devem ser levados em consideração ao se aplicar a frenagem regenerativa em um veículo, por exemplo, a distribuição da força de frenagem entre o eixo dianteiro e o eixo traseiro é vital para se manter a estabilidade direcional. Com o aumento gradativo da desaceleração, a força normal das rodas dianteiras tende a aumentar enquanto que de maneira inversa, nas rodas traseiras a força normal tende a diminuir. Assim, para um veículo que possui tração elétrica no eixo traseiro, o torque elétrico disponível para regeneração de energia é inversamente proporcional a desaceleração, evitando que o limite de aderência do pneu com o solo seja ultrapassado, causando a perda de controle do veículo. Um ponto negativo da configuração descrita, é que a transferência longitudinal de carga durante a frenagem, limita a capacidade de regeneração das MEs montadas nas rodas traseiras. Uma forma de se remover esse problema e recuperar maiores quantidades de energia, é eletrificar as rodas dianteiras do veículo, possibilitando a utilização de torques mais elevados durante a frenagem regenerativa sem causar perda de estabilidade (REIF, 2014). Outra alternativa, embora muito mais complexa, seria a eletrificação das quatro rodas, permitindo explorar ao máximo a recuperação da

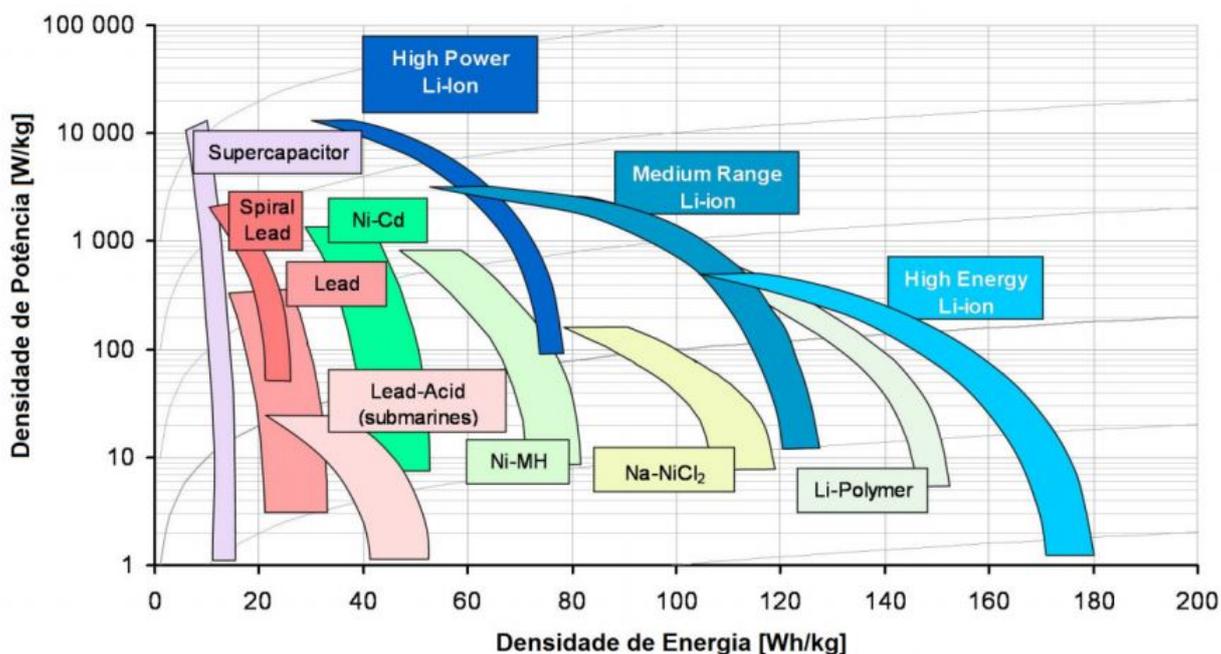
energia cinética do veículo durante as frenagens.

2.2.5.4 Sistemas de armazenamento de energia

Uma breve apresentação do estado-da-arte em sistemas de armazenamento de energia é feita, bem como uma análise de cada opção apresentada, em termos de densidade de potência e de energia. Algumas opções vêm sendo estudadas e apresentam um futuro promissor, sendo em algumas situações já utilizadas comercialmente ou em projetos de protótipos de veículos.

Para comparar de maneira sucinta como diferentes tipos de tecnologias utilizadas para armazenar energia se comportam, pode-se usar o diagrama de Ragone. Essa ferramenta consiste em um gráfico log-log cujos eixos se referem a densidade de potência (W/kg) e a densidade de energia (Wh/kg). Para que se apresente as características de dispositivos tão variados em um mesmo gráfico, é necessário utilizar a escala logarítmica em ambos os eixos. A Figura 19 apresenta o diagrama supracitado. (BRAVO et al., 2016)

Figura 19 – Diagrama de Ragone para baterias e supercapacitores.



Fonte: (BRAVO et al., 2016).

2.2.5.5 Bancos de baterias

Nos VEH, a bateria, que atua tanto no sentido de fornecer energia elétrica, como também no de armazenar a mesma, é um componente chave do projeto. Pode-se definir uma bateria como duas ou mais células elétricas combinadas. As células convertem

energia química em energia elétrica. Cada célula consiste de um eletrodo positivo e um negativo combinados em um eletrólito. É a reação química entre os eletrodos e o eletrólito que gera a energia *c.c.*. Em caso de baterias recarregáveis, a reação química pode ser reversa, revertendo-se o sentido da corrente, colocando assim, a bateria em um estado de carregamento (LARMINIE; LOWRY, 2012).

Comparada com combustíveis fósseis, a densidade de energia das baterias atuais é significativamente baixa. Para alcançar uma autonomia razoável são necessárias grandes quantidades de baterias, o que afeta de uma modo negativo o projeto, uma vez que a massa final do veículo e o custo de produção tendem a aumentar (FRIESKE; KLOETZKE; MAUSER, 2013).

Para resolver os problemas supracitados, uma grande variedade de materiais usados na confecção de Eletrólitos, anodos e catodos, vem sendo investigada. Do ponto de vista de um projetista, a bateria pode ser tratada como uma "caixa preta" que tem como principais qualidades, performance e autonomia. Assim, diversos critérios são abordados, como energia específica, densidade de energia, potência específica, tensões típicas, eficiência em Amperes/Hora, eficiência energética, viabilidade comercial, custos, temperaturas de operação, taxas de auto-descarga, número de ciclos-vitais, taxas de recarregamento, etc (LARMINIE; LOWRY, 2012).

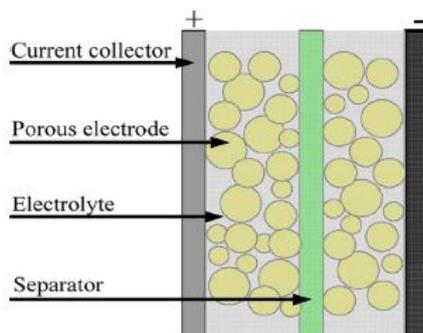
Ultracapacitores

Os ultracapacitores (UC) armazenam energia separando fisicamente cargas positivas e negativas. As cargas são armazenadas em duas placas paralelas divididas por um isolador. Uma vez que não ocorrem variações químicas nos eletrodos, os UC possuem um ciclo de vida superior, porém não possuem uma densidade de energia significativa. A Figura 20 apresenta a estrutura de uma unidade UC. Seu funcionamento ocorre por meio da aplicação de um potencial no eletrodo positivo, isso faz com que os íons negativos no eletrólito sejam atraídos, de forma análoga, os íons positivos são atraídos para o eletrodo negativo (KHALIGH; LI, 2010).

Quando comparado as baterias os UC possuem uma densidade de potência consideravelmente maior, isso é possível pelo fato das cargas estarem fisicamente alojadas nos eletrodos. Como esse tipo de SAE possui uma resistência interna muito baixa, acaba por atingir altos níveis de eficiência, contudo isso também pode gerar grandes correntes de saída se o UC for carregado a um estado de carga lento (RIBEIRO et al., 2001).

Em VEH, os UC podem ser usados como unidades de armazenamento auxiliares. Durante a utilização de um veículo em trânsito urbano, por exemplo, acontecem muitas paradas e partidas, nesse tipo de operação a potência total requerida é pequena. UC são também adequados para capturar a energia da frenagem regenerativa e rapidamente liberar potência para a aceleração do veículo, graças à alta velocidade de carga e descarga que possuem (LAM; LOUEY, 2006).

Figura 20 – Célula individual de um UC.

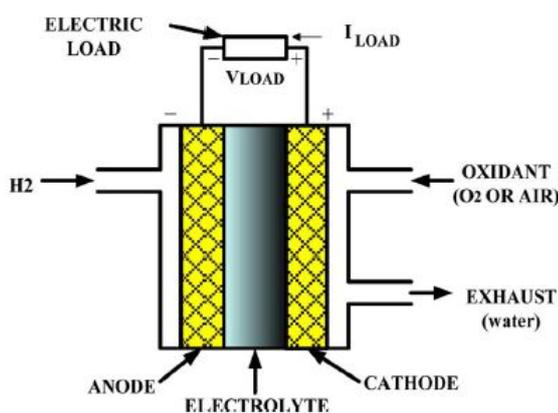


Fonte: (KHALIGH; LI, 2010) .

Células de combustível

Células de Combustível (FC) geram eletricidade através de um combustível no anodo e um agente oxidante no catodo, o que gera uma reação no eletrólito. Os reagentes fluem para dentro da célula durante o processo de geração, ao mesmo tempo que o produto final flui para fora. Enquanto o fluxo se mantiver estável a célula de combustível continua a gerar energia elétrica. A Figura 21 demonstra a construção de uma célula de combustível. Dentre suas principais vantagens estão a alta eficiência no processo de conversão do combustível em energia elétrica, flexibilidade do combustível usado, durabilidade e confiança (KHALIGH; LI, 2010).

Figura 21 – Célula de Combustível.



Fonte: (KHALIGH; LI, 2010) .

Em aplicações veiculares, um tanque especificado para o combustível a ser usado deve ser adicionado ao projeto. Devido ao fato da densidade de energia geralmente ser inferior a do petróleo, tanques maiores e robustos devem ser usados. Segundo Bossel (2006), um outro fator que deve ser considerado é que a eficiência da FC varia com a quantidade

de potência que é demandada da mesma, de modo geral, quanto mais potência o sistema exige da FC, menor a eficiência. Devido ao alto custo, cerca de cinco vezes maior quando comparado a MCI, poucos projetos tem sido implantados no mercado (BOSSEL, 2006).

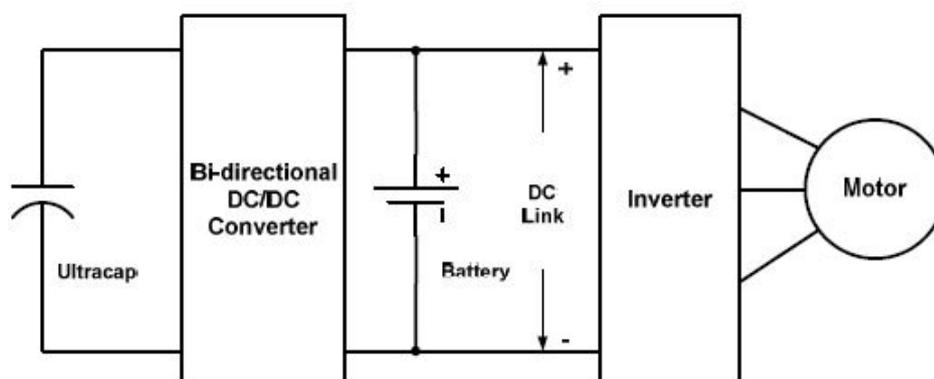
Sistemas de armazenamento de energia híbridos

Os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) listados até o momento possuem vantagens e desvantagens específicas distintas. Com o intuito de se atingir um desempenho aproximado ao do veículo convencional do ponto de vista da densidade de energia, o SAE de um VEH deve possuir uma capacidade similar a derivados do petróleo, como a gasolina. Devido ao perfil da carga alimentada em atividades automotivas variar muito, o SAE sofre com recargas (frenagem regenerativa) e descargas (comandos de aceleração) aleatórias, o que deteriora o tempo de vida de baterias (CAO; SCHOFIELD; EMADI, 2008; HUNG; HOPKINS; MOSLING, 1993).

Com o objetivo de reduzir ou até mesmo eliminar os problemas citados, Sistemas de Armazenamento de Energia Híbridos (SAEH) têm sido propostos. Basicamente trata-se de uma combinação entre ultracapacitores e baterias, uma vez que UC possuem uma alta densidade de potência e uma baixa densidade de energia quando comparados as baterias (GAO; DOUGAL; LIU, 2005).

Existem diversas configurações de SAEH. Nos chamados convencionais o banco de baterias é diretamente conectado ao barramento *c.c.* e um conversor de meia-ponte é colocado entre o banco de UC e o barramento *c.c.*. Para se utilizar a grande densidade de potência do UC o conversor deve possuir um nível de potência similar ao do UC, a fim de se evitar um gargalo no sistema. Esse tipo de design elimina o problema das demandas de pico nas baterias, porém ainda apresenta uma redução nos ciclos de vida da mesma. Um exemplo do sistema descrito é apresentado na Figura 22 (CAO; EMADI, 2012).

Figura 22 – Configuração Convencional de um SAEH.



Fonte:(CAO; EMADI, 2012).

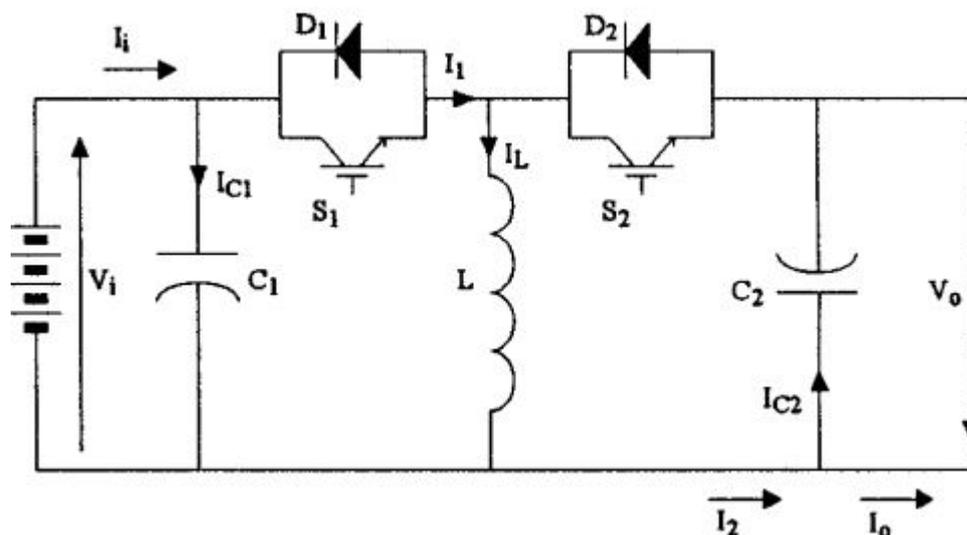
2.2.5.6 Conversores e retificadores

No intuito de tornar o Sistema híbrido de tração controlável, um arranjo de conversores e retificadores controlados ou não devem ser selecionados. Existem diversas topologias diferentes em utilização nos modelos atuais. Neste trabalho são apresentados alguns modelos com o intuito de se representar a sua existência no sistema de tração, contudo não são abordados modelos específicos.

Conversor *Buck-Boost* Bidirecional

O conversor *Buck-Boost* é apresentado na Figura 23. Existem diversas variações, sendo o modelo apresentado o mais básico. O controle de sua operação se dá através das duas chaves S_1 e S_2 que geralmente são construídas com GTOs (*Gate Turn Off*) ou IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). O fato de ser um conversor bidirecional significa que o fluxo de potência pode fluir tanto da bateria para a carga, quanto realizar o caminho reverso.

Figura 23 – Conversor *Buck-Boost* Bidirecional.



Fonte:(CARICCHI et al., 1998).

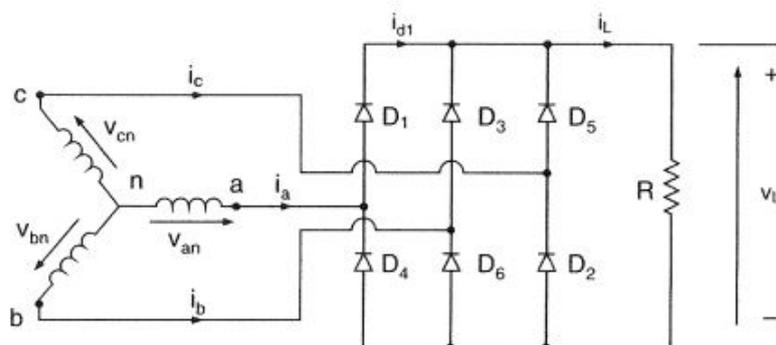
Retificadores

Os retificadores têm por função converter a corrente alternada *c.a.* para a corrente contínua *c.c.*, podendo ser controlados ou não. Nas arquiteturas dos VEH, esse componente está presente entre o barramento do SAE e a máquina elétrica usada para entregar tração as rodas ou gerar a energia por meio da frenagem regenerativa. Em outros casos, como o dos automóveis que possuem a arquitetura série, esse componente tem o papel de converter

a energia gerada pelo gerador para carregar o SAE. A Figura 24 apresenta um circuito retificador trifásico em ponte e suas formas de onda, respectivamente.

Embora os circuitos retificadores geralmente sejam construídos com base no sistema de ponte, como apresentado na Figura 24, é possível se substituir os diodos por componentes como SCR's *Silicon controlled rectifier*, que permitem implementar estratégias de controle. Basicamente, os SCR's operam como chaves que são abertas e fechadas conforme a estratégia de controle necessária, criando assim, a possibilidade de controle de tensão.

Figura 24 – Retificador trifásico em ponte.



Fonte: (RASHID, 1999).

2.2.5.7 Máquinas elétricas

Os modelos de máquinas elétricas utilizadas VEH, variam primordialmente com o tipo de arquitetura utilizada. Nesta seção serão apresentados os tipos de motores mais utilizados e suas variações levando em conta seus prós e contras mais expressivos.

Para escolher o sistema de propulsão de um VEH, devem ser levados em conta diversos fatores, incluindo as expectativas do motorista, as características do veículo, e as fontes de energia. Diferente de aplicações motoras industriais, VEH frequentemente requerem paradas e partidas constantes, altas taxas de aceleração/desaceleração, alto torque e baixas velocidades em acíves acentuados, baixo torque e altas velocidades terminais, como também uma ampla faixa de operação de velocidade (EHSANI; GAO; EMADI, 2009). Esses motores podem ser classificados em dois grupos principais:

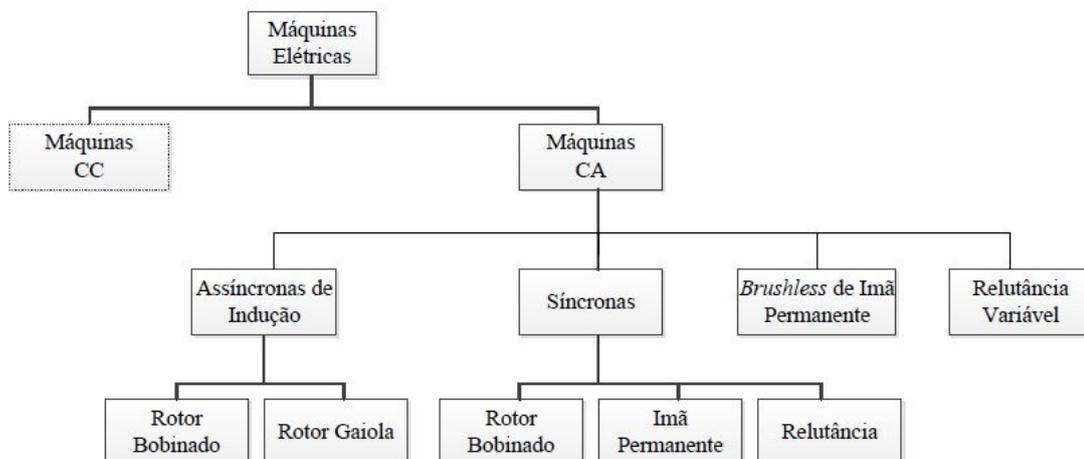
1. *Commutator Motors*: Basicamente, tratam-se de máquinas *c.c.* tradicionais, as quais incluem, excitação série, excitação *shunt*, excitação composta, excitação separada e excitação através de Magnéticos Permanentes. O uso de comutadores e escovas em máquinas de corrente contínua tem por fim alimentar a corrente de armadura, isso torna essa classe de máquina menos confiável, havendo a necessidade constante de manutenção para operações em altas velocidades. Além disso, o enrolamento de excitação de máquinas *c.c.* tem uma baixa densidade de potência específica. Em

contra partida, sua tecnologia simples tem sido proeminente, graças a facilidade de implementação de estratégias de controle (EHSANI; GAO; EMADI, 2009; HUSAIN, 2011).

2. *Commutatorless Motors*: Desenvolvimentos tecnológicos recentes têm elevado esta classe de máquinas *c.c.* a um novo patamar. As principais vantagens incluem uma maior eficiência, uma maior densidade de potência e um menor custo de operação. Outros pontos positivos são o alto grau de confiabilidade e o fato de ser livre de manutenção, quando comparados aos motores *c.c. Brushes* (com escovas). Motores de Indução são amplamente aplicados a projetos que envolvem essa classe de maquinário, pois apresentam as mesmas vantagens, somadas a um baixo custo, entretanto, técnicas convencionais de controle como "variação de tensão" e "variação de frequência" não fornecem a performance desejada (EHSANI; GAO; EMADI, 2009; HUSAIN, 2011).

As Figuras 25 e 26 apresentam as subcategorias das máquinas elétricas usadas em operações de tração do ponto de vista do acionamento. Como pode ser observado, existe uma grande gama de variações. Cada máquina requer uma estratégia de controle diferente a fim de se obter o desempenho desejado.

Figura 25 – Classificação das máquinas elétricas de corrente alternada.

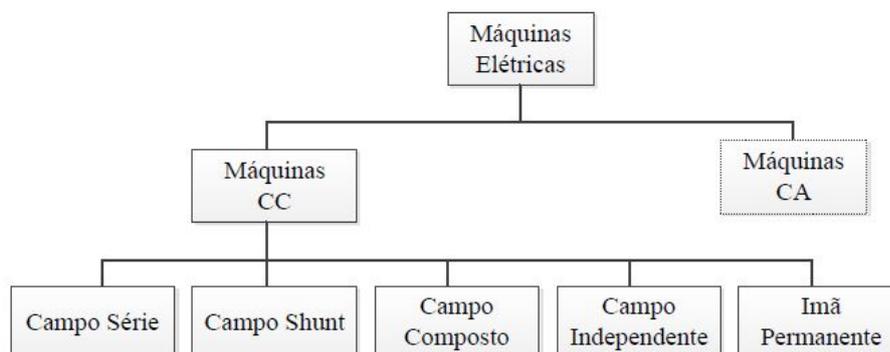


Fonte: (SILVA, 2017).

Segundo Zeraoulia, Benbouzid e Diallo (2006), quatro tipos de máquinas elétricas estão entre as mais empregadas em aplicações de tração veicular, são elas:

1. Máquinas assíncronas de indução;
2. Máquinas síncronas de imãs permanentes;
3. Máquinas de corrente contínua;

Figura 26 – Classificação das máquinas elétricas de corrente contínua.



Fonte: (SILVA, 2017).

4. Máquinas de relutância variável.

As principais características que esses modelos de máquinas elétricas apresentam são a eficiência, a controlabilidade, a confiabilidade, a densidade de potência, a maturidade ou o nível de desenvolvimento e os custos. A Tabela 3 sintetiza essas informações através de uma pontuação de 0 a 5, com o intuito de ranquear as diferentes tecnologias.

Tabela 3 – Comparativo entre as máquinas elétricas mais utilizadas em sistemas de tração veicular.

Parâmetros	Máquina DC	Assíncrona de Indução	Síncrona de Imã Permanente	Relutância Variável
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
Σ Total	22	27	25	23

Fonte: (ZERAOUlia; BENBOUZID; DIALLO, 2006).

Embora não sejam as mais eficientes e possuam uma densidade de potência limitada, as máquinas assíncronas de indução se tornam relevantes em todos os demais fatores analisados. Já no ponto de vista da eficiência energética e densidade de potência, as máquinas síncronas de ímãs permanentes são melhores. A Figura 27 apresenta uma comparação entre os modelos assíncrono de indução e síncrono de ímã permanente, mostrando uma redução de peso e volume. Ambos os motores são da fabricante nacional WEG.

Figura 27 – Comparativo entre as máquinas de indução e síncronas de ímãs-permanentes da fabricante WEG.



Fonte: (WEG, 2016).

Um dos maiores obstáculos para a implementação em larga escala das máquinas síncronas de ímãs permanentes, é a matéria prima utilizada em sua fabricação. Os chamados metais Terras Raras, denominação aplicada aos óxidos de lantanídeos. Segundo Andrade (2014), o Brasil é o segundo país com maior reserva confirmada deste mineral, 16% das reservas mundiais, ficando atrás apenas da China detentora de 40% das reservas totais.

As características de potência e torque das máquinas elétricas estão apresentadas abaixo pela Figura 28 (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. Essas curvas são naturais das máquinas *c.c.* e podem ser obtidas em máquinas de indução através de uma combinação de controles de "variação de tensão" e "variação de frequência". Um dos motores mais usados para aplicações de tração são os Motores *c.c. Brushed* (com escovas).

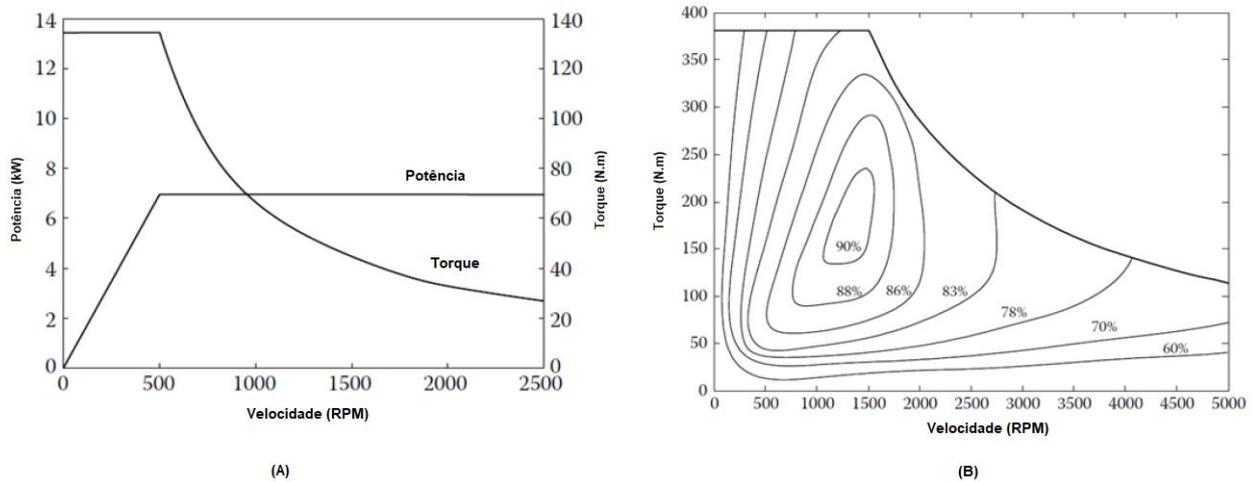
2.3 Softwares utilizados

Todo o trabalho foi desenvolvido em ambiente computacional, sendo que os modelos de veículos simulados foram desenvolvidos com base no *software* ADVISOR.

2.3.1 ADVISOR

O ADVISOR foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (*National Renewable Energy Laboratory*) para o Departamento de Energia dos EUA (*US DOE*). Trata-se de uma ferramenta que pode ser usada para avaliar e quantificar os impactos gerados pela aplicação de novas tecnologias a veículos automotores. Toda a programação foi desenvolvida em ambiente de MATLAB/Simulink e é liberada para uso geral na Internet. O ADVISOR representa para a comunidade de engenharia uma

Figura 28 – Características de (A) Potência e Torque das máquinas elétricas e (B) regiões de eficiência na curva de torque de uma máquina específica.



Fonte: (EHSANI; GAO; EMADI, 2009) - Traduzida.

ferramenta fácil e flexível, ainda que robusta para o estudo e modelagem de veículos elétricos híbridos.

O *software* ADVISOR foi desenvolvido com o objetivo primordial de quantificar a economia de combustível, performance e emissões de poluentes de veículos que utilizem tecnologias alternativas, especialmente VEH. Para isso, o programa emprega uma estratégia combinada de *backward/forward-facing modeling*. Essa estratégia permite que o ADVISOR represente o veículo simulado com um alto nível de precisão em uma gama de cenários simultâneos sem a necessidade de operar em conjunto com outros módulos. Dessa forma, a solução implementada no ADVISOR é capaz de acelerar o processo de análise em uma ordem de 1/75 do tempo, tornando-se uma opção viável para o estudo e otimização de sistemas veiculares.

Para situações onde é necessário se detalhar um módulo específico do conjunto, é possível realizar alterações somente nos blocos de controle que representam tal componente. Isso pode ser realizado, graças a arquitetura construtiva do ADVISOR, que faz uma conexão detalhada e dinâmica entre seus blocos de controle. Em seu banco de dados, o ADVISOR atualmente possui uma grande variedade de modelos de componentes com variados graus de complexidade. Todos os procedimentos e listas de variáveis necessários para a utilização do *software* estão dispostos no manual do programa.

3 Metodologia

O principal objetivo deste trabalho é apresentar os ganhos que podem ser obtidos por meio da hibridização de um veículo automotor convencional. Assim, nesse capítulo serão apresentados os parâmetros para a modelagem do veículo movido apenas com o MCI, bem como, os demais componentes que devem ser implementados no modelo com o intuito de torná-lo híbrido.

3.1 Modelagem do veículo convencional

O veículo convencional proposto por este trabalho é um popular compacto com MCI de ignição por centelha de quatro tempos. Para a realização das simulações, com o MCI escolhido foi considerada 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 apresenta os principais parâmetros requeridos pelo ADVISOR para realização das simulações.

Tabela 4 – Características do veículo convencional.

Parâmetros de um veículo nacional com MCI de 1.0L		
Comprimento	3,692	m
Entre-eixos	2,361	m
Peso sem componentes	592	Kg
Distribuição de peso	60/40	%
Largura	1,548	m
Altura	1,445	m
Distância CG - eixo frontal	1,192	m
Distância CG - eixo traseiro	1,292	m
Distância CG - altura	0,5	m
Raio do Pneu 165/70 R13	0,33	m
Área frontal	2,0	m^2
Coefficiente de arraste aerodinâmico	0,335	-
Coefficiente de resistência ao rolamento	0,009	-

Fonte: (SILVA, 2017; SANTICIOLLI et al., 2013) - CTM/UFMG - Biblioteca ADVISOR.

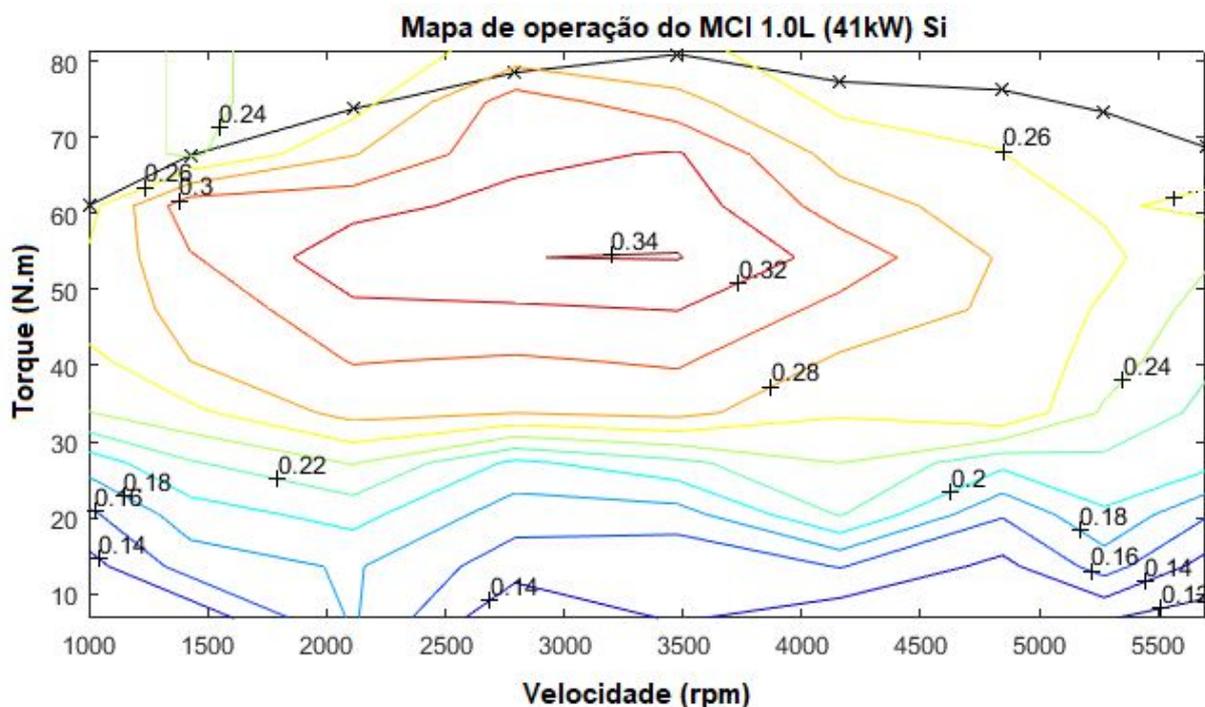
Segundo Silva (2017), parte dos parâmetros apresentados na Tabela 4 foram concedidos pelo Centro de Tecnologia da Mobilidade – CTM, que é vinculado ao departamento de Engenharia Mecânica da UFMG. Todo o embasamento matemático apresentado no capítulo 2, faz uso dessas informações para modelar o veículo, sendo que as equações apresentadas estão implementadas no software ADVISOR.

Por se tratar de uma ferramenta que objetiva alcançar ao máximo a realidade, o ADVISOR requer uma grande quantidade de parâmetros de entrada para simular um dado cenário. Assim, a gravidade considerada foi de $9,81 \text{ m/s}^2$ e a densidade do ar $1,2 \text{ kg/m}^3$. Para o caso das informações técnicas que não puderam ser obtidas em referências foram utilizados valores de um veículo de mesmo porte e com características semelhantes, denominado “*Small Car*”, um dos muitos modelos presentes no banco de dados do ADVISOR.

3.1.1 Motor de combustão interna

O MCI selecionado para as simulações faz parte do banco de dados do ADVISOR, contudo alguns de seus parâmetros foram modificados, tais como peso, para melhor representar o veículo a ser hibridizado. Em ambas as Figuras, 29 e 30, são apresentados os mapas de eficiência e de consumo, respectivamente. A potência máxima alcançável por este MCI de 1.0L é de aproximadamente 54,85 cv a uma velocidade de rotação de 6000 rpm. Essa potência equivale a 41 kW. Quanto ao torque, o pico máximo acontece em 3500 rpm, com aproximadamente 81,4 N.m.

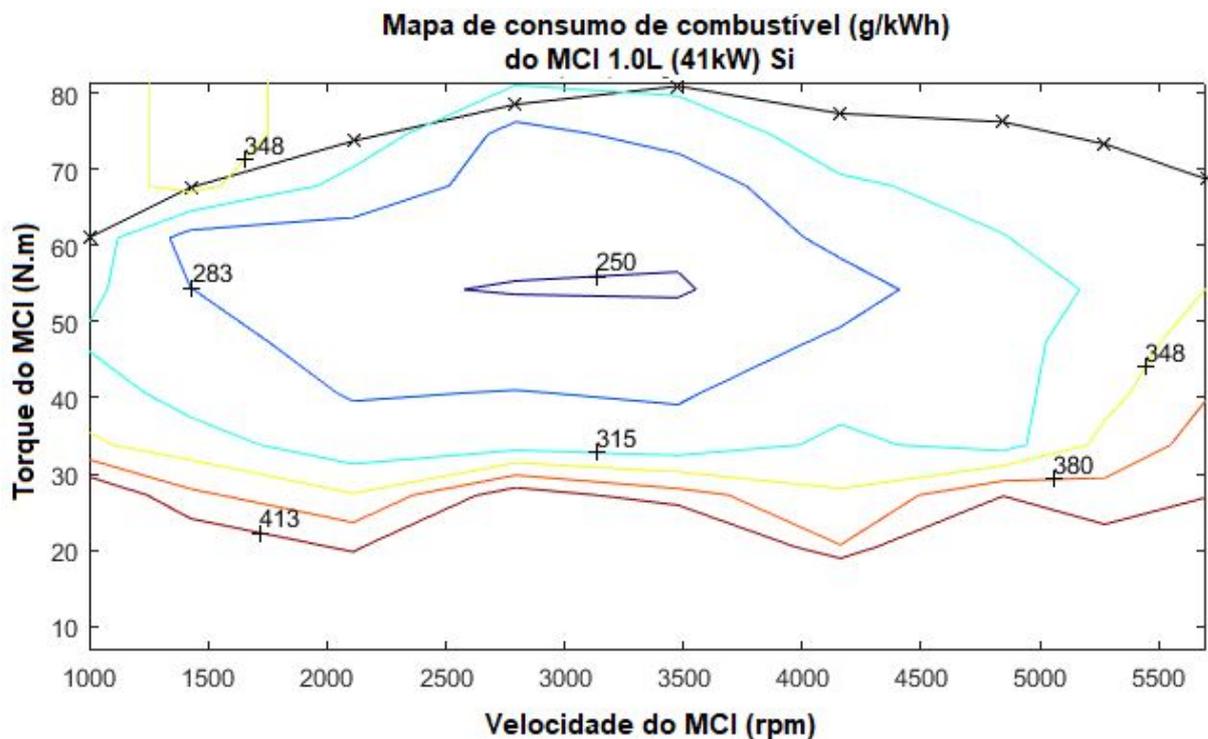
Figura 29 – Mapa de eficiência do MCI.



Fonte: Autor - ADVISOR.

Os mapas apresentados representam as regiões de operação do MCI limitadas ao máximo torque disponível. Na Figura 29 as curvas de nível delimitam as regiões de eficiência. Como pode ser observado, a máxima eficiência de operação deste MCI está

Figura 30 – Mapa de consumo de combustível do MCI.



Fonte: Autor - ADVISOR.

limitada em 34% na região ilustrada pela curva de nível vermelha, entre 3000 e 3500 RPM e entre 55 e 57 N.m de torque. Já na Figura 30 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.

3.1.2 Sistema de transmissão

A Tabela 5 apresenta as características do sistema de transmissão aplicado ao veículo que será hibridizado. A massa do conjunto de transmissão é de aproximadamente 65 Kg e possui uma eficiência de 94% no processo de conversão da energia fornecida pelo MCI. As relações de redução do diferencial e das marchas podem ser observadas abaixo. Os dados apresentados são referentes a uma das transmissões presentes no banco de dados do ADVISOR, bem como a um dos modelos implementados pelos autores Santiciolli et al. (2013).

Tomando como base a velocidade do veículo, é possível averiguar a relação de transmissão utilizada no momento seguindo os valores de velocidade recomendadas pelo fabricante para troca de marchas. Conhecendo-se a marcha da caixa redutora, calcula-se a rotação do motor, sendo que, a inércia do sistema de transmissão também é definida

conforme a marcha da caixa redutora (SANTICIOLLI et al., 2013). 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 (SILVA, 2017).

Tabela 5 – Características do veículo convencional.

Parâmetros da Transmissão do veículo		
Relação Diferencial / Inércia	4,870 / 7,44 e^{-4}	kgm^2
1º Relação de Redução / Inércia	13,45 / 1,791 e^{-3}	kgm^2
2º Relação de Redução / Inércia	7,57 / 2,415 e^{-3}	kgm^2
3º Relação de Redução / Inércia	5,01 / 3,421 e^{-3}	kgm^2
4º Relação de Redução / Inércia	3,77 / 4,782 e^{-3}	kgm^2
5º Relação de Redução / Inércia	2,83 / 1,070 e^{-3}	kgm^2
Peso	63,94	Kg
Rendimento	94	%

Fonte: (SANTICIOLLI et al., 2013) - Biblioteca ADVISOR.

3.2 Modelagem do veículo elétrico híbrido (VEH)

Mediante ao objetivo apresentado, a arquitetura híbrida de eixos paralelos foi escolhida para hibridização do veículo convencional. A motivação das escolhas está baseada no fato da arquitetura apresentar vantagens significativas quando comparada ao veículo convencional, dessa forma é possível obter-se resultados mais expressivos e dinâmicos para um mesmo ciclo de condução. Um outro fator motivante, é que a arquitetura possui tração dianteira, havendo assim um maior potencial de frenagem regenerativa, pois na frenagem ocorre transferência de massa para o eixo dianteiro, deixando o traseiro com capacidade limitada de frenagem.

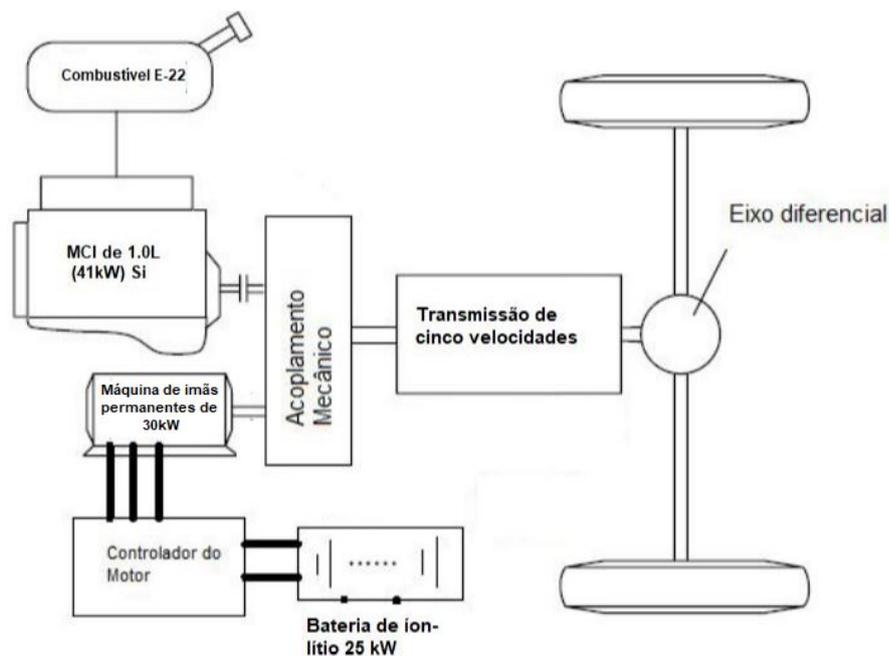
A estrutura do veículo será considerada a mesma para todas as simulações, isso equivale a dizer que um mesmo modelo de veículo será modificado com diferentes sistemas de tração.

Arquitetura Paralelo

Para a modelagem da arquitetura em paralelo, tanto o MCI como a transmissão de cinco velocidades continuam sendo as mesmas do veículo convencional. Quanto aos componentes do sistema elétrico a serem utilizados, o motor de tração e banco de baterias, estão definidos adiante no texto. A Figura 31 ilustra o modelo híbrido paralelo e seus componentes.

Com relação aos modos de operação, estão sendo considerados:

1. *Modo de tração elétrica pura:* O MCI é totalmente desativado e a potência de propulsão é fornecida apenas pelo banco de baterias;
2. *Modo de tração usando apenas o MCI:* A potência de tração do veículo é provida exclusivamente pelo MCI, enquanto as baterias não fornecem ou consomem energia do sistema;
3. *Modo de tração Híbrida:* A potência de tração é fornecida tanto pelo MCI e pelas baterias;
4. *Tração MCI com carregamento de bateria:* O MCI fornece potência tanto para carregar as baterias e propulsionar o veículo simultaneamente.
5. *Modo de Frenagem Regenerativa:* O MCI é desligado e o motor elétrico de tração é operado como um gerador alimentado pela energia cinética e potencial do veículo. A potência gerada é armazenada nas baterias para ser usada mais tarde.
6. *Modo de carregamento de bateria:* O motor elétrico de tração não recebe nenhuma potência enquanto a bateria é carregada pelo MCI por meio do acoplamento mecânico.
7. *Modo de carregamento híbrido da bateria:* Ambos MCI e motor elétrico de tração (operação gerador) são usados para carregar as baterias durante a frenagem.

Figura 31 – *Layout* de um modelo híbrido paralelo.

Fonte: Do Autor.

3.2.1 Máquina elétrica

Para aplicação de tração foi escolhida uma máquina de ímãs permanentes de 30kW. Embora possua um custo superior de implementação, apresenta uma densidade de potência e um grau de eficiência superior a todos os outros modelos utilizados na mesma aplicação. A escolha se justifica, visto que o foco deste trabalho é obter os melhores ganhos em eficiência e redução na emissão de poluentes. Como apresentado na Figura 31, a arquitetura abordada fará uso da máquina elétrica para aplicar tração no eixo dianteiro.

A Figura 32 apresenta a curva característica de torque x velocidade da máquina escolhida. Ao analisar a mesma curva para o MCI na Figura 29, nota-se a grande diferença entre a eficiência dos dois componentes. 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 6.

Tabela 6 – Parâmetros técnicos da máquina elétrica.

Máquina de ímãs permanentes de 30 kW		
Potência nominal	30	kW
Peso aproximado	56,75	Kg
Torque máximo	300	N.m
Velocidade máxima	6000	rpm
Eficiência máxima	95	%

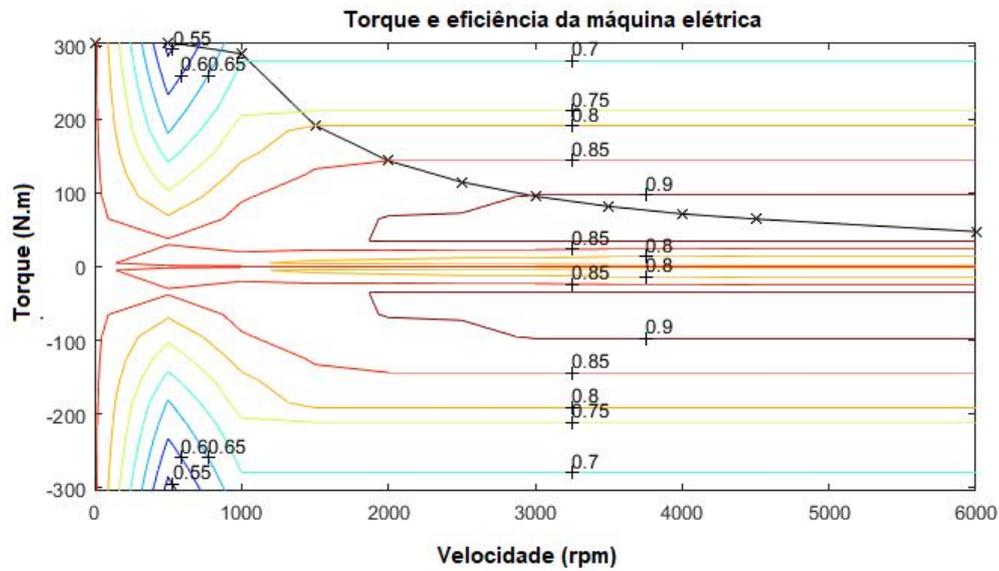
Fonte: Biblioteca ADVISOR.

3.2.2 Sistema de armazenamento de energia

O modelo de baterias utilizado nas simulações de hibridização do veículo convencional, foi um dos modelos 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. O motivo da escolha desse tipo de bateria, deu-se devido sua característica de densidade de energia, com o objetivo de obter uma solução de tração elétrica compacta, de forma similar a escolha da máquina elétrica, assim, os custos não foram considerados.

O modelo da bateria está desenvolvido conforme três conceitos. Primeiro, o circuito que compõe a bateria consiste em 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. O segundo conceito, leva em conta que os parâmetros V_{oc} , R_{int} e Potência são variáveis da equação que resolve a corrente do circuito equivalente da bateria. Por fim, considera-se

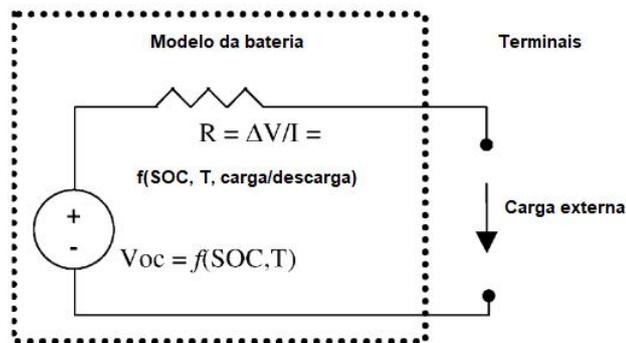
Figura 32 – Curva característica de torque x velocidade da máquina elétrica.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

que a corrente é variável e utilizada para estimar o SOC da bateria. O modelo é ilustrado pela Figura 33.

Figura 33 – Conceito do modelo de bateria implementada no ADVISOR.



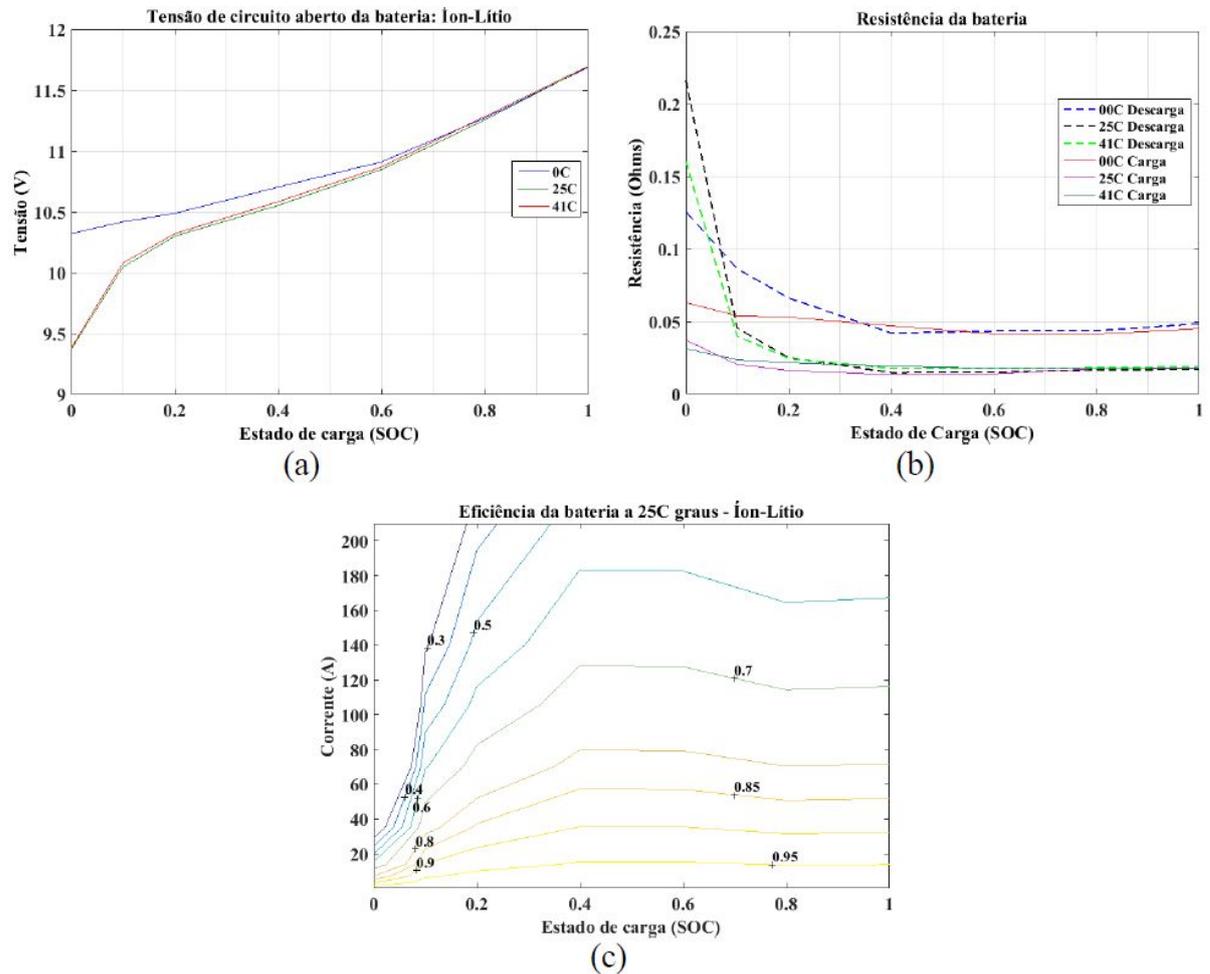
Fonte: (MARKEL et al., 2002).

O estado de carga (*SOC*) pode ser calculado pela Equação 3.1,

$$SOC = SOC_0 - 100 \int \frac{I_{bat} \cdot dt}{C_{nom}} \quad (3.1)$$

Onde SOC_0 estado de carga inicial das baterias (%) e C_{nom} capacidade nominal do banco de baterias (Ah).

Figura 34 – Características de tensão (a), da resistência (b) e do Estado de Carga (c) da bateria.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

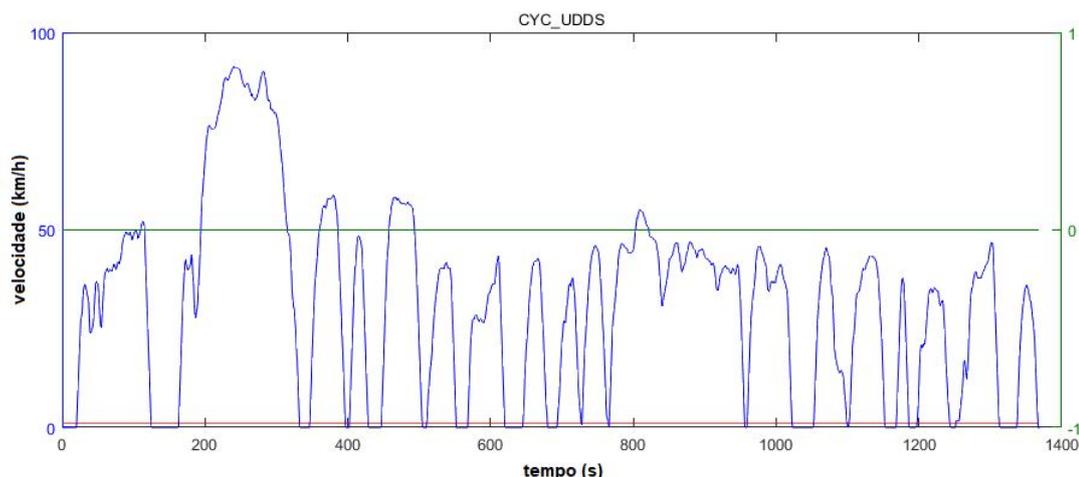
3.3 Ciclos de condução

Os cenários de teste utilizados para avaliar tanto o veículo convencional como seu modelo hibridizado foram escolhidos com base nas normas NBR6601 e NBR7024, onde estão dispostos os ciclos de condução que possuem características urbana e os de tráfego rodoviário, respectivamente. Estes ciclos normativos, tem por objetivo padronizar os testes realizados em veículos automotores e são utilizados para certificar o consumo de combustível e a emissão dos veículos.

Ambos são ciclos Norte Americanos adotados também pela ABNT para certificação no Brasil. A Figura 35, apresenta o ciclo de condução urbano (NBR6601) com 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 Tabela 7 apresenta alguns parâmetros de teste deste ciclo. Como se espera de um percurso urbano, são consideradas 17 paradas ao longo do ciclo, bem como, diversos

Figura 35 – Perfil de velocidades definido pela norma NBR6601 (ciclo urbano).



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

pontos de aceleração e frenagem. Devido as características supracitadas, mesmo atingindo uma velocidade de aproximadamente 90 *km/h*, a velocidade média do veículo neste ciclo gira entorno de 30 *km/h*.

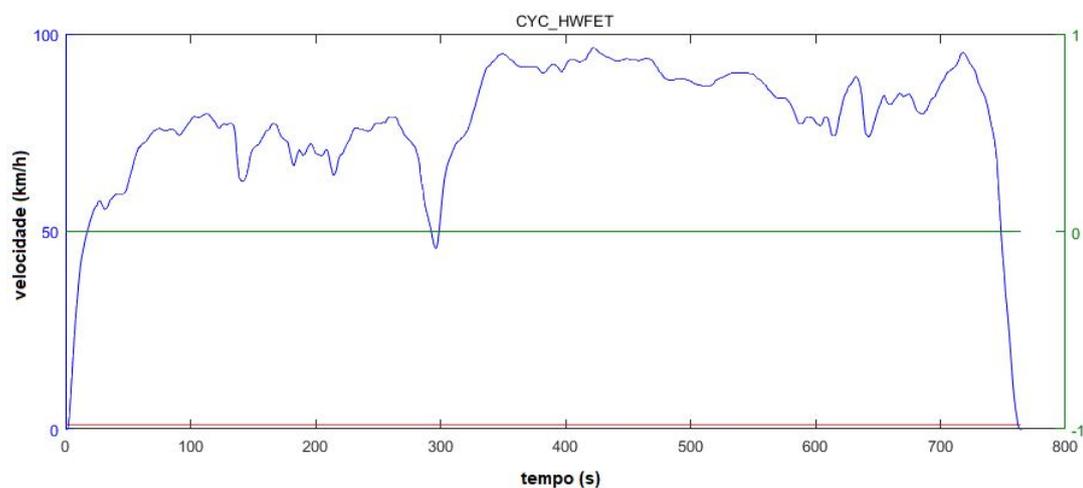
Tabela 7 – Parâmetros técnicos do ciclo de teste urbano.

Ciclo conforme norma NBR6601		
Duração	1369	s
Distância	11,99	Km
Velocidade máxima	91,25	km/h
Velocidade média	31,51	km/h
Aceleração máxima	1,48	m/s^2
Desaceleração máxima	-1,48	m/s^2
Aceleração média	0,5	m/s^2
Desaceleração média	-0,58	m/s^2
Tempo parado	259	s
Número de paradas	17	-

Fonte: Do Autor.

O ciclo definido na NBR7024 é apresentado de forma similar na Figura 36. 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, o que caracteriza um operação rodoviária, onde quase não ocorrem paradas e o veículo tende a operar em uma faixa de velocidade mais constante e elevada. A Tabela 8 apresenta alguns parâmetros de teste do ciclo da norma NBR7024.

Figura 36 – Perfil de velocidades definido pela norma NBR7024 (ciclo rodoviário).



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

Tabela 8 – Parâmetros técnicos do ciclo de teste urbano.

Ciclo conforme norma NBR6601		
Duração	765	s
Distância	16,51	Km
Velocidade máxima	96,4	km/h
Velocidade média	77,58	km/h
Aceleração máxima	1,43	m/s^2
Desaceleração máxima	-1,48	m/s^2
Aceleração média	0,19	m/s^2
Desaceleração média	-0,22	m/s^2
Tempo parado	6	s
Número de paradas	1	-

Fonte: Do Autor.

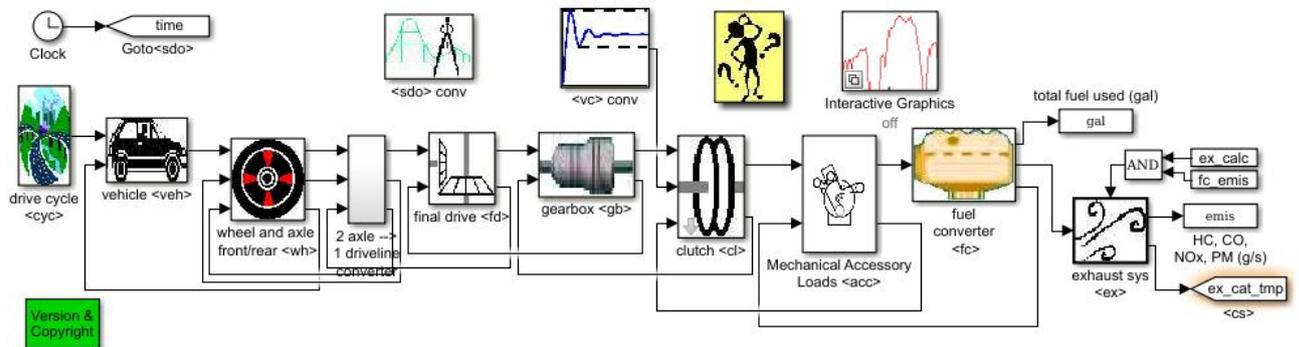
4 Implementação e simulação

Todos os dados necessários para implementar os modelos foram baseadas em dados retirados de trabalhos de outros autores e em parâmetros disponíveis no banco de dados do ADVISOR. Em diversos trabalhos o *software* tem sua assertividade comprovada por meio de ensaios em laboratório e em cenários reais, assim, assume-se com segurança que as informações disponíveis para utilização possuem embasamento técnico e se aproximam de maneira suficiente da realidade.

4.1 Modelo de veículo convencional

Todas as arquiteturas veiculares existentes no ADVISOR possuem uma modelagem por blocos, sendo que, cada bloco representa um componente do veículo. A Figura 37 ilustra esse diagrama do modelo do veículo convencional.

Figura 37 – Diagrama de blocos do modelo do veículo convencional no ADVISOR.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

Para melhor entender o arranjo apresentado acima, a seguir são descritas as funções e características dos blocos da esquerda para a direita:

1. Ciclo de condução (*drive cycle*). Aqui estão contidas as informações referentes ao cenário de teste adotado para a simulação.
2. Veículo (*vehicle*). Neste bloco são dimensionadas todas as forças a favor e contrárias ao movimento, levando-se em conta a aerodinâmica do modelo e a velocidade requerida aos pneus.
3. Rodas e eixo (*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.

4. Conversor de tração (*driveline converter*). Possui a única função de informar qual o eixo de tração do veículo está ativo, se é o frontal o traseiro, ou ambos.

Os blocos subsequentes representam os componentes intercambiáveis do veículo estudado. Esses subsistemas podem ser substituídos por outros com características de operação diferentes, possibilitando assim, uma análise dinâmica. Temos como exemplo, o diferencial, a caixa de marcha, a embreagem, o Motor de Combustão Interna (MCI) e as cargas mecânicas do MCI. Por fim, temos o bloco de controle que está ilustrado por uma curva de um sistema subamortecido, nela são definidas as estratégias de controle que influenciam diretamente na eficiência do veículo.

4.1.1 Simulações de desempenho

Com o intuito de mapear os resultados da hibridização do veículo convencional em seu desempenho e eficiência, duas linhas de testes foram conduzidas. Na primeira o objetivo foi coletar alguns dos parâmetros que classificam o desempenho geral do modelo, assim, na Tabela 9 estão dispostos os resultados dos testes que medem desde o tempo de aceleração e velocidade máxima do veículo, até os testes de consumo de combustível em velocidades constantes e na velocidade máxima.

Tabela 9 – Resultado dos testes simulados para o veículo convencional a MCI.

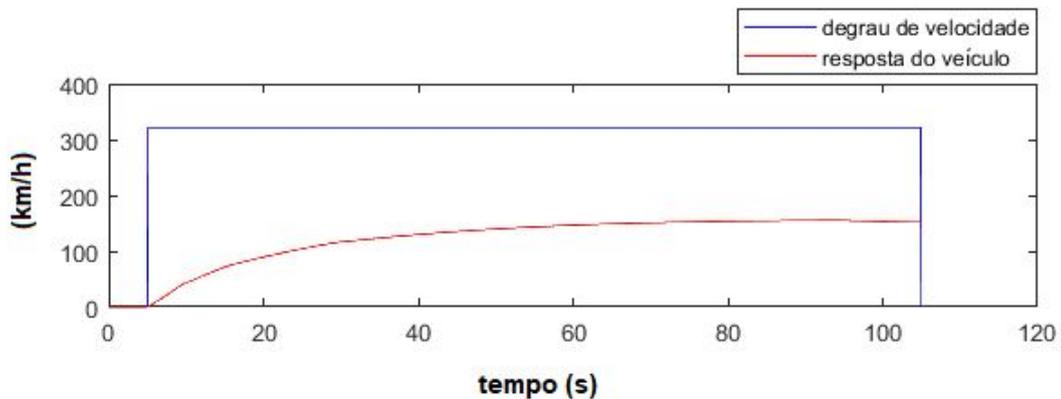
Parâmetro	Resultado	Unidade
Velocidade máxima	152,7	km/h
Velocidade constante (16,9 km/h)	11,62	km/L
Velocidade constante (72 km/h)	23,80	km/L
Velocidade constante (90 km/h)	18,18	km/L
Aceleração (0 - 100 km/h)	19,8	s
Aceleração (0 - 400 m)	21,9	s

Fonte: Do Autor.

Para se obter os resultados supracitados, são utilizados degraus de velocidade de acordo com a velocidade requerida, sendo que, para se realizar o teste de aceleração é aplicado um degrau de velocidade superior à máxima velocidade alcançável, aproximadamente 300 km/h neste caso, como apresentado na Figura 38.

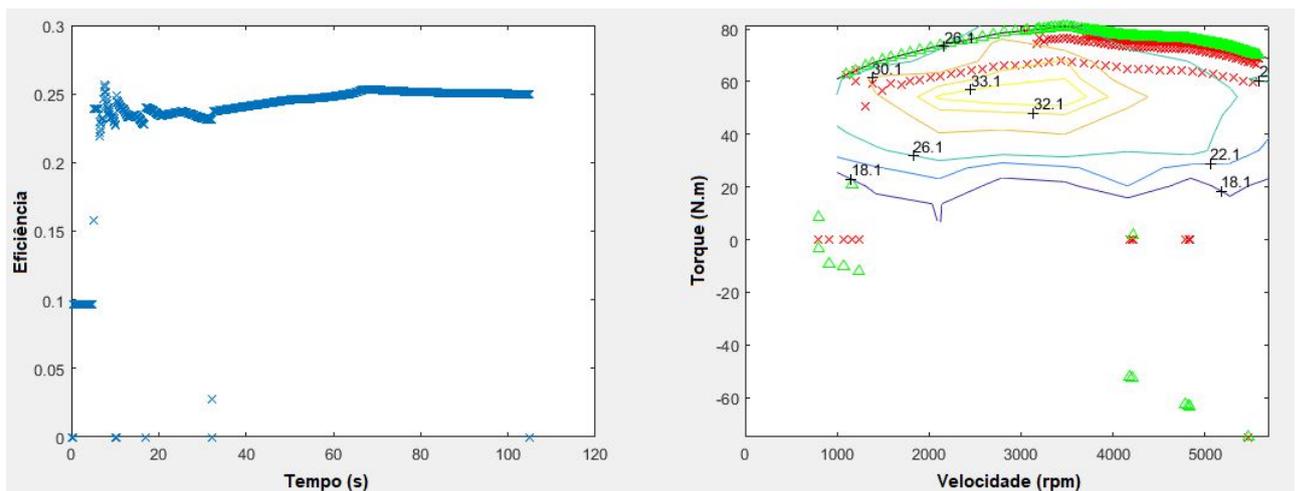
Por meio dessa metodologia se obtêm a máxima potência e torque do MCI, fato que pode ser observado na Figura 39.

Figura 38 – Resposta do veículo convencional - Teste de Aceleração.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

Figura 39 – Mapa do MCI com os pontos de operação - Teste de Aceleração.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

4.1.2 Simulações em ciclos de condução

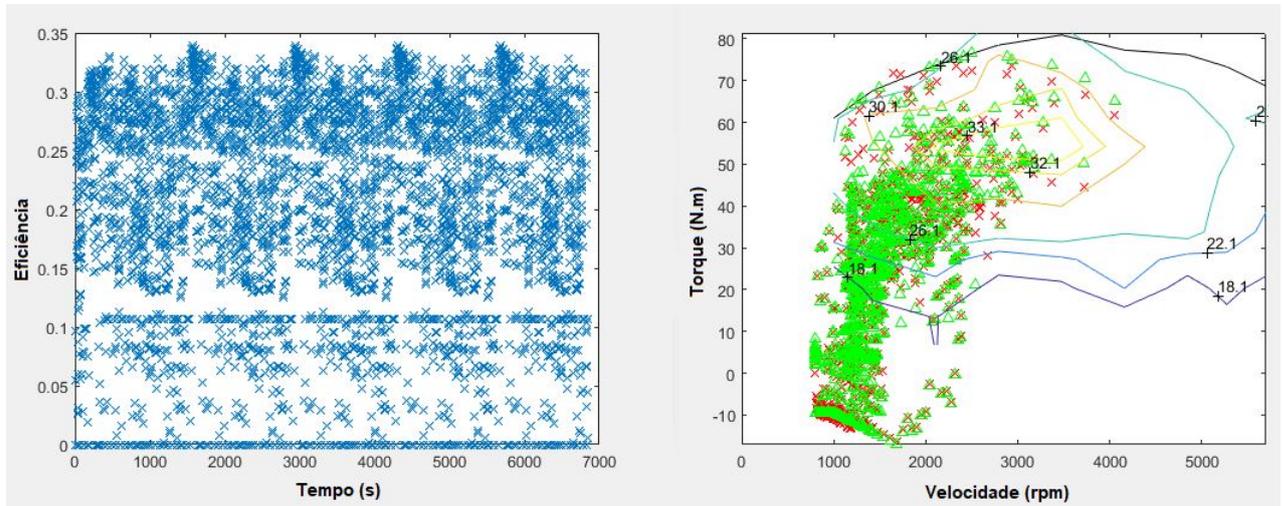
Definidos os parâmetros de desempenho do veículo convencional, o mesmo foi submetido a testes nos ciclos de condução propostos no capítulo 4.1.

Ciclo de condução urbano - NBR6601

O primeiro ciclo de teste foi o detalhado na norma NBR66001, que é composto por um circuito urbano. Os resultados do desempenho do MCI podem ser visualizados na Figura 40.

Como esperado de um ciclo de condução urbano, o MCI opera em velocidades de rotação relativamente baixas e em regiões de baixa eficiência, o que leva a um consumo maior de combustível. Um outro ponto importante a ser observado é que nesta região de

Figura 40 – Mapas do MCI com os pontos de operação e os pontos de eficiência em que o MCI operou - NBR6601.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

baixa velocidade, a disponibilidade de torque do MCI é inferior. A Figura 40 ilustra bem as regiões de eficiência em que o MCI operou. No veículo convencional o MCI é o único componente do sistema que fornece tração as rodas. É possível observar pontos onde o mesmo opera com torque negativo, isso ilustra o comportamento de frenagem do MCI. Esse comportamento, reduz a eficiência do sistema como um todo, isso porque essa energia de frenagem não pode ser armazenada.

Ciclo de condução rodoviário - NBR7024

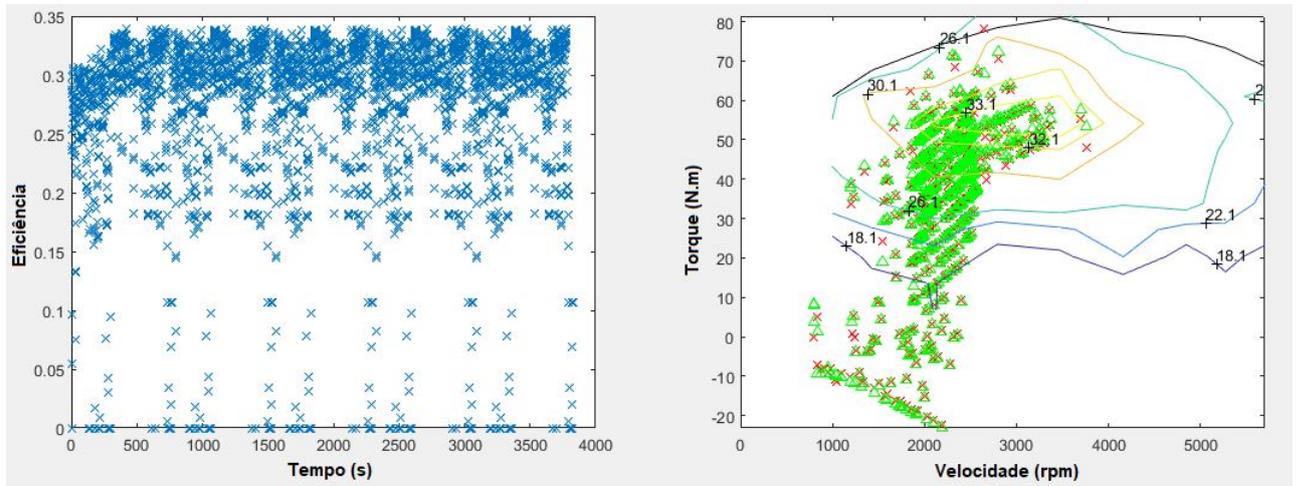
O segundo ciclo de teste empregado esta detalhado na NBR7024, se tratando do ciclo de condução rodoviário. Nestes testes, os veículos normalmente trafegam em velocidades mais altas e não atingem 0 km/h ao longo do trajeto, além das taxas de aceleração serem menores. Nesse cenário, o MCI naturalmente tende ser mais eficiente e a consumir menos combustível. A Figura 41 apresenta os pontos de operação dentro do mapa do MCI. Como nesse caso as demandas por torque ao MCI são menores e a operação acontece em regiões mais eficientes, se tem uma eficiência global superior. Na Figura 41 estão ilustrados os pontos de eficiência do MCI, onde é possível perceber que a operação foi predominantemente nas regiões de eficiência de 20 a 31%.

4.2 Modelo de veículo híbrido

De forma similar ao veículo convencional, a arquitetura híbrida de eixos paralelos possui um diagrama de blocos base no ADVISOR. Esse diagrama é ilustrado na Figura 42.

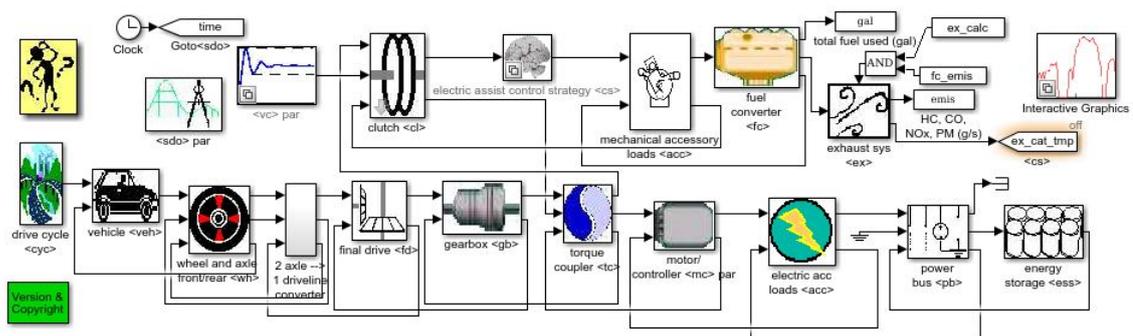
Abaixo são apresentados os principais blocos adicionados ao sistema:

Figura 41 – Mapas do MCI com os pontos de operação e os pontos de eficiência em que o MCI operou - NBR7024.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

Figura 42 – Diagrama de blocos do veículo híbrido com arquitetura paralela no ADVISOR.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

1. Sistema de armazenamento de energia (*energy storage*): Esse bloco representa o banco de baterias do veículo. No caso desse modelo as baterias são de íon-lítio.
2. Barramento de potência (*power bus*) e Cargas elétricas (*electric acc loads*): Nesses blocos estão especificados os componentes do barramento de energia que conecta a bateria ao sistema e as cargas auxiliares do veículo.
3. Motor/Controlador (*motor/controller*): Representa a máquina elétrica utilizada na operação de tração e recuperação de energia, bem como, o controlador responsável por realizar o controle bidirecional de energia do veículo, conforme demandado pela operação.
4. Acoplador de torque (*torque coupler*): Dispositivo mecânico responsável por entregar ao eixo/rodas do veículo a combinação de torque fornecida tanto pelo MCI quanto

pela máquina elétrica.

4.2.1 Simulações de desempenho

Com o intuito de medir o desempenho do veículo após a hibridização, foram realizados testes em duas etapas, ambas com a mesma metodologia adotada para a validação do modelo convencional. A primeira considerou funcional somente a máquina elétrica, visando-se entender como a máquina escolhida para o modelo se comporta em uma operação de tração.

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos pelo veículo imposto a um degrau de velocidade, assim como, durante os testes do veículo convencional. Uma vez que a máquina elétrica e o MCI estão unidos por um mesmo acoplamento mecânico, tem-se uma perda no torque entregue as rodas do veículo nesse tipo de operação. Visto que a máquina elétrica não opera sozinha em altas velocidades, a velocidade máxima atingida foi satisfatória, mesmo que o tempo de aceleração tenha sido muito extenso.

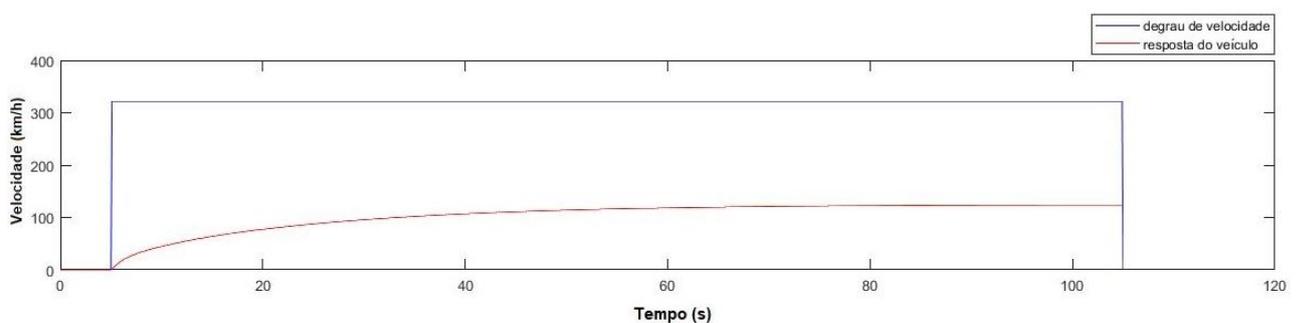
Tabela 10 – Resultados obtidos nos testes de desempenho após a hibridização - tração elétrica.

Parâmetro	Resultado	Unidade
Velocidade máxima	123,9	km/h
Aceleração (0 - 100 km/h)	38,8	s
Aceleração (0 - 400 m)	31,7	s

Fonte: Do Autor.

Para se realizar o teste, foi considerado que o banco de baterias estava com a carga máxima, uma vez que o objetivo era apenas medir os parâmetros relacionados a tração. A Figura 43, apresenta a resposta do veículo ao degrau de velocidade utilizando apenas a tração elétrica.

Figura 43 – Resposta do veículo apenas com tração elétrica.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

A segunda etapa dos testes de desempenho considerou ambos, o MCI e a máquina elétrica, para a aplicação do degrau de velocidade, dessa forma, os resultados apresentados na Tabela 11 foram organizados em âmbito comparativo com o veículo antes e após a hibridização. Graças ao trabalho conjunto de ambas as fontes de tração no eixo dianteiro, foi possível se obter um aumento significativo na velocidade máxima do modelo, bem como em sua capacidade de aceleração, reduzindo em 4,9 segundos o tempo para se atingir 100 km/h. Do ponto de vista da economia de combustível houve uma melhora expressiva para a operação em todas as velocidades constantes adotadas.

Tabela 11 – Comparativo entre os resultados nos testes de desempenho antes e após a hibridização.

Parâmetro	Veículo	Híbrido
	Convencional	Eixos-Paralelos
Velocidade máxima	152,7 km/h	170,5 km/h
Velocidade constante (16,9 km/h)	11,62 km/L	13,3 km/L
Velocidade constante (72 km/h)	23,80 km/L	25,0 km/L
Velocidade constante (90 km/h)	18,18 km/L	20,4 km/L
Aceleração (0 - 100 km/h)	19,8 s	14,9 s
Aceleração (0 - 400 m)	21,9 s	19,8 s

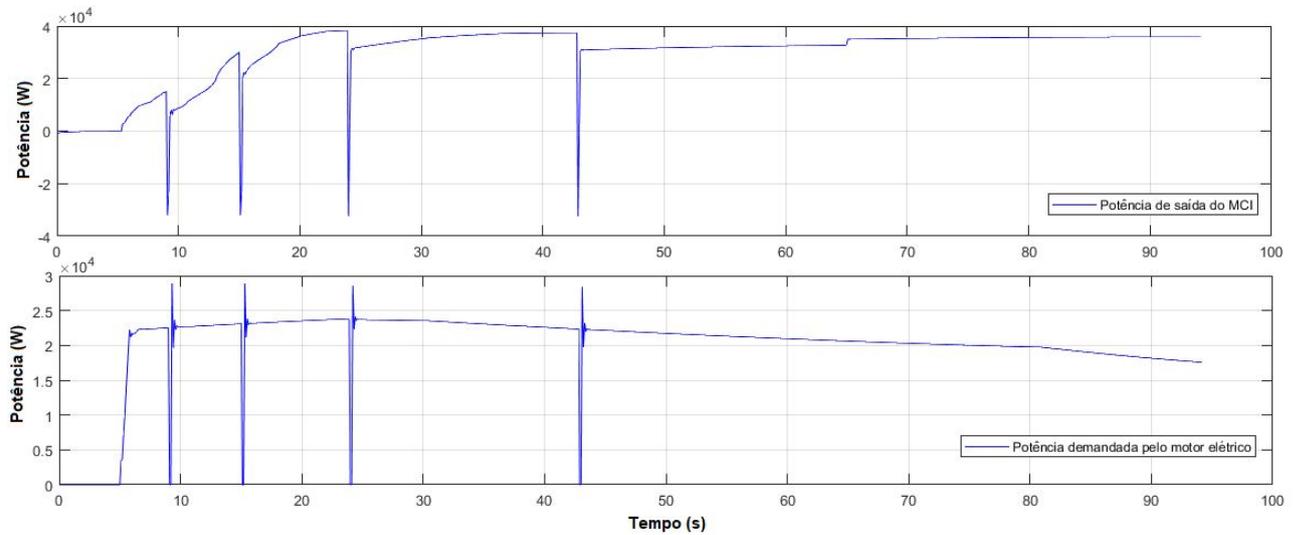
Fonte: Do Autor.

O comportamento interativo da máquina elétrica com o MCI durante a troca de marchas é ilustrado na Figura 44. Cada afundamento na potência entregue por ambos os elementos representa uma troca de marcha durante a operação. Nota-se que o evento se inicia no MCI e é seguido por um evento similar na máquina elétrica. Na arquitetura de eixos paralelos o MCI fica separado do acoplamento mecânico pela embreagem, assim, uma vez que o MCI é reconectado ao sistema de tração, o acoplamento de torque deve igualar as velocidades de ambos os componentes. A resposta a essa retomada na velocidade pode ser visualizada na curva de potência da máquina elétrica, como uma resposta subamortecida.

A Figura 45 ilustra a consequência da troca de marchas para a bateria durante a operação. Notam-se pontos de baixa eficiência durante o processo de descarga justamente nos intervalos de tempo onde são realizadas as trocas de marcha. O motivo desse comportamento, é um pico na corrente de descarga ocasionado pelo máximo sobressinal apresentado na Figura 44. Essa demanda de potência, ocorre pela retomada instantânea da operação da máquina elétrica.

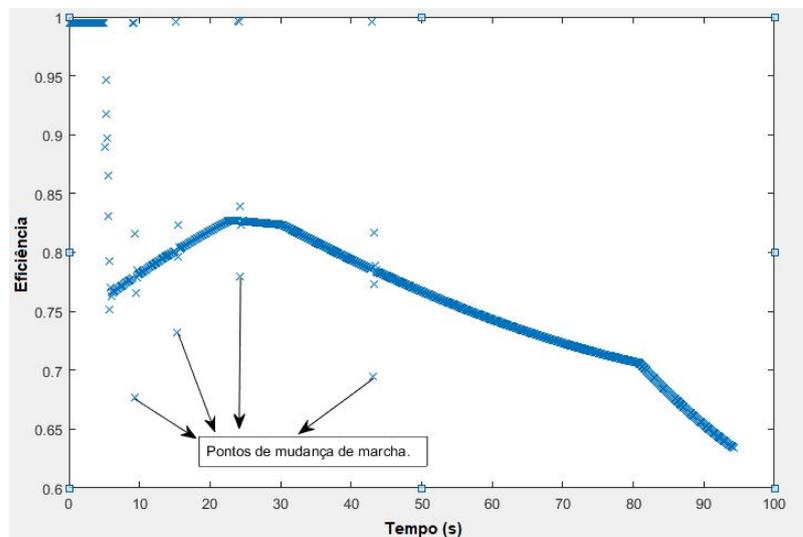
Para se realizar os testes de desempenho a uma velocidade constante, foi considerado um estado inicial de carga da bateria de 70%, como ilustra o primeiro gráfico da Figura 46, assim, conforme o veículo se desloca a carga da bateria diminui até que atinge um ponto crítico, por volta de 30% da carga total. No intuito de proteger a bateria de uma descarga

Figura 44 – Iteração das potências da máquina elétrica e do MCI durante as trocas de marchas.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

Figura 45 – Iteração das potências da máquina elétrica e do MCI durante as trocas de marchas.

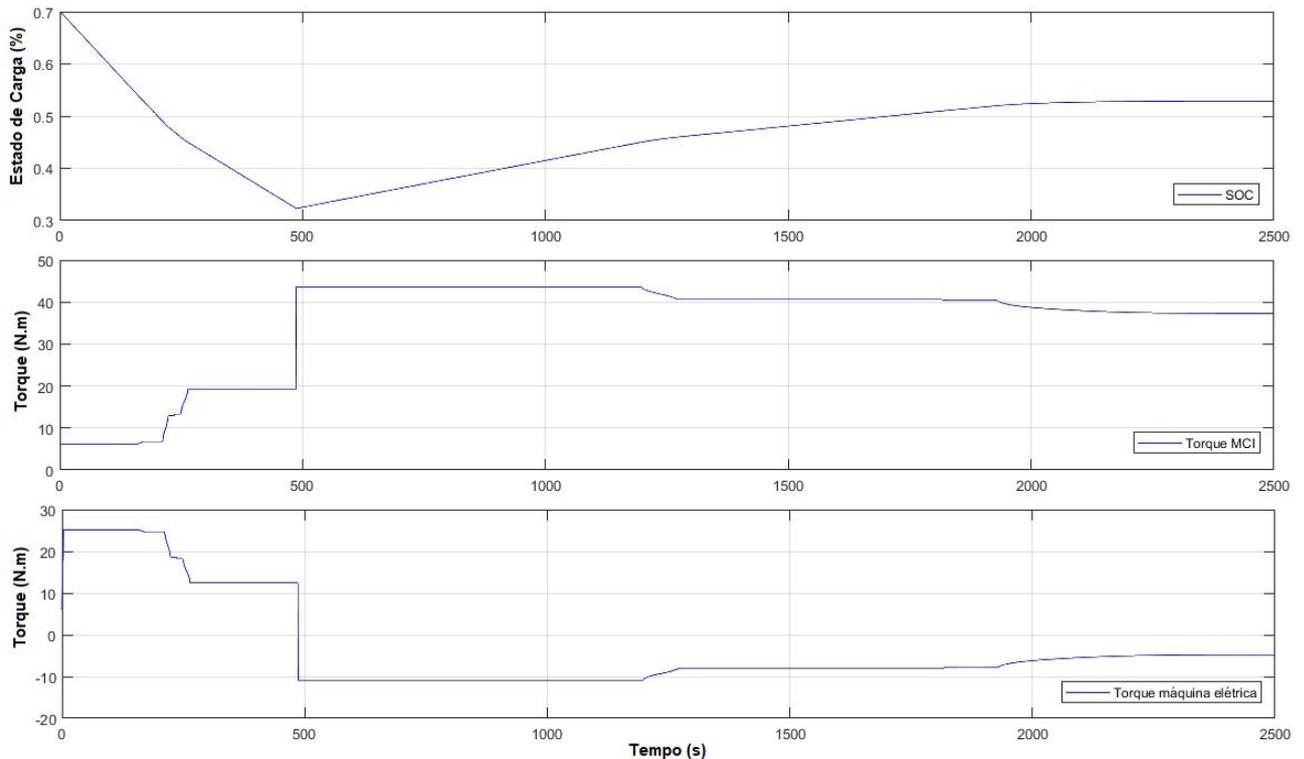


Fonte: ADVISOR - Do Autor.

excessiva, que pode diminuir a sua vida útil, o controlador alterna a operação da máquina elétrica de motor para gerador, fazendo com que o mesmo torne a recarregar as baterias.

O resultado desse processo é apresentado nos gráficos inferiores da Figura 46, onde nota-se um aumento repentino no torque entregue ao sistema pelo MCI, assumindo toda a carga de tração do veículo. De maneira oposta ao MCI o torque da máquina elétrica nesse momento tem uma característica negativa, evidenciando a operação como gerador.

Figura 46 – Iteração do torque entregue as rodas pelo MCI e máquina elétrica para uma velocidade constante.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

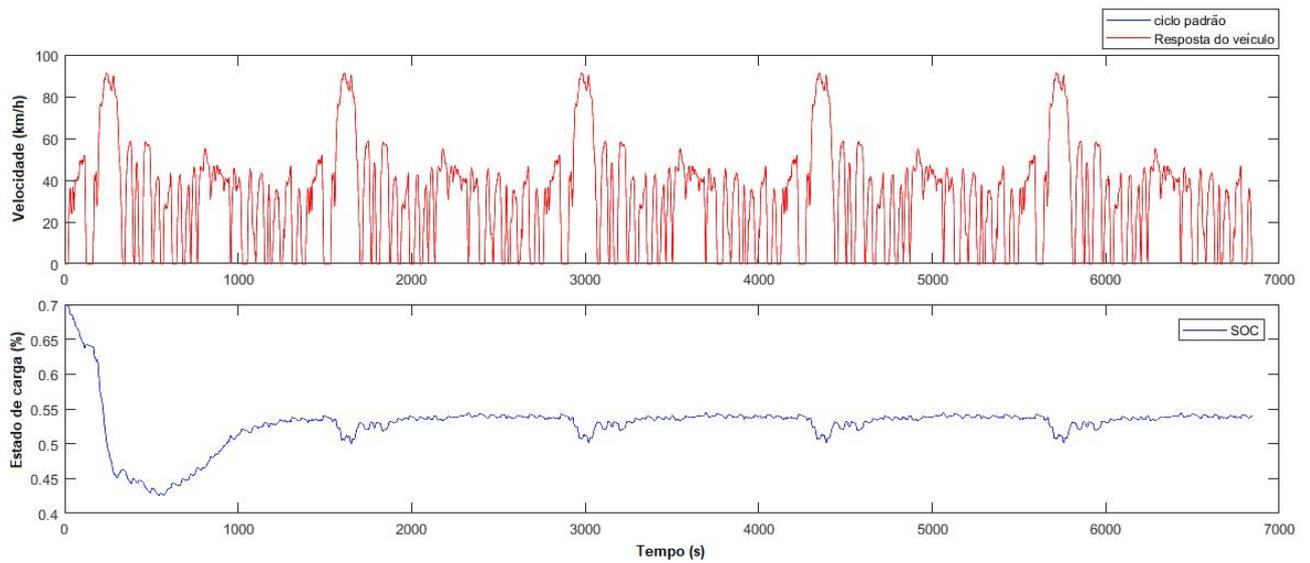
4.2.2 Simulações em ciclos de condução

Ciclo de condução urbano - NBR6601

Para se obter dados comparativos entre o veículo convencional e sua versão híbrida de eixos paralelos em um ambiente de condução urbana foram realizados testes com o ciclo disposto na NBR6601. O cenário foi executado 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 70%. A Figura 47 apresenta no gráfico superior resposta do veículo elétrico híbrido, ao ciclo de condução urbano, repetido cinco vezes consecutivas. Já no gráfico inferior está ilustrado o comportamento do estado de carga da bateria para este ciclo. Nota-se que inicialmente ocorre uma descarga mais expressiva na primeira iteração do ciclo, isso ocorreu por conta da estratégia de controle adotada, que permite que o banco de baterias atinja valores entorno de 30% de carga antes que seja dado início a recarga do banco pela máquina elétrica.

A descarga excessiva das baterias pode causar uma grave redução em sua vida útil e tem consequências negativas do ponto de vista da eficiência durante o processo de descarga, como fica evidenciado na Figura 48, onde a eficiência atinge uma região inferior a 80% durante a descarga. De maneira análoga, a operação da máquina elétrica teve sua

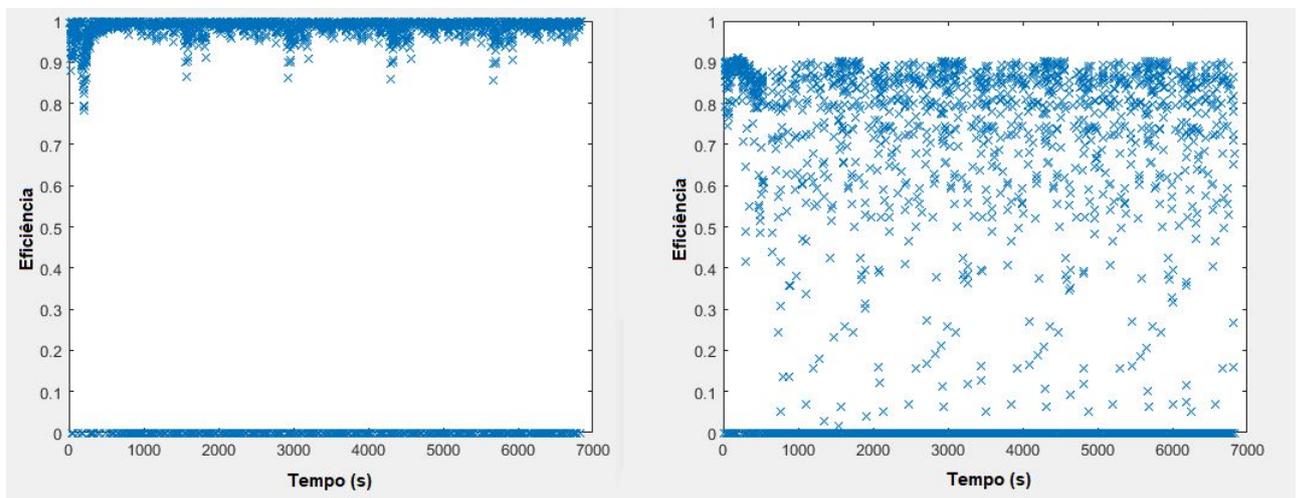
Figura 47 – Ciclo NBR6601 testado cinco vezes seguido pelo estado de carga do banco de baterias.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

eficiência afetada pelo comportamento da fonte de energia.

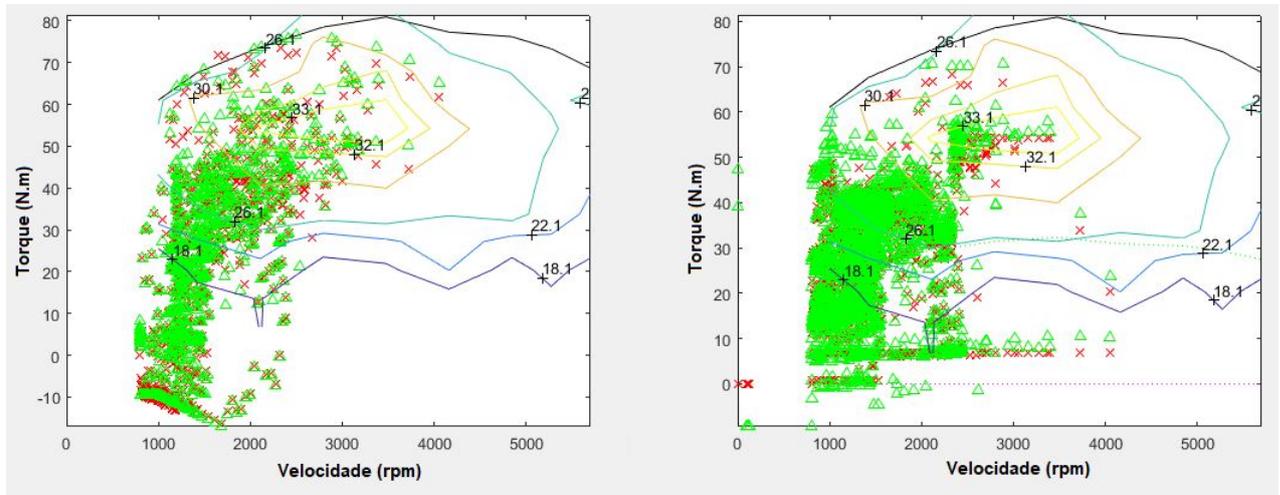
Figura 48 – Eficiência no processo de descarga da bateria (esquerda) e na conversão de energia pela máquina elétrica (direita).



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

A Figura 49 ilustra os pontos de operação do MCI do veículo convencional (esquerda) e do híbrido Paralelo ES (direita) 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. Mesmo com a melhora notada com a frenagem, a estratégia de controle adotada ainda fez uma utilização expressiva do MCI em zonas de operação onde a eficiência é inferior a 18,1%.

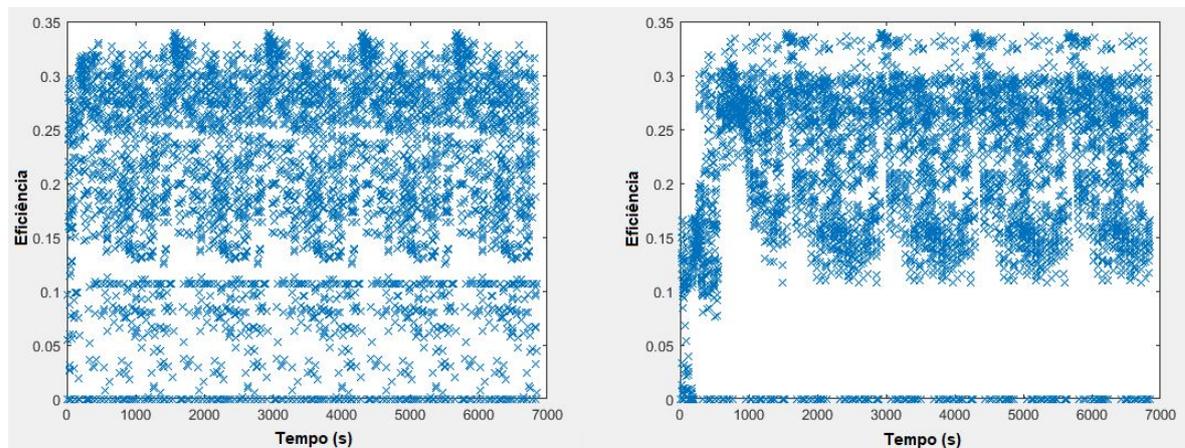
Figura 49 – Mapas do MCI com os pontos de operação para o veículo convencional (esquerda) e para o VEH de eixos paralelos (direita) – Ciclo NBR6601.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

A Figura 50 ilustra os pontos de eficiência do MCI para os dois veículos simulados. Como descrito anteriormente o ciclo foi simulado por cinco vezes consecutivas, sendo que, na primeira etapa a estratégia de controle ainda enxergava um estado de carga mais alto para a bateria. A partir da segunda iteração, já se observa um comportamento repetitivo, isso porque o SOC já esta estabilizado. De forma notável, o MCI do VEH (direita) operou em uma região de maior eficiência. Essa melhora se deve em partes ao torque adicional demandado ao MCI para recarga da bateria.

Figura 50 – Mapas do MCI com os pontos de eficiência em que o MCI operou no veículo convencional (esquerda) e no VEH de eixos paralelos (direita) – Ciclo NBR6601.



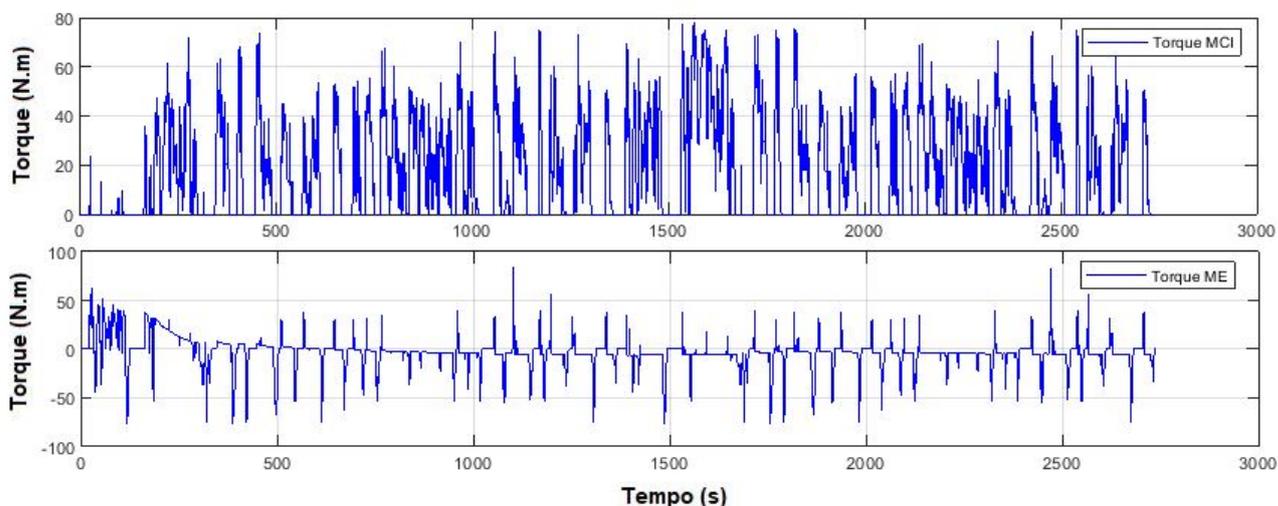
Fonte: ADVISOR - Do Autor.

Devido as características do ciclo de condução urbano, o veículo opera em baixas velocidades e com muitas partidas e paradas. Nesse cenário o MCI apresenta uma baixa

eficiência, sendo mais frequente a atuação da ME. Na Figura 51 é possível observar uma relação entre o torque fornecido por ambas fontes de tração do VEH. Nota-se que embora a tração seja majoritariamente fornecida pelo motor de combustão, em todas as partidas existe um torque auxiliar fornecido pela máquina elétrica.

Um outro ponto importante ilustrado na Figura 51 é a recorrência do torque negativo na ME. Isso ocorre por conta da frenagem regenerativa, devido as muitas paradas contabilizadas durante o ciclo de condução.

Figura 51 – Operação da máquina elétrica e do MCI no ciclo de condução Urbano - NBR6601.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

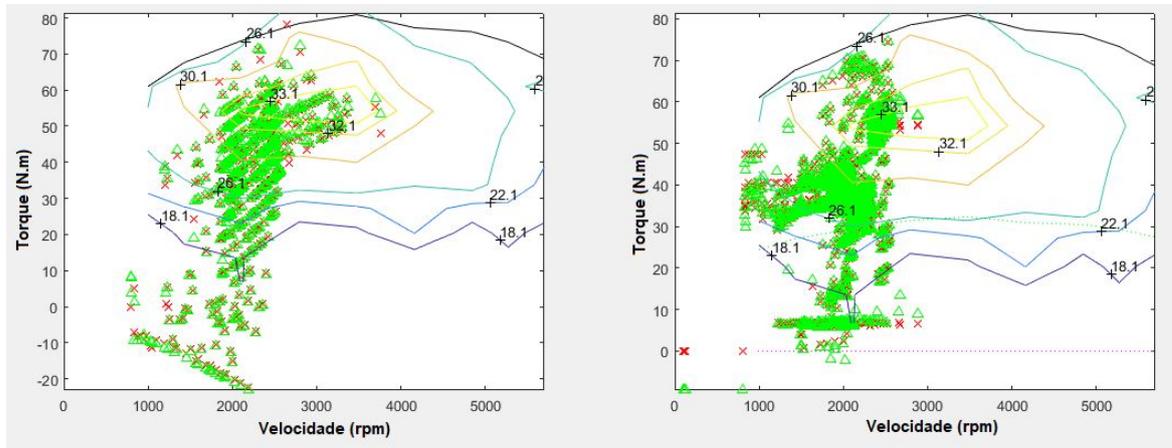
Ciclo de condução rodoviário - NBR7024

As simulações realizadas no cenário descrito no ciclo da norma NBR7024, tomaram como base exatamente as mesmas condições das consideradas para a realização de todas as simulações anteriores. Assim, os resultados obtidos fazem referência ao comportamento do veículo hibridizado em um ciclo de condução rodoviário.

A Figura 52 ilustra as regiões onde o MCI operou durante o ciclo. Como o veículo atua em velocidades maiores, a eficiência do veículo como um todo tende a ser maior, sendo que somente durante os momentos de frenagem e retomada, tem-se uma influência significativa da máquina elétrica no conjunto. Assim como retratado nos testes do ciclo urbano, o MCI não apresenta atuação em áreas de torque negativo.

Observando-se a Figura 53 é possível notar um aumento na eficiência do MCI, contudo, a melhora não é tão expressiva quanto na operação urbana, ilustrada nas simulações anteriores. Tem-se dessa maneira ganhos relativamente pequenos com relação ao consumo de combustível.

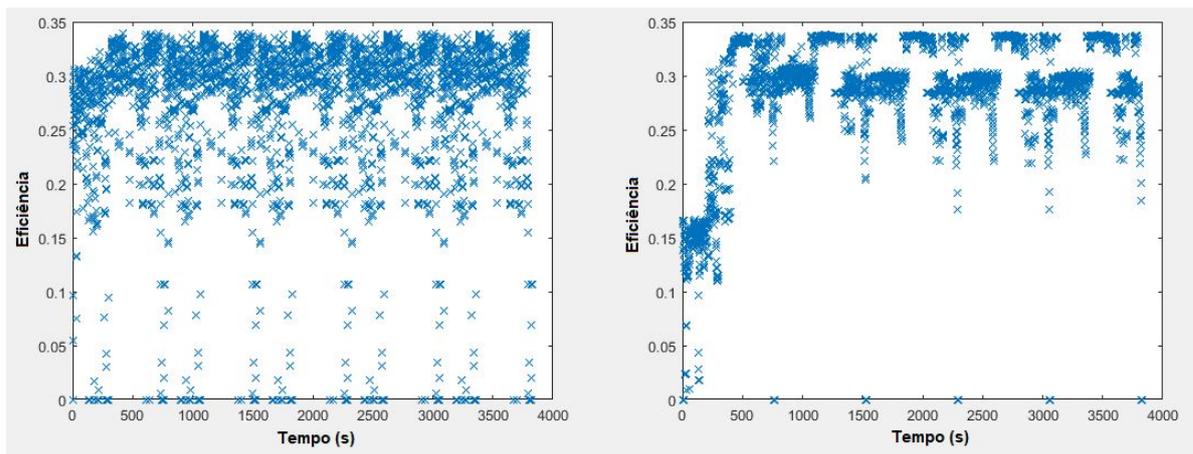
Figura 52 – Mapas do MCI com os pontos de operação para o veículo convencional (esquerda) e para o VEH de eixos paralelos (direita) – Ciclo NBR7024.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

Como citado anteriormente, os pontos de eficiência da primeira iteração não seguem o mesmo padrão do restante do teste por conta do estado de carga inicial da bateria. Uma vez que se encontra carregada a 70%, não é demandado do MCI um torque adicional para operar a máquina elétrica como gerador. Como resultado, o MCI acaba por atuar em zonas de baixa eficiência.

Figura 53 – Mapas do MCI com os pontos de eficiência em que o MCI operou no veículo convencional (esquerda) e no VEH de eixos paralelos (direita) – Ciclo NBR7024.



Fonte: ADVISOR - Do Autor.

4.3 Análise comparativa e resultados

O primeiro parâmetro analisado foi o consumo de combustível. As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados referentes ao consumo de combustível para ambos os veículos, nos ciclos NBR6601 e NBR7024, respectivamente.

Tabela 12 – Eficiência e consumo de combustível no ciclo NBR6601.

Ciclo NBR6601			
Ciclo de Condução	Eficiência média do MCI	Eficiência do veículo	Consumo (E-22)
Convencional	22%	9,2%	16,66 km/L
Híbrido Eixos Paralelos	25%	10,2%	18,18 km/L
Melhoria	12,0%	9,8%	11,75%

Fonte: Do Autor.

Tabela 13 – Eficiência e consumo de combustível no ciclo NBR7024.

Ciclo NBR7024			
Ciclo de Condução	Eficiência média do MCI	Eficiência do veículo	Consumo (E-22)
Convencional	29%	20,4%	22,22 km/L
Híbrido Eixos Paralelos	30%	20,8%	22,22 km/L
Melhoria	3,33%	1,92%	0%

Fonte: Do Autor.

Devido a maior atuação da máquina elétrica no ciclo de condução NBR6601, os ganhos contabilizados com a hibridização foram maiores para o cenário de testes urbano. Tanto o MCI quanto o veículo como um todo obtiveram uma melhora significativa. Do ponto de vista do consumo de combustível, pode-se obter uma economia de 11,75%. Embora o veículo hibridizado não tenha apresentado uma economia de combustível notável para o ciclo de condução NBR7024, o mesmo apresentou aumento de eficiência do MCI e do veículo como um todo. Para uma rodagem anual média de 20.000 km e o preço médio da gasolina em R\$ 4,76 o ganho em redução de consumo é de 100 litros/ano, o que representa uma economia anual de R\$ 476,00.

Mesmo com as melhoras em consumo e eficiência, os maiores ganhos da hibridização se deram na redução de gases pelo veículo. Em ambos os cenários de testes propostos houve uma grande redução nas emissões de gases estufa, especialmente no ciclo NBR6601, onde as emissões de monóxido de carbono foram reduzidas em 22,64%. Vale ressaltar que os dados referentes a emissão de poluentes tem como base os parâmetros disponibilizados na biblioteca do ADVISOR e que estes são baseados em dados reais coletados em laboratório.

Assim, os valores obtidos como resposta são aproximações do que pode ser obtido em testes reais.

Tabela 14 – Emissão de gases poluentes dos veículos simulados no ciclo NBR6601.

Emissão de gases poluentes (g/km)			
Veículo simulado	HC	CO	NOx
Convencional	0,153	0,574	0,149
Híbrido Paralelo	0,132	0,444	0,126
Redução	13,72%	22,64%	15,43%

Fonte: Do Autor.

Tabela 15 – Emissão de gases poluentes dos veículos simulados no ciclo NBR7024.

Emissão de gases poluentes (g/km)			
Veículo simulado	HC	CO	NOx
Convencional	0,114	0,350	0,145
Híbrido Paralelo	0,100	0,343	0,130
Redução	12,28%	2%	10,34%

Fonte: Do Autor.

5 Conclusão

O transporte rodoviário é o maior produtor de gases estufa no setor de transportes, contudo, o motor a combustão não é o único responsável por todas essas emissões, variados fatores influenciam para tal marco. Encontrar uma nova tecnologia que permita substituir o uso excessivo do petróleo como combustível é essencial para a sociedade moderna. Os avanços recentes em sistemas de armazenamento de energia, controle de máquinas elétricas e conversores de potência mostram que o processo de transição de tecnologias já começou. A fim de dominar uma parcela do mercado que vem se expandindo devido a incentivos governamentais e privados diversas empresas do ramo automotivo têm alcançado avanços significativos.

Cada fabricante está avançando com uma metodologia diferente, não existindo uma arquitetura padrão para os veículos híbridos. Em todas as frentes de pesquisa, a implementação de um veículo híbrido tende a aumentar os custos em relação aos veículos convencionais. É imprescindível o papel do governo como agente estimulador para a criação de projetos de lei que visam, não só a redução de impostos sob veículos híbridos, mas também benefícios para os consumidores que os utilizam. Tais projetos ainda não receberam a devida atenção dos governantes no Brasil, mas em diversos países já estão em prática medidas de incentivo.

O motivo da escolha da hibridização ter sido realizada em um veículo convencional de pequeno porte, fez-se por conta da utilização em grande escala do modelo. Atualizar a frota de veículos a nível nacional reduziria de forma expressiva as emissões de gases no setor de transportes e o consumo de combustível. Os maiores desafios para tal são os custos acessíveis para a tecnologia. Vale ressaltar, que a hibridização é um caminho viável na transição da tecnologia do MCI para uma tração totalmente elétrica e mais eficiente, isso porque não ela não demanda uma mudança completa na infraestrutura rodoviária existente.

Foram obtidos ganhos significativo no ponto de vista de desempenho, consumo de combustível e emissão de gases poluentes após a hibridização do modelo. Ambos os modelos simulados atenderam as condições impostas nos ciclos de condução urbana e rodoviária definidos pela ABNT, o que indica que os modelos possuem os requisitos para certificação do consumo e emissão de gases.

5.1 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, existem outras tratativas que podem melhorar ainda mais os ganhos obtidos com a hibridização. Sugere-se como temas para a continuidade do trabalho os seguintes pontos:

1. Estudos focados nas estratégias de controle utilizadas tanto para o acionamento da máquina elétrica quanto do MCI;
2. Variação dos componentes utilizados no sistema de tração elétrico visando aumentar a densidade de potência e simplificar o conjunto;
3. Desenvolvimento de sistemas híbridos de armazenamento de energia. Cada fonte de energia apresentada possui vantagens únicas. Assim, visando se utilizar o melhor os benefícios oferecidos por cada uma, torna-se válida a combinação de componentes diferentes;
4. Estudo da eletrificação total de um veículo convencional, visando mensurar os investimentos necessários e realizar um comparativo com o modelo híbrido desenvolvido;
5. Modelagem de diferentes arquiteturas híbridas baseadas em uma mesma carroceria.

Referências

- ANDRADE, R. H. P. Terras raras. *Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM*, p. 2, 2014. 40
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil. *BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011.*, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2011. 1, 5
- BOSSEL, U. Does a hydrogen economy make sense? *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 94, n. 10, p. 1826–1837, 2006. 34, 35
- BRAVO, D. M.; MEIRELLES, P. S.; GIALONARDO, W. Análise dos desafios para a difusão dos veículos elétricos e híbridos no brasil. *Blucher Engineering Proceedings*, v. 1, n. 2, p. 24–45, 2014. 2, 3, 4
- BRAVO, D. M. et al. Estudo sobre a utilização de um sistema auxiliar elétrico para a propulsão de veículos leves de baixa cilindrada. [sn], 2016. 32
- CAO, J.; EMADI, A. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on power electronics*, IEEE, v. 27, n. 1, p. 122–132, 2012. 35
- CAO, J.; SCHOFIELD, N.; EMADI, A. Battery balancing methods: A comprehensive review. In: IEEE. *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE*. [S.l.], 2008. p. 1–6. 35
- CARICCHI, F. et al. Study of bi-directional buck-boost converter topologies for application in electrical vehicle motor drives. In: IEEE. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998. APEC'98. Conference Proceedings 1998., Thirteenth Annual*. [S.l.], 1998. v. 1, p. 287–293. 36
- CASTRO, B. H. R. d.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. *BNDES Setorial, n. 32, set. 2010, p. 267-310*, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010. 2, 4
- CHAPMAN, L. Transport and climate change: a review. *Journal of transport geography*, Elsevier, v. 15, n. 5, p. 354–367, 2007. 1
- EDWARDS, D. B.; KINNEY, C. Advanced lead acid battery designs for hybrid electric vehicles. In: IEEE. *Applications and Advances, 2001. The Sixteenth Annual Battery Conference on*. [S.l.], 2001. p. 207–212.
- EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. [S.l.]: CRC press, 2009. 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 37, 38, 41
- EMADI, A. et al. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 54, n. 3, p. 763–770, 2005. ISSN 00189545. 26

- FETCENKO, M. et al. Recent advances in nimh battery technology. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 165, n. 2, p. 544–551, 2007.
- FRIESKE, B.; KLOETZKE, M.; MAUSER, F. Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles. In: IEEE. *Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013 World*. [S.l.], 2013. p. 1–12. 33
- FUHS, A. *Hybrid vehicles: and the future of personal transportation*. [S.l.]: CRC Press, 2008. 31
- GAO, L.; DOUGAL, R. A.; LIU, S. Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid. *IEEE transactions on power electronics*, IEEE, v. 20, n. 1, p. 236–243, 2005. 35
- GUZZELA, A. S. L. *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*. [S.l.: s.n.], 2013. 418 p.
- HARLOW, J. H. *Electric and hybrid vehicles design fundamentals*. Crc Press, 2005. 23
- HUNG, S. T.; HOPKINS, D. C.; MOSLING, C. R. Extension of battery life via charge equalization control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 40, n. 1, p. 96–104, 1993. 35
- HUSAIN, I. *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. [S.l.]: CRC press, 2011. 1, 38
- IEA. *International Energy Agency - Transport, Energy and CO2*. IEA/OECD. 2009. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/transport2009.pdf>.Acessadoem20-05-2018>. 2
- KHALIGH, A.; LI, Z. Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 59, n. 6, p. 2806–2814, 2010. 33, 34
- LAM, L.; LOUEY, R. Development of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications. *Journal of power sources*, Elsevier, v. 158, n. 2, p. 1140–1148, 2006. 33
- LARMINIE, J.; LOWRY, J. *Electric Vehicle Technology Explained Electric Vehicle Technology Explained*. [S.l.: s.n.], 2012. 325 p. ISSN 10685731. ISBN 9781119942733. 1, 18, 19, 20, 33
- MAGALHÃES, C. M. M. Hibridização de um smart fortwo coupé: Projecto do método de gestão dos modos de funcionamento do sistema híbrido. 2014. 19
- MARKEL, T. et al. Advisor: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. *Journal of power sources*, Elsevier, v. 110, n. 2, p. 255–266, 2002. 48
- N.549. *Medição de Emissão e Consumo em Veículos Elétricos Híbridos Leves*. 2012. Disponível em: <http://docplayer.com.br/4118277-Figura-1-quantidades-de-energia-antes-e-depois-do-ensaio-1-escopo.html#show_full_text.Acessadoem20-09-2018>. 60
- OLIVEIRA, E. C. Modelagem e simulação de veículos elétricos e híbridos. *rev*, 2005. 29

- OLSON, J. B.; SEXTON, E. D. Operation of lead-acid batteries for hev applications. In: IEEE. *Battery Conference on Applications and Advances, 2000. The Fifteenth Annual*. [S.l.], 2000. p. 205–210.
- POTTER, S. Transport energy and emissions: urban public transport. In: *Handbook of Transport and the Environment*. [S.l.]: Emerald Group Publishing Limited, 2003. p. 247–262. 1
- POULLIKKAS, A. Sustainable options for electric vehicle technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 41, p. 1277–1287, 2015. 22
- RASHID, M. H. *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. [S.l.]: Makron, 1999. 37
- REIF, K. Fundamentals of automotive and engine technology. *Springer: Bosch professional automotive information*, Springer, 2014. 31
- RIBEIRO, P. F. et al. Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 89, n. 12, p. 1744–1756, 2001. 33
- SANTICIOLLI, F. M. et al. *Evaluation of Available Energy for Regenerative Breaking at the Brazilian Driving Cycle*. [S.l.], 2013. 31, 42, 44, 45
- SILVA, R. A. Avaliação da hibridização de um veículo nacional compacto utilizando a arquitetura paralela de eixos separados. *Tese de Doutorado*, PPGEE, v. 1, p. 155, 2017. 19, 23, 38, 39, 42, 45
- SOUZA, R. B. d. et al. Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos. [sn], 2010. 26, 27
- TANAKA, C. N. *Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. 1
- VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. d. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. *BNDES Setorial, Rio de Janeiro*, n. 41, 2015. 5
- WEHREY, M. C. What's new with hybrid electric vehicles. *IEEE power and energy magazine*, IEEE, v. 2, n. 6, p. 34–39, 2004.
- WILLIAMSON, S. S. et al. Impact of energy storage device selection on the overall drive train efficiency and performance of heavy-duty hybrid vehicles. In: IEEE. *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*. [S.l.], 2005. p. 10–pp.
- 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*, IEEE, v. 55, n. 6, p. 1756–1764, 2006. 38, 39

ANEXO A – Parâmetros adotados para as simulações

Neste anexo, estão dispostos os parâmetros adotados nas simulações realizadas no ADVISOR. Assim, na Tabela 16 estão apresentadas as considerações de algumas variáveis necessárias para gerar os mapas do MCI, necessários para representá-los no *software* de simulação.

Tabela 16 – Considerações utilizadas para o MCI e para o Combustível utilizado.

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

Fonte: Do Autor.

Na Tabela 17 constam os pesos em Kg dos principais componentes inseridos no sistema de tração do veículo convencional para torná-lo híbrido. Com a hibridização para a arquitetura de Eixos Paralelos, os novos componentes do sistema de tração elétrica embarcado no eixo dianteiro agregaram um aumento de massa de aproximadamente 105 Kg ao veículo.

Tabela 17 – Peso adicionado ao veículo devido ao sistema de tração elétrico.

Peso adicionado ao veículo		
Acoplamento mecânico	20	Kg
Máquina elétrica	56,75	Kg
Banco de baterias	28	Kg
Total	104,75	Kg

Fonte: Do Autor.

O ADVISOR é uma ferramenta muito completa e está detalhada, ela já teve sua assertividade testada em diversos trabalhos realizados no meio acadêmico e industrial. Devido a este fator todos os parâmetros necessários para a simulação foram escolhidos no banco de dados do *software* e combinados a informações retiradas de trabalhos de outros autores que já utilizaram o simulador. As Tabelas 18 e 19 apresentam esses arquivos utilizados como base para criar os modelos utilizados neste trabalho.

Tabela 18 – Descrição dos arquivos utilizados como base para implementar os modelos do veículo deste trabalho.

Arquivos do veículo – Banco de dados do ADVISOR	
Descrição do arquivo “.m” do componente	Arquivo original
Modelo do Veículo	VEH_SMCAR.m
Modelo de rodas e eixo de veículo	WH_SMCAR.m
Modelo do motor de combustão interna	FC_SI41_emis.m
Modelo do escapamento	EX_SI.m
Modelo da transmissão	TX_5SPD.m
Modelo da máquina elétrica	MC_PRIUS_JNP.m
Modelo do sistema de armazenamento de energia	ESS_LI7_temp.m
Modelo do acoplamento mecânico	TC_DUMMY

Fonte: Do Autor.

Tabela 19 – Descrição dos arquivos utilizados para simular os modelos do veículo deste trabalho.

Arquivos do veículo – Modificados pelo autor	
Descrição do arquivo “.m” do componente	Arquivo utilizado
Modelo do Veículo	VEICULO_PADRAO.m
Modelo de rodas e eixo de veículo	RODAS_PADRAO.m
Modelo do motor de combustão interna	MCI_SI41_PADRAO.m
Modelo do escapamento	ESCAPAMENTO_SI_PADRAO.m
Modelo da transmissão	TRANSMISSAO_5.m
Modelo da máquina elétrica	MAQUINA_ELE_30KW.m
Modelo do sistema de armazenamento de energia	BATERIA_LIO_25KW.m
Modelo do acoplamento mecânico	ACOPLAMENTO_MECANICO.m

Fonte: Do Autor.

As simulações realizadas neste trabalho com o auxílio do ADVISOR levam em conta algumas considerações importantes, que na prática não acontecem. A Tabela 20 apresenta os valores utilizados para as constantes físicas.

Tabela 20 – Considerações utilizadas para as constantes físicas.

Constantes físicas		
Gravidade (constante)	9,81	m/s^2
Densidade do ar (constante)	1,2	Kg/m^3
Temperatura ambiente (constante)	25	$^{\circ}C$

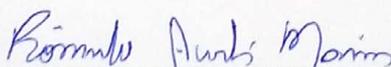
Fonte: Do Autor.



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "**Análise comparativa da hibridização de um veículo convencional para a arquitetura Híbrida de Eixos Paralelos**" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 18 de Dezembro de 2018.


Rômulo Acerbi Marin

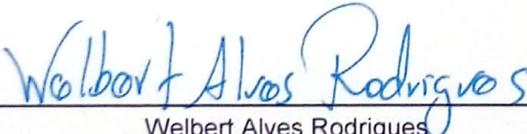


DECLARAÇÃO DE CONFERÊNCIA DA VERSÃO FINAL

Declaro que conferi a versão final a ser entregue pelo aluno **Rômulo Acerbi Marin**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado **Análise comparativa da hibridização de um veículo convencional para a arquitetura Híbrida de Eixos Paralelos** quanto à conformidade nos seguintes itens:

1. A monografia corresponde a versão final, estando de acordo com as sugestões e correções sugeridas pela banca e seguindo as normas ABNT;
2. A versão final da monografia inclui a ata de defesa, a ficha catalográfica e o termo de responsabilidade devidamente assinado.

João Monlevade, 18 de Dezembro de 2018.



Welbert Alves Rodrigues