



Fernanda Cristina Corrêa

Desenvolvimento e Análise de Estratégias de Gerenciamento de Potência em Veículo Elétrico Híbrido de Configuração Paralela

62/2013

CAMPINAS
2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Fernanda Cristina Corrêa

Desenvolvimento e Análise de Estratégias de Gerenciamento de Potência em Veículo Elétrico Híbrido de Configuração Paralela

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO(A) ALUNO(A)

.....*Fernanda Cristina Corrêa*.....

....., E ORIENTADA PELO(A)

PROF(A). DR(A).*Franco Giuseppe Dedini*

.....

.....
ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

C817d Corrêa, Fernanda Cristina, 1984-
Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela / Fernanda Cristina Corrêa. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Franco Giuseppe Dedini.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Lógica fuzzy. 2. Veículos elétricos híbridos. 3. Veículos - Dinâmica. I. Dedini, Franco Giuseppe, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Development and analysis of strategies of power management in hybrid electric vehicles with parallel configuration

Palavras-chave em inglês:

Fuzzy logic

Hybrid electric vehicles

Vehicles dynamics

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutora em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Franco Giuseppe Dedini [Orientador]

Robson Pederiva

Ely Carneiro de Paiva

Lauro Cesar Nicolazzi

Marcelo Becker

Data de defesa: 12-07-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO MECÂNICO

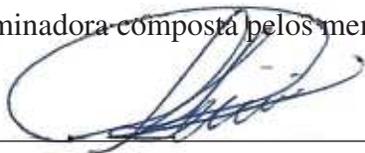
TESE DE DOUTORADO

**Desenvolvimento e Análise de Estratégias de
Gerenciamento de Potência em Veículo Elétrico
Híbrido de Configuração Paralela**

Autora: Fernanda Cristina Corrêa

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



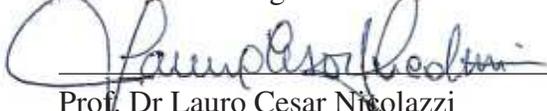
Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Robson Pederiva
Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP



Prof. Dr. Ely Carneiro de Paiva
Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP



Prof. Dr. Lauro Cesar Nicolazzi
Departamento de Engenharia Mecânica - UFSC



Prof. Dr. Marcelo Becker
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Campinas, 12 de julho de 2013.

Dedico este trabalho a meus pais José Carlos e Dalva, aos meus irmãos Carlos Eduardo e Luciana e ao meu noivo Luiz Eduardo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ter sido concluído sem a ajuda de diversas pessoas que compartilharam comigo durante essa longa jornada. Assim, presto minhas sinceras homenagens e agradecimentos:

Primeiramente a Deus, agradeço pela vida e pelo livre arbítrio, bem como a Nossa Senhora, agradeço pela sua intercessão na minha vida.

A CPFL Piratininga, CPFL Santa Cruz, Aneel pelo suporte financeiro e oportunidade de trabalhar no Projeto Roda Elétrica e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agradeço também pelo suporte financeiro à realização deste trabalho. Agradeço também o auxílio prestado pela GM, CPqD e Magneti Marelli.

A meu orientador Professor Franco Giuseppe Dedini pela orientação, pela paciência nas horas difíceis e principalmente, a confiança depositada em mim durante esses anos de convivência.

Agradeço aos meus pais José Carlos e Dalva, pelo amor incondicional, dedicação e apoio que sempre foram fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço aos meus irmãos, Carlos Eduardo e Luciana, e cunhado João Paulo por todo apoio, incentivo e carinho.

Agradeço ao meu noivo Luiz Eduardo que desde o meu início no meio acadêmico foi meu alicerce, sempre me apoiando nos momentos difíceis.

Aos colegas do LabSIn, Adriana, Marília, Ludmila, Fabio, Heron, Arthur, Jony, Eduardo, agradeço pelos agradáveis momentos de descontração, conhecimentos compartilhados e amizade dedicada.

Aos professores, funcionários e colegas da Universidade Estadual de Campinas, agradeço por todo auxílio.

Enfim, a todos os amigos e familiares, agradeço pelo apoio e incentivo.

Obrigada por tudo!!!!

*“Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas
o que você faz com aquilo que você sabe.” -
Aldous Huxley*

RESUMO

O considerável aumento de automóveis tem causado graves efeitos ao meio ambiente e para o homem, fato este que incentiva a pesquisa pela obtenção de formas de energia mais limpa. A adoção da tecnologia propulsora híbrida veicular tem contribuído para a redução da agressão causada pelos automóveis ao meio ambiente. O termo “híbrido” deriva da combinação de duas ou mais fontes de potência, sendo que a combinação mais comum se faz através de um motor de combustão interna (MCI), comumente usado em veículos convencionais, com o conjunto bateria e motor elétrico (ME) usados nos VEs (Veículos Elétricos). Em geral, a principal razão para usar a arquitetura híbrida elétrica é o grau de liberdade adicional devido à presença de uma fonte de energia adicional além do tanque de combustível; isto implica que, a cada instante, a potência necessária pelo veículo pode ser fornecida por uma dessas fontes, ou por uma combinação das duas. Escolher a combinação correta é normalmente uma tarefa complexa. Dentro desse contexto, neste trabalho é realizado o desenvolvimento e a análise das estratégias de gerenciamento de potência em um VEH a fim de minimizar o seu consumo de combustível e conseqüentemente suas emissões. São desenvolvidas duas estratégias de gerenciamento, a primeira baseada em regras e a segunda utilizando sistemas *fuzzy*. Além disso, também é realizado o controle interno do motor a combustão, de forma que este opere, na maior do tempo, em regiões que tenham um menor consumo específico. Por meio da utilização das estratégias de gerenciamento de potência aliadas ao controle do motor a combustão é possível obter uma considerável economia de combustível. Comparando-se as duas estratégias desenvolvidas, a estratégia baseada em *fuzzy* é a que proporcionou melhor economia de combustível.

Palavras-Chave: lógica fuzzy; veículos elétricos híbridos; Veículos - Dinâmica.

ABSTRACT

The considerable increase of automobiles has caused serious effects to the environment and to man, this fact encourages research by obtaining forms of cleaner energy. The adoption of hybrid vehicle propulsion technology has contributed to the reduction of aggression caused by car to the environment. The term "hybrid" derives from the combination of two or more power sources, and the most common combination is by of the engine (ICE), commonly used in conventional vehicles, together with the battery and motor electric (ME) used in EVs (Electric Vehicles). In general, the main reason to use the architecture electric hybrid is the additional degree of freedom due to the presence of an energy source plus additional fuel tank, this implies that, at each instant, the power required the vehicle may be provided by one of these sources, or a combination of both. Choose the correct combination is usually a complex task. Within of this context, this work development is undertaken and analysis of strategies for power management in a VEH in order to minimize fuel consumption and thus emissions. Two management strategies are developed, the first is based in rules and the second is based in fuzzy systems. Furthermore, it is also performed internal control engine combustion of so that it operates at greater time in regions having a lower specific fuel consumption. Through the use of power management strategies coupled with the motor control combustion is possible to obtain a considerable saving of fuel. Comparing the two strategies developed, the strategy based on fuzzy is that provided better economy fuel.

Keywords: fuzzy logic; hybrid electric vehicles; vehicles dynamics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1	Carro elétrico-gasolina Krieger.	11
2.2	Porsche nº1 Lohner-Wagen de 1890 com dois MEs nas rodas dianteiras.	11
2.3	Um dos primeiros VEHs projetado por Ferdinand Porsche, chamado Mix-Wagen.	12
2.4	Veículo híbrido em configuração série.	16
2.5	Fluxograma de energia na configuração série.	17
2.6	Veículo híbrido em configuração paralelo.	17
2.7	Fluxograma de energia na configuração paralelo.	18
2.8	Características de acionamento de um VE e de um MCI.	19
3.1	Sistemas de coordenadas do veículo conforme SAE.	29
3.2	Mapa de consumo esquemático de um MCI.	36
3.3	Fluxo de energia em sistemas de propulsão convencional.	37
3.4	Divisão didática de um sistema de controle automotivo.	39
3.5	Diagrama de Blocos de uma ECU	43
3.6	Sensor Hall com abertura entre o sensor e o ímã.	45
3.7	Classificação Geral dos Motores.	47
3.8	Vista em corte transversal de um motor elétrico CC.	48
3.9	Regra da mão-esquerda de Fleming.	50
3.10	Bobina sob a ação de um campo magnético.	50
3.11	Distribuição do fluxo de campo e da corrente no rotor.	51
3.12	Circuito equivalente para um motor C.C. com ímãs permanentes.	54
3.13	Torque versus velocidade angular de um motor elétrico CC.	54
3.14	Direção da corrente e magnitude da f_{cem} na ação regenerativa.	55
3.15	Representação esquemática de uma máquina de CC mostrando as direções de referência um motor (a) e para um gerador (b).	57
3.16	Circuito elétrico simplificado equivalente a uma bateria.	60
3.17	Voltagem de circuito aberto em função do estado de carga para uma célula típica de bateria chumbo ácido.	68

4.1	Esquemático do VEH de configuração paralela com os principais subsistemas.	70
4.2	Modelo de bancada para simulação.	73
4.3	Bloco gerado pelo Adams	79
4.4	Superfície de torque de um MCI em função da velocidade de rotação e da posição da borboleta	82
4.5	Representação em diagrama de blocos do MCI.	83
4.6	Diagrama em blocos das equações elétricas e dinâmicas para um motor C.C. com campo independente.	84
4.7	Perfis de velocidade por tempo dos ciclos NBR6601 (A) e NBR7024 (B).	87
4.8	Entradas e Saídas do modelo da bateria proposto.	88
4.9	Fluxograma do algoritmo da EGP baseada em regras e ME atuando como principal propulsora quando a potência requerida é positiva.	91
4.10	Fluxograma do algoritmo da EGP baseada em regras e ME atuando como principal propulsora quando a potência requerida é negativa.	91
4.11	Fluxograma do algoritmo da EGP baseada em regras e Mci atuando como principal propulsora quando a potência requerida é positiva.	92
4.12	Representação esquemática de um controlador <i>fuzzy</i>	94
4.13	Variáveis de entrada com seus respectivos universo de discurso e grau de pertinência (a) Potência demanda P_{dem} , (b) Profundidade de Descarga da Bateria (DoD) e (c) Frenagem ($Freq$).	96
4.14	Variáveis de saída com seus respectivos universo de discurso e grau de pertinência (a) Potência do ME P_{ME} , (b) Potência do MCI (P_{MCI}), (c) Potência da Bateria (P_b) e (d) Torque do freio (T_{fre})	98
4.15	Mapa de Consumo do MCI destacando-se região de maior eficiência	101
4.16	Diagrama em blocos para a representação do VEH Paralelo estudado.	102
5.1	Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do veículo convencional.	106
5.2	Dispersão do consumo específico em função da rotação e torque do MCI para o veículo convencional	107
5.3	Dispersão do consumo específico em função da rotação e torque do MCI para o VEH baseado em Regras e com o ME como principal fonte propulsora.	109

5.4	Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH baseado em Regras e com o ME como principal fonte propulsora.	109
5.5	Comportamento do DOD da bateria para o VEH com EGP baseada em regras e MCI como fonte principal propulsora.	110
5.6	Dispersão do consumo específico do MCI para o para o VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora e com limitação de faixa de rotação do MCI.	111
5.7	Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora e com limitação de faixa de rotação do MCI.	112
5.8	Comportamento do DoD da bateria para o VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora e com limitação de faixa de rotação do MCI. . . .	112
5.9	Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora.	114
5.10	Dispersão do consumo específico do MCI do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora.	114
5.11	Comportamento do DoD da bateria do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora.	115
5.12	Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora e com limitada faixa de rotação.	116
5.13	Dispersão do consumo específico do MCI do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora e com limitada faixa de rotação.	117
5.14	Comportamento do DOD da bateria do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora e com limitada faixa de rotação.	117
5.15	Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação e abertura de borboleta limitados.	118
5.16	Visualização dos pontos de perfis de velocidade onde o VEH não consegue seguir o ciclo urbano.	119

5.17	Dispersão do consumo específico do MCI do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação e abertura de borboleta limitados.	119
5.18	Comportamento do DOD da bateria do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação e abertura de borboleta limitados.	120
5.19	Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação, abertura de borboleta e torque de saída limitados.	121
5.20	Dispersão do consumo específico do MCI do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação, abertura de borboleta e torque de saída limitados.	122
5.21	Comportamento do DOD da bateria do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação, abertura de borboleta e torque de saída limitados.	122
5.22	Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em <i>fuzzy</i>	124
5.23	Dispersão do consumo específico do MCI para o VEH com EGP baseada em <i>fuzzy</i>	124
5.24	Comportamento do <i>DOD</i> da bateria do VEH com EGP baseada em <i>fuzzy</i>	125
5.25	Comparativo das EGPs desenvolvidas para o ciclo urbano	125
5.26	Dispersão do consumo específico do MCI para o VEH com EGP baseada em regras (ME) e para o veículo convencional.	127
5.27	Dispersão do consumo específico do MCI para o VEH com EGP baseada em <i>fuzzy</i> e com EGP baseada em regras (MCI)	128
5.28	Correlação entre as velocidades do ciclo e do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI com parâmetros limitados.	128
5.29	Correlação entre as velocidades do ciclo e do VEH com EGP baseada em <i>fuzzy</i>	129
5.30	Comportamento da bateria para o VEH seguir o ciclo rodoviário com a EGP baseada em regras e com o MCI com parâmetros limitados.	130
5.31	Comportamento da bateria para o VEH seguir o ciclo rodoviário com a EGP baseada em <i>fuzzy</i>	130

LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros nominais usuais de uma bateria chumbo ácido (REVOREDO, 2007)	64
3.2	Tempo de descarga aproximado para uma bateria com capacidade nominal de 40Ah definida para 5h, em função da solicitação de diferentes correntes (REVOREDO, 2007)	65
4.1	Dados veículo A	72
4.2	Troca de marchas conforme fabricante	80
5.1	Consumo de combustível para o veículo convencional dada a variação em sua massa total.	107
5.2	Consumo de combustível para o VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora.	108
5.3	Consumo de combustível para o VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora e com limitação de faixa de rotação do MCI.	111
5.4	Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora.	113
5.5	Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora e com limitada faixa de rotação.	115
5.6	Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação e abertura de borboleta limitados. . . .	118
5.7	Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação, abertura de borboleta e torque de saída limitados.	121
5.8	Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em <i>fuzzy</i>	123
5.9	Consumo de combustível das EGPs para seguir o ciclo rodoviário NBR7024.	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

CAN	Controller Area Network
CARB	California Air Resources Board
CC	Corrente contínua
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CG	Centro de gravidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DOD	Profundidade de descarga da bateria
ECMS	Estratégia de minimização de consumo equivalente
ECU	Unidade de Controle Eletrônica
EGP	Estratégia de Gerenciamento de Potência
EGR	Controle da recirculação dos gases de escape
EUA	Estados Unidos da América
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
MCI	Motor de Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
PD	Programação Dinâmica
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PROCONVE	Controle de poluição por automóveis
PROMOT	Controle da poluição por motocicletas
SAE	Society of Automotive Engineers
SOC	Estado de carga
UCC	Unidade de Controle Central
VEH	Veículo elétrico híbrido
VE	Veículo Elétrico
ZEV	Veículos de Zero Emissão

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área	[m ²]
a_r	Aceleração requerida	[m/s ²]
a_x	Aceleração longitudinal do veículo	[m/s ²]
B_d	Densidade do fluxo magnético	[T]
C	Capacidade de carga da bateria	[Ah]
C_a	Coefficiente de resistência do ar	
C_p	Capacidade de Peukert	
D	Coefficiente de atrito viscoso	
E	Força eletromotriz	[V]
E_a	Fcem do circuito de armadura	[V]
f	Coefficiente de resistência ao rolamento	
F_x	Força de tração aplicada pelas rodas ao solo	[N]
G	Inclinação do pavimento em porcentagem	[%]
I	Corrente elétrica	[A]
I_a	Corrente de armadura dos terminais do motor	[A]
I_{bat}	Corrente solicitada à bateria	[A]
I_c	Constante da força contra eletromotriz	
I_e	Inércia do MCI	[kgm ²]
I_o	Momento de inércia do cilindro	[kgm ²]
I_t	Inércia da caixa redutora	[kgm ²]
I_w	Inércia das rodas	[kgm ²]
J	Momento de inércia da carga mecânica que se opõe à rotação do motor	[kgm ²]
K	Constante do ME	
K_e	Constante da força contra eletromotriz	
K_T	Constante de torque do ME	
L_a	Auto-indutância do circuito de armadura	[H]
L_c	Auto-indutância do circuito de campo	[H]
L_{cp}	Largura da parte de contato com o pneu	[mm]
L_d	Comprimento do condutor	[m]

L_l	Largura entre as rodas dianteiras do veículo	[mm]
L_{pc}	Largura da parte central do rolo	[mm]
M	Massa do veículo	[kg]
M_c	Massa do cilindro	[kg]
M_v	Massa total do veículo	[kg]
N_f	Relação de redução do diferencial	
N_t	Relação de transmissão da caixa redutora	
N_{tf}	Relação de redução total	
Ω	Velocidade angular de rotação do ME	[rad/s]
P	Potência resultante da regeneração	[W]
P_0	Potência da regeneração	[W]
P_b	Potência da bateria	[W]
ϕ	Fluxo de campo magnético	[Wb]
P_L	Potência dissipada em forma de calor	[W]
$Q_{\delta t}$	Carga removida da bateria	[Ah]
Q_n	Carga total removida da bateria após n instantes de tempo	[Ah]
r	Raio do pneu	[m]
R_a	Resistência aerodinâmica	[N]
r_a	Resistência do circuito de armadura	[Ω]
R_c	Raio do cilindro	[m]
r_c	Resistência do circuito de campo	[Ω]
R_d	Distância do eixo 00' para cada condutor	[m]
R_g	Componente peso na direção do movimento do veículo.	
R_{hx}	Força resultante do acoplamento de reboque	[N]
R_{I_1}	Força de resistência de inércia de translação	[N]
R_{I_2}	Força de resistência de inércia de rotação	[N]
R_p	Raio do pneu	[m]
R_r	Resistência ao rolamento	[N]
T_{Carga}	Torque da carga mecânica que se opõe à rotação do motor	[Nm]
T_a	Torque nas rodas	[Nm]
T_c	Torque na saída da embreagem	[Nm]
T_d	Torque na saída da caixa redutora	[Nm]
T_e	Torque do MCI	[Nm]
T_{el}	Torque produzido pelo ME	[Nm]

T_m	Energia cinética de rotação	[J]
T_o	Energia cinética de translação	[J]
V	Tensão	[V]
V	Velocidade do veículo	[km/h]
v	Velocidade de um condutor sob a ação de um campo magnético	[m/s]
v_a	Velocidade atual	[m/s]
v_c	Tensão terminal do circuito de campo	[V]
v_r	Velocidade requerida	[m/s]
v_t	Tensão terminal do circuito de armadura	[V]
V_v	Velocidade do vento na direção de deslocamento do veículo	[km/h]
W	Peso do veículo	[N]
w_p	Velocidade angular da roda	[rad/s]
Z	Número total de condutores	

Letras Gregas

α_e	Aceleração angular do MCI	[rad/s ²]
α_w	Aceleração angular das rodas	[rad/s ²]
Δ_t	Intervalo de tempo para cálculo da aceleração	[s]
δ_t	Intervalo de tempo da simulação (passos variáveis)	[s]
η_{tf}	Eficiência do sistema	
ρ	Densidade do ar	[kg/m ³]
θ	Ângulo de inclinação da pista	[°]
w_c	Velocidade angular do cilindro	[rad/s]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.1.1	Normas de controle de emissões no Brasil	3
1.1.2	Benefícios da Propulsão Elétrica e Elétrico Híbrida	3
1.1.3	Gerenciamento de Potência em VEHS	5
1.2	Objetivos	6
1.3	Escopo da Tese	6
2	REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1	História do Veículo Elétrico	9
2.2	História do Veículo Elétrico Híbrido	13
2.3	Configurações de VEHS	15
2.4	Gerenciamento de potências em VEHS	20
2.4.1	Otimização numérica	20
2.4.2	Otimização analítica	22
2.4.3	Otimização instantânea	23
2.4.4	Técnicas de controle heurística	24
3	REVISÃO TEÓRICA	27
3.1	Introdução	27
3.2	Dinâmica veicular	27
3.2.1	Forças de Resistência ao Movimento do Veículo	32
3.3	Motores a combustão interna	35
3.4	Unidade de Controle Central	37
3.4.1	Descrição dos subsistemas de controle do motor	40
3.5	Máquinas Elétricas	46
3.5.1	Princípios de Motores CC com Imãs Permanentes	48
3.6	Baterias	59
3.6.1	Tensão	60

3.6.2	Capacidade de carga	60
3.6.3	Densidade de energia	62
3.6.4	Eficiência energética	62
3.6.5	Outros fatores	63
3.6.6	Modelo da bateria	63
4	ESTUDO DE CASO - VEÍCULO HÍBRIDO DE CONFIGURAÇÃO PARALELA	69
4.1	Modelagem da Dinâmica Longitudinal	69
4.1.1	Equacionamento dinâmico	70
4.2	Modelo para simulação	72
4.2.1	Dimensionamento dos rolos da bancada	73
4.2.2	Modelo dinâmico	77
4.2.3	Modelo ADAMS	77
4.2.4	Interface Simulink	78
4.2.5	Modelo de simulação dinâmica	79
4.3	Modelagem do Motor a Combustão	82
4.4	Modelagem do Motor Elétrico	83
4.4.1	Diferencial	85
4.4.2	Ciclo de Condução	86
4.4.3	Sistemas de freios	87
4.5	Modelagem da Bateria	88
4.6	Estratégias de gerenciamento de potência	88
4.6.1	EGP com Regeneração Baseada em Regras	89
4.6.2	EGP com Regeneração Baseada em <i>Fuzzy</i>	93
4.6.3	Otimização das EGPs por meio do controle de operação do MCI	100
4.7	Representação do VEH Paralelo	102
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	105
5.1	Veículo Convencional	106
5.2	EGP com regeneração baseado em Regras	108
5.2.1	ME atuando como principal fonte propulsora	108
5.2.2	MCI atuando com principal fonte propulsora	113

5.3	EGP com regeneração baseado em <i>Fuzzy</i>	123
5.4	Análise das EGPs no ciclo rodoviário NBR7024	126
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	131
	REFERÊNCIAS	133

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, no mundo inteiro, tem-se discutido o impacto da ação do homem sobre a questão ambiental e o que fazer para reverter ou estabilizar esse quadro. O desenvolvimento dos automóveis trouxe grande contribuição para o crescimento da sociedade moderna, principalmente no que se diz respeito a satisfazer as necessidades de mobilidade. O rápido crescimento da indústria automobilística, um dos maiores entre todos os setores industriais no mundo, é relacionado com o desenvolvimento da sociedade, (WAKEFIELD, 1994). Além disso, tem grande importância na economia mundial, sendo um dos setores da indústria com maior empregabilidade.

Entretanto, o crescente número de automóveis pode estar causando graves efeitos para o meio ambiente e para o homem, tais como poluição, aquecimento global, esgotamento das reservas de petróleo, problemas que preocupam a sociedade. A alta dependência dos derivados de petróleo cria uma situação de fragilidade, pois estes recursos têm disponibilidade limitada e existem em regiões específicas, gerando recorrentes aumentos de preço e conflitos internacionais (EHSANI et al., 2004). Situação esta que incentiva a pesquisa pela obtenção de novas formas de energia e equipamentos com maior eficiência energética.

A adoção da tecnologia propulsora híbrida veicular, como constatado em Badin et al. (1999) e Farrall e Jones (1993), tem contribuído consideravelmente para a redução de gases tais como óxidos de carbono, de nitrogênio e de enxofre além da redução de materiais particulados. Agregado a esses benefícios, o veículo elétrico híbrido (VEH) mantém as características atribuídas aos veículos convencionais tais como desempenho veicular, segurança e confiabilidade.

O termo “híbrido” deriva da combinação de duas ou mais fontes de potência, sendo que a combinação mais comum se faz através de um motor de combustão interna (MCI), comumente usado em veículos convencionais, com o conjunto bateria e motor elétrico (ME) usados nos VEs (Veículos Elétricos). Esta combinação possibilita aos VEHs grande autonomia e rápido reabastecimento, presente nos veículos convencionais, e baixo ruído, aceleração suave e demais benefícios ambientais característicos dos veículos elétricos (PHILLIPS et al., 2000).

A classificação dos VEHs depende da combinação do MCI e do ME no *drivetrain* e pode ser dada em três diferentes tipos:

- VEH Série: A tração é somente elétrica onde o MCI é acoplado a um gerador atuando

apenas como fonte de energia para o ME e/ou para um dispositivo de estocagem de energia como uma bateria.

- VEH Paralelo: Nesta configuração, ambas as unidades propulsoras, MCI e ME, são conectadas diretamente às rodas. O ME é adicionado ao *drivetrain* em paralelo ao MCI com a função de assistir ao adicional de torque exigido deste último, como descrito em Lee et al. (2000) e Schouten et al. (2002).
- VEH Série-Paralelo: Como o nome sugere, esta configuração agrega os dois tipos descritos acima atuando, em determinadas condições, como um VEH série ou como um VEH Paralelo segundo estudos realizados por (RIZOULIS et al., 2000).

Uma descrição detalhada dos tipos de VEH encontrados na literatura bem como dos citados acima será dada no Capítulo 2.

1.1 Motivação

Até meados da década de 1980, órgãos governamentais desprendiam demasiada atenção para o controle da poluição devido às emissões industriais. A partir daí, verificou-se que a grande frota veicular, presente nos grandes centros urbanos, também contribuía de forma agravante para o aumento da emissão de gases tóxicos e materiais particulados no ar.

Diante desse quadro, surgiu a necessidade da elaboração de leis que também regularizassem a taxa de emissão referente aos veículos convencionais automotores. Para atender a essas novas leis, a indústria automobilística, desde então, tem adequado sua tecnologia quanto à economia de combustível e redução na emissão de gases tóxicos e materiais particulados.

Segundo Queiroz (2006) em sua pesquisa, mesmo sob a vigência dessas leis, a degradação do ar, devido a emissões de veículos convencionais, ainda é um sério problema.

1.1.1 Normas de controle de emissões no Brasil

Com o objetivo de reduzir e controlar a poluição atmosférica de origem veicular, o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA - criou os Programas de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores. A esses programas foram dados os nomes PROCONVE, controle de poluição por automóveis, e PROMOT para o controle da poluição por motocicletas.

O órgão técnico conveniado pelo IBAMA para assuntos de homologação de veículos em âmbito nacional é a CETESB com a responsabilidade da implantação e operacionalização do PROCONVE de acordo com IBAMA (2008). A CETESB adequou as metodologias internacionais às necessidades brasileiras e desenvolveu os fundamentos técnicos para restringir a emissão de poluentes de origem veicular, que serviu de base para que o CONAMA criasse os programas citados acima.

Desde então, todos os novos modelos de veículos e motores nacionais e importados são submetidos obrigatoriamente à homologação quanto à emissão de poluentes. Para isto, os parâmetros de engenharia do motor e do veículo relevantes à emissão de poluentes são analisados.

O Programa, desde a sua implementação em 1986, reduziu a emissão de poluentes de veículos novos em cerca de 97%. Segundo Ferraz e Donha (2006), isto se deve ao desenvolvimento da indústria automotiva que incluiu na fabricação dos veículos brasileiros tecnologias de controle de emissão de poluentes tais como a implementação de catalisadores, injeção eletrônica de combustível e melhorias nos combustíveis automotivos.

1.1.2 Benefícios da Propulsão Elétrica e Elétrico Híbrida

Os veículos elétricos (VE) podem ser considerados uma solução direta para o problema referente à eliminação da poluição de origem veicular. São veículos que apresentam independência de derivados do petróleo, porém baixa autonomia de operação e grande tempo de recarga. Como citado por Revoredo (2007) essas limitações dificultam o estabelecimento dos veículos puramente elétricos como real alternativa na substituição dos veículos convencionais. No entanto, o desenvol-

vimento de tecnologias de tração híbrida pode apresentar a melhor saída para o projeto de veículos ambientalmente corretos. Os VEHs que apresentam um MCI em sua configuração detêm características que os tornam atraentes, face à propulsão convencional, tais como:

- **Motor a Combustão Interna Menor:** Em VEHs, o maior ganho em eficiência é originado do uso de um MCI menor e mais eficiente. Os MCIs de veículos convencionais automotores são dimensionados para fornecer potência requerida em - poucos frequentes - picos de aceleração. No modo cruzeiro, mais frequentemente utilizado, esses motores são muito maiores do que precisam ser. Pela adição de um ME para disponibilizar a potência parcial ou total durante as acelerações, um VEH pode ser equipado com um MCI menor e mais eficiente sem o comprometimento do desempenho em aceleração, característico de um convencional.
- **Frenagem Regenerativa:** A frenagem regenerativa é um importante mecanismo de recuperação de energia utilizado na maioria dos modelos de VEHs. Este mecanismo recupera a energia (normalmente perdida como calor) originada durante a frenagem e a armazena em um sistema de estocagem de energia (como em baterias, por exemplo) para uso posterior do ME de tração.
- **Potência Fornecida sob Demanda:** Outra característica que poupa energia e reduz emissões nos VEHs é a habilidade do MCI em permanecer temporariamente inativo ou em modos de operação de baixa potência. Nesta situação, somente o ME é capaz de fornecer potência suficiente ao veículo para que seja movido sem queima de combustível.
- **Região de Operação de Menor Consumo do MCI e Potência de Saída:** Em uma configuração de propulsão híbrida, o MCI pode ser projetado para operar entre pontos otimizados de saída de potência e entre valores de velocidade angular que representem o intervalo de operação de menor consumo. Esta característica está presente em VEHs Série uma vez que o MCI, acoplado a um gerador, atua somente como fonte energia para o ME e não como fonte direta de propulsão às rodas. Para um VEH Paralelo, o MCI pode ser usado na tração das rodas a velocidades nas quais seu funcionamento é otimizado. Garantindo essas condições de otimização, a eficiência do MCI aumentará e as emissões serão reduzidas.

Esta última característica é particularmente interessante para veículos de tráfego urbano, pois contribui significativamente para a redução da poluição devido a eliminação do funcionamento do

MCI em regiões ineficientes de operação.

1.1.3 Gerenciamento de Potência em VEHS

Em geral, a principal razão para usar a arquitetura híbrida elétrica é o grau de liberdade adicional devido à presença de uma fonte de energia adicional além do tanque de combustível; isto implica que, a cada instante, a potência necessária pelo veículo pode ser fornecida por uma dessas fontes, ou por uma combinação das duas. Escolher a combinação correta é normalmente uma tarefa complexa. Se o veículo estiver desacelerando, é claro que o armazenador de energia elétrica receberá a energia proveniente da frenagem o quanto for possível. Mas, se o veículo estiver acelerando, é mais vantagem usar o motor de combustão e deixar a bateria carregada para ser usada posteriormente, ou usar alguma energia presente na bateria? Em geral, a resposta desta questão depende de diversas variáveis (SERRAO et al., 2011).

Desta forma, para que um VEH apresente condições satisfatórias de operação (bom desempenho e redução de emissões) é importante que a arquitetura e os componentes do VEH sejam otimizados, e que também ocorra a adequada escolha da estratégia de gerenciamento de potência. Em um VEH, a EGP é executada por uma unidade de controle central (ECU) onde os sinais de todos os sensores do veículo são adquiridos e processados para que a ECU possa tomar suas decisões em relação ao acionamento dos sistemas propulsores do veículo. Com essa decisão tomada, a ECU envia sinais para que os atuadores executem a tarefa determinada pela ECU, e assim a EGP seja realizada.

A consolidação deste trabalho fundamenta-se no problema de gerenciamento de potência em VEHS, que está relacionado ao estudo da dinâmica veicular assim como dos componentes que integram o sistema de propulsão do VEH abordado. Duas abordagens distintas para a realização do gerenciamento de potência são propostas, sendo a primeira baseada em regras, e a segunda baseada em sistemas *fuzzy*. Além do desenvolvimento das estratégias de gerenciamento é realizado o controle do MCI buscando regiões de operação que apresentem menor consumo. Por fim, por meio de simulações utilizando os programas Adams[®] e Simulink[®] observa-se que a estratégia de gerenciamento de potência apresenta resultados satisfatórios quanto a economia de combustível

comparando-se com os veículos convencionais. A principal contribuição deste trabalho é a concepção de uma metodologia comparativa entre estratégias de gerenciamento de potência, que permite com que diferentes estratégias sejam comparadas observando-se suas principais características, tais como economia e desempenho.

1.2 Objetivos

Para a realização este trabalhos, os principais objetivos a serem cumpridos são:

- Modelagem dos subsistemas que constituem o VEH, buscando a sua otimização;
- Desenvolvimento das EGPs através da modelagem dos subsistemas do VEH;
- Análise das EGPs em relação à economia de combustível, desempenho e comportamento do armazenador de energia;

1.3 Escopo da Tese

Esta tese está organizada da seguinte forma:

No capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura que contempla a história do VE e do VEH, além de serem discutidas as configurações do VEH e os métodos de gerenciamento de potência em VEHs encontrados na literatura.

No capítulo 3 é abordada uma revisão teórica dos principais sistemas que integram o VEH, assim como a modelagem da dinâmica veicular.

No capítulo 4 apresenta-se o estudo de caso realizado no presente trabalho, descrevendo-se os modelos utilizados para cada sistema que integra o VEH, assim como o procedimento para a elaboração das EGPs.

No capítulo 5 são discutidos os resultados encontrados com a simulação do modelo de VEH

para cada EGP desenvolvida.

No capítulo 6 apresenta-se uma breve conclusão das atividades realizadas e possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O VEH teve sua origem de projeto baseada na estrutura do veículo puramente elétrico (VE). Segundo Larminie et al. (2003), sistemas como os motores elétricos de tração e baterias, presentes em VEHs, são em princípio os mesmos utilizados nos VEs. Dessa forma, o estudo da aplicação desses sistemas em VEs pode também ser direcionada para o desenvolvimento e aplicação em VEHs.

Este capítulo apresenta na Seção 2.1 uma breve descrição da história do VE bem como da necessidade do surgimento da tração veicular híbrida descrita na Seção 2.2. Na Seção 2.3 são citadas as diferentes classificações de veículos com propulsão puramente elétrica e elétrico híbrida e os principais sistemas. Na Seção 2.4 são discutidos os métodos de gerenciamento de potência encontrados na literatura para VEHs.

2.1 História do Veículo Elétrico

O VEH tem sua origem no VE. A história do VE explica o desenvolvimento de dispositivos práticos de estocagem de energia elétrica que, combinados com a invenção de métodos de conversão de energia elétrica para mecânica, forneceram a possibilidade de um método novo, silencioso e limpo de propulsão.

A tecnologia de propulsão elétrica remonta à descoberta da bateria e do ME utilizado como sistema de tração. Em 1800, Alessandro Volta criou a primeira bateria conhecida como bateria de Volta. Michael Faraday, com a descoberta da indução eletromagnética em 1831, demonstrou a relação íntima entre magnetismo e corrente elétrica permitindo a consolidação da tecnologia elétrica e eletrônica incluindo motores e geradores elétricos. A partir desse ponto, todas as descobertas relacionadas à operação de um ME levaram inventores a pensar na possibilidade de usar a bateria de Volta para acionar um ME conectado às rodas de um veículo leve. Como exemplo, pode ser citada a invenção do Professor Strating em Groningen na Holanda pela construção de um pequeno modelo de carro elétrico em 1835. Pouco se evoluiu até 1859 quando, então, foi descoberta a co-

nhecida “bateria de ácido e chumbo” amplamente utilizada em veículos automotores e em veículos elétricos como fonte de energia.

No período entre 1873 e 1881 surgiram os primeiros veículos elétricos para estrada. Em 1882, na Inglaterra, William Ayrton e John Perry criaram um veículo movido eletricamente por dez células de ácido e chumbo em uma bateria com capacidade de 1 1/2 kWh fornecendo 20 V de tensão a um ME de 1/2 cavalo de potência. Esse veículo foi capaz de percorrer uma distância entre 16 e 40 km, de acordo com as condições do terreno, e a máxima velocidade alcançada foi de 14 km/h. Esta demonstração ocorreu três anos antes do primeiro triciclo tracionado por um MCI criado por Carl Benz. Devido à sua velocidade, o veículo de Ayrton e Perry sofreu resistência através da lei “*Red Flag Act*” que proibia a ação da propulsão à vapor nas estradas a fim de não perturbar os cavalos que estivessem transitando por estas. Esta lei introduziu severas restrições sobre todos os veículos tracionados mecanicamente em ruas Britânicas até sua reformulação em 1896, período no qual o Reino Unido viu-se atrasado em relação a outros países quanto ao desenvolvimento de veículos elétricos.

Nos EUA, o avanço das descobertas no terreno oferecido pela propulsão elétrica ganhou espaço entre 1888 e 1895 com Philip W. Pratt em Boston e Andrew L. Riker, além de outros inventores. Foi nessa época que alguns termos descritivos largamente utilizados no campo automotivo começaram a surgir. Particularmente, o termo *horseless carriage* foi utilizado pela primeira vez nos EUA na publicação *The Horseless Age*, e o termo *automobile* (automóvel) no *Pall Mall Gazette* de Londres, ambos em 1895.

Os anos entre 1900 e 1912 podem ser citados como a era de ouro para os VEs embora os veículos à gasolina tenham sido desenvolvidos rapidamente neste período. Em 1903 havia mais VEs em Londres que veículos com MCI, porém essa situação não foi suportada por muito tempo.

Em 1906, o Modelo K da Ford apresentou o primeiro desafio real. Quando o Modelo T, também da Ford, foi lançado em 1909 ficou claro que os MCIs haviam ganhado o mercado do transporte particular. Nos EUA, em 1912, apesar da crescente frota de 30000 VEs, a produção de veículos à gasolina chegou a 900000 unidades. Diante desse quadro, nesse mesmo período entre 1890 e 1912, surgiram ideias para melhorar a distância percorrida e o desempenho dos VEs por meio da adoção da configuração híbrida. Como exemplos podem ser citados os modelos *French Electroautomobile* de 1890 e o carro elétrico-gasolina Krieger de 1903 (Figura 2.1), em que ambos possuíam um ME e um motor à gasolina para fornecer tração combinada às rodas dianteiras.

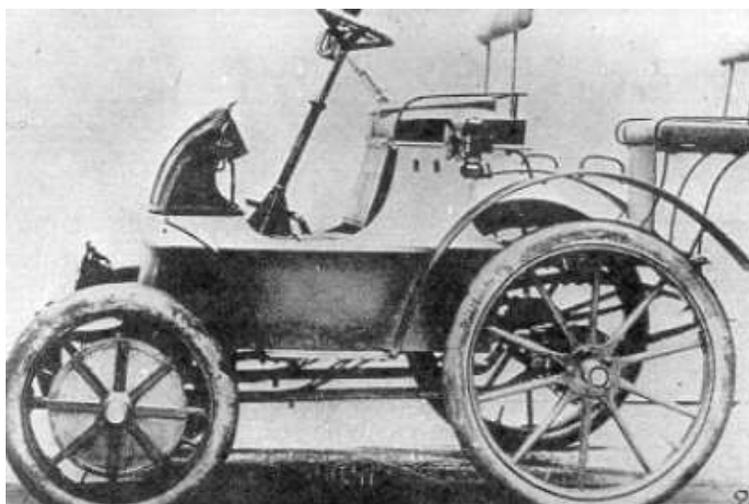


Figura 2.1 - Carro elétrico-gasolina Krieger.
Fonte: Lopes (2008).

Fabricantes inovadores, em 1890, como Ferdinand Porsche também desenvolveram carros elétricos, em particular o Porsche nº1 Lohner-Wagen (Figura 2.2) com dois MEs acoplados às rodas dianteiras. Também, desenvolveu carros de corrida como o modelo Lohner-Porsche Rennwagen que carregava 1800 kg de baterias a fim de alcançar longas distâncias. Ferdinand Porsche foi responsável por um dos primeiros VEHS que se chamava ‘Mixt-Wagen’ (Figura 2.3), nesse veículo um motor à gasolina acionava um gerador responsável pela recarga das baterias que por sua vez ofereciam a potência necessária para os MEs localizados nas rodas dianteiras.

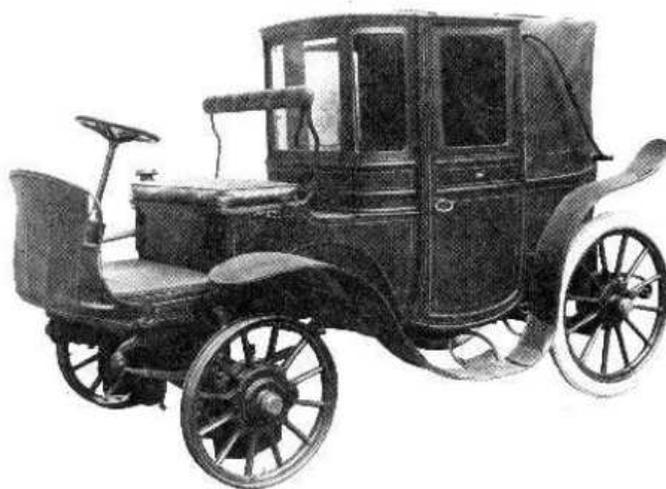


Figura 2.2 - Porsche nº1 Lohner-Wagen de 1890 com dois MEs nas rodas dianteiras.
Fonte: Lopes (2008).



Figura 2.3 - Um dos primeiros VEHS projetado por Ferdinand Porsche, chamado Mix-Wagen.
Fonte: Lopes (2008).

Com a máxima produção de veículos elétricos por volta de 1912, a combinação híbrida entre os sistemas de propulsão elétrica e mecânica no modelo de veículo *Woods Gasoline-Electric*, datado em 1916, atingiu um nível aceitável de desenvolvimento que permitiu a produção e comercialização desses veículos. Neste veículo, um pequeno motor à gasolina de quatro cilindros foi acoplado a um ME responsável pela força de tração no eixo traseiro. Neste arranjo, sempre que o ME ou o MCI fossem operados, ambos deveriam rotacionar. Isto significa que o carro poderia operar como um veículo puramente à gasolina ou como um puramente elétrico. Este veículo ainda poderia operar no modo híbrido-elétrico no qual o ME auxiliaria o MCI em picos de potência ou no modo gerador carregando o conjunto de baterias. O arranjo descrito é conhecido nos dias de hoje como VEH paralelo. A grande desvantagem do modelo de VEH, *Woods Gasoline-Electric*, esteve em seu custo relativamente maior que o de um puramente elétrico e o de um à gasolina, resultando na venda de poucas unidades desses veículos híbridos.

Os anos seguintes a 1912 marcaram o declínio do uso e da produção dos veículos elétricos enquanto observava-se o notável crescimento da produção de veículos à gasolina. O último modelo de VE, antes da era moderna, foi produzido nos EUA em 1921. A partir de então, a tecnologia de tração elétrica foi pouco explorada, voltando a ser desenvolvida a partir dos anos 60 quando VE passou a ser uma saída para a superação de problemas ambientais causados por emissões dos MCIs. Nos anos 60 a maior parte dos VE produzidos foi resultado da conversão de veículos convencionais. Nesse período, os maiores esforços em avanços tecnológicos de tração elétrica concentraram-se na Inglaterra e EUA.

O problema relacionado ao alto custo da produção de VE foi superado em 1972 na Flórida pela *Sebring-Vanguard Company* que produziu um veículo de baixo custo chamado *Citicar* que, no entanto, apresentava desempenho insatisfatório. Ainda nesta década algumas companhias apostaram na conversão de veículos convencionais em elétricos. VEs com baterias de ácido e chumbo e máquinas elétricas de corrente contínua e alternada somente apareceram nos anos 80.

Na década de 80 interesses governamentais voltaram-se para as vantagens da propulsão veicular elétrica, quanto à questão ambiental, disponibilizando um financiamento oficial para programas de desenvolvimento em VEs. A liderança foi do programa Ford/GE patrocinado pelo Departamento de Energia dos EUA resultando na criação do modelo ETX-1 com um avançado sistema de tração de corrente alternada e baterias de ácido e chumbo. Nessa época ocorreram grandes avanços na tecnologia de baterias, inversores e máquinas elétricas. No Reino Unido, *Clive Sinclair* iniciou o trabalho sobre um VE de baixo custo encorajado pela decisão do governo na isenção de impostos de pequenos VEs. Em 1988, na França, foram produzidos 500 VEs para uso experimental de clientes.

Em 1990, na Califórnia, ocorreu um efeito dramático produzido por um mandato de vendas emitido pelo órgão *California Air Resources Board* (CARB). Este requerimento estipulava que, em 1998, 2% dos veículos leves vendidos de cada companhia automotiva, que vendesse mais que 35.000 unidades por ano na Califórnia, deveriam ser veículos de zero emissão (ZEV). Essa exigência aumentou para uma porcentagem de 5% em 2001 e 10% em 2003. Assim, os maiores fabricantes no campo automobilístico foram impelidos de forma frenética a realizar atividades no desenvolvimento de VEs. Embora já tenham havido concessões no tempo de fabricação desses veículos, alguns requerimentos relativos à urgência de produção e porcentagem da venda ainda permanecem como confirmado por Westbrook (2001).

2.2 História do Veículo Elétrico Híbrido

Conforme Wakefield (1994), o conceito de veículo elétrico híbrido tem idade próxima ao próprio automóvel. Naquele tempo, porém, a intenção não era a de reduzir o consumo de combustível e sim de auxiliar os motores de combustão interna a fornecer um desempenho aceitável. Os motores de combustão interna tinham desenvolvimento bem menos avançado que os elétricos.

Dois veículos híbridos desenvolvidos pela Pieper foram apresentados no salão de Paris de 1899, um deles era um híbrido paralelo com um pequeno motor de combustão interna refrigerado a ar, assistido por um ME alimentado por baterias de chumbo-ácido. O motor de combustão era utilizado para recarga das baterias quando o mesmo não estava em movimento. Quando a potência requerida era maior que a do motor de combustão o ME era responsável por prover potência adicional. Além de ser o primeiro veículo híbrido paralelo foi também o primeiro veículo com motor de partida elétrico.

O segundo veículo apresentado foi um híbrido série, derivado de um modelo elétrico puro. Este veículo era um triciclo com motorização independente nas duas rodas traseiras. O conjunto de um motor de combustão interna de 0,75HP acoplado a um gerador de 1,1kW eram responsáveis pelo aumento da autonomia recarregando as baterias do veículo. Neste caso, o sistema híbrido foi adotado exclusivamente para o aumento da autonomia do veículo e não para o fornecimento de potência adicional. No período de 1899 a 1914, alguns veículos híbridos foram desenvolvidos, tanto na configuração paralela quanto série. Embreagens e acoplamentos magnéticos eram amplamente utilizados (EHSANI et al., 2004).

Naquela época esses veículos faziam uso de tecnologias básicas na parte elétrica, e embora a criatividade usada no projeto, não podiam mais competir com os motores de combustão interna, que sofreram grande avanço depois da primeira guerra mundial. Eles melhoraram em potência, tamanho e não dependiam mais da assistência de motores elétricos. Com isso o custo agregado ao ME adicional e o incômodo de carregar as baterias, passou a não ser mais vantajoso e os híbridos sumiram após a primeira guerra (ANDERSON, 2005).

Um dos principais problemas daquela época era o controle da parte elétrica, sendo que os motores elétricos eram controlados por acionadores mecânicos e resistores e torná-los compatíveis com a operação de um veículo híbrido era um grande desafio do século XX (ANDERSON, 2005).

Somente a partir dos anos 60 e 70 alguns pesquisadores lideraram estudos e desenvolvimento de protótipos de veículos híbridos. Na década de 80 muitas pesquisas em veículos elétricos foram conduzidas, porém poucos híbridos foram desenvolvidos.

De acordo com Ehsani et al. (2004), devido a diminuição dos motores de combustão interna “downsizing”, a introdução dos catalisadores e a popularização da injeção eletrônica o interesse em sistemas alternativos de propulsão diminuiu, principalmente devido ao grande avanço que estas tecnologias representaram nas emissões de poluentes.

Porém, nos anos 90 a indústria começou a retomar seu interesse por economia de combustível. A Ford, por exemplo, promoveu o desafio do veículo híbrido financiando recursos a universidades para o desenvolvimento de versões híbridas de veículos em produção.

As montadoras seguiram a tendência e construíram protótipos que obtiveram ótimos resultados em economia de combustível em comparação com modelos comuns. Nos Estados Unidos a Dodge produziu o Intrepid ESX 1, 2 e 3. O Intrepid ESX 1 era um híbrido série, equipado com um motor diesel turboalimentado de 3 cilindros, dois motores elétricos de 100hp, um em cada roda traseira e um banco de baterias (EHSANI et al., 2004).

Ao mesmo tempo o governo dos Estados Unidos iniciou um programa com o objetivo de desenvolver um sedan médio com consumo de 35km/l. Através deste programa surgiram o Ford Prodigy e o GM Precept, os dois utilizavam a configuração de híbrido paralelo, motorizados por pequenos motores a diesel turboalimentados, que embora tenham atingido os objetivos de consumo, não seguiram para produção (EHSANI et al., 2004).

Na Europa a Renault produziu o Next, um veículo compacto, na configuração híbrida paralelo, com um motor de 750cc a gasolina e dois motores elétricos, alcançava 29,4km/l com desempenho similar aos veículos convencionais. A Volkswagen também produziu um protótipo chamado Chico, com a base de um pequeno veículo elétrico com um banco de baterias Ni-MH e motores elétricos de indução. Um pequeno motor de 2 cilindros era utilizado para recarregar as baterias e fornece potência adicional em situações de necessidade (ANDERSON, 2005).

Porém, os avanços mais significativos de desenvolvimento e comercialização de veículos híbridos partiram dos fabricantes japoneses. Em 1997, a Toyota lançou o Prius no Japão. A Honda lançou o Insight e o Civic Hybrid. Estes estão disponíveis para venda atualmente, e apresentam ótimos resultados em economia de combustível. O Toyota Prius e o Honda Insight foram os primeiros veículos híbridos da era moderna a serem comercializados em larga escala.

2.3 Configurações de VEHS

Os VEHS podem ser classificados em três categorias diferentes, de acordo com sua construção (arquitetura) e a maneira pela qual a energia gerada pelas diferentes fontes é transmitida para as

rodas. São elas: série, paralelo ou *split* (LARMINIE et al., 2003; FRIEDMAN, 2003; JALIL et al., 1997).

Na configuração série, a força de tração que chega as rodas é obtida através de um ou mais motores elétricos, alimentados pelas fontes de energia do veículo. Caso um MCI seja uma das fontes do sistema, um gerador irá converter a energia do MCI em energia elétrica que será somada à energia proveniente da(s) outra(s) fonte(s) e fornecida as rodas através do(s) motor(es) elétrico(s). A Figura 2.4 ilustra um VEH em configuração série.

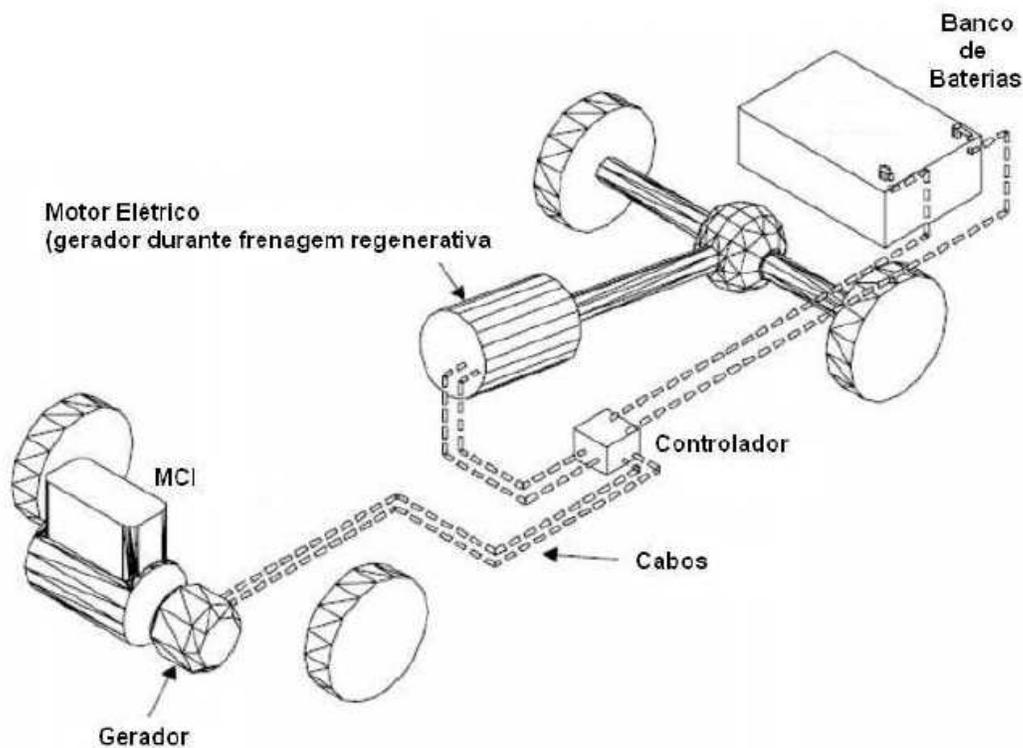


Figura 2.4 - Veículo híbrido em configuração série.

Nos VEHs em série não existe nenhuma conexão mecânica entre o MCI e as rodas, havendo necessidade de duas conversões de energia entre o MCI e as rodas (MCI → Gerador → Bateria → ME), elevando a perda de energia por causa das resistências internas dos acoplamentos mecânicos e fricção (WALLMARK, 2004). Nestas configurações, a caixa de transmissão deixa de ser necessária, constituindo-se em uma vantagem de custo (LARMINIE et al., 2003).

Uma desvantagem da configuração série diz respeito ao tamanho da bateria e do ME, que acaba aumentando ainda mais as perdas durante o processo de carga e descarga da bateria. Através da Figura 2.5 pode-se observar o fluxograma de energia para configuração série.

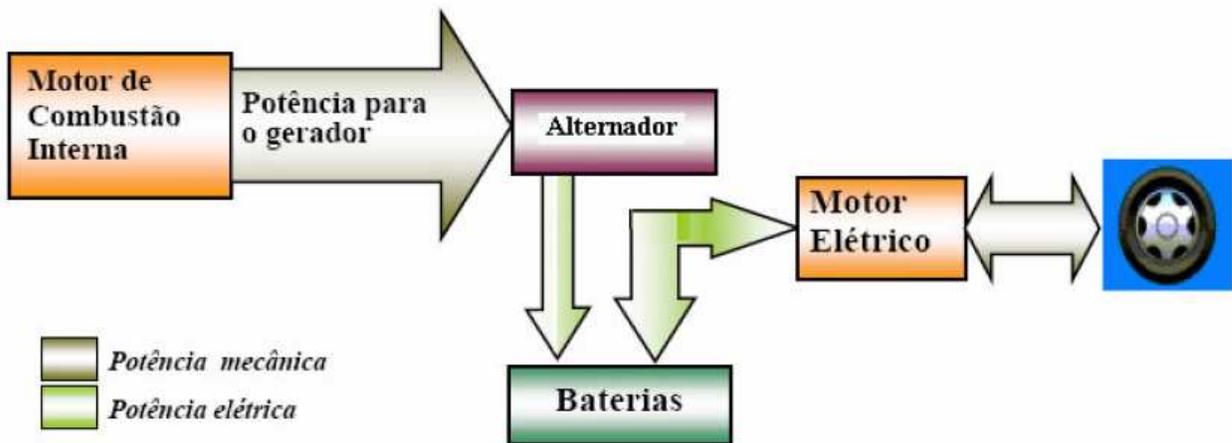


Figura 2.5 - Fluxograma de energia na configuração série.

Na configuração em paralelo (Figura 2.6), o veículo pode ser propelido diretamente pelo MCI, através de um sistema de engrenagens que transmite a potência gerada pelo mesmo as rodas e/ou através de MEs alimentados por outra(s) fonte(s) de energia, normalmente um banco de baterias. Esta configuração de veículo pode ter uma CVT (transmissão continuamente variável) no lugar de uma transmissão escalonada fixa, tornando possível a escolha dos pontos de operação mais eficientes do MCI.

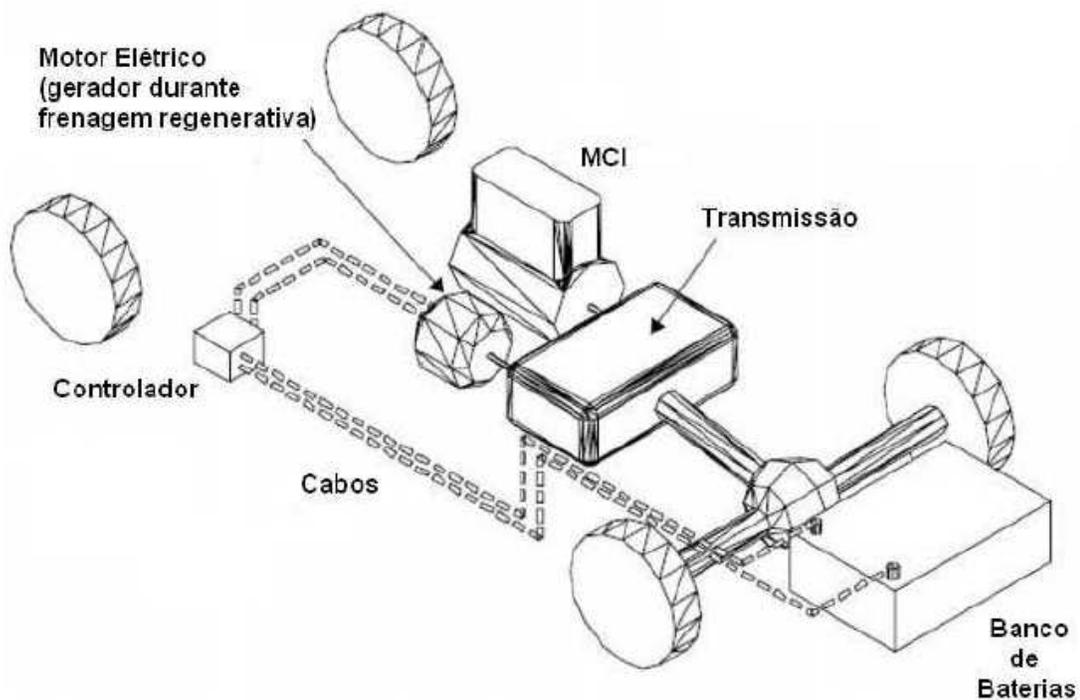


Figura 2.6 - Veículo híbrido em configuração paralela.

Na configuração paralela, os VEHs não precisam de um gerador dedicado, pois o próprio ME é usado como gerador para recarregar as baterias. A desvantagem comparada à configuração série é que o sistema requer uma estratégia de controle mais sofisticada. A Figura 2.7, mostra o fluxograma de energia na configuração paralela.

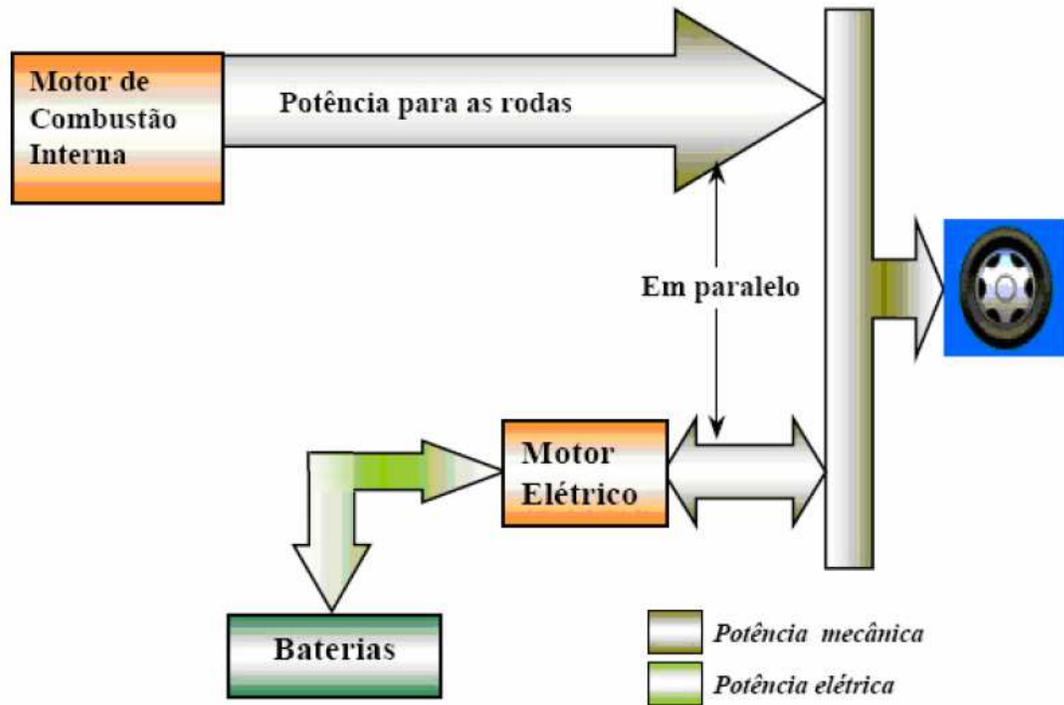


Figura 2.7 - Fluxograma de energia na configuração paralela.

A configuração *split* é uma variante da configuração em paralelo na qual cada um dos eixos do veículo é alimentado através de uma fonte de energia diferente. Por exemplo, um MCI pode alimentar o eixo dianteiro enquanto um banco de baterias o eixo traseiro, através de um ou mais MEs.

O primeiro critério avaliado ao se projetar um VEH diz respeito ao seu sistema de propulsão. Nesta etapa, a escolha entre as configurações série, paralelo ou split é realizada. Entretanto, deve-se ter em mente que outros parâmetros são importantes para que um VEH tenha sucesso no mercado. Os critérios que um VEH deve atender podem ser resumidos da seguinte maneira (REVOREDO, 2007):

- Desempenho: autonomia, aceleração, velocidade máxima e capacidade de carga;
- Emissões: deve atender à regulamentação vigente;
- Segurança: condução e frenagem adequadas, proteção contra materiais perigosos e boa

resistência no caso de acidentes;

- Custo: custo de aquisição, operação e reparo moderados;
- Conveniência no abastecimento;
- Durabilidade e resistência;
- Conforto: baixo ruído, capacidade de acomodar passageiros, volume para armazenamento de carga, etc.

Muitos destes fatores contrastam com o melhor desempenho do veículo, entretanto devem ser devidamente avaliados para que sua implantação seja feita de maneira adequada. A comparação com veículos convencionais é bom ponto de partida para avaliar a viabilidade de um novo projeto de VEH ou mesmo a implantação de modificações em projetos (veículos) existentes.

No caso do VEH, de acordo com Oliveira (2005), é possível operar o MCI em torno de carga e velocidade angular constantes e, portanto, com alta eficiência e em condições de baixa emissão. A Figura 2.8 mostra as características de acionamento de um sistema de propulsão elétrica e de um veículo com MCI. No ME existe uma região em que o torque é constante, uma característica fundamental dos MEs, ou seja, alto torque em baixas velocidades e baixo torque em altas velocidades.

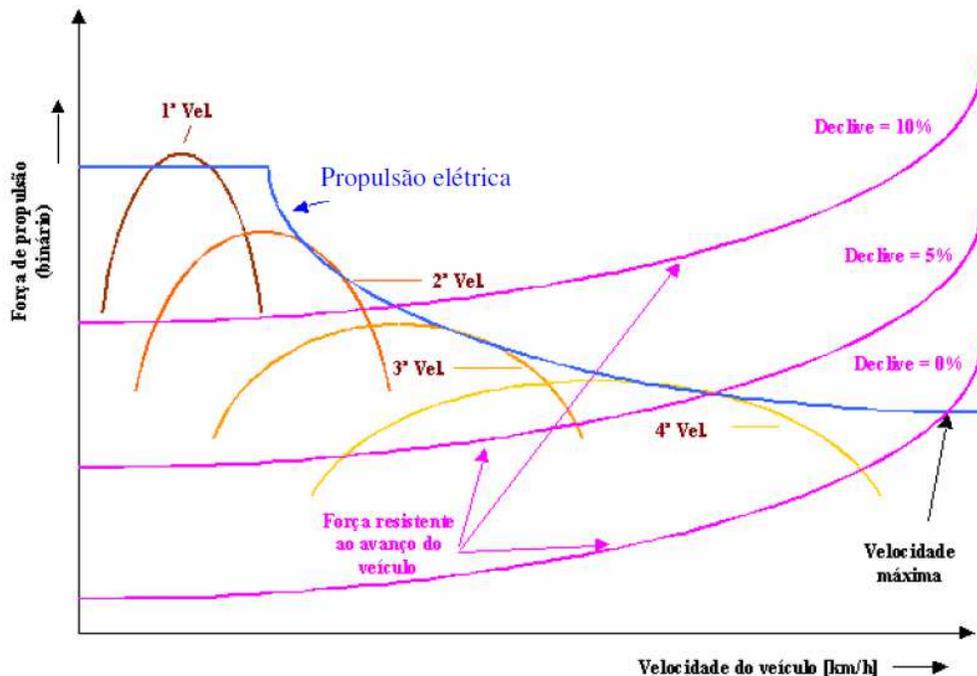


Figura 2.8 - Características de acionamento de um VE e de um MCI.

Fonte: Oliveira (2005).

Nos VEHs o MCI é solicitado quando a potência requerida não pode ser suprida pelo ME ou pela bateria. O período no qual o veículo pode ser operado com energia fornecida somente pelas baterias deve ser o maior possível, indo ao encontro às normas de restrição de emissão. Para isto é necessário que haja um balanço entre o dimensionamento da bateria e do MCI para a elaboração dos algoritmos utilizados no controle desses veículos determinando, assim, o sucesso particular de qualquer combinação híbrida de acordo com os objetivos operacionais. A seção a seguir realiza um levantamento das principais estratégias de gerenciamento de potência em VEHs.

2.4 Gerenciamento de potências em VEHs

A utilização de fontes diferentes de energia em um mesmo veículo demanda uma estratégia de controle que gerencie o funcionamento desses sistemas objetivando melhor desempenho. Isso implica em satisfazer a solicitação de potência imposta ao veículo sujeito à restrições tais como: possuir uma determinada autonomia e baixa emissão de poluentes. Em outras palavras, o gerenciamento do fluxo de energia torna-se fator fundamental em VEHs (REVOREDO, 2007).

O projeto de um algoritmo de controle que determine a quantidade de potência necessária à uma solicitação do motorista, bem como a divisão adequada dessa potência entre as fontes de energia do sistema é denominado Estratégia de Gerenciamento de Potência (do inglês, *Power Management*) e é realizado através de diferentes abordagens na literatura, que podem ser agrupadas em 04 (três) categorias: otimização numérica, otimização analítica, otimização instantânea e técnicas de controle heurístico. Nos dois primeiros casos, o problema é considerado em sua totalidade, levando em consideração cada instante de informação relacionado ao passado, presente e futuro. Já nos dois últimos casos, a solução para cada instante de tempo é calculada baseado somente em informações do presente (algumas vezes no passado).

2.4.1 Otimização numérica

Em geral, a solução ótima para o problema é somente atingível se o ciclo de condução é bem definido ou conhecido a priori. Fato este que impossibilita a implementação em tempo real devido ao impedimento de conhecer exatamente as condições de condução futura (velocidade, ângulo da pista, entre outros), ou ainda a duração do ciclo. Mesmo não sendo diretamente aplicável em casos reais, a solução ótima numérica pode ser usada em termos comparativos em relação a estratégias implementáveis, com o intuito de se adquirir conhecimento a respeito do comportamento do sistema. O método mais amplamente utilizado para obter soluções ótimas numérica é a PD (Programação Dinâmica) (BRAHMA et al., 2000; PÉREZ et al., 2006; PISU; RIZZONI, 2007), que consiste em uma técnica numérica que se inicia no instante final do ciclo de condução e finaliza no tempo inicial.

Musardo et al. (2005) utilizam o método PD para gerenciar energia em VEH Paralelo, determinando a divisão de potência entre o MCI e o ME com o intuito de minimizar o consumo e emissão de poluentes. Para isso Musardo et al. (2005) considera o problema como um problema global, onde a solução pode ser vista como uma sequência de comandos que a cada instante de tempo alcança seus objetivos. O estado de carga da bateria é o estado dinâmico e a potência de saída do ME é a variável de controle. A potência de demanda do motorista é determinada a partir da velocidade do veículo e o custo de cada divisão de torque permitida em dado instante de tempo é avaliado pelo algoritmo da PD. Tal proposta tem a vantagem de tratar em um tempo razoável um problema de otimização, que caso contrário, seria difícil de validar.

Lin et al. (2001) propõem técnicas de PD para determinar as ações de controle ótimo a fim de minimizar o consumo de combustível de um caminhão elétrico híbrido paralelo. As leis de *feedback* dos algoritmos de PD não são implementadas devido à sua natureza de predição e intensa exigência computacional. Dessa forma, a PD serve como uma boa ferramenta de projeto na qual uma estratégia de controle básica pode ser comparada e melhorada concluindo que através do estudo cuidadoso do comportamento da solução da PD é possível extrair regras de fácil implementação, cujo processo pode melhorar significativamente os algoritmos baseados em regras.

No trabalho de Lin et al. (2003) uma estratégia de gerenciamento quase-ótima é obtida com o auxílio da PD, de modo que sejam extraídas regras podendo estas serem implementáveis. O início

do procedimento de projeto é dado pela definição de uma função custo que minimize o consumo de combustível e emissões em um dado ciclo de operação. A adoção deste procedimento resultou em uma significativa redução na emissão para um pequeno custo adicional no consumo de combustível.

Pérez et al. (2006) aplicam a PD em um VEH série de tal forma que o consumo seja minimizado. O procedimento é adotado obedecendo as regiões otimizadas de operação de todos os sistemas de veículo.

Apesar da PD ser uma ferramenta perfeita para o controle ótimo de um VEH, apresenta alguns obstáculos para seu uso efetivo, sendo sempre baseado em hipóteses fundamentais, o que implica que o problema deve ser conhecido e bem formulado por toda a sua duração. Para a aplicação em VEHs, a PD necessita do conhecimento prévio do ciclo de condução sobre o qual o consumo de combustível deve ser minimizado (MUSARDO et al., 2005). Outra desvantagem da aplicação da PD em VEHs, está no alto custo associado à implementação computacional. Como mencionado anteriormente, a PD é geralmente utilizada como base para a melhoria de um algoritmo de controle que torna-se, depois de tal procedimento, uma solução quase-ótima.

2.4.2 Otimização analítica

A teoria de controle ótimo tradicional fornece uma estrutura matemática para abordar o problema de otimização dinâmica. Infelizmente, o problema de gerenciamento de energia em VEHs é bastante complexo e deve ser simplificado significativamente de maneira a ser completamente resolvido utilizando essas técnicas. No entanto, a aplicação da teoria de controle ótimo para o problema simplificado permite a sua melhor compreensão e pode levar a melhorias de soluções praticamente implementáveis.

Um dos resultados mais poderosos na teoria de controle ótimo é o princípio mínimo de Pontryagin (PONTRYAGIN V. BOLTYANSKII, 1986; BERTSEKAS, 1996; GEERING, 2007) que fornece condição necessária que a solução ótima deve satisfazer. Apesar de oferecer condições de otimalidade apenas necessárias (não suficiente), o princípio (que é, na verdade, um teorema) é extremamente útil porque é aplicável a qualquer problema, uma vez que não impõe qualquer hipótese restritiva sobre as propriedades analíticas das funções matemáticas envolvidas na formulação do

problema.

Na prática, o princípio Pontryagin pode ser usado para gerar soluções, se o problema de controle ótimo admite uma solução e as suas condições necessárias estão satisfeitas, a solução obtida com este princípio é a solução ótima. No campo da otimização em VEH, o princípio de Pontryagin tem sido utilizado por vários autores (ANATONE et al., 2005; WEI et al., 2007; ROUSSEAU et al., 2007; SERRAO; RIZZONI, 2008; CIPOLLONE; SCIARRETTA, 2006) para efetuar ótima divisão de potência para um dado ciclo de condução. Pode ser uma alternativa válida para programação dinâmica se os fluxos de energia em um *powertrain* puder ser descrito como simples funções analíticas, oferecendo conhecimentos significativos para o problema. No entanto esta técnica não pode ser aplicada na prática, sem o prévio conhecimento do ciclo.

2.4.3 Otimização instantânea

A terceira família das estratégias de controle inclui aqueles que modificam o problema de controle ótimo global em uma sequência de problemas locais (instantâneo), calculando assim a solução como um sequência de mínimos local. Esta aproximação funciona bem se a minimização local estiver bem definida. A estratégia de minimização de consumo equivalente (ECMS), introduzida por Paganelli et al. (2000) e desenvolvida pela Universidade de Ohio (PISU; RIZZONI, 2007; GU; RIZZONI, 2006; MUSARDO et al., 2005), é a mais bem conhecida dentro dessas estratégias. ECMS é baseado no conceito que, em VEH auto sustentáveis de energia elétrica, a diferença entre os estados de carga inicial e final são muito pequenos, sendo negligenciada a informação sobre a energia total utilizada. Desde que toda a energia é proveniente do combustível, a bateria pode ser vista como um auxiliar, um tanque de combustível reversível. A eletricidade utilizada durante uma fase de descarga da bateria devem ser reposta em uma fase posterior usando o combustível a partir do MCI (direta ou indiretamente através de um caminho de regeneração).

Dois casos são possíveis em um dado ponto de operação:

1. A energia da bateria tem valor positivo (caso de descarga): uma recarga utilizando o MCI requer algum consumo adicional de combustível no futuro;
2. A energia da bateria tem valor negativo (caso de carga): a energia elétrica armazenada

será utilizada para reduzir a carga do motor, o que implica em uma economia de combustível.

O custo instantâneo que é minimizado em cada instante é chamado de consumo de combustível equivalente e é obtido pela adição de um termo para o consumo atual de combustível do MCI. Este termo é positivo no caso 1 acima, e negativo no caso 2; representando o consumo de combustível virtual associado ao uso da bateria, e - se adequadamente definido - permite obter resultados perto da solução ótima, enquanto mantém o estado de carga da bateria entre os níveis desejados. A grande vantagem dessa aproximação é que, pelo fato de ser baseado na técnica de minimização instantânea, é facilmente implementável em tempo real.

Como mencionado, uma definição apropriada do consumo equivalente de combustível é necessária para atingir resultados quase-ótimos, porém esta técnica requer uma otimização no ajuste de parâmetros que apenas é possível se o ciclo de condução for conhecido a priori. Entretanto, bons resultados tem sido atingidos através do ECMS adaptativo, como em (MUSARDO et al., 2005), que utiliza o reconhecimento de ciclos de condução no qual o veículo está trafegando e dinamicamente adaptado à definição de consumo de combustível virtual a fim de encontrar a melhor estratégia para cada situação.

2.4.4 Técnicas de controle heurística

Técnicas de controle heurística não são baseadas na minimização ou otimização, mas sim em um conjunto pré-definido de regras. As regras geram a ação de controle (o valor de potência entregue à cada fonte de energia) baseado nos valores instantâneos de diversos parâmetros do veículo (velocidade do veículo, potência demandada, estado de carga da bateria, etc). Muitas vezes, regras são derivadas do conhecimento do engenheiro ou especialista e complementada com uma quantidade substancial de testes para ajustar os parâmetros (JALIL et al., 1997; CACCIATORI et al., 2006; HE et al., 2005; HOFMAN et al., 2007). A técnica pode ser robusta e adequada para o gerenciamento de potência em VEHs, mas os resultados podem não ser ótimos, pelo fato da técnica heurística não ser baseada em técnicas formais de otimização. Em alguns casos, regras podem ser extraídas de uma solução ótima encontrada através do uso da programação dinâmica, representando

um método de implementação da solução ótima.

Dentre as técnicas de controle heurística se destacam os sistemas baseados em regras e os sistemas *fuzzy*. As duas estratégias de gerenciamento de potência baseadas em regras são: *thermostat* e *power split*.

São muitos os trabalhos encontrados na literatura que utilizam sistemas *fuzzy* na estratégia de gerenciamento de potência em VEHs.

Farrall e Jones (1993) propõem um controlador baseado em sistemas *fuzzy* para o gerenciamento de potência em um VEH Paralelo, onde a entrada do controlador é a posição do pedal do acelerador ou do freio do veículo. Baseado no algoritmo de controle *fuzzy*, o controlador determinará a posição da *throttle* (entrada do MCI) e a corrente de armadura para o ME. O processo de tomada de decisão é realizado continuamente no tempo.

Cerruto et al. (1994a) utilizaram sistemas *fuzzy* no gerenciamento de potência de VEH série urbano. As componentes do veículo são operadas por um controlador de acordo com os comandos do motorista. Em condições normais de operação, a potência elétrica é diretamente disponibilizada na unidade de geração para o ME, enquanto a bateria contribui somente nos picos de potência. Em condições de frenagem, a potência flui para a bateria. Através do comando do motorista, o controle determina as condições de operação de todos os sistemas do veículo de acordo com regras pré-definidas e restrições físicas de cada sistema em particular. A ideia básica aplicada ao controle de fluxo de potência é assumir que existe uma diferença entre a potência de demanda e a utilizada tal que a diferença entre elas é dividida entre o MCI e as baterias. As restrições quanto à divisão de potência são baseadas no estado de carga das baterias, nas condições de operação do MCI, e na dinâmica veicular.

Cerruto et al. (1994b) apresentam um gerenciamento de potência também em um VEH urbano utilizando os sistemas *fuzzy*, mas dessa vez baseado em dois níveis de controle. O primeiro nível consiste no controle da potência disponibilizada para o ME de tração, com a tarefa de satisfazer as exigências do motorista e minimizar o mal uso das baterias. O segundo nível de controle ajusta a potência gerada com base na avaliação do estado de carga em cada ponto de parada do veículo e compara este valor com um valor de estado de carga desejado. Caso haja diferença entre esses dois valores, será solicitada potência da unidade de geração (MCI/gerador). Foram obtidos resultados satisfatórios através da aplicação de sistemas *fuzzy* em dois níveis de controle para VEHs série.

Lee et al. (2000) implementaram um sistema *fuzzy* para gerenciamento de potência em um VEH paralelo urbano. As regras foram elaboradas através de ensaios em dinamômetro, considerando dados da produção de torque, de emissões e consumo de combustível. O controlador fundamentado em sistemas *fuzzy* é principalmente composto de duas partes: pela predição da intenção do motorista e pelo controle do balanço de potência. O trabalho conseguiu provar a grande utilidade dos sistemas *fuzzy*, empregados em EGPs, através da manutenção da tensão nominal da bateria por um período de vinte dias de uso sem a necessidade de recarga extra.

Com o objetivo de gerenciar a potência de um VEH paralelo Schouten et al. (2002) desenvolveram um controlador baseado em sistemas *fuzzy*, cujas regras foram desenvolvidas através do comando do motorista, do estado de carga da bateria e da velocidade do conjunto MCI/gerador. A principal função das regras é determinar a divisão entre as duas principais fontes de potência, MCI e o ME, de modo que se otimize a eficiência operacional de todas os componentes do *powertrain*. Os resultados foram bastante satisfatórios, mostrando uma potencial economia de combustível quando comparados aos obtidos por outros tipos de controles, que geralmente maximizam apenas a eficiência do MCI.

Wang e Yang (2006b) desenvolveram um controlador *fuzzy* para quantificar o comportamento do gerenciamento de potência. Na sequência de seus trabalhos, Wang e Yang (2006a) utilizaram um algoritmo genético para refinar os parâmetros do controlador *fuzzy* com o objetivo de minimizar o consumo de combustível. Os resultados obtidos mostram que o “sistema *fuzzy promissor*”, nome dado à estratégia de gerenciamento *fuzzy* aprimorado com algoritmos genéticos, possibilita uma melhoria no desempenho do VEH paralelo.

3 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão teórica necessária na descrição e modelagem dos sistemas que constituem o VEH Paralelo no estudo de caso apresentado no Capítulo 4. Uma revisão teórica da dinâmica veicular é apresentada na Seção 3.2. A Seção 3.3 e Seção 3.4 apresentam a descrição do MCI e dos sistemas embarcados presentes no veículos, respectivamente. A Seção 3.5 contempla a revisão teórica dos sistemas equivalentes ao ME e gerador, enquanto a Seção 3.6 aborda a revisão teórica da bateria.

3.1 Introdução

Em geral, os sistemas de interesse que compõem um VEH Paralelo, são:

- Motor a combustão interna;
- Unidade de Controle do Sistema.
- Motor elétrico de tração;
- Gerador;
- Banco de baterias.

Nesta configuração de veículo híbrido, tanto o motor elétrico como o motor à combustão são responsáveis pela tração nas rodas do veículo. Para a devida validação do VEH Paralelo em situação real de operação é necessária a inclusão de um modelo de dinâmica veicular, bem como um modelo que represente a ação do motorista de acordo com o estudo realizado por Neto (2003).

3.2 Dinâmica veicular

A simulação da dinâmica longitudinal é frequentemente usada para comparar a importância das características de equilíbrio de energia para veículos que fazem uso de conceitos de propul-

são diferentes sem a necessidade de construir protótipos que requerem tempo e de alto custo. As equações físicas básicas do movimento longitudinal do veículo são fundamentais para entender as relações causa-efeito entre o motorista, veículo e solo.

Algumas variáveis de entrada são:

- Ciclo de tráfego;
- Especificações do veículo (por exemplo, resistência de rolamento, resistência do ar, peso);
- Especificações de componentes individuais (por exemplo, características de perda de desempenho da caixa de câmbio).

A análise dos resultados de simulação é usada para verificar se as especificações do projeto foram satisfeitas; por exemplo:

- Dirigibilidade;
- Velocidade máxima;
- Aceleração de 0 a 100 km/h;
- Dados de consumo e emissões de poluentes.

Para este estudo, serão levadas em consideração as relações físicas fundamentais, especificações técnicas e mapas de consumo de combustível aproximadamente levantados por meio de informações encontradas na literatura.

No que diz respeito à dinâmica veicular, ela é dividida em três grandes áreas, como apresentado por Neto (2003).

- Dinâmica longitudinal: estuda o movimento longitudinal (x) e rotações em torno de (y) em resposta a torques aplicados às rodas (Figura 3.1).
- Dinâmica vertical: compreende o movimento vertical (z) e as rotações em torno de (x) e (y) em função de irregularidades do pavimento.
- Dinâmica lateral: envolve o movimento lateral (y) e as rotações (z) e (x) como resultado da atuação no volante.

Considerando essa divisão, o movimento do veículo é analisado com referência a um sistema de coordenadas ortogonal, com origem em seu centro de gravidade (CG). Esse sistema de coordenadas obedece à convenção da SAE (*Society of Automotive Engineers*), como mostra a Figura 3.1.

Na qual:

- x - movimentos longitudinais, positivos para a frente do veículo;

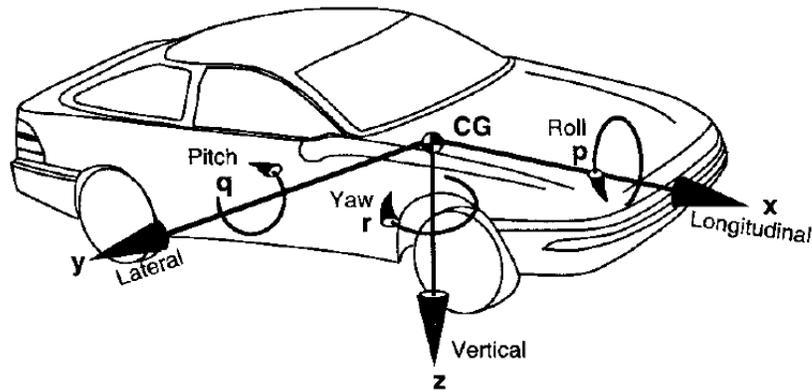


Figura 3.1 - Sistemas de coordenadas do veículo conforme SAE.
Fonte: Gillespie (1992).

- y - movimentos laterais, positivos para o lado direito do veículo;
- z - movimentos verticais, positivos para baixo em relação ao veículo;
- p - velocidade de rolagem (*roll*) em torno do eixo x ;
- q - velocidade de arfagem (*pitch*) em torno do eixo y ;
- r - velocidade de guinada (*yaw*) em torno do eixo z .

Em análises elementares pode-se considerar que, todas as componentes de um veículo movimentam-se simultaneamente. Desta forma, o veículo pode ser representado como um corpo rígido, com seu respectivo centro de gravidade. Esta hipótese é adotada para o estudo da dinâmica longitudinal e lateral. Para a dinâmica vertical, a suspensão do veículo é considerada como uma massa individual como assinalado por Neto (2003).

De acordo com Gillespie (1992) uma afirmativa exata do desempenho da aceleração de um veículo requer a modelagem dos sistemas mecânicos através dos quais a potência do motor de tração é transmitida ao pavimento. Para se obter a aceleração do veículo a partir do torque fornecido pelo sistema de propulsão são necessárias algumas hipóteses simplificadoras:

- os eixos da roda (*axle shafts*) e do motor (*driveshafts*) são corpos rígidos e com massa constante;
- não há folga e deslizamento no contato entre os eixos através do diferencial;
- as variações das grandezas do sistema são relativamente pequenas, a fim de manter o comportamento do sistema praticamente linear.

O máximo desempenho de aceleração longitudinal de um veículo motorizado é limitado por dois fatores, a potência do motor e o limite de tração das rodas em contato com a pista, no qual a

velocidade do veículo determina qual limite prevalece. Em baixas velocidades a tração nos pneus é o fator limite, já em altas velocidades a potência disponível no motor é o limitador (GILLESPIE, 1992).

A mudança da relação de transmissão através da caixa de redução é o fator predominante para a performance na aceleração do veículo. Em moderadas e baixas velocidades a aceleração pode ser obtida através da segunda lei de Newton sendo as demais resistências ao movimento desprezadas.

$$M a_x = F_x \quad (3.1)$$

onde:

M = Massa do veículo [kg];

F_x = Força de tração disponível [N];

a_x = Aceleração longitudinal do veículo [m/s^2].

$$a_x = \frac{1}{M} F_x \quad (3.2)$$

onde F_x é a força de tração aplicada pelas rodas ao solo.

O torque disponível na entrada da transmissão logo após o acoplamento da embreagem é definido pela Equação 3.3.

$$T_c = T_e - I_e \alpha_e \quad (3.3)$$

onde:

T_c = Torque na saída da embreagem [Nm];

T_e = Torque do MCI [Nm];

I_e = Inércia do MCI [kgm^2];

α_e = Aceleração angular do MCI [rad/s^2];

E o torque de saída da transmissão é fornecido pela Equação 3.4:

$$T_d = (T_c - I_t \alpha_e) N_t \quad (3.4)$$

onde:

T_d = Torque na saída da caixa redutora [Nm];

I_t = Inércia da caixa redutora [kgm^2];

N_t = Relação de transmissão da caixa redutora.

O torque disponível no motor é ampliado pela caixa de transmissão e pelo diferencial, no entanto, existem perdas nestes mecanismos, sendo estas reduções representadas por fatores de eficiência.

O torque nas rodas de tração do veículo é dado pela Equação 3.5.

$$T_a = F_x r + I_w \alpha_w = (T_d - I_d \alpha_d) N_f \quad (3.5)$$

onde:

T_a = Torque nas rodas [Nm];

r = Raio do pneu [m];

I_w = Inércia das rodas [kgm^2];

α_w = Aceleração angular das rodas [rad/s^2].

A força de tração disponível no contato roda solo é dada pela Equação 3.6.

$$F_x = \frac{T_e N_{tf}}{r} - ((I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (3.6)$$

onde:

N_{tf} = Relação de redução total (caixa redutora + diferencial);

N_f = Relação de redução do diferencial.

Devido à existência de perdas no sistema de transmissão é adicionado um termo referente a eficiência na equação acima, sendo a eficiência usual de sistemas de transmissão na ordem de 0,9 a 0,8.

$$F_x = \frac{T_e N_{tf} \eta_{tf}}{r} - ((I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (3.7)$$

onde η_{tf} representa a eficiência do sistema.

Finalmente, conhecendo-se a força de tração torna-se possível a estimativa do desempenho em aceleração do veículo pela Equação 3.8.

$$Ma_x = \frac{W}{g}a_x = F_x - R_r - R_a - R_{hx} - W \text{sen}(\theta) \quad (3.8)$$

onde:

R_r = Resistência ao rolamento [N];

R_a = Resistência Aerodinâmica [N];

R_{hx} = Força resultante do acoplamento de reboque [N];

θ = Ângulo de Inclinação da pista [$^\circ$].

As forças de resistência ao movimento são abordadas na subseção seguinte.

3.2.1 Forças de Resistência ao Movimento do Veículo

A energia requerida para o movimento de um veículo é função das suas velocidades e acelerações, e das forças de resistência que devem ser vencidas podendo ser divididas em quatro sub-grupos:

- Resistência ao rolamento;
- Resistência aerodinâmica;
- Forças devido a inclinação da pista;
- Resistência das forças de inércia.

Resistência ao rolamento

Para o cálculo da resistência ao rolamento utiliza-se as seguintes equações:

$$R_r = f_r W \quad (3.9)$$

onde:

W = peso do veículo (kg);

f_r = coeficiente de resistência ao rolamento.

O coeficiente de resistência ao rolamento (f_r) depende de uma série de fatores como o tipo de solo, a pressão interna dos pneus, temperatura, carga radial dos pneus e, em baixas velocidades, pode ser calculado através da Equação 3.10 (GILLESPIE, 1992):

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{0,62V}{100} \right) \quad (3.10)$$

onde V é a velocidade do veículo em km/h.

Resistência aerodinâmica

Quando um corpo se move, uma força resistente causada pelo ar age no sentido contrário. Esta força é função da velocidade relativa do veículo frente à velocidades do ar (GILLESPIE, 1992), dada pela Equação 3.11:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho C_a A (V - V_v)^2 \quad (3.11)$$

onde

ρ = densidade do ar;

C_a = coeficiente adimensional de resistência do ar;

A = área (m^2);

V_v é a velocidade do vento.

Segundo Gillespie (1992), o valor de C_a pode ser obtido experimentalmente (recomendado) ou através de alguns valores pré-definidos de acordo com a geometria do veículo.

Resistência devido a inclinação da pista

A componente peso R_g na direção do movimento do veículo é dada por:

$$R_g = W \text{sen}(\theta) \quad (3.12)$$

É usual, na literatura, encontrar a inclinação do pavimento em porcentagem de acordo com a Equação 3.13:

$$G = 100 \tan \theta \quad (3.13)$$

na qual: G é a inclinação do pavimento em porcentagem.

Pode-se notar que para ângulos pequenos é possível assumir que $\text{sen}(\theta) \cong \tan \theta$, implicando em:

$$R_g = W \text{sen}(\theta) \cong W \tan \theta = \frac{WG}{100} \quad (3.14)$$

o erro cometido nesta simplificação é de aproximadamente 5% para $G=32\%$ (18°).

Resistência das forças de inércia

Segundo Newton, um corpo para ter o seu estado de movimento (em repouso ou em movimento retilíneo uniforme) alterado é necessário aplicar uma força. Desta forma, para um veículo, que é um conjunto de inércias em translação e rotação, no cálculo da força a ser aplicada para variar a velocidade deve ser levado em conta, além das massas em translação, as inércias rotativas. Isto porque as inércias rotativas submetidas a acelerações angulares proporcionais a linear e, em função das relações de transmissão da caixa e do diferencial, podem ser responsáveis por uma grande parcela de consumo de força (consequentemente potência) durante a aceleração de um automóvel. Assim a abordagem será subdividida em duas parcelas, uma devido as massas em translação e outra devida as massas em rotação. No final, o efeito das duas parcelas será somado e corresponderá a resistência total de aceleração.

Sabe-se da dinâmica que para acelerar uma massa M de uma quantidade a_x é necessário aplicar uma força, dada por:

$$F = Ma_x \quad (3.15)$$

Esta força, que deve ser colocada a disposição do veículo pelo motor, corresponde a resistência de inércia de translação (R_{I_1}) dada pela Equação 3.16, e corresponde a primeira parcela de resistência de inércia.

$$R_{I_1} = Ma_x \quad (3.16)$$

Já a segunda parcela (inércia referente ao sistema de transmissão e motor, R_{I_2}) é calculada conforme Equação 3.17:

$$R_{I_2} = ((I_e + I_t)N_{tf}^2 + I_dN_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (3.17)$$

3.3 Motores a combustão interna

Os primeiros automóveis movidos a motor de combustão interna (MCI) surgiram no final do século XIX e se tornaram comuns nas paisagens no início do século XX, devido à produção seriada em massa. O MCI converte a energia química, presente no combustível (gasolina, etanol, gás natural, diesel, etc.), em energia mecânica, que é utilizada para acionar as rodas do veículo. Segundo Oliveira (2005), o MCI pode operar em diversas condições. Porém, existe um ponto ótimo de operação em que o MCI apresenta a maior eficiência e emite menos gases poluentes, conforme a Figura 3.2.

De acordo com Oliveira (2005) quando o MCI está em operação, é necessário haver várias combinações de velocidade e torque, para que o mesmo opere próximo à condição de maior eficiência, melhorando, assim, a conversão da energia química do combustível e, conseqüentemente, emitindo menos poluentes. Para atender esta necessidade existe a caixa de transmissão, que tem como atributo principal fazer com que o motorista através da embreagem possa mudar as marchas de maneira a adaptar a rotação/torque do motor às solicitações da roda, buscando sempre trabalhar

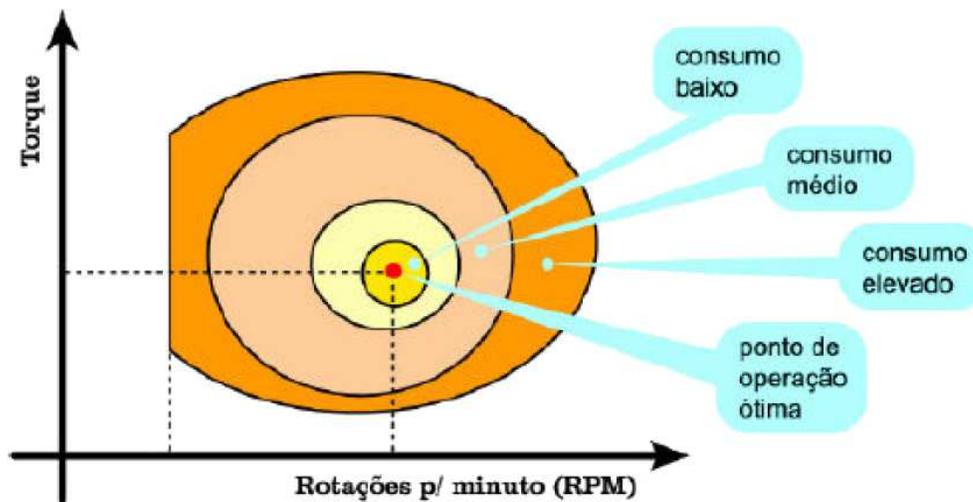


Figura 3.2 - Mapa de consumo esquemático de um MCI.

Fonte: Oliveira (2005).

no ponto de maior eficiência.

O MCI apresenta como característica de funcionamento, intrínseca ao seu ciclo termodinâmico, um limite inferior de velocidade angular (ou rotação) que o impede de funcionar abaixo deste limite (sempre um pouco abaixo da rotação de marcha-lenta especificada pelo manual do veículo). Essa limitação faz com que o motor consuma energia para manter o limite mínimo de rotação de funcionamento mesmo quando não é solicitada uma demanda de energia para a movimentação do veículo como, por exemplo, quando o veículo encontra-se parado por ocasião de um semáforo fechado. Algumas soluções como sistemas de desligamento do MCI nestas condições já estão em produção na Europa, principalmente para motores pequenos, de até quatro cilindros. Estes sistemas são conhecidos como micro-híbridos ou *start&stop*. Para motores maiores, de seis e oito cilindros, já existem sistemas que desligam automaticamente alguns dos cilindros nas condições acima mencionadas (NOCE, 2009).

A Figura 3.3 mostra o fluxo de energia num sistema de propulsão convencional, onde a potência final gerada nos eixos é dada pela conversão da energia química do combustível usado em energia mecânica, que é transferida às rodas através da caixa de câmbio.

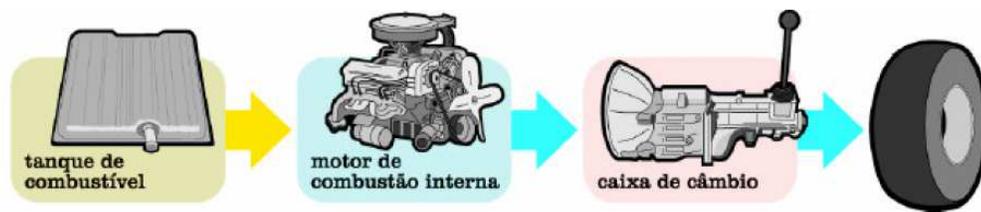


Figura 3.3 - Fluxo de energia em sistemas de propulsão convencional.

Fonte: Oliveira (2005).

3.4 Unidade de Controle Central

A aplicação dos conceitos de eletrônica em sistemas automotivos era um processo natural, e até mesmo inevitável. O constante aumento do preço dos combustíveis e a inserção de leis que regulamentam as emissões de poluentes aceleram o processo. O primeiro controle eletrônico aplicado a um motor automotivo surgiu em 1978, e foi chamado de carburador de “ciclo fechado” (*closed loop*). No ano seguinte houve a produção em série do primeiro dispositivo de controle automotivo de natureza puramente eletrônica. Antes dele, outros dispositivos já atuavam no motor com o intuito de controlá-lo, porém eram mistos - parte mecânicos, parte eletrônicos.

Já era de conhecimento da ciência que o resultado da combustão (tanto a energia quanto a produção de gases) era diretamente influenciado pela precisão de mistura ar-combustível. Para se obter o máximo do processo, deveria obedecer-se a razão estequiométrica de 14:1. Além disso, a faísca gerada para causar a explosão deveria ocorrer no instante exato desta proporção, sendo que esses fatores dependiam de outras variáveis tais como a velocidade, a carga de trabalho, temperatura.

Deste modo, começou-se a avaliar quais eram as informações mais importantes que uma unidade de controle pudesse ter para executar um trabalho eficiente. Primeiramente, era importante saber a rotação do motor, as posições do virabrequim (*crankshaft*) e do pistão (*camshaft*), a massa de ar admitida, posição do acelerador e a razão da aceleração.

Com o tempo, vários sensores e atuadores foram inseridos nos motores, em subsistemas específicos, tais como o de injeção de combustível e o de controle do tempo de ignição. Conforme a necessidade surgia, apareciam também os equipamentos que possibilitavam o avanço na construção das unidades eletrônica de controle. Entre os anos de 1980 e 1982 surgiram elementos muito im-

portantes para a aquisição de sinais do motor: sensores de rotação fotoelétricos, sensores de massa de ar, sensores de medição de rotação, e o controle de regime de trabalho livre do motor.

Atualmente, as unidades eletrônicas de controle estão bastante avançadas, e são capazes de executar funções consideradas complexas para um dispositivo embarcado, como interface com o usuário, por exemplo, além de serem capazes de identificar configurações pessoais de cada usuário.

Basicamente, uma ECU é constituída de alguns elementos principais, sendo que o mais importante deles é o controlador, responsável pela tomada de decisões sobre os estados de funcionamento do motor. O controlador trabalha com sinais digitais, portanto sinais provenientes de sensores analógicos (tensão, temperatura, velocidade angular, linear, entre outros) devem ser convertidos para o formato digital. Esta conversão pode ou não ser realizada pelo próprio controlador, dependendo das funcionalidades implementadas nele.

Outra característica crítica é a capacidade de captura e tratamento de eventos assim que eles acontecem, fazendo diferença a velocidade na qual o controlador consegue trabalhar com os sinais de entrada e saída. O sistema de controle é dividido em um conjunto de subsistemas. Estes interagem entre si e com o sensores e atuadores, auxiliando a unidade de controle a tomar a melhor decisão sobre a operação do motor em um dado instante de análise (DESARKAR et al., 2004).

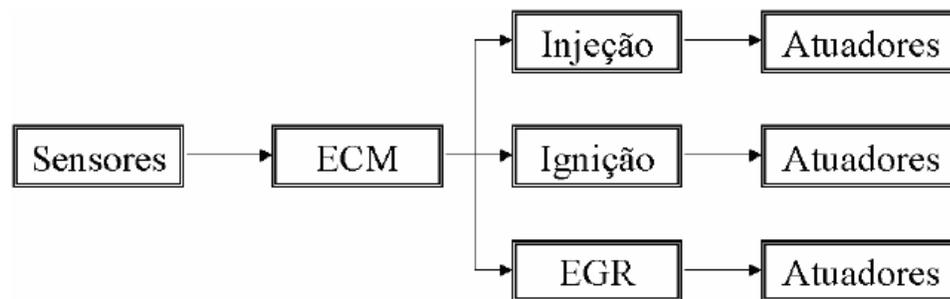
O principal subsistema é o de injeção de combustível, responsável por controlar a quantidade ideal de combustível para determinada condição de operação do motor. Além desse, existem os sistemas de controle de ignição, recirculação de gases e outros que variam conforme o fabricante.

A precisão no controle destes sistemas visa atingir o ponto ideal de funcionamento do motor. Neste, o consumo de combustível é minimizado, assim como a emissão de poluentes. Essas duas metas tem sido fortemente buscadas pelo projetistas, pressionados principalmente por três fatores: a natural busca por minimização de custos; a alta nos preços dos combustíveis nos últimos 30 anos, e pelas rigorosas leis ambientais relacionadas à emissão de gases na atmosfera por veículos automotores.

O sistema de controle interpreta os sinais recebidos, e através de valores contidos em tabelas, conclui sobre uma determinada ação a ser desempenhada pelo motor. Estas tabelas são obtidas em laboratório através de um processo chamado de calibração. A partir de medições obtêm-se curvas de torque do motor, potência, consumo específico e níveis de emissões, e são construídas tabelas (como carga versus rotação versus ponto de ignição, carga versus rotação versus tempo de ignição, temperatura do motor versus tempo de injeção, entre outras). Estas são armazenadas na memória

interna da unidade de controle, e são recuperadas ponto a ponto de acordo com a condição de operação do motor (MILHOR, 2002).

Para cada condição do motor, define-se um modo de controle. Cada modo corresponde a uma rotina realizada pelo programa, e que é ativada a partir dos sinais recebidos dos sensores. Apesar do sistema de gerenciamento atuar de maneira integrada, os módulos de controle são representados separadamente para fins didáticos, seguindo a literatura da área, conforme indicado na Figura 3.4:



*ECM = Engine Control Module, ou Módulo de Controle do Motor;
EGR = Exhaust Gas Recirculation, ou Controle de Recirculação de Gases.*

Figura 3.4 - Divisão didática de um sistema de controle automotivo.

A ECU deve possuir uma interface de comunicação com os sensores e atuadores, incluindo aí todas as questões relacionadas a protocolos e *drivers*. Um dos protocolos de comunicação mais utilizados automobilística é o *Controller Area Network* (CAN). Ele foi desenvolvido pela Bosch em 1986 para resolver problemas de comunicação entre dispositivos eletrônicos em automóveis (BOSCH, 1999).

Quase a totalidade das empresas de automóveis utiliza este padrão para comunicação entre os sensores e atuadores localizados no veículo e as unidades eletrônicas de controle. Também é utilizado na comunicação entre ECUs. Entre as razões para tal fato estão sua segurança e o custo baixo de implementação.

3.4.1 Descrição dos subsistemas de controle do motor

Controle eletrônico da ignição

O controle eletrônico de ignição trabalha a partir do mapa de avanço da ignição do motor. Uma vez detectada a condição de operação, as informações armazenadas em tabelas na memória da unidade de controle são recuperadas, para corrigir o ponto de ignição em função de alguns fatores. Dentre eles estão a rotação do motor, a pressão no coletor de admissão e a temperatura do motor.

Além de corrigir o ponto de ignição, a unidade eletrônica controla a ocorrência de *knocking*, de modo a atrasar o ponto de ignição quando o *knock* aparece. *Knocking* é o termo utilizado para descrever a combustão com características muito próximas à combustão detonante, quando comparado com o processo normal de combustão. Este fenômeno pode causar danos ao motor dependendo de sua intensidade e ocorrência.

Controle da recirculação dos gases de escape (EGR)

O sistema de recirculação de gases de escape tem por função desviar uma parte dos gases queimados da tubulação de exaustão de volta para a admissão do motor. O principal intuito desta medida é diminuir a emissão de gases na atmosfera, especialmente os que possuem nitrogênio em sua composição.

A quantidade de gás recirculado para a admissão varia em função da rotação do motor, pressão no coletor de admissão e temperatura do motor (RIBBENS, 1995). Estas informações são avaliadas pela unidade de controle, que atua de acordo com as condições momentâneas de funcionamento.

Sensores

Os sensores são responsáveis por obter as condições de funcionamento do motor em um determinado instante, e enviá-las à unidade de controle. Existem diversos sensores espalhados pelo motor, com o intuito de levantar o máximo de informações possível. Estas auxiliam nas decisões sobre qual ação tomar com relação a determinado estado de funcionamento. Entre todos, pode-se destacar como principais:

- Sensores de pressão no coletor de admissão - tem a função de informar as variações de pressão no coletor de admissão. Em alguns casos, esta pressão é utilizada para determinar qual a carga de trabalho na qual o motor se encontra, definindo o avanço da ignição;
- Sensores mássicos - são responsáveis pela medida da massa de ar admitida pelo motor. Outra maneira de fazer isso é a utilização de sensores volumétricos, que medem o fluxo volumétrico de ar;
- Sensores de posição da borboleta de aceleração - informam a posição angular da borboleta de aceleração à unidade eletrônica. Isto permite adotar estratégias de controle de liberação de combustível e momento de detonação da centelha de acordo com as tabelas armazenadas em sua memória;
- Sensores de temperatura - responsáveis por informar a temperatura do ar aspirado pelo motor e da água do sistema de arrefecimento. A temperatura do ar é necessária para se determinar sua densidade, utilizada para o cálculo da massa de ar que está sendo admitida pelo motor. A temperatura da água é utilizada como indicativo da temperatura do motor, servindo como parâmetro para que estratégias específicas possam ser realizadas, tais como:
 - Enriquecimento da mistura ar-combustível no momento da partida, quando o motor ainda está frio;
 - *Cut-off* com o motor frio (diminuição ou corte da injeção de combustível quando o carro não está acelerado);
 - Substituição do sensor de temperatura do ar, caso este não seja empregado;
 - Sensor de rotação do motor/PMS - tem por finalidade gerar o sinal de rota-

- ção do motor, e a posição da árvore de manivelas;
- Sensor de fase - combinado com o sinal de rotação, permite que a unidade de controle identifique o cilindro em ignição.

Atuadores

Atuadores são todos os componentes do sistema de controle responsáveis por gerar uma ação sobre a planta - no caso, motores de combustão interna -, a partir de um sinal de controle. Nos sistemas de injeção eletrônica, este sinal é de natureza elétrica, resultado do processamento realizado pela unidade de controle. Dentre os principais atuadores, pode-se destacar:

- Válvulas injetoras de combustível - dispositivos dosadores de combustível. Outros componentes podem realizar sua função (antigamente, essa função era exercida por carburadores mecânicos);
- Bobina de ignição - responsável por gerar a alta tensão requerida para provocar o centelhamento da vela de ignição. A centelha inicia o processo de combustão da mistura ar-combustível;
- Corretor da marcha lenta - tem como objetivo manter a rotação do motor o mais estável possível, quando o pedal do acelerador não está acionado e a rotação do motor é baixa.

Sensor *lambda*

A realimentação da malha fechada do sistema é feita pela sonda *lambda*, trabalhando em parceria com o conversor catalítico (dispositivo usado para reduzir a toxicidade das emissões dos gases de escape de um motor de combustão interna).

Hoje, este conversor é o método mais eficiente de purificação dos gases de exaustão dos motores de combustão interna. Operando juntos, os sistemas de ignição e injeção permitem obter níveis muito baixos de emissão de gases poluentes. Com a utilização de um catalisador, estes níveis

podem ser realmente bastante baixos, pois um catalisador (de três níveis) tem o poder de reduzir os índices de emissão dos gases prejudiciais em até 90%.

Este número só pode ser alcançado se o motor operar muito próximo da proporção estequiométrica ideal de funcionamento ($\lambda = 1 \pm 0,05$). Este pequeno desvio só pode ser mantido com o auxílio de sistemas de injeção de combustível controlados eletronicamente. Por essa razão, utiliza-se o controle em malha fechada com sonda *lambda*, ou seja, a composição da mistura ar-combustível é mantida dentro da faixa ótima através de ações de controle.

Em outras palavras, a sonda *lambda* funciona como um sensor de realimentação que indica se a mistura está acima ou abaixo da proporção estequiométrica (MILHOR, 2002). Este e todos os outros subsistemas descritos podem ser vistos esquematicamente na Figura 3.5.

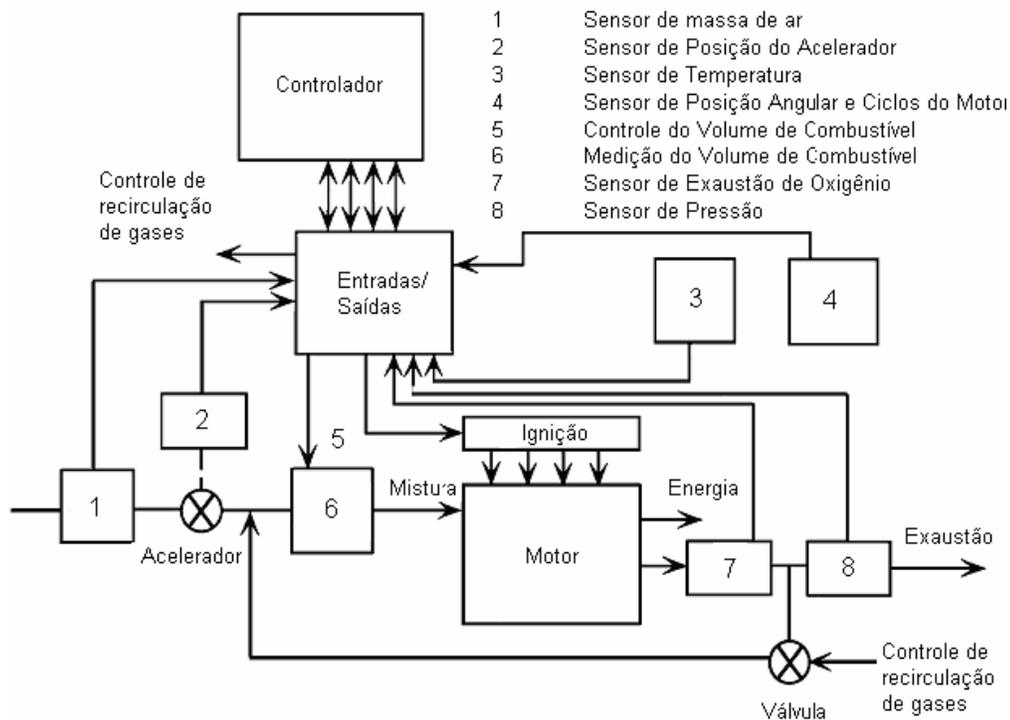


Figura 3.5 - Diagrama de Blocos de uma ECU
 Fonte: Milhor (2002)

Sistema de Injeção de Combustível

O propósito do sistema de injeção de combustível é controlar a quantidade exata de combustível no tempo exato para a obtenção da razão estequiométrica (TOYOTA, 2001b). Baseado nos sinais de entrada, a unidade de controle determina o instante em que cada bico injetor é ativado ou não. Este sistema será descrito com mais detalhes, devido à sua caracterização pela aplicação prática deste trabalho.

Para que o motor tenha um funcionamento suave, econômico e não contamine o ambiente, ele necessita receber a perfeita mistura ar/combustível em todas as faixas de rotação. Um carburador, por melhor que seja e por melhor que esteja sua regulagem, não consegue alimentar o motor na proporção ideal de mistura em qualquer regime de funcionamento. Os sistemas de injeção eletrônica tem essa característica de permitir que o motor receba somente o volume de combustível que ele necessita.

Mais do que isto, os conversores catalíticos - ou simplesmente catalisadores - tiveram papel decisivo no desenvolvimento de sistemas de injeção eletrônicos. Para que sua eficiência fosse plena, seria necessário medir a quantidade de oxigênio presente no sistema de exaustão e alimentar o sistema com esta informação para corrigir a proporção da mistura. O primeiro passo neste sentido foram os carburadores eletrônicos, mas cuja difícil regulagem e problemas que apresentaram, levaram ao seu pouco uso.

Surgiram então os primeiros sistemas de injeção monoponto (ou *single-point*, consistindo de uma válvula injetora ou bico, que fazia a pulverização do combustível junto ao corpo da borboleta do acelerador. Toda vez que o pedal do acelerador é acionado, esta válvula (borboleta) se abre, admitindo mais ar. Um sensor no eixo da borboleta indica o quanto de ar é admitido. Esta informação é reconhecida pela central de gerenciamento, que fornece o combustível proporcionalmente.

Para que o sistema possa suprir o motor com maiores quantidades de combustível de acordo com a necessidade, a linha de alimentação dos bicos injetores é pressurizada e alimentada por uma bomba de combustível elétrica, a qual envia doses maiores que as necessárias para que sempre o sistema possa alimentar adequadamente o motor em qualquer regime em que ele funcione. O excedente retorna ao tanque. Nos sistemas *single point* a alimentação é direta ao bico único. No sistema *multipoint*, em que existe um bico para cada cilindro, existe uma linha de alimentação única

para fornecer combustível para todos os injetores, localizada antes da válvula de admissão.

O instante no qual o injetor atuará no sistema é determinado pela unidade eletrônica de controle. Esta informação é obtida através de um sensor de fundamental importância chamado sensor *Hall*. Seu princípio de funcionamento consiste em gerar diferenças de potencial de voltagem a partir de efeitos eletromagnéticos.

O sensor *Hall* é constituído basicamente por um pastilha semicondutora alimentada eletricamente. Esta pastilha fica associada ao eixo de rotação do motor, que transmite seu movimento a um disco giratório com quatro janelas (Figura 3.6). Quando a abertura do disco giratório está posicionada entre o sensor e o ímã permanente, o primeiro fica imerso no campo magnético do ímã. Esta situação gera no interior da Unidade de Comando uma tensão de aproximadamente 12 Volts.

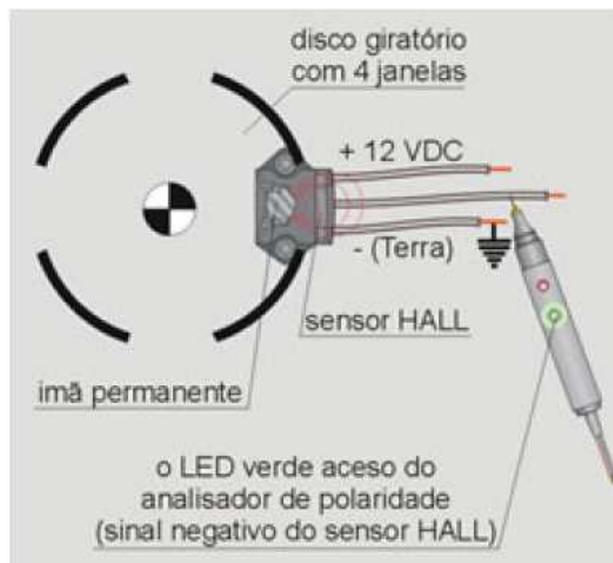


Figura 3.6 - Sensor Hall com abertura entre o sensor e o ímã.

Quando o disco está posicionado entre o ímã e o sensor, não há contato do sensor *Hall* com o campo magnético e a tensão gerada é de zero Volt. O disco giratório pode ter 4 janelas igualmente espaçadas, ou 3 janelas igualmente espaçadas entre si e uma maior (dependendo do sistema em questão). No disco de 4 janelas simétricas, o início das janelas indica quantos graus estão dois dos cilindros do ponto morto superior (esta angulação varia de acordo com o sistema de injeção). No disco de 3 janelas iguais e uma maior, o início da janela maior indica quantos graus está o primeiro cilindro do ponto morto superior.

Especificamente neste segundo caso, o sensor acaba gerando uma onda quadrada com um período constante, mas com o *duty cycle* da janela maior diferente de 50%. Esta diferença, associada

à análise do sinal de rotação do motor, permite inferir o momento exato que a sequência de injeção de combustível nos cilindros deve ser iniciada.

Existem algumas estratégias que a ECU pode adotar para realizar a injeção de combustível. Como a injeção é determinada pela posição angular do virabrequim, é considerada uma injeção síncrona. Dependendo da aplicação, os três principais tipos de injeção síncrona são: simultânea, por grupo ou sequencial (TOYOTA, 2001a).

Na injeção simultânea, todos os bicos são acionados ao mesmo tempo por um circuito em comum. A admissão de combustível é feita uma vez por ciclo do motor. Já na injeção por grupo, os bicos são divididos em partes, sendo que a entrada de combustível ocorre de maneira alternada entre estes grupos (em um motor com quatro cilindros, geralmente se divide em dois grupos de dois cilindros, sendo o primeiro e o terceiro cilindros acionados simultaneamente, e a seguir o segundo e o quarto). A injeção sequencial, como o próprio nome diz, ocorre de maneira a ativar um bico por vez, ordenadamente, de maneira que todos os bicos injetam combustível pelo menos uma vez durante um ciclo do motor (TOYOTA, 2001a).

3.5 Máquinas Elétricas

As máquinas elétricas têm causado um importante impacto no desenvolvimento industrial, elas têm a vantagem de ser tão potentes quanto os motores à combustão, além de ter maior potência e menor volume, ou seja, são máquinas com menor tamanho. Além do mais não usam matéria-prima diretamente proveniente do carbono, que podem causar emissões poluidoras ao ambiente, além de ser um produto caro no mercado. Entre as máquinas elétricas mais relevantes nas aplicações de veículos elétricos ou híbridos se encontram os motores de indução, de relutância magnética e os síncronos de ímã permanente (CHAU et al., 2008). Essas máquinas podem ser classificadas pela construção do comutador de acionamento, com ou sem escovas, como pode ser observado na Figura 3.7, sendo que o PMSM (Motor Síncrono de Ímã Permanente) faz referência ao motor síncrono de ímã permanente com excitação senoidal.

A máquina de indução é amplamente utilizada nos VEs porque tem baixo custo, alta confiabilidade e baixa manutenção. No entanto, métodos de controles convencionais, como tensão

variável e frequência variável não proporcionam o desempenho desejado. A maior razão é devido às não-linearidades do seu modelo dinâmico. Portanto, métodos de controle como o vetorial têm se mostrado bastante eficazes para resolver estas não-linearidades (DELGADO, 2010).

A máquina de relutância magnética tem muito potencial em aplicações de VE. Ela tem a vantagem de que sua construção é muito simples, portanto tem um custo baixo e apresenta alto torque. Apesar da sua simplicidade, seu projeto e controle é difícil e minucioso. Adicionalmente este sempre apresenta problemas de ruído acústico. Recentemente através do controle *fuzzy* tem-se tentado resolver as não linearidade e as vibrações (DELGADO, 2010).

A máquina de ímã permanente, por outro lado, está tornando-se mais atrativa para aplicações de VE. Por suas características de construção e maneira de funcionamento, oferece um elevado fator de potência, atinge velocidades significativas e revela alta eficiência, com respeito as outras máquinas elétricas (EHSANI et al., 1997). Entretanto, esta ainda é uma máquina cara, devido aos ímãs permanentes.

Desta forma, os VEs e VEHS podem apresentar, em sua configuração, diferentes tipos de MEs com sistemas de tração. No entanto, a forma mais simples de um motor elétrico, é o motor CC com escovas. Segundo (LARMINIE et al., 2003) os motores de CC representam um bom ponto de partida para a aplicação em VEs e VEHS, pois as questões mais importantes de controle de MEs podem ser facilmente explicadas com referência a este tipo.

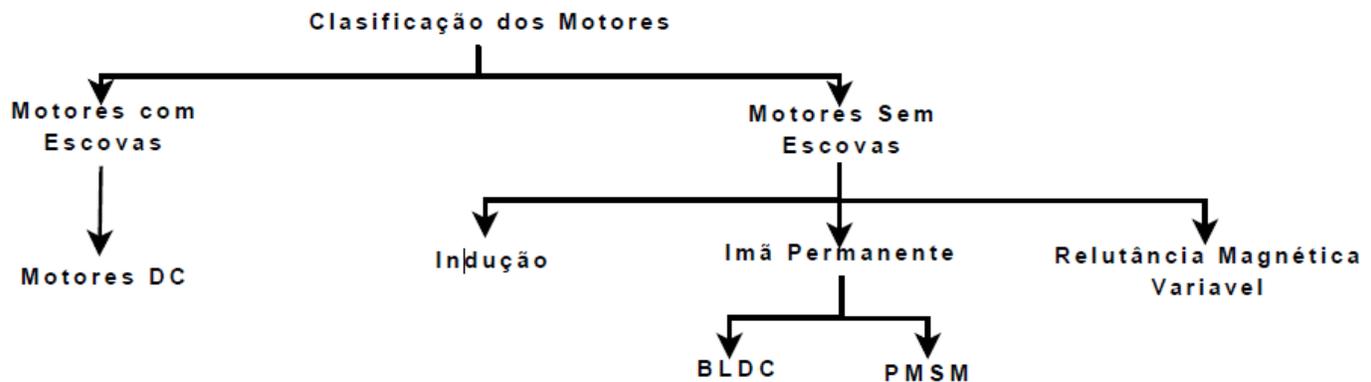


Figura 3.7 - Classificação Geral dos Motores.

3.5.1 Princípios de Motores CC com Ímãs Permanentes

Esta seção tem como foco os princípios básicos de motores CC com ímãs permanentes como os utilizados por Kenjío e Nagamori (1985).

Termos Básicos

Dentre os diferentes tipos de motores elétricos de corrente contínua, segundo Kenjío e Nagamori (1985), na Figura 3.8 podem ser vistos os componentes e os termos básicos pelos quais são formados e conhecidos.

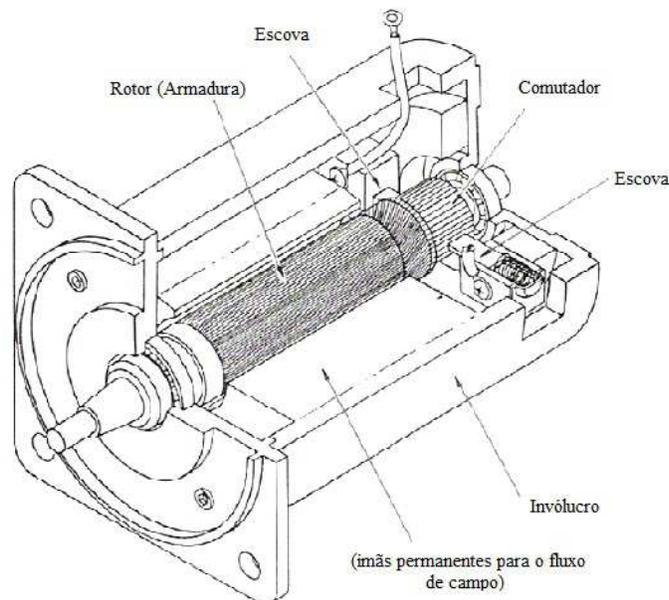


Figura 3.8 - Vista em corte transversal de um motor elétrico CC.

De acordo com a Figura 3.8:

- Rotor: parte rotativa do motor;
- Estator: parte estacionária do motor;
- Sistema de Campo: parte do motor que fornece o fluxo magnético necessário para a geração de torque. Na Figura 3.8 o sistema de campo é formado por dois ímãs perma-

mentes e um invólucro de ferro, constituindo o estator.

- Armadura: parte do motor que transporta a corrente que interage com o fluxo de campo para gerar o torque. No motor da Figura 3.8 o rotor é referido como a armadura desde que possui bobinas enroladas ao seu redor. Estas bobinas têm a função de transferir a corrente das escovas e do comutador para o rotor.
- Escovas: parte do circuito através da qual a corrente elétrica é fornecida para a armadura a partir da fonte de potência. Um motor CC pode ter um ou mais pares de escovas, na Figura 3.8 uma escova é conectada ao terminal positivo da fonte de potência e a outra ao terminal negativo.
- Comutador: parte que está em contato com as escovas. A corrente é apropriadamente distribuída nas bobinas de armadura por meio das escovas e do comutador.

Regra da mão-esquerda de Fleming e Geração de Torque

Em um motor CC a geração de torque pode ser baseada na regra da mão-esquerda de Fleming. A Figura 3.9 mostra a atuação de uma força sobre um condutor, pelo qual flui corrente elétrica, quando colocado em campo magnético. A direção desta força é determinada pela regra da mão-esquerda como ilustrado na mesma figura, e sua magnitude é dada pela Equação 3.18:

$$F = B_d I L_d \quad (3.18)$$

na qual:

$F \triangleq$ força;

$B_d \triangleq$ densidade do fluxo magnético;

$I \triangleq$ corrente elétrica, e

$L_d \triangleq$ comprimento do condutor.

O torque obtido quando uma única bobina é colocada em um campo magnético é ilustrado na Figura 3.10. Nesta figura, existem dois condutores presentes, \overline{AB} e \overline{CD} e a magnitude da força que

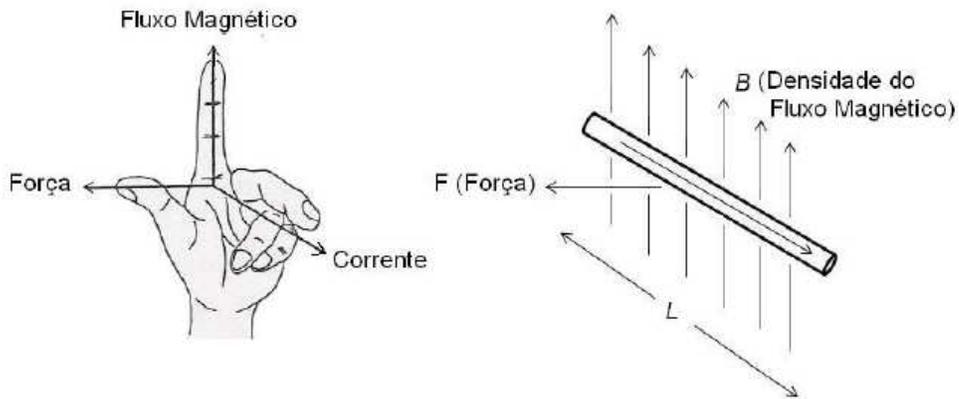


Figura 3.9 - Regra da mão-esquerda de Fleming.

age em cada condutor é determinada pela Equação 3.18. As direções das forças presentes em cada um dos segmentos condutores citados são opostas. Na Figura 3.10 o torque T em torno do eixo OO' tem sentido horário e dado pela Equação 3.19:

$$T_{el} = 2R_d F = 2R_d B_d I L_d \quad (3.19)$$

em que:

$T_{el} \triangleq$ torque produzido pelo ME, e

$R_d \triangleq$ distância do eixo OO' para cada condutor.

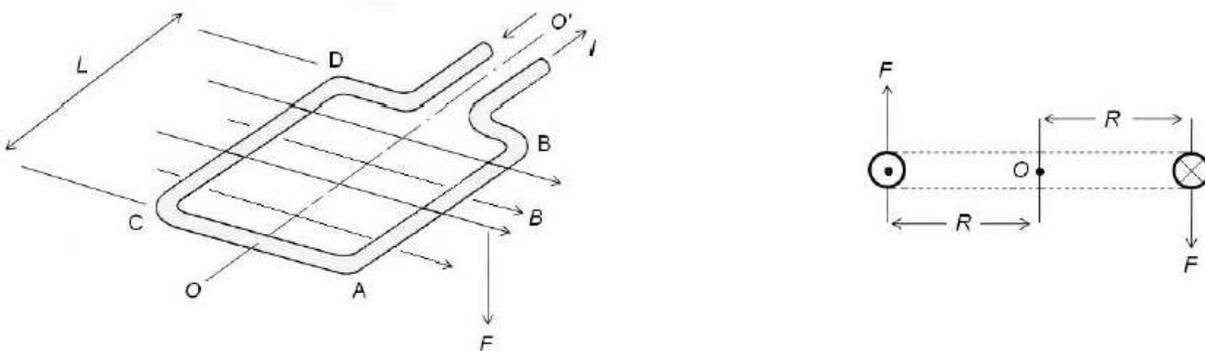


Figura 3.10 - Bobina sob a ação de um campo magnético.

Constante de torque

A armadura do motor apresenta distribuição de corrente conforme ilustrada na Figura 3.11. Nesta figura pode-se observar que o fluxo de corrente nos condutores da direita do eixo $00'$ terá sentido orientado do “plano da folha para o leitor”. As escovas e os comutadores sempre distribuem a corrente dos terminais para dentro do rotor da maneira citada acima.

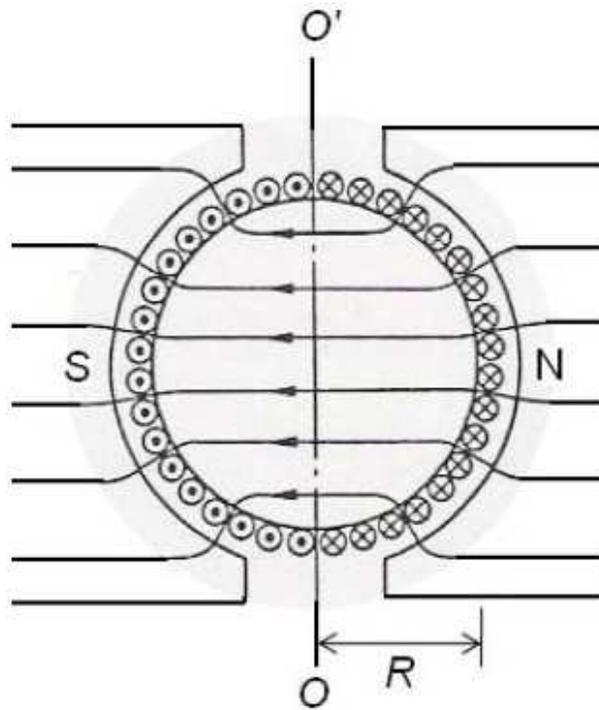


Figura 3.11 - Distribuição do fluxo de campo e da corrente no rotor.

Assumindo que a densidade de fluxo magnético possui valor médio igual a B , então o torque $RBIL$ agindo sobre todos os condutores originaria um torque total em torno do eixo $00'$ igual a:

$$T_{el} = ZR_d B_d L_d I_a / 2 \quad (3.20)$$

na qual:

$Z \triangleq$ número total de condutores, e

$I_a \triangleq$ corrente de armadura dos terminais do motor e igual a $2I$.

Neste modelo, o fluxo do campo magnético é igual a:

$$\phi = \pi R_d B_d L_d \quad (3.21)$$

na qual: $\phi \triangleq$ fluxo de campo magnético.

E substituindo a Equação 3.21 na Equação 3.20 tem-se:

$$T_{el} = (Z/\pi)\phi I_a/2 \quad (3.22)$$

Como o termo $(Z/\pi)\phi$ representa um valor fixo, pode-se concluir que o torque T é proporcional à corrente de armadura. Dessa forma, a constante de torque pode ser definida como:

$$K_T = (Z/2\pi)\phi \quad (3.23)$$

na qual: $K_T \triangleq$ constante de torque do ME.

Agora, substituindo a Equação 3.23 na Equação 3.22 obtém-se a equação para o torque em função da constante de torque K_T dada pela Equação 3.24:

$$T_{el} = K_T I_a \quad (3.24)$$

Constante de Força Contra-eletromotriz (fcem)

Quando um condutor, percorrido por uma corrente elétrica, é colocado sob a ação de um campo magnético B surgirá uma força sobre este condutor que o moverá a uma dada velocidade v . Como resultado desse movimento uma força eletromotriz E é originada no condutor. A magnitude dessa força é dada pela Equação 3.25:

$$E = v B_d L_d \quad (3.25)$$

em que:

$E \triangleq$ força eletromotriz, e

$v \triangleq$ velocidade de um condutor sob a ação de um campo magnético.

O sentido de E é determinado pela regra da mão-direita de Fleming, e é oposto ao sentido do fluxo de corrente. Como cada condutor passa através dos polos magnéticos norte e sul dos ímãs

permanentes, a força eletromotriz muda sucessivamente. Mas, devido às escovas e ao comutador, a força eletromotriz total em cada bobina é somada aos terminais do motor. A tensão resultante desta forma é chamada de força contra eletromotriz e seu valor é diretamente proporcional à velocidade angular de rotação do motor elétrico e é dada por:

$$E = K_e \Omega \quad (3.26)$$

na qual:

$K_e \triangleq$ constante da força contra eletromotriz, e

$\Omega \triangleq$ velocidade angular de rotação do ME.

No sistema internacional (SI) de unidades as constantes K_e e K_T apresentam o mesmo valor, ou seja:

$$K_e = K_T = K, \quad (3.27)$$

em que: $K \triangleq$ constante do ME.

Assim desde que K_e e K_T sejam dadas com referência ao *SI*, poderão ser tratadas como uma única constante K , conhecida como constante do motor elétrico.

Relação entre Torque e Velocidade Rotacional do ME

Um motor que utilize ímãs permanentes para fornecer o fluxo de campo pode ser representado por um simples circuito equivalente como o da Figura 3.12. Neste circuito, a resistência de armadura r_a está em série com a fcm E .

Desprezando a queda de tensão através das escovas, a equação resultante para a tensão nos terminais do motor é dada por:

$$V = r_a I_a + K_e \Omega \quad (3.28)$$

na qual:

$V \triangleq$ tensão nos terminais do ME, e

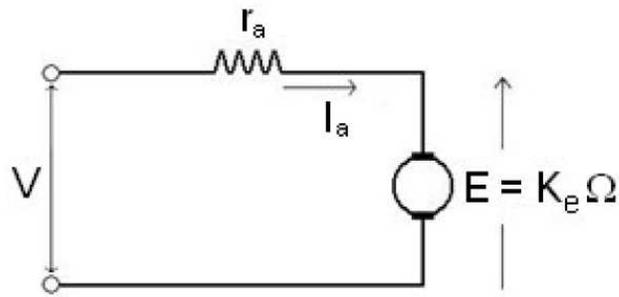


Figura 3.12 - Circuito equivalente para um motor C.C. com ímãs permanentes.

$r_a \triangleq$ resistência do circuito de armadura.

E isolando a corrente de armadura da Equação 3.28:

$$I_a = (V - K_e \Omega) / r_a \quad (3.29)$$

Agora, substituindo a Equação 3.29 na Equação 3.24, obtém-se a equação que fornece o comportamento do torque do motor em função da velocidade de rotação, conforme destacado por Kenjlo e Nagamori (1985) e Larminie et al. (2003):

$$T_{el} = K_T I_a = K_T / r_a (V - K_e \Omega) \quad (3.30)$$

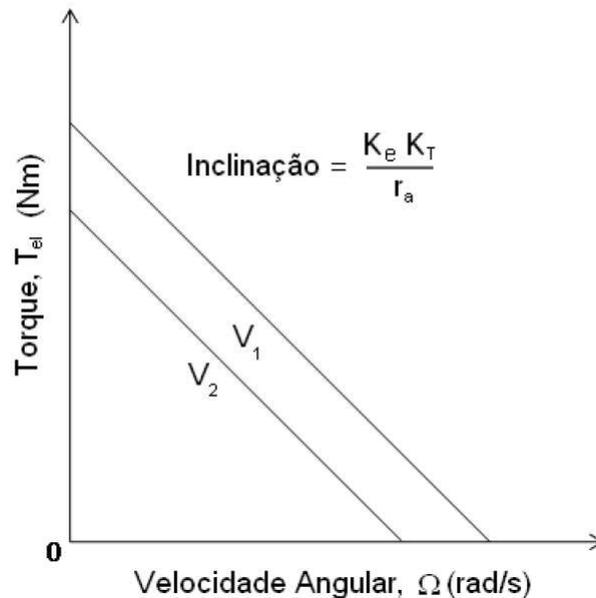


Figura 3.13 - Torque versus velocidade angular de um motor elétrico CC.

A Figura 3.13 mostra a relação entre o torque e a velocidade de rotação de um motor elétrico CC para duas diferentes tensões de alimentação. Pode-se notar que o torque decresce linearmente

com o aumento da velocidade e que a inclinação da curva resultante é uma constante $K_T K_e / r_a$ e independente de V e Ω . Tal característica torna o controle de velocidade de um motor CC relativamente fácil, segundo Larminie et al. (2003). No entanto, é importante destacar que somente os motores CC e os sem escovas de CA apresentam este comportamento.

Regeneração

Agora, considerando o circuito equivalente da Figura 3.14 será discutido o caso no qual a corrente retorna para a fonte de potência do motor. Quando o motor opera à tensão terminal V_0 na ausência de carga, a velocidade de rotação é igual a $\Omega_0 = V_0 / K_e$. Se nessa situação o motor for rotacionado por uma força externa a uma velocidade maior que Ω_0 , a fcm ($E = K_e \Omega$) será maior que a tensão V da fonte de potência acarretando na mudança de sentido do fluxo de corrente elétrica, que agora retornará para a fonte. Assim, quando a máquina elétrica trabalha como gerador, a corrente gerada retornará para a fonte de potência. Este efeito é chamado de regeneração e nesta situação a corrente de armadura I_a é dada pela Equação 3.31:

$$I_a = \frac{E - V}{r_a} \quad (3.31)$$

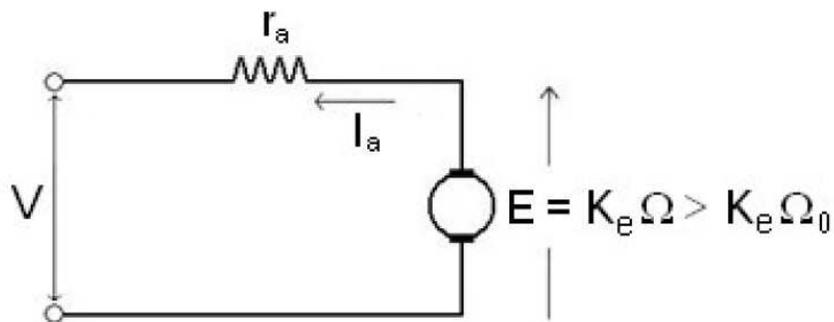


Figura 3.14 - Direção da corrente e magnitude da fcm na ação regenerativa.

A potência resultante da regeneração é dada pela Equação 3.32:

$$P = P_0 - P_L = (K_e \Omega - r_a I_a) I_a, \quad (3.32)$$

em que:

$P \triangleq$ potência resultante da regeneração;

$P_0 \triangleq$ potência da regeneração, e

$P_L \triangleq$ potência dissipada em forma de calor.

E substituindo o termo $(K_e\Omega - r_a I_a)$ por V da Equação 3.31, obtém-se que a potência regenerada é igual ao produto da tensão da fonte pela corrente de armadura:

$$P = V I_a \quad (3.33)$$

Dinâmica do Motor CC com Campo Independente

Em VEs e em VEHs, tanto os motores síncronos como os assíncronos podem ser utilizados como sistema de tração. Porém, para um estudo de dinâmica longitudinal do veículo, o comportamento dinâmico pode ser satisfatoriamente descrito se o modelo de um motor CC for utilizado, como empregado por Waltermann (1996) em sua pesquisa. Neste trabalho, o ME utilizado como sistema de tração para o estudo de caso será um CC com campo independente.

O Motor CC com Campo Independente Ideal

A representação esquemática do modelo de motor elétrico CC com campo independente é mostrada na Figura 3.15 como também indicada por Fitzgerald et al. (1975). A partir da definição das direções de referência para a corrente e o campo magnético, pode-se então adotar um conjunto consistente de direções de referência para todas as outras variáveis. Por exemplo, na Figura 3.15a, a direção de referência para torque produzido pelo motor é anti-horária, tendendo a alinhar os campos do estator e do rotor como mostrado pela seta T_{el} . Se a máquina é um motor, o sentido de rotação do eixo será na direção anti-horária contra o torque de resistência T_{carga} aplicado ao motor pela carga mecânica, como mostrado pelas setas indicada por Ω e T_{el} . A escova superior será positiva,

pois a potência elétrica precisa ser alimentada ao motor.

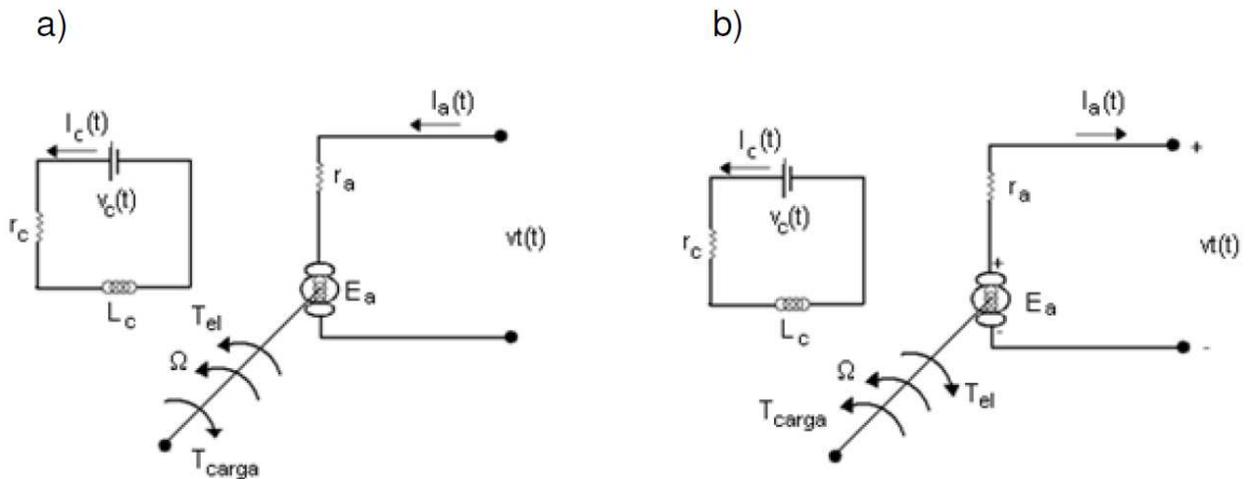


Figura 3.15 - Representação esquemática de uma máquina de CC mostrando as direções de referência um motor (a) e para um gerador (b).

A Figura 3.15b, mostra os sentidos de referência para a máquina atuando como um gerador, e neste caso, como citado na Seção 3.5.1 o T_{carga} terá o mesmo sentido da velocidade de rotação do eixo da máquina e sentido contrário ao do T_{el} .

Equações Dinâmicas do ME CC

Os termos de acoplamento eletromecânico são o torque produzido pelo motor e a fcm dados pelas Equação 3.24 e Equação 3.26. De acordo com Fitzgerald et al. (1975), estas equações juntamente com a equação diferencial de movimento do sistema mecânico, com as equações tensão-corrente para os circuitos de armadura e campo, e com a curva de magnetização, descrevem o comportamento do sistema.

Considerando a máquina de CC ideal da Figura 3.15, a Equação 3.34 para o circuito do campo é:

$$v_c(t) = r_c I_c(t) + L_c \frac{dI_c(t)}{dt} \quad (3.34)$$

em que:

$v_c \triangleq$ tensão terminal do circuito de campo;

$r_c \triangleq$ resistência do circuito de campo;

$I_c \triangleq$ corrente do circuito de campo, e

$L_c \triangleq$ auto-indutância do circuito de campo.

É importante ressaltar que aplicando um valor constante de v_c à bobina de campo será obtido um valor constante de fluxo de campo magnético que após rápido transitório terá comportamento igual ao de um motor de CC com ímãs permanentes. Com as direções de referência para motores (Figura 3.15a), a equação de tensão para o circuito de armadura é dada por:

$$v_t(t) = r_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a \quad (3.35)$$

na qual:

$v_t \triangleq$ tensão terminal do circuito de armadura;

$L_a \triangleq$ auto-indutância do circuito de armadura, e

$E_a \triangleq$ fcm do circuito de armadura.

A transformada de Laplace aplicada à Equação 3.35 com condições iniciais nulas ou sistema inicialmente desenergizado fornece:

$$V_t(s) = E_a(s) + (r_a + sL_a)I_a(s), \quad (3.36)$$

e isolando $I_a(s)$:

$$I_a(s) = \frac{V_t(s) - E_a(s)}{r_a + sL_a} \quad (3.37)$$

Para um motor, a equação dinâmica do sistema mecânico é dada por:

$$T_{el} - T_{carga} - D\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.38)$$

em que:

$T_{carga} \triangleq$ torque da carga mecânica que se opõe à rotação do motor;

$J \triangleq$ momento de inércia da carga mecânica que se opõe à rotação do motor;

$D \triangleq$ coeficiente de atrito viscoso (mancais e ventilação do motor).

Aplicando a transformada de Laplace à Equação 3.38 com condições iniciais nulas tem-se:

$$T_{el} - T_{carga}(s) = (D + sJ)\Omega(s) \quad (3.39)$$

e isolando $\Omega(s)$:

$$\Omega(s) = \frac{(T_{el}(s) - T_{carga}(s))}{D + sJ} \quad (3.40)$$

Já para os sentidos de referência do gerador (Figura 3.15b), as transformadas de Laplace das equações de tensão de armadura e torque são dadas por:

$$V_t(s) = E_a(s) - (r_a + sL_a)I_a(s) \quad (3.41)$$

$$T_{carga}(s) - T_{el}(s) = (D + sJ)\Omega(s) \quad (3.42)$$

3.6 Baterias

Baterias são elementos compostos por duas ou mais células que convertem energia química em energia elétrica. Por célula entende-se dois eletrodos, um positivo e um negativo, unidos através de um eletrólito e cuja reação química com o mesmo produz eletricidade. Em baterias recarregáveis, a reação química pode ser revertida através da inversão da corrente elétrica fazendo com que a bateria retorne a um determinado estado de carga (SOC) (REVOREDO, 2007).

A bateria é um componente fundamental em veículos híbridos, sejam eles de qualquer tamanho ou tipo. Isso porque, o banco de baterias permite o aproveitamento de energia de frenagem, que corresponde a 30% da energia eficiente do veículo.

Em veículos a bateria, esta é a única fonte geradora de energia. Já em veículos híbridos (VEHs), a bateria será utilizada juntamente com outra fonte de maneira equilibrada, servindo para o armazenamento de energia e auxiliando na propulsão do veículo.

Dentre as características de uma bateria que devem ser consideradas em um projeto de veículo híbrido, pode-se ressaltar sua voltagem típica, capacidade de carga, densidade de energia e

eficiência energética, além de outros fatores, tais como: taxa de descarga, temperatura de operação e quantidade de ciclos de trabalho. Os principais parâmetros serão discutidos a seguir.

3.6.1 Tensão

Uma bateria pode ser representada de maneira simplificada pelo circuito elétrico mostrado na Figura 3.16, na qual E representa a tensão de circuito aberto, R_{int} a resistência interna e V a tensão entre os terminais da bateria.

Pode-se observar que a voltagem nos terminais de uma bateria não é constante. Esta irá variar de acordo com a corrente elétrica solicitada à mesma. A resistência interna modela a perda associada ao aumento da corrente entre os terminais da bateria. Modelos mais detalhados levam em conta a queda de tensão devido ao estado de carga da bateria e a tensão de operação.

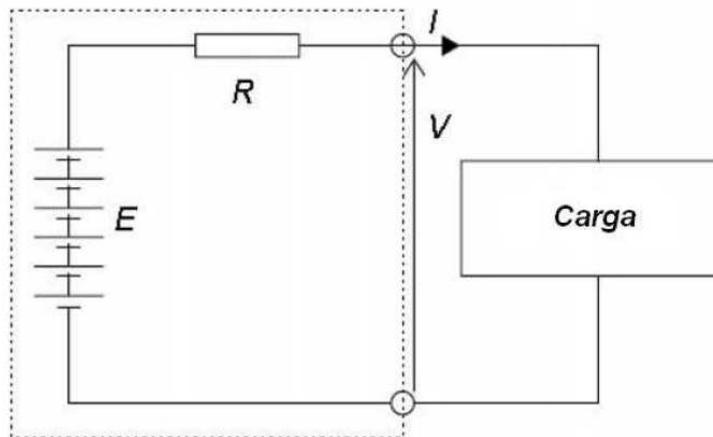


Figura 3.16 - Circuito elétrico simplificado equivalente a uma bateria.

3.6.2 Capacidade de carga

A capacidade de carga de uma bateria é geralmente definida em termos de Ampères-hora (Ah), uma vez que a unidade do sistema internacional de unidades (*Coulomb*) é muito pequena, representando o fluxo de apenas um Ampère em um segundo, o que é uma quantidade de energia muito baixa para aplicações tais como veículos híbridos. A quantidade de Ampères-hora denota o número de horas que uma bateria é capaz de fornecer 1 Ampère de corrente. Por exemplo, afirmar que uma bateria possui capacidade $10Ah$ é equivalente a dizer que ela é capaz de gerar 1 A de corrente durante 10 horas ininterruptas. É natural pensar, portanto, que ao solicitar 2 A desta mesma bateria, seu tempo de descarga irá decair pela metade. Entretanto, na prática, isso não acontece. Caso uma corrente de 2 A seja solicitada a uma bateria de 10 Ah ininterruptamente, o tempo de descarga não será exatamente a metade do originalmente previsto. Na realidade, a descarga acontecerá mais rapidamente Larminie et al. (2003). Da mesma maneira, o tempo de descarga será diferente do esperado caso a corrente solicitada seja menor do que 1 A. Por exemplo, uma solicitação contínua de 0,5 A implica em mais de 20 h de operação para uma bateria de 10 Ah. Em outras palavras, o tempo de descarga de uma bateria varia com relação a sua especificação em função da quantidade de corrente que lhe é solicitada.

Além disso, é usual que os fabricantes especifiquem a capacidade de carga de uma bateria associada a um determinado tempo de descarga. No caso de baterias com grande capacidade de carga, tais como as aplicadas em VEHs, é comum que estas sejam especificadas para tempo de descarga de 5 h. Por exemplo, se um fabricante afirma que uma bateria possui capacidade nominal de 20 Ah associada a 5 horas de descarga, equivale a dizer que a bateria é capaz de fornecer uma corrente $I = \frac{20}{5} = 4A$ ao longo de 5 horas ininterruptamente. Ao final das 5 horas, a bateria estará completamente descarregada.

Portanto, é importante para o projeto e simulação de veículos híbridos, que seja possível prever o tempo e a quantidade de descarga de um banco de baterias em função da corrente que lhe é solicitada pelo sistema (carga). A forma usual e, provavelmente, a maneira mais simples de realizar esta estimativa é através de uma capacidade de referência denominada *Capacidade de Peukert*, que será definida mais adiante neste capítulo.

3.6.3 Densidade de energia

A densidade de energia de uma bateria é a quantidade de energia armazenada por unidade de volume e é normalmente denotada em termos de Whm^{-3} , na qual Wh significa Watts-hora e representa a quantidade de energia calculada de acordo com a Equação 3.43, na qual C representa a capacidade de carga da bateria, em Ah, e V sua voltagem (*Volts*).

$$Energia = VC \quad (3.43)$$

A densidade de energia de uma bateria é um parâmetro de projeto importante pois através dela será possível calcular o tamanho (volume) necessário a uma bateria em função da capacidade energética desejada/necessária, bastando para tal a divisão do valor encontrado na Equação 3.43 pela densidade de energia (REVOREDO, 2007).

3.6.4 Eficiência energética

A eficiência de uma bateria está associada a quantidade de energia que ela é capaz de fornecer com relação a energia utilizada para carregá-la. Idealmente, uma bateria deveria ser capaz de devolver toda a energia que lhe foi fornecida quando foi carregada, entretanto isso nunca acontece e a razão entre essas quantidades de energia é denominada eficiência da bateria.

A eficiência de uma bateria varia de acordo com a temperatura de operação, a taxa de carga, o tipo de bateria e, ainda, em função do estado de carga da mesma. Por exemplo, a eficiência alcançada ao carregar uma bateria de 20% a 80% de sua capacidade será maior do que carregá-la de 0 a 80% de sua capacidade.

3.6.5 Outros fatores

Outros fatores que influenciam na capacidade e eficiência energética de uma bateria são sua temperatura de operação, geometria, ciclos de trabalho e auto descarga. Embora a maioria das baterias operem em temperatura ambiente, algumas são projetadas para operar em altas temperaturas e, desta forma, precisarão ser pré-aquecidas para iniciar seu funcionamento normal. Além disso, algumas baterias diminuem substancialmente sua eficiência quando operam em baixas temperaturas. O conhecimento das necessidades de aquecimento ou resfriamento de uma bateria é importante para sua utilização em qualquer tipo de aplicação e para otimização de seu desempenho.

Além do conhecimento da operação em diferentes temperaturas, outros fatores relevantes ao projeto são a geometria da bateria e a sua vida útil. A geometria é importante pois o projetista pode optar por formatos diferentes objetivando características tais como a mudança do centro de gravidade do veículo. Para tal, é preciso que o tipo de bateria desejado seja capaz de ser fabricado e operado na geometria almejada. Além disso, a maneira que a bateria será utilizada e seu tipo possuem influência no número de ciclos (cargas e descargas) possíveis e consequente vida útil da bateria.

Por fim, outra característica que deve ser observada é o tempo de auto descarga da bateria. A maioria das baterias é descarregada se não utilizada por longos períodos de tempo e isso também pode e deve ser um dos parâmetros considerados no projeto de veículos híbridos.

3.6.6 Modelo da bateria

Existem alguns modelos de bateria desenvolvidos na literatura aplicáveis ao estudo de veículos híbridos. Alguns exemplos podem ser encontrados em Larminie et al. (2003), Ceraolo (2000), Akella et al. (2001), Barsali e Ceraolo (2002).

A maioria dos modelos para aplicação em VEH são baseados em baterias do tipo chumbo ácido. Isso é devido à boa confiabilidade e a alta voltagem por célula deste tipo se comparado a outras baterias. Outra característica importante é sua baixa resistência interna e consequente baixa

queda de tensão entre seus terminais quando um aumento na solicitação de potência ocorre. Os principais parâmetros desse tipo de bateria são apresentados na Tabela 3.1. Com relação ao custo, as baterias do tipo chumbo ácido utilizadas em VEHs são mais caras do que as baterias de chumbo ácido convencionais, pois precisam ser mais robustas de maneira a suportar ciclos de operação mais severos. Estas baterias utilizam gel no eletrólito ao invés de água.

Tabela 3.1 - Parâmetros nominais usuais de uma bateria chumbo ácido (REVOREDO, 2007)

Parâmetro	Valores nominais usuais
Quantidade de energia	20 – 35Wh.kg ⁻¹
Densidade de energia	0,054 – 0,095Whm ⁻³
Potência	250W.kg ⁻¹
Voltagem nominal das células	2 V
Eficiência	60 % (varia com a taxa de descarga e com a temperatura)
Resistência interna	muito baixa (0,022 Ω por célula de 1 Ah)
Disponibilidade	Disponível comercialmente por vários fabricantes
Temperatura de operação	ambiente (baixa performance em ambientes gelados)
Auto-descarga	2% por dia
Número de ciclos de trabalho	até 800 para 80% da carga
Tempo de recarga	8h

O modelo utilizado neste trabalho é baseado no mostrado na Figura 3.16. Uma vez que o escopo desta tese é determinar estratégias de controle para gerenciamento de potência em veículos híbridos, e como a velocidade do veículo varia lentamente se comparado aos transientes da bateria, o modelo simplificado pode ser utilizado satisfatoriamente. Será apenas adicionado à modelagem, o cálculo do estado de carga da bateria e a variação da tensão de saída em função desta variável.

Capacidade de Peukert

Tendo como base um tempo de descarga (t) e uma capacidade de carga de referência (C) para os quais uma bateria foi especificada, pode-se calcular o tempo de descarga real da bateria em função da corrente drenada pela carga (solicitação de potência a bateria) através do cálculo de uma capacidade de carga de referência, que é constante, denominada *Capacidade de Peukert*, dada pela Equação 3.44.

$$C_p = (I_{bat})^k t \quad (3.44)$$

Nesta equação, I_{bat} é a corrente solicitada à bateria e k é uma constante (tipicamente $k = 1,2$ para baterias do tipo chumbo ácido) denominada *Coefficiente de Peukert*. Dessa forma, uma vez conhecida a *Capacidade de Peukert*, que pode ser calculada a partir da capacidade e do tempo de descarga para os quais a bateria foi específica/fabricada, pode-se determinar o tempo de descarga associado a uma solicitação de corrente qualquer.

Por exemplo, suponha que uma bateria possua capacidade nominal de 40 Ah especificada para 5 horas de descarga. Isso quer dizer que a bateria é capaz de fornecer uma corrente constante de 8 A ao longo de 5 horas, tal como apresentado na Equação 3.45.

$$I_{bat} = \frac{40}{5} = 8A \quad (3.45)$$

Seja $k = 1,2$, a *Capacidade de Peukert* é dada pela Equação 3.46.

$$C_p = 8^{1,2} 5 = 60,6Ah \quad (3.46)$$

Uma vez conhecida a *Capacidade de Peukert*, é possível calcular o tempo de descarga da bateria caso lhe seja solicitada uma corrente I qualquer, de amplitude constante ao longo do tempo, através da Equação 3.44, tal como apresentado na Equação 3.47.

$$t = \frac{C_p}{I^k} \quad (3.47)$$

Para o caso da bateria com capacidade nominal de 40 Ah com tempo de descarga de 5 horas, a Tabela 3.2 mostra o tempo de descarga aproximado para diferentes solicitações de corrente.

Pelo exposto, pode-se concluir que, quando uma corrente I_{bat} flui através dos terminais de uma bateria, a capacidade da bateria é afetada por um fator igual a $(I_{bat})^k$. Por exemplo: Seja uma bateria do tipo chumbo ácido de 20 Ah especificada para um tempo de descarga de 10 horas. Caso uma corrente elétrica de 2 A seja solicitada de maneira constante a esta bateria, sua capacidade será modificada para $C = \frac{20}{2^{1,2}} = 8,7Ah$ e não 10 Ah como seria em princípio esperado.

Tabela 3.2 - Tempo de descarga aproximado para uma bateria com capacidade nominal de 40Ah definida para 5h, em função da solicitação de diferentes correntes (REVOREDO, 2007)

Corrente solicitada	Tempo de descarga
02 A	26 horas e 23 minutos
04 A	11 horas e 29 minutos
06 A	07 horas e 03 minutos
08 A	05 horas
10 A	03 horas e 49 minutos
12 A	03 horas e 04 minutos
14 A	02 horas e 33 minutos
16 A	02 horas e 11 minutos
18 A	01 hora e 53 minutos
20 A	01 hora e 40 minutos

Estado de carga

Seja um intervalo de tempo δ_t , no qual uma corrente constante, I_{bat} , é solicitada a bateria. A carga removida da bateria neste intervalo é dada pela Equação 3.48 (LARMINIE et al., 2003).

$$Q_{\delta_t} = \delta_t [I_{bat}]^k \quad (3.48)$$

Seja δ_t em segundos, a carga total removida da bateria após n instantes de tempo, Q_n , em Ah, é dada pela Equação 3.49.

$$Q_n = Q_{n-1} + \frac{\delta_t [I_{bat}]^k}{3600} \quad (3.49)$$

A Equação 3.49 pode ser entendida como um integrador discreto. Em tempo contínuo, com $\delta_t \rightarrow 0$, pode-se reescrever esta equação tal como apresentado na Equação 3.50.

$$Q(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} [I_{bat}(t)]^k dt \quad (3.50)$$

Esta equação fornece a quantidade de carga (energia) que é retirada da bateria em um determinado intervalo de tempo. Seja a razão entre esta energia e a capacidade original (capacidade máxima) da bateria, o estado de carga é encontrado através da subtração deste valor do estado de carga inicial (100%), tal como apresentado na Equação 3.51, na qual C representa a capacidade original (máxima) da bateria.

$$SOC = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{[I_{bat}(t)]^k}{C_p} dt = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{[I_{bat}(t)]^k}{C} dt \quad (3.51)$$

Em outras palavras, a integral da corrente elétrica ao longo do tempo fornece a quantidade de energia retirada da bateria. A razão entre esta energia e a energia máxima da bateria é um número entre 0 e 1 (0 e 100%) que representa a quantidade de descarga da bateria. O estado de carga é definido como a diferença entre a carga máxima possível da bateria (100%) e quantidade de descarga imposta.

Outro termo bastante utilizado na literatura é o *DoD*, profundidade de descarga da bateria, que é o inverso do *SOC*, estado de carga, conforme Equação 3.52.

$$DoD = 1 - SOC \quad (3.52)$$

A voltagem de circuito aberto (E) é dependente do estado de carga da bateria e do número de células que a compõem, e é calculada através da Equação 3.53, tal como o exposto em Larminie et al. (2003). A Figura 3.17 mostra a variação de E para uma célula típica de bateria do tipo chumbo ácido de acordo com o estado de carga.

$$E = n[2 + 0,15(SOC)] \quad (3.53)$$

A tensão entre os terminais da bateria é determinada utilizando-se a lei de Ohm, tal como apresentado na Equação 3.54, na qual R_{int} denota a resistência interna da bateria, R_{int} é considerada constante em função da capacidade da bateria e é calculada em função da corrente que descarregaria a bateria por completo no decorrer de 10 horas caso fosse aplicada de maneira constante ao longo do tempo (I_{10}), tal como apresentado na Equação 3.55.

$$V = E - RI \quad (3.54)$$

$$R_{int} = n \frac{0,022}{I_{10}} \quad (3.55)$$

Potência Requerida da Bateria

Quando um veículo opera a uma certa velocidade, então uma certa potência P será exigida do ME que por sua vez solicitará potência diretamente da bateria no caso de VEs. Desse ponto de

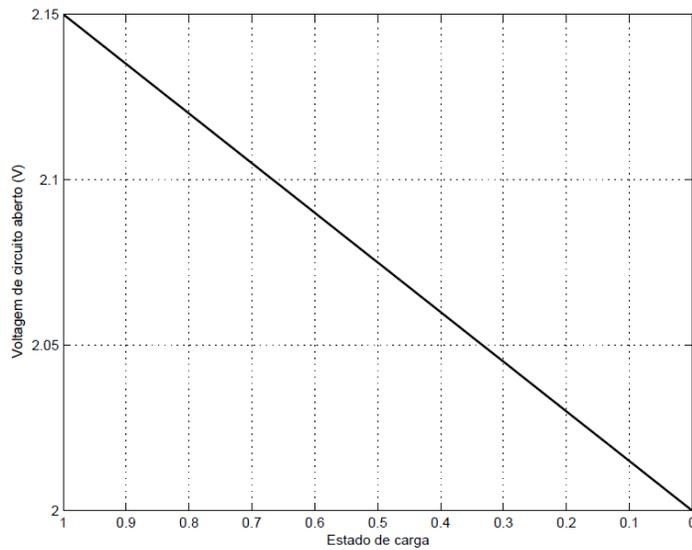


Figura 3.17 - Voltagem de circuito aberto em função do estado de carga para uma célula típica de bateria chumbo ácido.
 Fonte: (REVOREDO, 2007).

vista é interessante simular a operação de uma bateria a uma certa potência que à corrente. Em geral, a potência pode ser dada por:

$$P_b = V_b I \tag{3.56}$$

na qual: $P_b \triangleq$ potência da bateria.

A Equação 3.56 combinada com a Equação 3.54 fornece:

$$P_b = V_b \times I = (E - RI)I = EI - RI^2 \tag{3.57}$$

e isolando I tem-se:

$$I = \frac{(-E + \sqrt{E^2 + 4RP_b})}{2R} \tag{3.58}$$

que representa a corrente solicitada da bateria pelo ME durante a operação do veículo.

4 ESTUDO DE CASO - VEÍCULO HÍBRIDO DE CONFIGURAÇÃO PARALELA

Neste capítulo são apresentadas e definidas as modelagens dos sistemas e subsistemas do VEH paralelo em questão. A modelagem da dinâmica longitudinal é apresentada na Seção 4.1 e na Seção 4.2 é descrito o modelo de simulação utilizado neste trabalho. Na Seção 4.3 e na Seção 4.4 são definidos os modelos dos sistemas propulsores, MCI e ME, respectivamente. A Seção 4.5 aborda a modelagem da bateria, enquanto na Seção 4.6 são discutidas as estratégias de gerenciamento de potência utilizadas no veículo. Por fim, na Seção 4.7 é apresentada a união dos sistemas analisados, através de um fluxograma, para composição do veículo proposto.

4.1 Modelagem da Dinâmica Longitudinal

Para a dinâmica veicular, no estudo de caso abordado, é considerado apenas um grau de liberdade: o longitudinal, desprezando o escorregamento do pneu, e fazendo com que as inércias do sistema de propulsão girem sempre acopladas ao movimento do veículo. O estudo da dinâmica longitudinal de veículos elétricos ou elétrico híbridos, não difere do realizado para veículos convencionais. Os principais subsistemas - considerados neste trabalho - envolvidos no estudo da dinâmica longitudinal para um VEH paralelo são descritos na Figura 4.1. Os sistemas de propulsão consistem no MCI que é conectado à caixa de câmbio e ao diferencial e também dos dois motores elétricos acoplados diretamente às rodas.

A seguir é apresentada a modelagem empregada para cada subsistema da dinâmica longitudinal do VEH paralelo em questão.

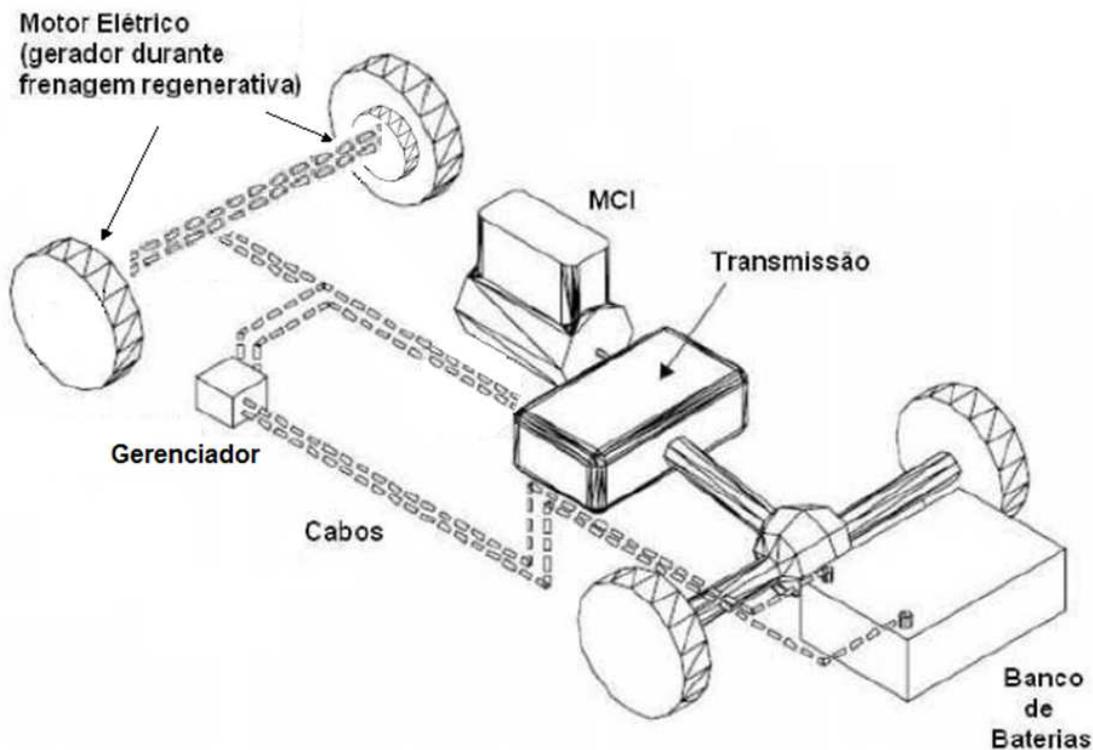


Figura 4.1 - Esquemático do VEH de configuração paralela com os principais subsistemas.

4.1.1 Equacionamento dinâmico

Segundo a metodologia proposta por Gillespie (1992), para um veículo convencional acionado somente pelo motor a combustão, a força de tração necessária é dada pela Equação 3.6. Como os motores elétricos estão acoplados diretamente às rodas traseiras do veículo torna-se necessário o conhecimento da demanda de potência nas rodas e não no motor a combustão para que um correto gerenciamento entre as duas fontes propulsoras seja realizado (ECKERT, 2013).

O torque na roda (T_r) do veículo em função do torque do motor a combustão (T_e) é dado pela Equação 4.1.

$$T_r = T_e N_{tf} \eta_{tf} \quad (4.1)$$

Substituindo a Equação 4.1 na Equação 3.6, obtém-se a Equação 4.2.

$$F_x = \frac{T_r}{r} - ((I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (4.2)$$

A Equação 4.3 descreve o comportamento do veículo em aceleração em uma pista plana.

$$T_r = r \left(R_a + R_r + Ma_x + \frac{((I_e + It)N_{tf}^2 + I_d N f^2 + I_w)a_x}{r^2} \right) \quad (4.3)$$

Pelo fato dos MEs das rodas traseiras não estarem acoplados ao sistema de transmissão, o termo referente à eficiência é desconsiderado no cálculo da força de tração requerida nas rodas, sendo este considerado somente após a divisão da demanda de potência entre o motor a combustão e os motores elétricos, sendo aplicado um fator de eficiência referente a cada motor.

Após o cálculo do torque requerido nas rodas do veículo (T_r), o sistema de gerenciamento toma as decisões de qual sistema utilizar para a propulsão do veículo. A parcela de torque destinada ao motor de combustão interna deve ser dividido pelo fator de eficiência do sistema de transmissão e pela relação de transmissão como mostra a Equação 4.4.

$$T_{MCI} = \frac{T_{r_{MCI}}}{\eta_{tf} N_{tf}} \quad (4.4)$$

onde:

T_{MCI} = Parcela de torque requerido do MCI [Nm];

$T_{r_{MCI}}$ = Parcela de torque requerido do MCI na roda do veículo [Nm].

Já no caso da parcela de torque fornecida pelos MEs nas rodas é obtida dividindo-se o torque requerido na roda pela eficiência dos MEs (η_{ME}) como mostra a Equação 4.5.

$$T_{ME} = \frac{T_{r_{ME}}}{\eta_{ME}} \quad (4.5)$$

onde:

T_{ME} = Parcela de torque requerido dos MEs [Nm];

$T_{r_{ME}}$ = Parcela de torque requerido dos MEs na roda do veículo [Nm].

Os torques requeridos pelo sistema de gerenciamento T_{MCI} e T_{ME} são comparados com os torques disponíveis nas respectivas curvas em função da rotação para cada tipo de motor, no qual o torque disponível nas rodas do veículo (T_d) é a soma dos torques fornecidos pelos MEs e pelo MCI como mostra a Equação 4.6.

$$T_d = T_{d_{MCI}} N_{tf} \eta_{tf} + T_{d_{ME}} \eta_{ME} \quad (4.6)$$

onde:

- Td_{ME} = Torque dado pela curva do ME [Nm];
- Td_{MCI} = Torque dado pela curva do MCI [Nm].

E a aceleração disponível do veículo (a_d) é dada pela Equação 4.7.

$$a_d = \frac{\frac{T_d}{r} - R_a - R_r}{M + \frac{(I_e + I_t)N_{t_f}^2 + I_d N_f^2 + I_w}{r^2}} \quad (4.7)$$

A Tabela 4.1 mostra os valores utilizados de inércia considerando-se um veículo híbrido A, baseado num *Hatch* compacto equipado com motor 1.0 L. Os valores de inércia aqui apresentados foram retirados do manual de um veículo *hatch* 1.0 L.

Tabela 4.1 - Dados veículo A

Componentes	Unidade	Relação de transmissão				
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Inércia rotacional do motor	kgm^2	0,1367				
Inércia rotacional transmissão	kgm^2	0,0017	0,0022	0,0029	0,0039	0,0054
Relação de transmissão	-	4,27	2,35	1,48	1,05	0,8
Inércia rotacional do diferencial	kgm^2	9,22E-04				
Relação de transmissão do diferencial	-	4,87				
Inércia rotacional Rodas + Pneus	kgm^2	2				
Massa do veículo	kg	980				
Pneus	-	175/70 R14				

4.2 Modelo para simulação

Para a simulação das estratégias de gerenciamento de potência foi elaborado um modelo de bancada dinamométrica, baseado em um conjunto de dois rolos que simulam a inércia referente ao deslocamento longitudinal, nos quais são apoiados quatro cilindros que representam as rodas do veículo que estão presas a um chassi com massa similar ao veículo analisado.

Por se tratar apenas de uma simulação referente à dinâmica longitudinal do veículo o sistema de suspensão foi omitido, sendo assim criado o modelo CAD como mostra a Figura 4.2.

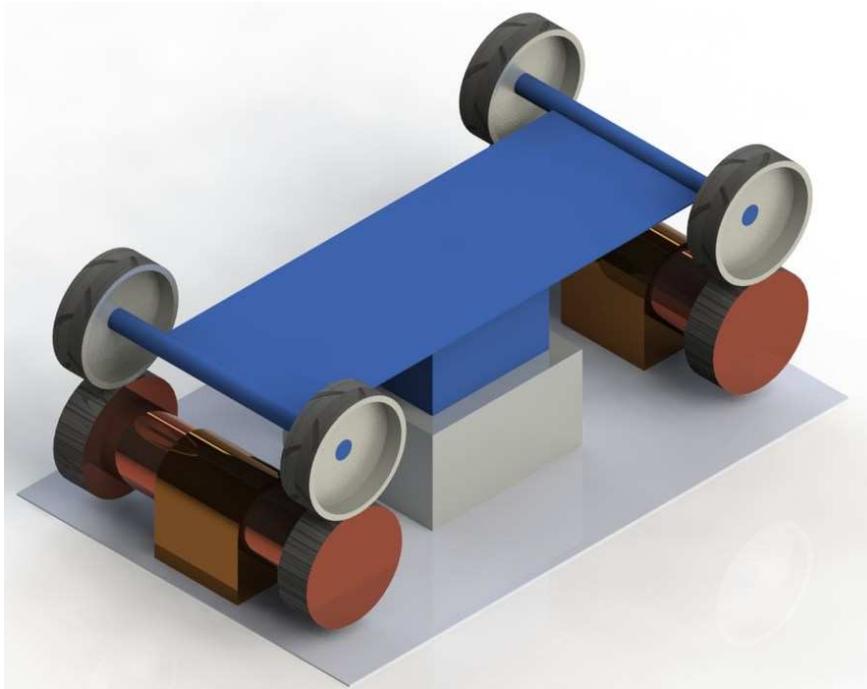


Figura 4.2 - Modelo de bancada para simulação.

4.2.1 Dimensionamento dos rolos da bancada

Para que o modelo funcione de forma adequada, os rolos da bancada devem simular a inércia do deslocamento longitudinal do veículo cujo equacionamento é demonstrado a seguir. A energia cinética proveniente do deslocamento do veículo é dada pela Equação 4.8:

$$T_o = \frac{1}{2} M_v V^2 \quad (4.8)$$

onde:

T_o = Energia cinética de translação [J];

M_v = Massa total de veículo [kg];

Para que o modelo represente o deslocamento do veículo na pista, as massas rotativas devem fornecer a mesma quantidade de energia cinética (Equação 4.8). Entretanto, a energia cinética das massas é proveniente da inércia rotativa das mesmas, sendo calculada pela Equação 4.9.

$$T_m = \frac{1}{2} I_o \omega_c^2 \quad (4.9)$$

onde:

T_m = Energia cinética de rotação [J];

I_o = Momento de inércia do cilindro [kgm^2];

w_c = Velocidade angular do cilindro [rad/s].

O valor da inércia rotativa é dado pela Equação 4.10.

$$I_o = \frac{1}{2}M_c R_c^2 \quad (4.10)$$

onde:

M_c = Massa do cilindro [kg];

R_c = Raio do cilindro [m];

Portanto, para que haja equivalência entre as energias cinéticas, deve-se manter a igualdade entre os termos, conforme Equação 4.11.

$$T_o = T_m \therefore \frac{1}{2}M_v V^2 = \frac{1}{2}I_o w_c^2 \quad (4.11)$$

Simplificando e substituindo o momento de inércia, a igualdade toma a seguinte forma:

$$M_v V^2 = \frac{1}{2}M_c R_c^2 w_c^2 \quad (4.12)$$

A massa do cilindro é o resultado da multiplicação da massa específica do material do cilindro ρ pelo volume do mesmo. Já o volume do cilindro é o resultado da multiplicação da área transversal do cilindro pelo seu respectivo comprimento L (Equação 4.13), no qual a área do cilindro é calculada pela Equação 4.14.

$$M_c = \rho \frac{\pi(R_c^2)}{2} L \quad (4.13)$$

$$A_c = \frac{\pi(R_c^2)}{2} \quad (4.14)$$

Substituindo a Equação 4.13 na Equação 4.12 obtém-se a Equação 4.15, onde a inércia devido à velocidade de translação do veículo torna-se dependente apenas da geometria e da velocidade angular do cilindro.

$$M_v V^2 = 1,57 \rho L R_c^4 w_c^2 \quad (4.15)$$

Através da análise cinemática do veículo tem-se que a velocidade de translação do veículo V possui o mesmo valor da velocidade tangencial da roda no contato pneu pista. Desta forma, no modelo implementado, o pneu irá transmitir movimento para as massas rotativas. A relação entre a velocidade de translação do veículo e a rotação da roda é dada pela Equação 4.16.

$$V = w_p R_p \quad (4.16)$$

onde:

w_p = Velocidade angular da roda [rad/s];

R_p = Raio do pneu [m].

Substituindo a Equação 4.16 na Equação 4.12 tem-se a velocidade angular da roda em função do raio do pneu.

$$M_v (w_p R_p)^2 = 1,57 \rho L R_c^4 w_c^2 \quad (4.17)$$

Entretanto, com o intuito de simplificar o modelo e eliminar a diferença entre o diâmetro dos pneus e o diâmetro das massas rotativas, adaptou-se o modelo no ponto de contato com os pneus para que estas possuam diâmetro similar gerando uma relação de transmissão unitária. Portanto, a velocidade angular w_p pode ser simplificada com w_c resultando na Equação 4.18.

$$M_v R_p^2 = 1,57 \rho L R_c^4 \quad (4.18)$$

O comprimento das massas rotativas é arbitrado, e o raio é dado pela Equação 4.19.

$$R_c = \sqrt[4]{\frac{M_v R_p^2}{1,57 \rho L}} \quad (4.19)$$

Neste trabalho, o veículo abordado trata-se do veículo A de massa 980 kg (considerando o VEH com um passageiro) e Pneu 175/70 R14, conforme mencionado anteriormente, e a distância entre rodas frontais é de 1387 mm .

Desta forma, o diâmetro externo do pneu é dado por:

$$D_p = 2 \times 175 \frac{70}{100} + 25,4 \times 13 = 575,2mm \quad (4.20)$$

Ao comprimento do cilindro atribuiu-se 1 (um) metro, enquanto a massa específica do aço o valor de 7800 kg/m^3 , calculando-se assim o raio da massa rotativa como:

$$R_c = \sqrt[4]{\frac{980 \times 0,2876^2}{1,57 \times 7800 \times 1}} = 0,285m \quad (4.21)$$

Desta forma, sabendo-se a largura dos pneus e o diâmetro externo (Equação 4.20), torna-se possível o dimensionamento dos contatos dos rolos inerciais da bancada, porém, mantendo-se a relação de transmissão unitária, e a inércia do cilindro com o raio acima calculado, conforme mostra a Equação 4.22. Esta inércia resultante é dividida igualmente entre o rolo dianteiro e o rolo traseiro da bancada.

$$I_o = \frac{1}{2}\rho ALR_c^2 = \frac{1}{2} \times 7800 \frac{\pi(2 \times 0,285)^2}{4} \times 1 \times 0,285^2 = 81,1kgm^2 \quad (4.22)$$

Objetivando a simplificação do modelo, considera-se a relação de transmissão unitária, desta forma, a parte de contato do rolo com o pneu deve ter o mesmo diâmetro do pneu, sendo a inércia desta parte de contato do rolo calculado pela Equação 4.23.

$$I_{cp} = \frac{1}{2}\rho ALR_c^2 = \frac{1}{2} \times 7800 \frac{\pi 0,5752^2}{4} \times 0,175 \times 0,2876^2 = 14,67kgm^2 \quad (4.23)$$

A inércia da parte central de cada rolo é calculada dividindo-se a inércia total pelos 2 rolos e reduzindo-se a parte correspondente ao contato com os pneus, como mostra a Equação 4.24.

$$I_{pc} = \frac{I_o}{2} - 2I_{cp} = \frac{81,1}{2} - 2 \times 14,67 = 11,21 \quad (4.24)$$

O comprimento da massa rotativa corresponde a distância entre os pneus esquerdo e direito do veículo, como parte desta distância entre as rodas está preenchida pelos cilindros de contato com os pneus, a largura destes deve ser deduzida de acordo com a Equação 4.25.

$$I_{pc} = L_l - 2L_{cp} = 1387 - 2 \times 175 = 1037mm \quad (4.25)$$

onde:

L_{pc} = Largura da parte central do rolo [mm];

L_{cp} = Largura da parte de contato com o pneu [mm];

L_l = Largura entre as rodas dianteiras do veículo [mm].

Sabendo-se a inércia necessária e a largura da parte central do rolo, calcula-se o diâmetro conforme Equação 4.26.

$$R_{pc} = \sqrt[4]{\frac{I_{pc}}{1,57\rho L_{pc}}} = \sqrt[4]{\frac{11,21}{1,57 \times 7800 \times 1,037}} = 0,173m \quad (4.26)$$

4.2.2 Modelo dinâmico

Após a modelagem da bancada através do programa CAD o modelo foi exportado para o programa de análise dinâmica de multicorpos Adams[®]. Entretanto, o modelo requer uma série de parâmetros de entrada diretamente dependentes da velocidade do veículo, como a velocidade angular das rodas e os parâmetros de entrada referentes às curvas do motor a combustão.

Para facilitar o manuseio do modelo foi utilizada a interface entre o Adams[®] e o Simulink Matlab[®], exportando-se um bloco que contém os parâmetros de entrada e saída do modelo dinâmico do Adams. Este bloco, por sua vez, é adicionado a um arquivo Simulink[®] no qual são fornecidos os dados de entrada e lidas as saídas presentes no bloco, que se utiliza do *solver* presente no Adams[®]. Os modelos estão descritos mais detalhadamente nos próximos subitens.

4.2.3 Modelo ADAMS

No modelo desenvolvido no Adams[®] foram criadas juntas de revolução de forma a permitir o movimento das rodas e das massas rotativas, cujo movimento é proveniente dos torques aplicados às rodas. O chassi do veículo encontra-se conectado à base por meio de uma junta que permite somente o movimento vertical, portanto as rodas apoiam-se nas massas rotativas devido à ação da gravidade.

Também foi criada uma junta que acopla o movimento de rotação dos dois rolos de forma a simular um acoplamento por correia, no qual a rotação de ambos os rolos é semelhante, para simular o deslocamento do veículo em linha reta. No entanto, os torques aplicados nas rodas dianteiras e

traseiras são diferentes, sendo esta junta responsável pela transmissão de forças entre os rolos.

A transmissão de movimento entre as rodas e as massas rotativas é dada por um modelo de contato criado entre os componentes. Enquanto as forças de resistência ao movimento são representadas em forma de torques no sentido inverso ao movimento aplicado às massas rotativas.

Inicialmente foi utilizado um modelo de contato entre as rodas e os rolos, visando avaliar o escorregamento do pneu do carro em relação ao rolo da bancada, entretanto, este modelo demanda um amplo tempo de simulação.

Como alternativa optou-se por utilizar juntas semelhantes à utilizada para sincronizar o movimento dos dois rolos, cujos resultados obtidos por este modelo são semelhantes ao modelo anterior, porém com um tempo de processamento computacional muito menor, entretanto a capacidade de avaliação do escorregamento no contato foi removida do modelo.

4.2.4 Interface Simulink

Para facilitar a inserção dos dados de entrada no modelo Adams foi utilizada uma conexão Adams/Simulink Matlab, possibilitando assim, uma estimativa dos valores de torque a serem aplicados às rodas, assim como os torques resistivos aplicados às massas rotativas, que são fornecidos para que o modelo Adams possa realizar a simulação da dinâmica do veículo. Desta forma, o Adams utiliza os dados provenientes do Simulink como entrada para que a simulação do modelo ocorra, e como resultado dessa simulação tem-se a velocidade angular das rodas, cujo resultado é enviado ao Simulink na forma de um bloco como mostrado na Figura 4.3.

Na parte da esquerda da Figura 4.3 está representado o bloco gerado pelo Adams, na parte da direita está demonstrado o conteúdo do bloco Adams com os 3 torques de entrada, e a velocidade angular da roda como variável de saída.

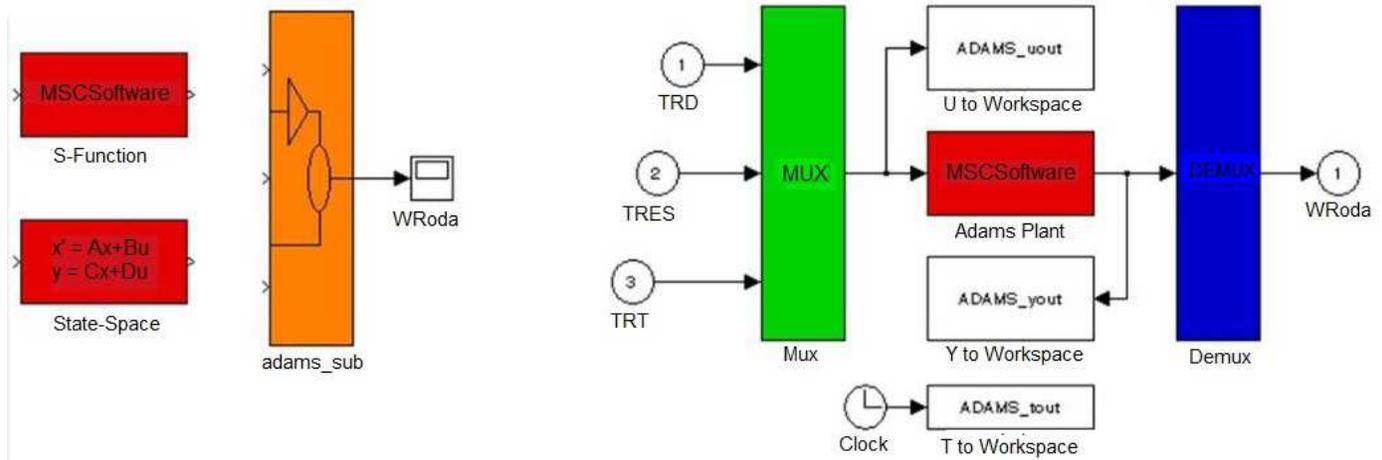


Figura 4.3 - Bloco gerado pelo Adams

4.2.5 Modelo de simulação dinâmica

O parâmetro de saída do modelo Adams é a velocidade angular da roda, desta forma, é possível determinar a velocidade de deslocamento do veículo. O objetivo da simulação consiste em estimar a potência requerida para que o veículo consiga cumprir o perfil de velocidades imposto por ciclos de padrões de velocidades.

Aceleração requerida

O comportamento do motorista é representado pelo cálculo da aceleração requerida de forma que o veículo alcance a velocidade do ciclo padrão em um determinado instante. O modelo Simulink utiliza passos variáveis de simulação, enquanto, a conexão do Simulink com o Adams® é realizada com passos fixos, devido ao intervalo de comunicação entre os dois programas.

Desta forma, a aceleração é calculada pela diferença entre a velocidade requerida e a velocidade atual dividindo-se o resultado pelo intervalo de tempo fixo (Δt) como mostra a Equação 4.27. O intervalo de tempo para o cálculo da aceleração requerida é fixo pelo fato que se for considerado um intervalo de tempo variável pode-se obter intervalos de tempos muito pequenos, dos quais irá resultar em valores de aceleração muito grande, dificultando a realização da simulação.

$$a_r = \frac{v_r - v_a}{\Delta_t} \quad (4.27)$$

onde:

a_r = Aceleração requerida [m/s^2];

v_r = Velocidade requerida [m/s];

v_a = Velocidade atual [m/s];

Δ_t = Intervalo de tempo para cálculo da aceleração. [s].

Sistema de redução

Em função da velocidade do veículo é possível identificar a relação de transmissão utilizada de acordo com os valores de velocidade recomendados pelo fabricante para troca de marchas (Tabela 4.2). Deste modo, tanto a rotação do motor, como a inércia do sistema de transmissão são definidas conforme a marcha da caixa redutora, tais valores são utilizados nos procedimentos descritos a seguir.

Tabela 4.2 - Troca de marchas conforme fabricante

Marcha	Velocidade
1 ^a	0 - 15 km/h
2 ^a	15 - 30 km/h
3 ^a	30 - 50 km/h
4 ^a	50 - 72 km/h
5 ^a	72 km/h - ...

Cálculo da potência requerida e forças de resistência

O cálculo das forças de arrasto aerodinâmico e resistência ao rolamento, assim como o torque requerido para que o veículo atinja a velocidade do ciclo imposto é realizado conforme Gillespie (1992) apresentada na Seção 3.2. As forças referentes à inclinação da pista são desconsideradas devido aos ciclos padrão serem baseados em terrenos planos, ou simplesmente por não haver informação sobre a inclinação da pista durante o ciclo. Outras forças como as causadas por acoplamento de reboques ao veículo também são desconsideradas nestas simulações.

Caso o torque requerido se torne negativo caracteriza que o veículo está acima da velocidade do ciclo, o que leva a uma condição de frenagem. Porém, se o torque requerido for positivo é caracterizada a aceleração do veículo ou manutenção da velocidade quando a força de tração nas rodas se equivale com as resistências ao movimento.

As forças de resistência somadas são transformadas em torque multiplicando-as pelo raio da massa rotativa da bancada, que corresponde ao raio do pneu do veículo para que seja mantida uma relação de transmissão unitária, cujo torque é uma variável de entrada no modelo Adams sendo aplicado nas massas rotativas de modo a restringir o movimento das rodas do veículo.

Consumo de combustível

O consumo de combustível é estimado através de um mapa de consumo específico, onde o consumo é estimado em função do torque e da rotação do motor.

Em cada instante de simulação (δ_t), para cada valor de rotação e torque do MCI tem-se um determinado consumo específico (g/kWh) que é utilizado, juntamente com a potência do MCI, para o cálculo da massa do combustível. Desta forma, por meio da densidade da gasolina (799 kg/m^3) é calculado o volume de combustível instantâneo. E finalmente, para se obter a estimativa final do combustível consumido considera-se o volume instantâneo e o valor acumulado.

4.3 Modelagem do Motor a Combustão

O motor de tração em um veículo é o sistema responsável pela geração de potência que através do sistema de transmissão originará as forças propulsoras nas rodas motoras. Para veículos convencionais é comum encontrar na literatura a caracterização de MCIs por meio de curvas de torque ou potência versus velocidade de rotação como exposto por Rizoulis et al. (2000).

Devido à alta complexidade de operação de um MCI envolvendo o controle da borboleta (*throttle*), por exemplo, optou-se pela utilização de um mapa tridimensional da posição da borboleta versus velocidade de rotação versus torque.

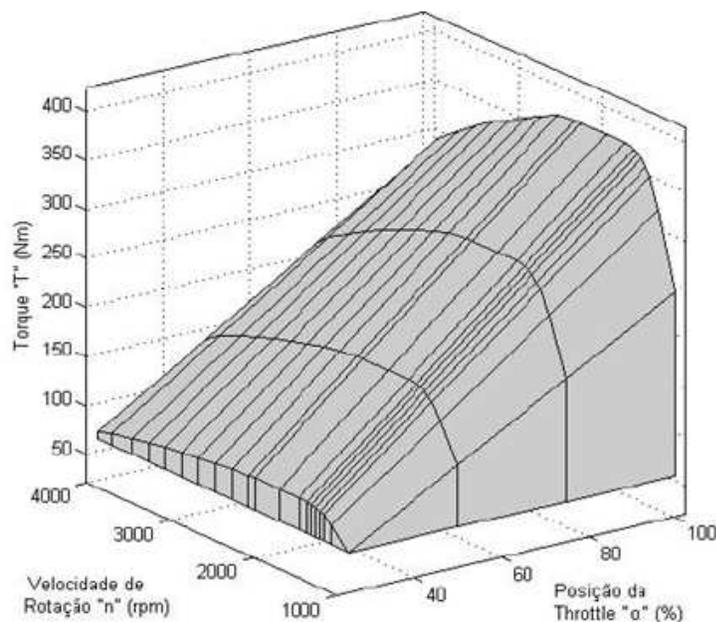


Figura 4.4 - Superfície de torque de um MCI em função da velocidade de rotação e da posição da borboleta
Fonte: (LOPES, 2008).

Com base em uma curva de rotação x torque para 100% borboleta, que foi obtida através de dados do fabricante do veículo 1.0 L, estimou-se as demais curvas em relação à variação da abertura da borboleta. A Figura 4.4 representa o mapeamento efetuado no MCI em questão, porém a velocidade de rotação do MCI variou-se de 1000 a 6400 rpm em intervalos de aproximadamente 200 rpm e com a posição da borboleta para uma abertura de 0 a 100 % em intervalos de 10 %. Assim, para cada posição fixa de abertura da borboleta varrem-se todas as velocidades de rotação

para as quais são obtidos o torque, a potência e o consumo, por exemplo, correspondentes. Esses mapas são muito úteis na verificação da região de operação do MCI de maior desempenho em VEHs evitando situações de operação transitória responsáveis pelas más condições de emissão e baixa economia de combustível presente nos veículos convencionais.

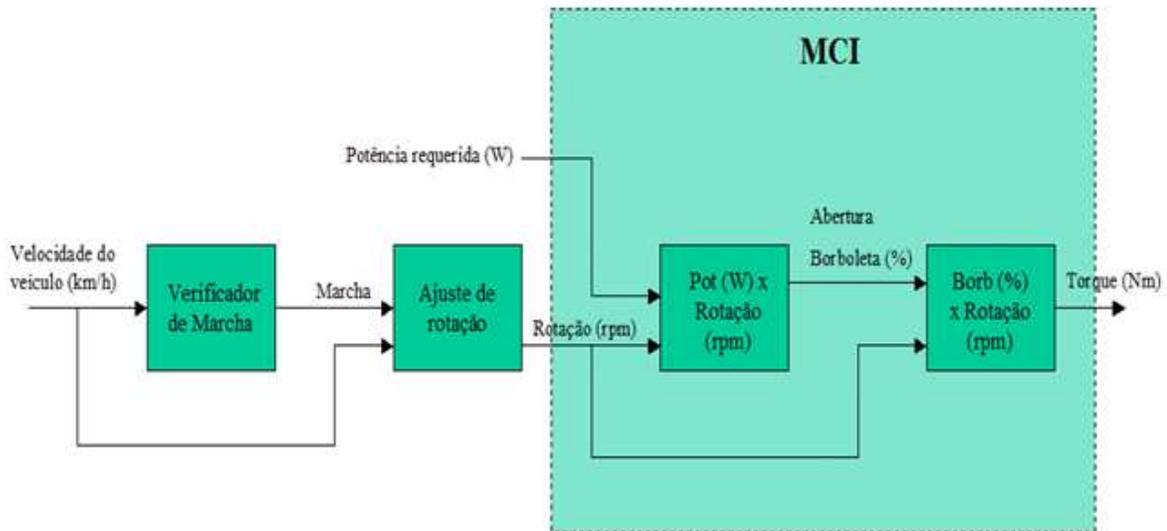


Figura 4.5 - Representação em diagrama de blocos do MCI.

Na Figura 4.5 tem-se a representação em diagramas de blocos para o MCI, onde a entrada P_{MCI} corresponde à solicitação de potência requerida ao MCI pela EGP adotada, e a rotação do MCI é calculada através da velocidade do veículo em relação à relação de transmissão correspondente. Desse modo, o bloco Pot (Watt) x rotação (rpm) determina para cada valor de entrada de potência requerida do MCI e rotação do MCI, o valor da posição da borboleta que por sua vez é a entrada do bloco Borb (%) x rotação (rpm) que resulta na saída do torque do MCI, referente à potência solicitada.

4.4 Modelagem do Motor Elétrico

O ME foi modelado de acordo com as equações dinâmicas, para uma máquina elétrica CC com campo independente. Neste contexto, são desconsiderados os transitórios elétricos uma vez

que são muito mais rápidos que os transitórios mecânicos e a análise deste trabalho se faz no âmbito deste último. Assim, as equações elétricas serão consideradas em situação de regime.

Através da Equação 4.28, que representa a relação direta entre a corrente de armadura e o torque elétrico desenvolvido pelo rotor, e da união desta com as Equação 4.29 e Equação 4.30 é possível construir um diagrama em blocos equivalente para a modelagem do ME como o representado pela Figura 4.6.

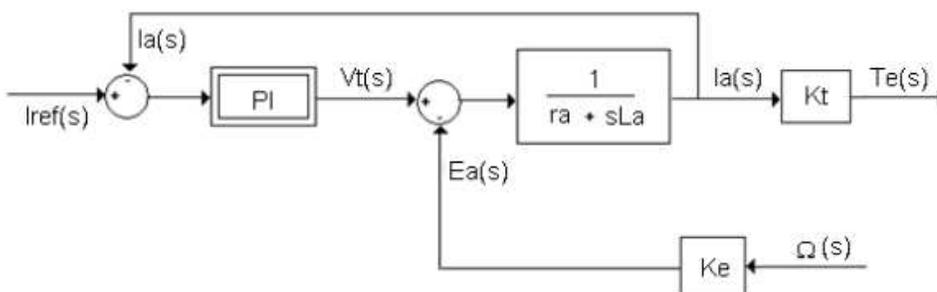


Figura 4.6 - Diagrama em blocos das equações elétricas e dinâmicas para um motor C.C. com campo independente.

$$T_{el} = K_T I_a \quad (4.28)$$

$$I_a(s) = \frac{(V_t(s) - E_a(s))}{(r_a + sL_a)} \quad (4.29)$$

$$\omega(s) = \frac{(T_{el}(s) - T_{carga}(s))}{(D + sJ)} \quad (4.30)$$

Baseado no estudo realizado por Waltermann (1996), e conforme indicado na Figura 4.6, utiliza-se um controlador proporcional e integral (PI) para a geração do valor da tensão do circuito de armadura $V_t(s)$ da Equação 4.29. A entrada deste controlador é o erro obtido da diferença entre o valor atual da corrente de armadura ($I_a(s)$) e o seu valor de referência ($I_{ref}(s)$) desejado. A corrente $I_{ref}(s)$ é entendida como a demanda direta da corrente de armadura necessária para que o motor de tração seja capaz de atender a demanda de potência exigida pelo motorista. Este controlador torna-se necessário no ponto mais conveniente de operação da máquina, ou seja, quando $I_a(s)$ é igual a $I_{ref}(s)$. Nesta situação, a componente integrativa do controlador faz-se necessária para que o ME tenha erro nulo de corrente em situações de regime, ou seja, quando $V_t(s)$ for constante.

$$\omega = \frac{V_{el} N \eta}{r} \quad (4.31)$$

O torque T_{ME} , produzido pelo ME é, então, utilizado no cálculo da aceleração longitudinal e conseqüentemente da velocidade do veículo. A velocidade do veículo e a velocidade de rotação do motor de tração são relacionadas pela Equação 4.31 Na qual: $V_{vel} \triangleq$ velocidade longitudinal do veículo. Dessa forma, obtém-se ω para o cálculo da fcm do circuito de armadura.

O ME de tração é capaz de atuar como gerador durante a frenagem do veículo. Neste contexto, toda ou uma parcela limitada à máxima potência de recarga da bateria, por instante de tempo, será utilizada para recarregar o banco de baterias. No modelo utilizado para o ME, não foi considerado valor limite máximo para a corrente de armadura, significando que o ME conseguirá disponibilizar qualquer sinal de torque de aceleração ou frenagem, sendo esta limitação realizada pela EGP. Outra característica deste modelo está na desconsideração de coeficientes de perda (ou fuga) pelo ferro e/ou cobre, por exemplo. Ou seja, o modelo proposto apresenta 100% de eficiência para a máquina elétrica operando como motor e como regenerador.

As constantes utilizadas para o equacionamento da modelagem do ME são:

$$K_T = K_e = 1,98 \text{ V s/rad}$$

$$r_a = 0,082 \text{ Ohm}$$

$$L_a = 0,2 \text{ mH}$$

4.4.1 Diferencial

O diferencial é o elemento que possibilita ao veículo fazer uma curva sem que as rodas motoras escorreguem, pois as velocidades das rodas nessa condição são diferentes, com a roda motora externa girando a uma velocidade maior que a roda motora interna. Como a dinâmica veicular de interesse é apenas a longitudinal, não será considerada qualquer diferença de rotação entre as rodas motoras esquerda e direita. Essas considerações tornam a modelagem do diferencial bastante simplificada sendo suficiente modelá-lo em termos do fator de redução, N , e do fator de eficiência, η , ambos adimensionais.

4.4.2 Ciclo de Condução

Um ciclo de condução representa a maneira como o veículo é conduzido durante uma viagem e as características da estrada. No caso mais simples, o ciclo de condução é definido como uma sequência de velocidades do veículo (e, portanto a acelerações) e grau de inclinações da estrada (CORRÊA F.C.; SILVA, 2011).

O motorista é o fator governante do conjunto, ele determina o percurso gerando uma série de diferentes tipos de situações envolvendo pavimentação, topologia e carregamento, sendo o responsável pela maneira como o veículo é conduzido. Como cada usuário possui um comportamento diferente durante um mesmo trajeto foram criados os ciclos padrão de condução.

Estes ciclos de condução são projetados para representar as condições de condução urbana e extra urbana, e reproduzir medidas de velocidade do veículo em estradas reais (SERRAO et al., 2011).

Os ciclos são definidos através da gravação das condições de operação de veículos devidamente instrumentados em situações reais de uso. Os dados coletados são analisados para avaliação dos níveis de solicitação, criando ciclos representativos em função da velocidade e aceleração do veículo.

No modelo proposto, são desconsideradas irregularidades de pavimento e também a inclinação. O ciclo de condução é a entrada principal do modelo completo de VEH Paralelo fornecendo, em cada instante de tempo da simulação, o valor de velocidade desejado que o veículo deve apresentar.

Dois ciclos de condução serão analisados, no qual o primeiro é o ciclo urbano brasileiro NBR6601 e o segundo ciclo é o ciclo rodoviário brasileiro, NBR7024. Estes dois ciclos são apropriados para o estudo do VEH Paralelo em questão, uma vez que retratam o perfil de velocidade adequado para um VEH.

Na Figura 4.7 (A) e (B) estão os perfis de velocidade por tempo que representam os ciclos NBR6601 e NBR7024 sem repetições.

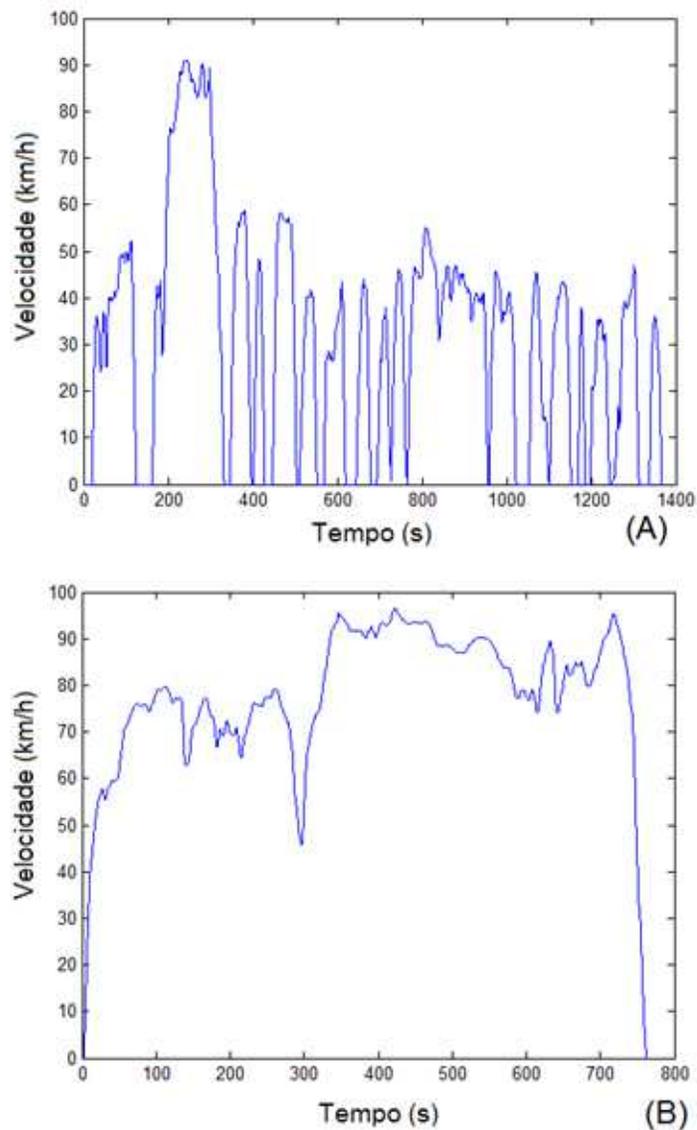


Figura 4.7 - Perfis de velocidade por tempo dos ciclos NBR6601 (A) e NBR7024 (B).

4.4.3 Sistemas de freios

Segundo Gillespie (1992), na modelagem completa de um sistema de freios há 27 fatores independentes que influem no torque produzido. Devido a essa complexidade, considera-se que o sistema de freios atuará como função direta da posição do pedal de freio, no qual corresponde ao torque requerido proveniente do equacionamento da dinâmica longitudinal.

4.5 Modelagem da Bateria

A bateria utilizada como uma das fontes de energia para o VEH Paralelo é do tipo ácido e chumbo e a modelagem foi construída, por conveniência em linha de código. As entradas do modelo da bateria são a demanda de potência (P_b) da EGP, a profundidade de descarga (DoD) e a carga total removida (CR_n). É importante ressaltar que as entradas DoD e CR_n são realimentadas ao próprio modelo da bateria a fim de controlar o nível de carga e descarga de energia em cada instante da simulação. A principal saída do presente modelo é a potência disponibilizada pela bateria (P_{ot}) ao sistema de tração. Na Figura 4.8 estão ilustradas as entradas e saídas do modelo de bateria proposto.

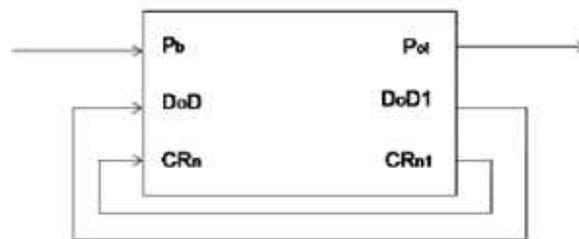


Figura 4.8 - Entradas e Saídas do modelo da bateria proposto.

Para o devido cumprimento da solicitação de potência da bateria no veículo em questão, optou-se por um banco composto por duas baterias, em que cada uma apresenta:

Número de células, $N_{ocells} = 10$

Capacidade = 32 Ah

Coefficiente de Peukert, $k = 1,2$

4.6 Estratégias de gerenciamento de potência

Estratégias de gerenciamento de potência, para VEHs, geralmente têm como alvo objetivos simultâneos, dentre os principais estão a minimização do consumo de combustível e emissões do

veículo, sem o comprometimento de desempenho do mesmo. O cumprimento de tais objetivos está diretamente ligado ao tipo de EGP adotada e à configuração do trem de potência do veículo (LOPES, 2008).

Em qualquer instante de tempo e para qualquer velocidade do veículo, a EGP deve determinar a distribuição de potência entre as fontes de energia. Apesar da topologia do veículo, o objetivo primário de qualquer estratégia de controle é satisfazer a demanda de potência imposta pelo motorista através do gerenciamento do fluxo de potência entre todos os sistemas (LOPES, 2008).

Das três categorias de EGPs mais difundidas na literatura, as fundamentadas em regras e em sistemas *fuzzy* são as de interesse para o estudo realizado neste trabalho. De forma geral, a EGP – atendendo a solicitação de potência do veículo – deve ser capaz de gerenciar a potência solicitada às fontes e, simultaneamente, mantendo-as em seus pontos otimizados de operação.

Nesta seção, são analisadas duas diferentes EGPs, na qual uma é baseada em regras, e a segunda é fundamentada em sistemas *fuzzy*. Para estas duas estratégias considera-se que tanto o MCI como o ME podem fornecer a potência requerida.

4.6.1 EGP com Regeneração Baseada em Regras

Essa EGP foi obtida a partir da apresentada por Revoredo (2007), e por Lopes (2008). Nesta, assim como nas estratégias que seguem, a potência de demanda, correspondente à solicitação de potência do motorista ao veículo, será chamada de P_{dem} , a solicitada ao MCI de P_{MCI} , a solicitada ao ME de P_{ME} e a solicitada ao banco de baterias de P_b . As regras da EGP são também determinadas em função do DoD da bateria, dessa forma DoD, P_{dem} e também o torque requerido (T_{req}) são identificadas como as entradas e P_{MCI} , P_{ME} , P_b e T_{fre} (torque do freio) como as saídas da EGP.

A EGP baseada em regras foi desenvolvida admitindo-se dois tipos de análise. A primeira foi realizada considerando-se o ME como a principal fonte de propulsão do VEH e o MCI a fonte secundária. Já a segunda análise corresponde ao MCI atuando como fonte principal de propulsão e o ME como a fonte secundária. Em todas as EGPs desenvolvidas os limites de carga e descarga são 0,45 e 0,4, respectivamente, com o objetivo de prolongar a vida útil da bateria chumbo-ácida utilizada neste trabalho, conforme citado por Lin et al. (2003). Contudo, aumentando-se a faixa limite

de carga e descarga da bateria, o número de ciclos irá decair. As EGPs desenvolvidas baseadas em regras são descritas a seguir.

EGP baseada em Regras com o ME atuando como principal fonte propulsora

Nesta EGP, o ME opera fornecendo o valor de potência solicitada (P_{dem}) e atua em sua capacidade máxima quando necessário (P_{MEmax}), até que o limite máximo do DoD (DoD_{max}) seja alcançado. Logo, quando o limite máximo do DoD é alcançado o ME atua como gerador, recarregando o banco de baterias.

Quando P_{dem} ultrapassa o valor de P_{MEmax} e o valor de DoD encontra-se no limite máximo (DoD_{max}), o MCI é a fonte responsável pelo fornecimento da potência excedente. O MCI também atuará sozinho quando a P_{dem} for maior que P_{MEmax} e menor que 35 kW, caracterizando uma região de boa eficiência para a operação do MCI. No entanto, se o valor de DoD encontra-se abaixo do limite máximo (DoD_{max}), o MCI atuará juntamente com o ME fornecendo a P_{dem} ao VEH (Figura 4.9).

Contudo, se o valor de P_{dem} for negativo (Figura 4.10) denota-se que o valor do Torque Requerido (T_{req}) seja negativo, o que indica uma desaceleração do veículo. Durante a frenagem, quando o ME atua como gerador transformando energia cinética em elétrica, é possível armazenar essa energia, ou potência, desde que a bateria encontre-se acima do limite máximo ótimo (DoD_{max}). Esta EGP atua de tal forma durante a frenagem:

- Se o valor de P_{dem} for menor que o valor da potência máxima de carga (P_{bcarga}), os freios auxiliarão no fornecimento do torque de desaceleração, além do ME operando como gerador;
- Se o valor de P_{dem} for maior que o valor da potência máxima de carga (P_{bcarga}) o ME, operando como gerador, será o único responsável pela frenagem, no qual a P_{ME} será igual a P_{dem} , e conseqüentemente irá ocorrer o processo de carga do banco de baterias.

Desta forma, o valor de potência que o banco de baterias pode absorver no processo de recarga é limitado pelo valor da potência máxima de carga (P_{bcarga}) que pode ser absorvido por instante de tempo de simulação sendo que a quantidade excedente deve ser descartada, neste trabalho o valor

utilizado de P_{bcarga} é kW.

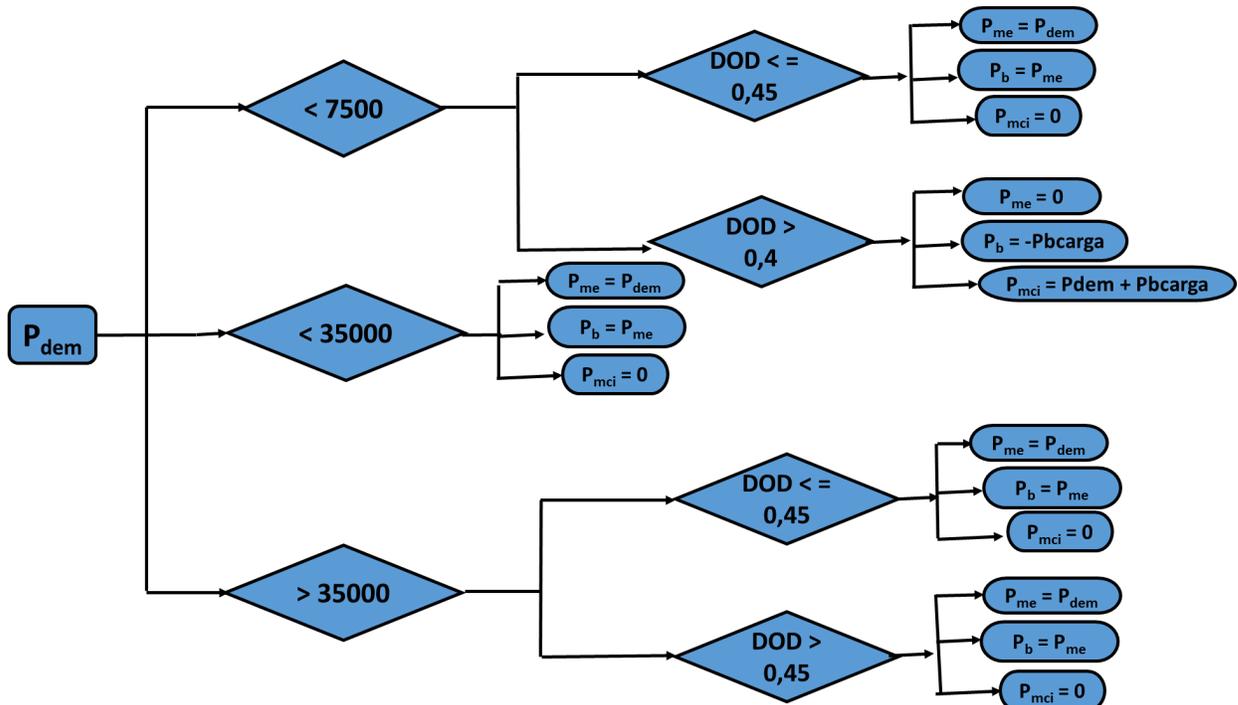


Figura 4.9 - Fluxograma do algoritmo da EGP baseada em regras e ME atuando como principal propulsora quando a potência requerida é positiva.

EGP baseada em Regras com o MCI atuando como principal fonte propulsora

Nesta EGP, o MCI assume a atribuição de ser a principal fonte propulsora do veículo, e o ME é utilizado como fonte auxiliar. A conjuntura relevante dessa EGP parte da ideia de limitação da abertura da borboleta, na qual a abertura da borboleta estando limitado em um determinado valor, o MCI responderá com uma potência correspondente à abertura da borboleta (%) e, se necessário, o ME será acionado para fornecer a quantidade de potência restante.

Através da Figura 4.11 pode-se observar o algoritmo utilizado nesta EGP quando a P_{dem} é positiva, sendo que a variável Flag terá o valor igual a 1, toda vez que a abertura da borboleta estiver limitada por um determinado valor. Neste caso, o ME é acionado fornecendo potência ao sistema de tração, porém até o seu valor limite e também sempre levando em consideração o valor

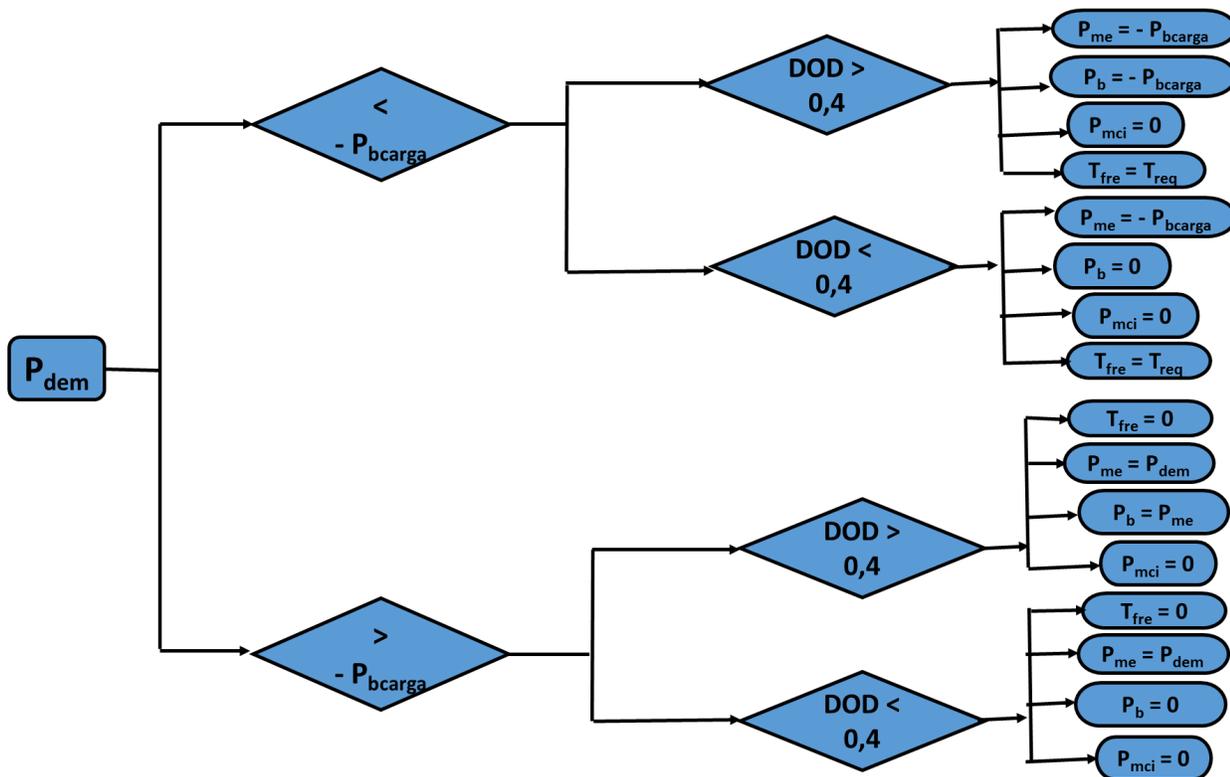


Figura 4.10 - Fluxograma do algoritmo da EGP baseada em regras e ME atuando como principal propulsora quando a potência requerida é negativa.

do *DoD*. Já se o Flag tiver valor igual a 0, significa que a porcentagem de abertura da borboleta não está acima do valor limite, sendo que neste caso, o MCI fornecerá toda a potência necessária ao sistema de tração.

Em frenagens, o comportamento decorrente dessa EGP será a mesma que a EGP anterior (quando o ME é a principal fonte propulsora), no qual se a potência de frenagem for maior do que a potência que o motor, funcionando como gerador pode fornecer, então o sistema de freio é utilizado.

4.6.2 EGP com Regeneração Baseada em *Fuzzy*

Sistemas fuzzy são conhecidos por aproximarem a decisão computacional da decisão humana, permitindo a operação de dispositivos através de decisões tais como “próximo de”, “em torno de”, “muito alto” ou “muito baixo”. Esses sistemas, por serem baseados em regras linguís-

ticas, são recomendados para a solução de problemas que possam ser descritos qualitativamente. Outra vantagem de sua utilização está na independência da modelagem matemática e na capacidade de aproximação de modelos complexos não lineares sem a necessidade do uso de *softwares* sofisticados e de alto custo.

Os sistemas fuzzy apresentam-se bastante apropriados para o controle de VEHs. Essa seção discute as bases de implementação de sistemas fuzzy no gerenciamento de potência para o veículo elétrico híbrido em questão.

A EGP fundamentada em sistemas fuzzy foi utilizada no controle da potência fornecida pelos sistemas de propulsão, com base na potência de demanda e na profundidade de descarga do banco de baterias.

Segundo Pedrycz e Gomide (1998) o diagrama esquemático de um controlador *fuzzy* pode ser representado como na Figura 4.12.

A descrição dos blocos que compõem o diagrama da Figura 4.12 é dada a seguir:

- Interface de Fuzzificação: obtém os valores das variáveis de entrada, faz um escalonamento para condicionar os universos de discurso, transformando números em conjuntos *fuzzy*.
- Base de Conhecimento: consiste de uma base de regras, caracterizando a estratégia de

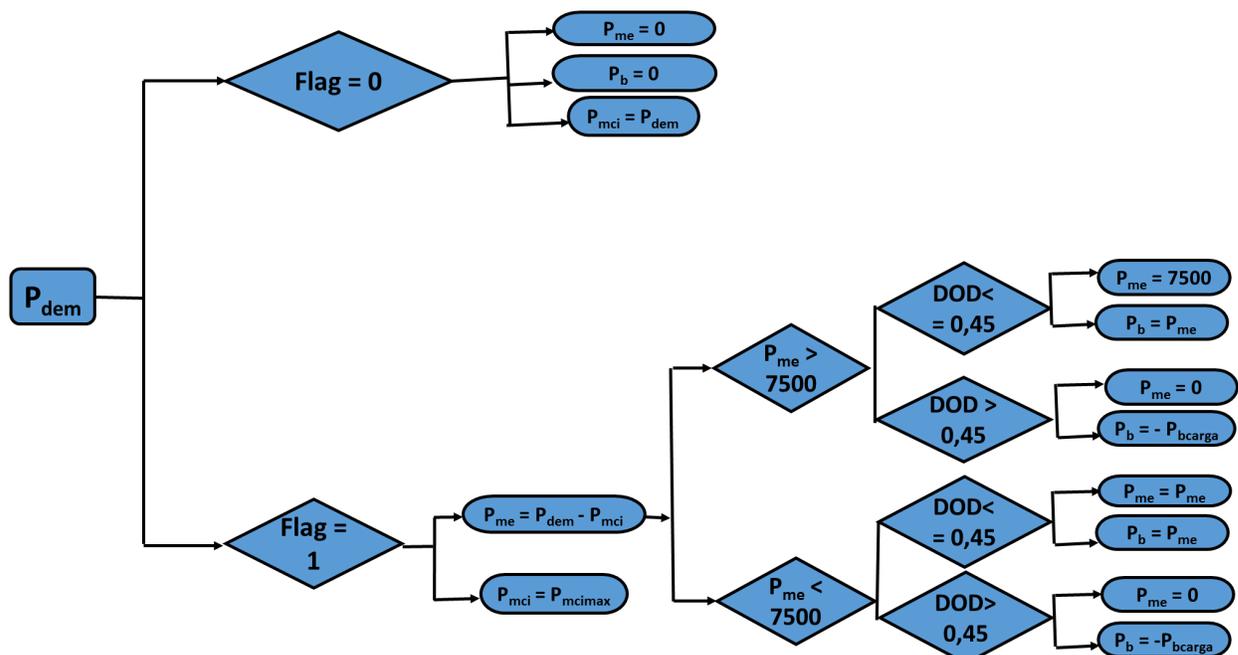


Figura 4.11 - Fluxograma do algoritmo da EGP baseada em regras e Mci atuando como principal propulsora quando a potência requerida é positiva.

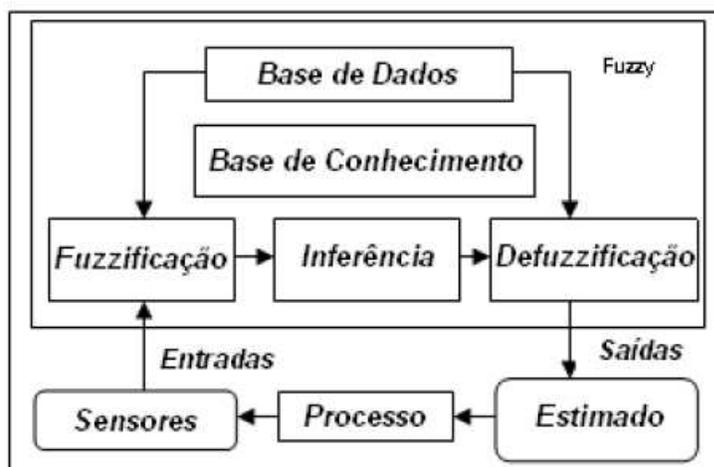


Figura 4.12 - Representação esquemática de um controlador *fuzzy*.

estimação e suas metas.

- Base de Dados: armazenam as definições necessárias sobre discretização, definição de funções de pertinência e etc.
- Procedimento de Inferência: processa os dados *fuzzy* de entrada, juntamente com as regras, de modo a inferir as ações de saída *fuzzy*.
- Interface de Defuzzificação: Transforma as ações de saída *fuzzy* inferidas em ações/respostas não *fuzzy*. Em seguida, efetua um escalonamento de modo a compatibilizar os valores normalizados vindos do passo anterior com os valores reais dos universos de discurso das variáveis.

Como mencionado, os sistemas *fuzzy* permitem a manipulação de informações inexatas como também a modelagem de processos descritos qualitativamente. Estas informações compõem uma família de conjuntos *fuzzy* que representam as entradas e saídas do controle através de variáveis linguísticas. Em geral, as principais características das variáveis linguísticas são:

- Nome da variável linguística;
- Os nomes dos termos linguísticos associados à variável: conjunto de termos;
- O domínio no qual cada variável linguística é definido: universo de discurso;
- Conjuntos *fuzzy* que representam cada valor pertencente aos conjuntos de termos da variável linguística: função de pertinência.

Para o ajuste das funções de pertinência - quanto à quantidade de funções utilizadas assim como os intervalos para os quais foram definidas nos seus respectivos universos de discurso - foram realizados testes preliminares. O objetivo destes testes teve como alvo a redução do consumo de

combustível face as estratégias baseadas em regras. Nesse contexto, as variáveis linguísticas, que representam os conjuntos *fuzzy* das entradas para a EGP em questão foram determinadas como segue:

- Potência de demanda (P_{dem}): esta variável de entrada foi especificada no universo de discurso entre 20000 e 60000 W, com conjunto de termos NM (médio negativo), NB (baixo negativo), Z (zero), B (baixo), M (médio) e A (alto) representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Figura 4.13a. Os limites do universo de discurso para esta variável foram obtidos com base nos valores máximo e mínimo assumidos pela demanda de potência do veículo em operação no ciclo NBR6601.
- Profundidade de descarga do banco de baterias (DoD): foi especificada no universo de discurso entre 0 e 1, com conjunto de termos BB (bem baixo), B (baixo), M (médio) e A (alto) representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Figura 4.13b. Os limites definidos para o universo de discurso são os mesmos para os quais DoD é definido no modelo da bateria.
- Solicitação de frenagem (T_{req}): esta variável foi especificada no universo de discurso entre -5000 e 0 , com conjuntos de termos representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Figura 4.13c. O limite do universo de discurso definido, neste caso, é o limite de frenagem requerida pelo VEH, no entanto, extrapolou-se um pouco dos valores limites originais para que o sistema tivesse uma margem de segurança.

Já as variáveis linguísticas, que representam os conjuntos *fuzzy* das saídas para a EGP baseada em *fuzzy* são:

- Potência do motor elétrico (P_{me}): esta variável de saída foi especificada no universo de discurso entre 8000 e 7500 W, com conjunto de termos CN (constante negativo), N (negativo), Z (zero), P (positivo) e CP (constante positivo) representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Figura 4.14a. Igualmente às demais variáveis, os limites do universo de discurso para esta variável foram obtidos com base nos valores máximo e mínimo que o motor elétrico pode assumir durante sua operação.
- Potência do motor a combustão (P_{mci}): foi especificada no universo de discurso entre 0 e 55000W, sendo o limite de operação do MCI, com conjunto de termos Z (zero), B (baixo), BM (baixo médio), M (médio) e A (alto) representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Figura 4.14b.

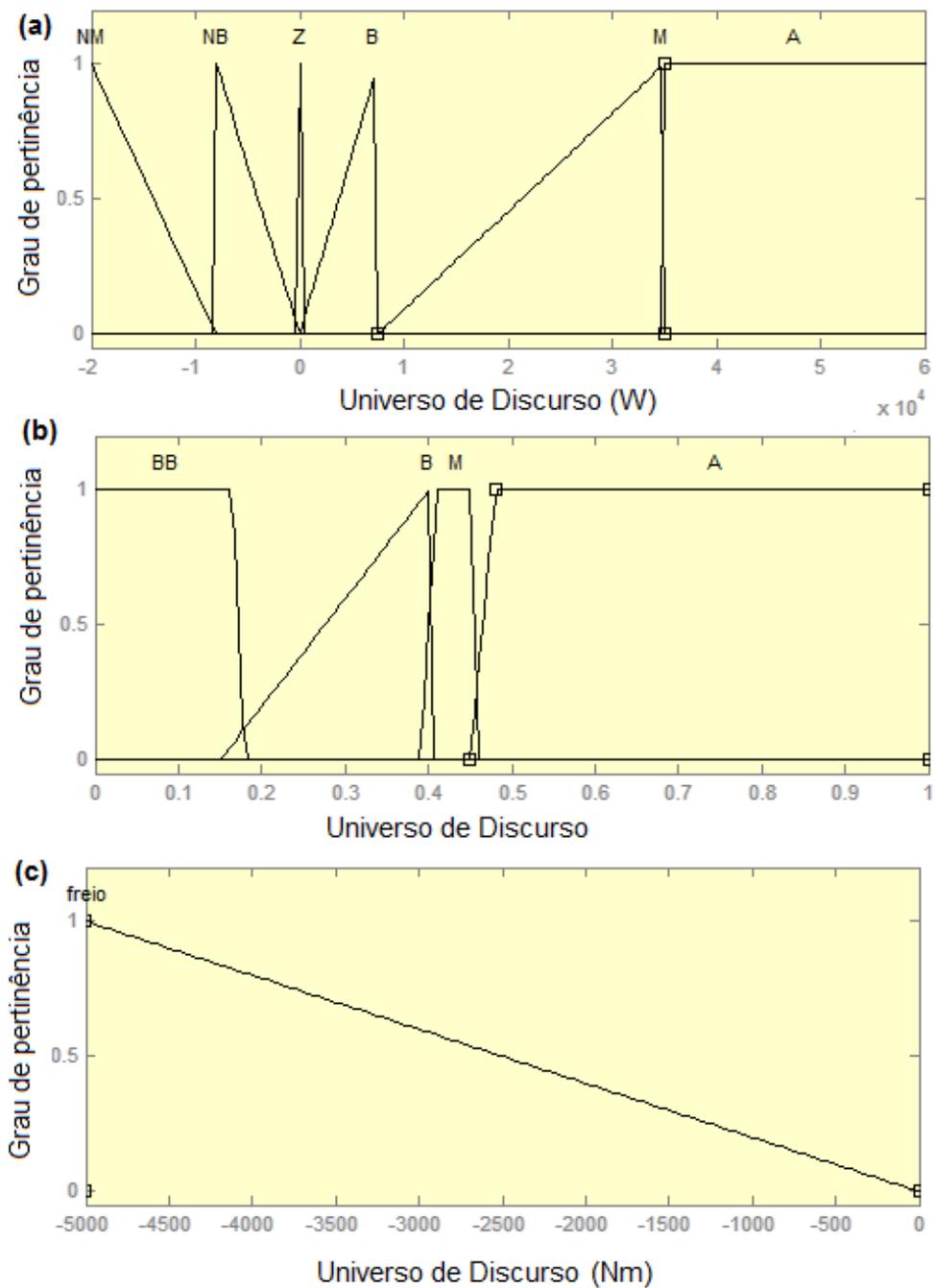


Figura 4.13 - Variáveis de entrada com seus respectivos universo de discurso e grau de pertinência (a) Potência demanda P_{dem} , (b) Profundidade de Descarga da Bateria (DoD) e (c) Frenagem ($Freq$).

- Potência da bateria (P_b): esta variável de saída foi especificada da mesma forma que o motor elétrico, no universo de discurso entre 8000 e 7500W, pois a bateria deve fornecer a mesma potência que a requerida pelo motor elétrico. Desta forma, igualmente ao motor elétrico, esta variável de saída tem conjunto de termos CN (constante negativo), N (negativo), Z (zero), P (positivo) e CP (constante positivo) representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Figura 4.14c.
- Torque do freio (T_{fre}): esta variável de saída corresponde a variável de entrada Solicitação de frenagem ($Freq$), pois essa variável de saída responde de forma proporcional à variável de entrada a ela relacionada, neste caso $Freq$. Assim, esta variável de saída foi especificada no universo de discurso entre -5000 e 0, com conjuntos de termos freio representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Figura 4.14d.

Os tipos de funções de pertinência associados aos conjuntos *fuzzy* mais frequentemente encontrados na literatura são triângulos e trapezóides, por serem gerados com facilidade, segundo Simões (1999). Funções de pertinência do tipo gaussiana e sigmóide, por exemplo, são mais utilizadas em casos onde um desempenho suave do controle é de importância crítica. Para a validação do processo de inferência *fuzzy* é necessário mapear o conhecimento relacionado ao sistema estudado através das “regras *fuzzy*”. Estas regras podem ser implementadas a partir do conhecimento especialista do processo, sendo descritas de forma linguística utilizando-se a estrutura “Se-Então”.

As regras *fuzz* foram elaboradas com base nas regras expostas no algoritmo anterior. Dessa forma, utilizou-se a base de regras para formam a base de regras *fuzzy*. Logo, todo o processo de conhecimento expresso pelas regras é dado da seguinte forma:

1. Se (P_{dem} é B) e (DOD é M), então (P_{ME} é P) e (P_{MCI} é Z) e (P_b é P)
2. Se (P_{dem} é A) e (DOD é B), então (P_{ME} é CP) e (P_{MCI} é M) e (P_b é CP)
3. Se (P_{dem} é A) e (DOD é A), então (P_{MCI} é A)
4. Se (P_{dem} é NM) e (DOD é A) e (Torque = freio), então (P_{ME} é CN) e (P_{MCI} é Z) e (P_b é CN) e (Torquefreio = freio)
5. Se (P_{dem} é NM) e (DOD é M) e (Torque = freio), então (P_{ME} é CN) e (Torquefreio = freio) e (P_b é Z)
6. Se (P_{dem} é NB) e (DOD é A), então (P_{ME} é N) e (P_b é N)
7. Se (P_{dem} é NB) e (DOD é B), então (P_{ME} é N) e (P_b é Z)
8. Se (P_{dem} é Z) e (DOD é M), então (P_{ME} é Z) e (P_{MCI} é Z) e (P_b é Z)

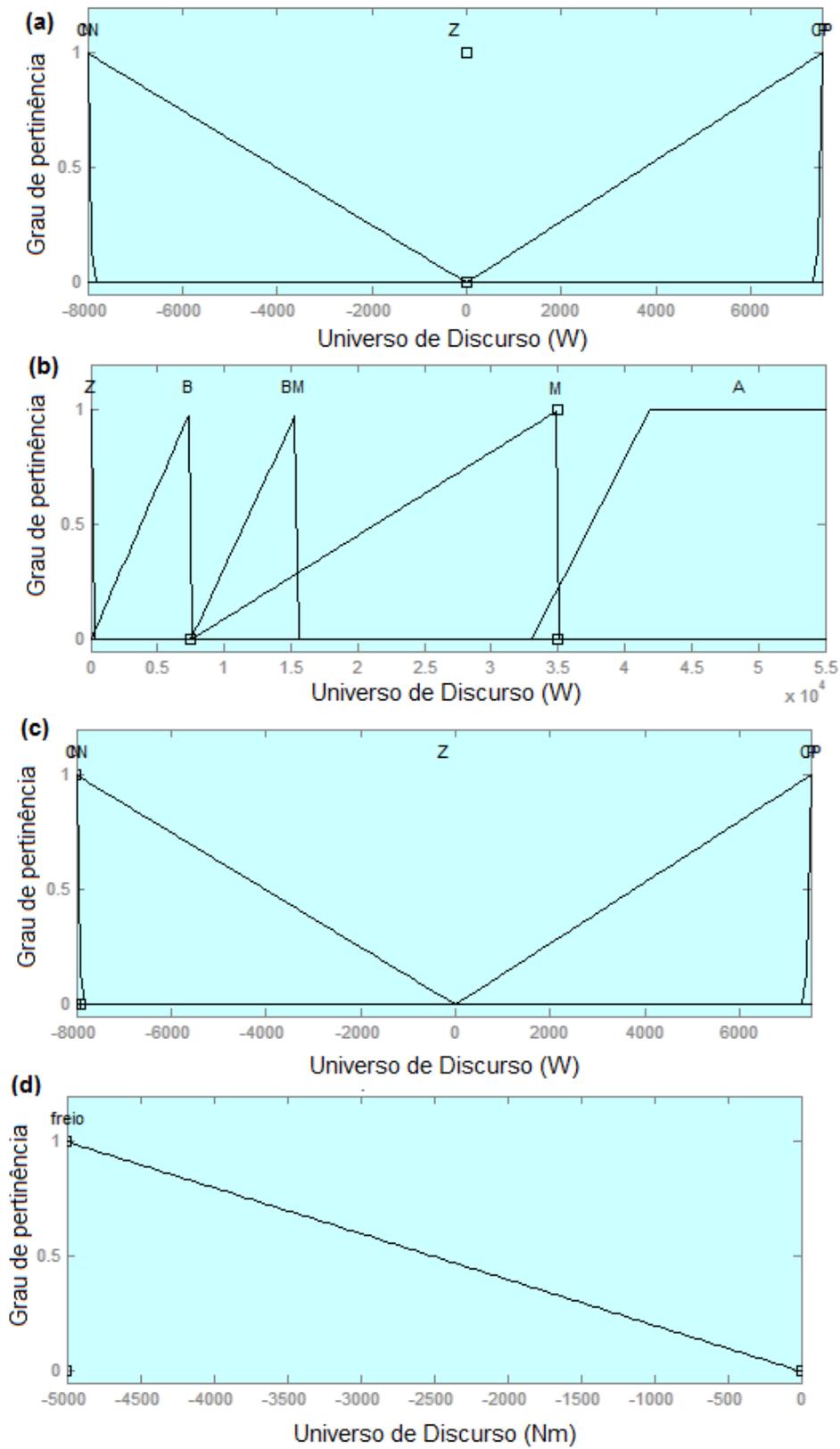


Figura 4.14 - Variáveis de saída com seus respectivos universo de discurso e grau de pertinência (a) Potência do ME P_{ME} , (b) Potência do MCI (P_{MCI}), (c) Potência da Bateria (P_b) e (d) Torque do freio (T_{fre})

9. Se (P_{dem} é Z) e (DOD é B), então (P_{ME} é Z) e (P_{MCI} é Z) e (P_b é Z)
10. Se (P_{dem} é Z) e (DOD é A), então (P_{ME} é Z) e (P_{MCI} é Z) e (P_b é Z)
11. Se (P_{dem} é B) e (DOD é BB), então (P_{ME} é P) e (P_{MCI} é Z) e (P_b é P)
12. Se (P_{dem} é A) e (DOD é M), então (P_{ME} é P) e (P_{MCI} é Z) e (P_b é P)
13. Se (P_{dem} é A) e (DOD é BB), então (P_{ME} é CP) e (P_{MCI} é A) e (P_b é CP)
14. Se (P_{dem} é B) e (DOD é A), então (P_{ME} é Z) e (P_{MCI} é BM) e (P_b é CN)
15. Se (P_{dem} é B) e (DOD é M), então (P_{ME} é Z) e (P_{MCI} é BM) e (P_b é CN)
16. Se (P_{dem} é NB) e (DOD é BB), então (P_{ME} é N) e (P_b é Z)
17. Se (P_{dem} é M) e (DOD é B), então (P_{ME} é P) e (P_{MCI} é BM) e (P_b é P)
18. Se (P_{dem} é M) e (DOD é M), então (P_{ME} é P) e (P_{MCI} é BM) e (P_b é P)
19. Se (P_{dem} é M) e (DOD é A), então (P_{ME} é Z) e (P_{MCI} é M) e (P_b é Z)
20. Se (P_{dem} é M) e (DOD é BB), então (P_{ME} é P) e (P_{MCI} é BM) e (P_b é P)
21. Se (P_{dem} é B) e (DOD é B), então (P_{ME} é P) e (P_b é P)
22. Se (P_{dem} é NM) e (DOD é B) e (Torque = freio), então (P_{ME} é CN) e (P_b é Z) e (Torque = freio)
23. Se (P_{dem} é NB) e (DOD é M), então (P_{ME} é N) e (P_b é N)

Desta forma, são obtidas vinte e três regras na determinação do comportamento desejado para a EGP de interesse. As regras foram elaboradas de tal forma que o DoD do banco de baterias mantivesse o valor de DoD em torno de seu limite máximo igual a 0,45.

Uma vez determinadas as entradas e saídas da EGP, o problema básico do processo de inferência é o de encontrar uma função de pertinência que denote a aplicação simultânea das regras elaboradas. A função de pertinência em relação ao processo de inferência pode ser obtida através de operadores de implicação tais como: *Mandani*, *Zadeh*, *Larsen*, *Arithmetical* e *Boolean*. Neste caso, optou-se pela utilização do operador de Mandani que consiste em encontrar a relação de inferência através de valores mínimos entre a entrada e a saída do sistema. Tal procedimento é obedecido por todas as regras ativadas em qualquer instante de simulação.

Sempre que houver mais de uma regra ativada, para cada entrada do controlador, as saídas *fuzzy* originadas de todas as regras ativadas devem ser combinadas resultando em uma única região *fuzzy*. Um último passo (defuzzificação) é necessário na substituição desta região *fuzzy* por um único valor que age como a saída do controlador. Para isto, utilizou-se o primeiro máximo de área da região *fuzzy* resultante, neste caso, determina-se o valor de saída através do ponto em que o grau

de pertinência atinge o primeiro valor máximo.

4.6.3 Otimização das EGPs por meio do controle de operação do MCI

Além das EGPs abordadas anteriormente, é realizada a otimização da operação do MCI, de forma com que este funcione na região de maior eficiência. O objetivo dessa otimização é impelir que o consumo específico instantâneo do MCI esteja em uma região do mapa de consumo de maior eficiência, resultando então em uma maior economia de combustível e conseqüentemente menores emissões. Através da Figura 4.15 pode-se observar a região de maior eficiência no mapa de consumo do MCI, que é a região alvo de operação do MCI através da otimização implementada. O controle de operação do MCI realizado neste trabalho é efetuado por meio do controle do sistema de transmissão, controle da abertura de borboleta e por meio do controle de torque disponível do MCI, que serão discutidos a seguir.

Otimização do MCI por meio do controle do sistema de transmissão

A fim de otimizar o funcionamento do MCI, de forma com que este funcione na região de maior eficiência, utiliza-se o controle do sistema de transmissão. O controle do sistema de transmissão é realizado por meio de um algoritmo que efetua a troca de marchas quando a rotação de operação do MCI (eixo \times do mapa de consumo) sai de uma região de eficiência preestabelecida. Desta forma, a lógica elaborada consiste na limitação da rotação do MCI, no qual quando o MCI apresentar rotação superior ao limite máximo imposto a marcha é aumentada, reduzindo-se então a rotação, que ficará na região de eficiência, e o valor do torque é ampliado. Já se a rotação do MCI for inferior ao limite mínimo, então a marcha será reduzida, fazendo-se com que a rotação do MCI aumente, e conseqüentemente o torque diminua.

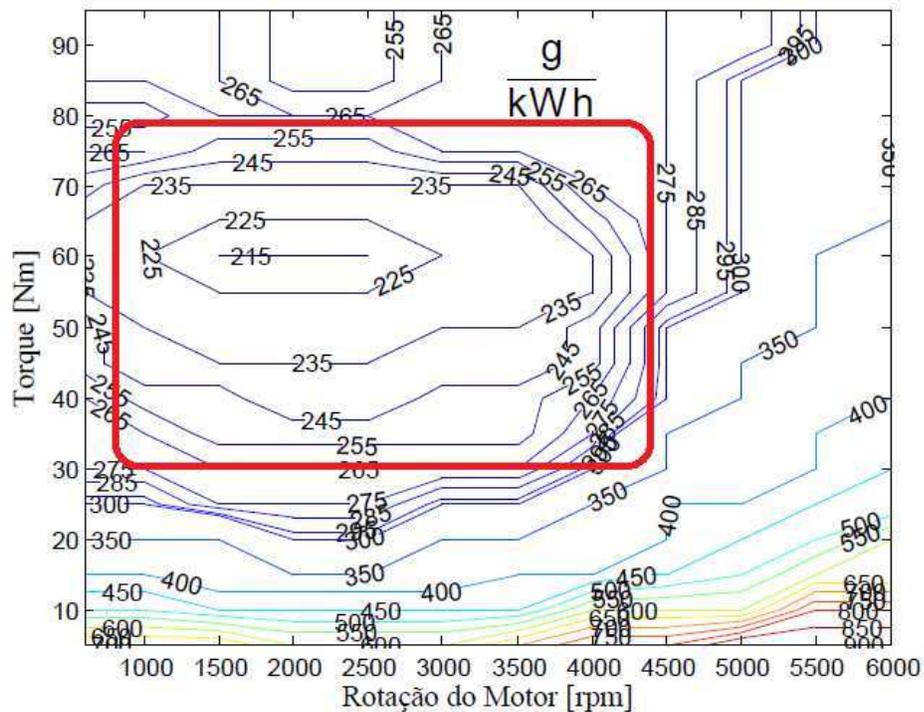


Figura 4.15 - Mapa de Consumo do MCI destacando-se região de maior eficiência

Otimização do MCI por meio do controle da abertura da borboleta

Outra técnica de otimização de operação da MCI é realizada por meio do controle da abertura da borboleta, cujo controle pode resultar em uma maior economia de combustível, pois o controle da borboleta acarreta uma limitação no eixo y (torque) do mapa de consumo. Entretanto, tal limitação de torque do MCI, ocasionada pelo controle de abertura da borboleta, pode influenciar no desempenho do veículo, sendo que o restante do torque requerido para o veículo cumprir o ciclo de condução imposto é fornecido pelo ME, porém, se o torque máximo do ME for inferior ao torque necessário para que se cumpra o trajeto, haverá então uma redução do desempenho do veículo.

Otimização do MCI por meio do controle de torque

A última técnica de otimização de operação da MCI é realizada por meio do controle do torque de saída do MCI. Como pode ser observado na Figura 4.15, o mapa de consumo do MCI apresenta menor eficiência quando o torque assume valores menores. Desta forma, o objetivo do controle do torque é impedir que o torque de saída do MCI assuma baixos valores, fato este que acarreta na redução da rotação do MCI. A lógica implementada é realizada levando-se em consideração a marcha do veículo. Quando o MCI apresentar torque menor que a referência de melhor consumo, há um aumento na marcha do veículo, sendo que a rotação é reduzida e o torque ampliado.

4.7 Representação do VEH Paralelo

Na Figura 4.16 podem ser vistos os sistemas que constituem o VEH Paralelo em questão.

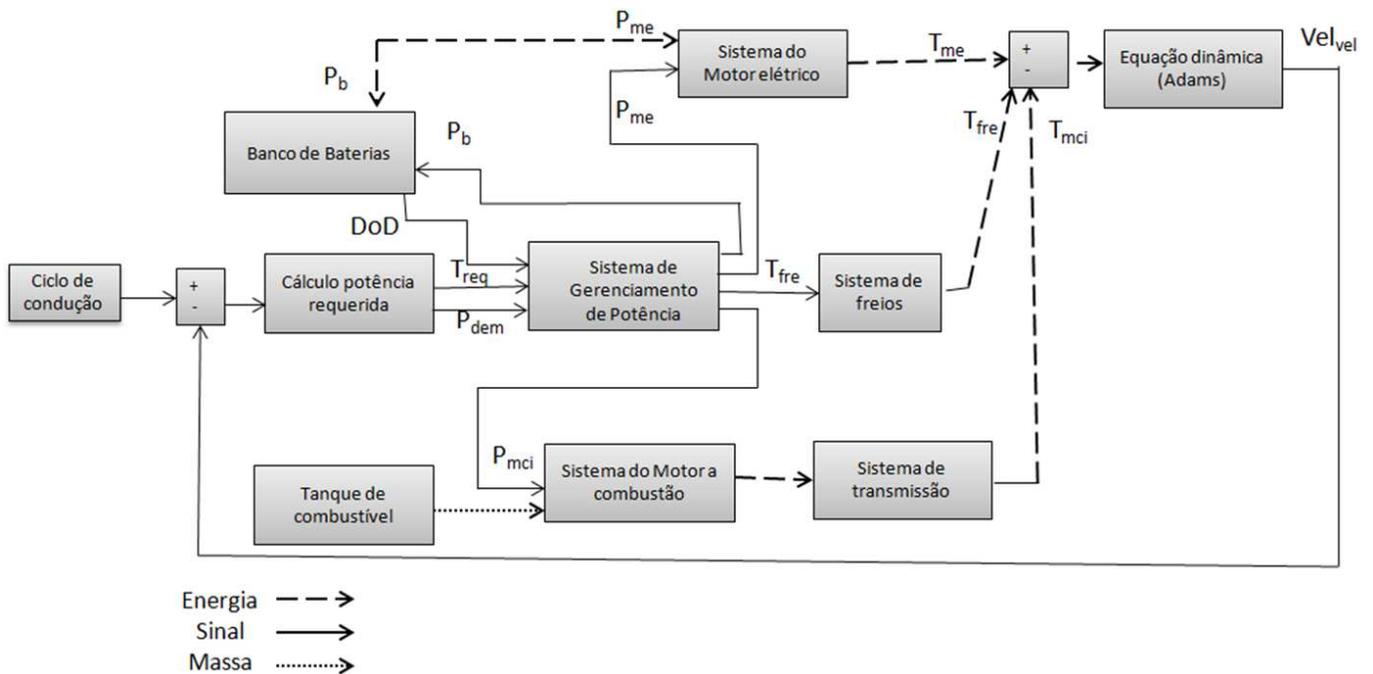


Figura 4.16 - Diagrama em blocos para a representação do VEH Paralelo estudado.

Nesta figura, estão indicados os sentidos para o fluxo de potência (energia) de cada sistema do veículo, o sinal de controle e o fluxo de massa. O controle do veículo pode ser resumido da seguinte forma:

1. A velocidade longitudinal de referência do ciclo de condução é comparada com a velocidade real do veículo e através do equacionamento dinâmico do veículo é calculado um torque de referência (T_{req}) que representa o torque necessário para que o veículo atinja a velocidade desejada, além disso, a potência requerida (P_{dem}) é calculada por meio da velocidade do veículo e do torque encontrado.
2. A potência requerida (P_{dem}), assim como a profundidade de descarga (DoD) e o torque requerido (T_{req}) são as entradas do sistema de gerenciamento de potência (SGP). O SGP realiza o acionamento dos sistemas de propulsão por meio da estratégia de gerenciamento apresentada acima, cujo resultado é a potência de operação do MCI, do ME e da bateria, além do torque requerido pelo sistema de freio.
3. O ME recebe o sinal de potência e por meio da sua rotação é calculado o torque de operação correspondente. Este torque gera um sinal de referência para a corrente de armadura que juntamente com a velocidade de rotação do ME geram o sinal de torque final do ME;
4. O MCI também recebe o sinal de potência e, conforme descrito anteriormente, o torque final do MCI é calculado por meio da estimativa de abertura da borboleta e também por meio da velocidade do veículo. O torque de saída do MCI é então enviado ao sistema de transmissão onde o valor do torque será alterado de acordo com a relação de transmissão.
5. De acordo com a potência exigida pelo ME, a bateria fornece o valor de potência correspondente amplificando-se o valor do DoD . Já quando o ME atua como gerador, a bateria recebe a potência referente ao gerador, e assim é reduzido o valor do DoD .
6. Para que seja calculado o valor da velocidade que o veículo está se deslocando, todos os torques provenientes dos sistemas de propulsão são somados e enviados ao modelo de dinâmica longitudinal do veículo implementado no software Adams, cuja resposta do modelo é a velocidade do veículo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo, são analisadas as estratégias de gerenciamento de potência propostas. As análises são delimitadas pela observância do comportamento da bateria durante o ciclo de condução, do consumo de combustível e do desempenho do veículo.

O comportamento da bateria é examinado por meio da variável DoD , sendo que este opera entre valores pré-determinados de carga e descarga (DoD_{max} e DoD_{min}), 0,45 e 0,4 respectivamente, cujos valores considerados visam ampliar a vida útil da bateria chumbo-ácido utilizada neste trabalho.

O consumo de combustível é analisado utilizando-se o algoritmo implementado conforme mostrado na seção anterior e também por meio do mapa de consumo onde é possível visualizar a dispersão do consumo específico em relação à rotação e ao torque correspondente do MCI.

Já o desempenho do veículo é verificado por meio da correlação entre o ciclo de condução padrão e o ciclo resultante da simulação, averiguando a capacidade do veículo em seguir o ciclo imposto perante determinadas condições.

As EGPs são analisadas aplicando-se o ciclo de condução urbano NBR6601 e também é realizada uma análise complementar que abrange o ciclo de condução rodoviário NBR7024 no final deste capítulo. As análises iniciam-se com a abordagem do veículo convencional, onde são mostradas as regiões de maior concentração no mapa de consumo do MCI, e conseqüentemente o consumo por km/h e também a correlação resultante obtida. Em seguida são realizadas as análises para cada EGP específica, e ainda na EGP baseada em regras é discutido o controle do MCI. Além disso, nas análises efetuadas são verificadas a influência que a alteração da massa do veículo exerce no consumo de combustível do VEH estudado. Para estes casos analisados a bateria é considerada plenamente carregada, ou seja, DoD zero.

A massa total do veículo é, inicialmente, 980 kg (massa do veículo, tanque de combustível e motorista). As análises da EGPs em relação a alteração da massa do veículo serão efetuadas tomando-se um acréscimo de massa advindo pela adição de passageiros no VEH. Desta forma, serão utilizados valores para a massa total do VEH sendo 1120 kg, considerando a massa do veículo, tanque de combustível, motorista, motor elétrico e bateria; e a massa do VEH será 1260 kg para o VEH acrescidos 2 passageiros, e 1400 kg acrescidos 4 passageiros.

Primeiramente, as EGPs foram analisadas considerando a estratégia de troca de marchas na velocidade recomendada pelo fabricante do veículo, onde a velocidade indicada representa a velocidade limite para a troca de marcha, tanto na redução, quanto na troca em aceleração, à medida que a velocidade limite é atingida ocorre a troca de marcha pelo algoritmo que simula a caixa de câmbio. Desta forma, a troca de marchas é um fator limitante da região de operação MCI dentro do mapa de consumo.

5.1 Veículo Convencional

Para fins comparativos a primeira análise efetuada aborda o veículo convencional. De acordo com a Figura 5.1, o veículo convencional consegue acompanhar o ciclo urbano NBR6601 de forma satisfatória, no qual a correlação entre a velocidade do veículo com a velocidade do ciclo imposto é de 0,9999, o que significa que o MCI conseguiu fornecer sozinho toda a potência solicitada para se cumprir o ciclo urbano.

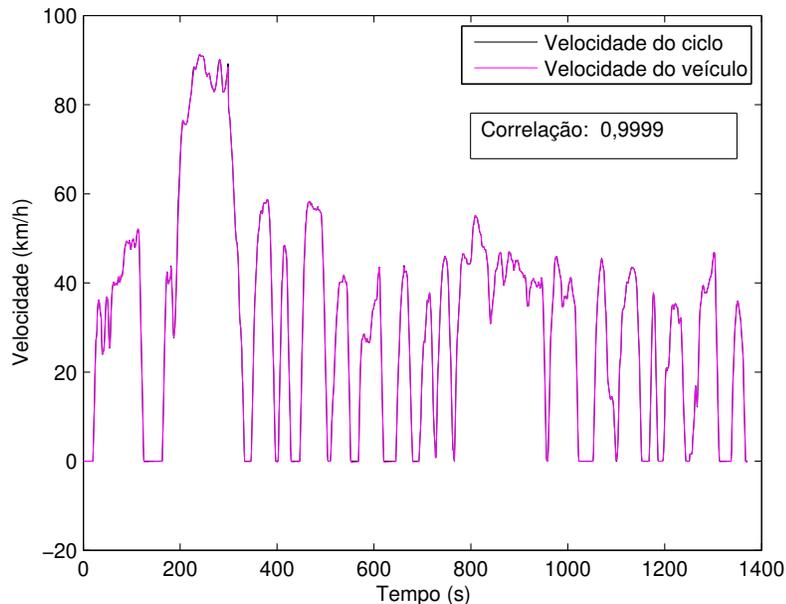


Figura 5.1 - Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do veículo convencional.

A Tabela 5.1 mostra a quantidade de combustível utilizada, considerando-se a alteração da

massa do veículo, para percorrer o ciclo de condução urbano que possui 12 km de extensão. Juntamente com o consumo está mostrado o valor em termos de km/l. Através da tabela é possível observar que o aumento da massa irá acarretar em um aumento no consumo de combustível, o que era previsível de acordo com o estudo da dinâmica veicular.

Tabela 5.1 - Consumo de combustível para o veículo convencional dada a variação em sua massa total.

Massa total do veículo (kg)	Consumo no ciclo urbano (l)	Valor km/l
980	0,66	18,10
1120	0,673	17,83
1260	0,69	17,39

A Figura 5.2 mostra a dispersão do consumo específico, para as diferentes massas analisadas, em relação à rotação e ao torque correspondente do MCI no mapa de consumo. Através da Figura pode-se observar que o mapa de consumo referente ao veículo convencional possui regiões de baixa eficiência, e a variação da massa do veículo não afeta a alteração dessa dispersão. Deste modo, o objetivo das EGPs é reduzir essas regiões no gráfico do mapa de consumo, o que resulta em economia de combustível.

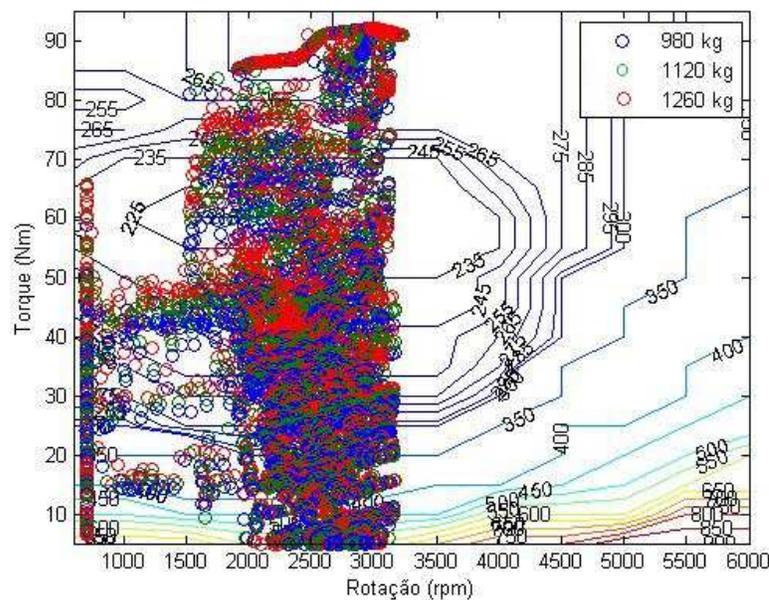


Figura 5.2 - Dispersão do consumo específico em função da rotação e torque do MCI para o veículo convencional

5.2 EGP com regeneração baseado em Regras

5.2.1 ME atuando como principal fonte propulsora

Troca de marchas recomendada

Utilizando-se a EGP baseada em Regras, o ME atuando como principal fonte propulsora e a rotação do MCI limitada através da troca de marchas recomendada pelo fabricante do veículo 1.0, tem-se o consumo de combustível para percorrer o ciclo de condução NBR6601 analisando-se a variação de massa do VEH mostrada na Tabela 5.2. Percebe-se que o aumento da massa do VEH também ocasiona um aumento no consumo de combustível, e o consumo de combustível resultante dessa EGP é, significativamente, menor face ao veículo convencional.

Tabela 5.2 - Consumo de combustível para o VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora.

Massa total do veículo (kg)	Consumo no ciclo urbano (l)	Valor km/l
1120	0,4849	24,74
1260	0,5077	23,63
1400	0,521	23,03

Através da Figura 5.3 é possível observar a dispersão do consumo específico no mapa de consumo, no qual pode-se verificar que o MCI opera em regiões de maior eficiência do que o veículo convencional, fato este que justifica a economia de combustível. E ainda, alterando-se a massa total do veículo observa-se que não há alterações consideráveis na distribuição do consumo específico no mapa de consumo.

A Figura 5.4 mostra o desempenho do VEH em relação ao ciclo seguido, no qual apresentou uma boa correlação de perfis de velocidade (0,999).

Já a Figura 5.5 apresenta o comportamento do DoD que atinge a máxima descarga em 200 segundos do ciclo de condução, e depois disso oscila entre os valores máximo e mínimo de carga e descarga da bateria. Mesmo com a alteração da massa do VEH o comportamento da bateria

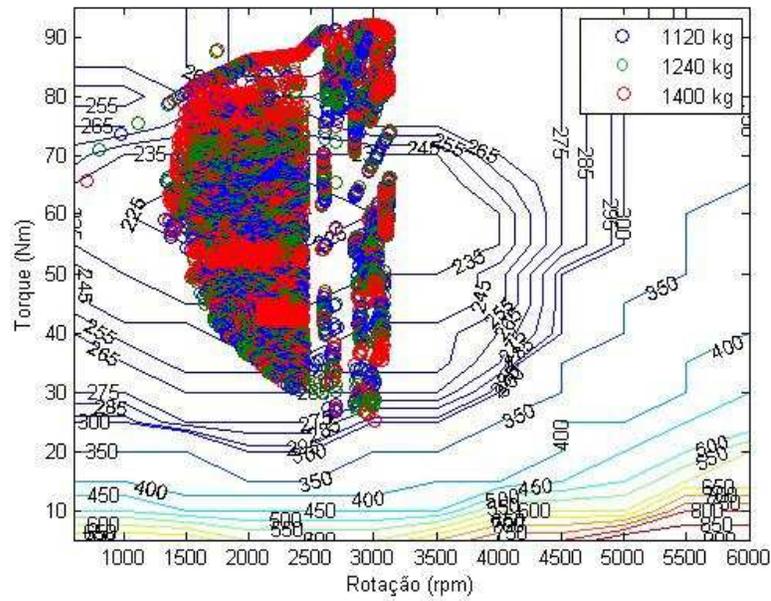


Figura 5.3 - Dispersão do consumo específico em função da rotação e torque do MCI para o VEH baseado em Regras e com o ME como principal fonte propulsora.

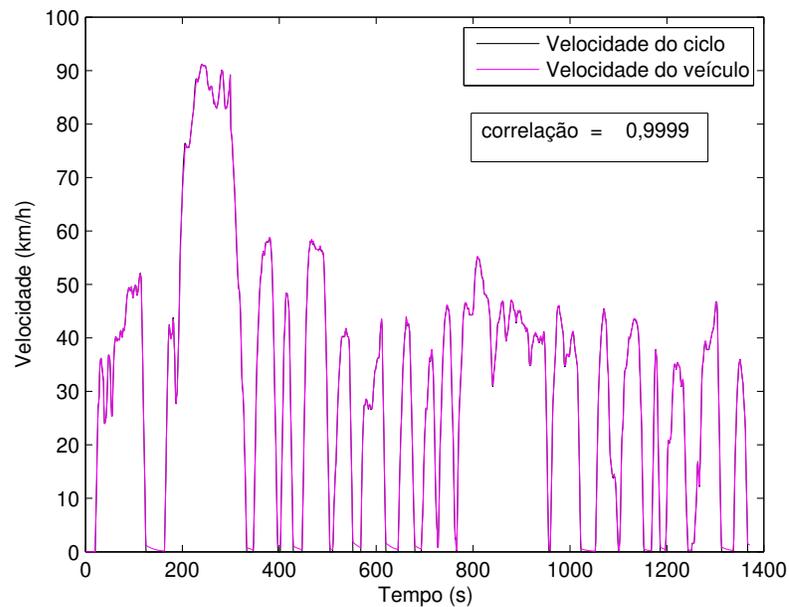


Figura 5.4 - Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH baseado em Regras e com o ME como principal fonte propulsora.

permanece praticamente igual para todas as massas consideradas.

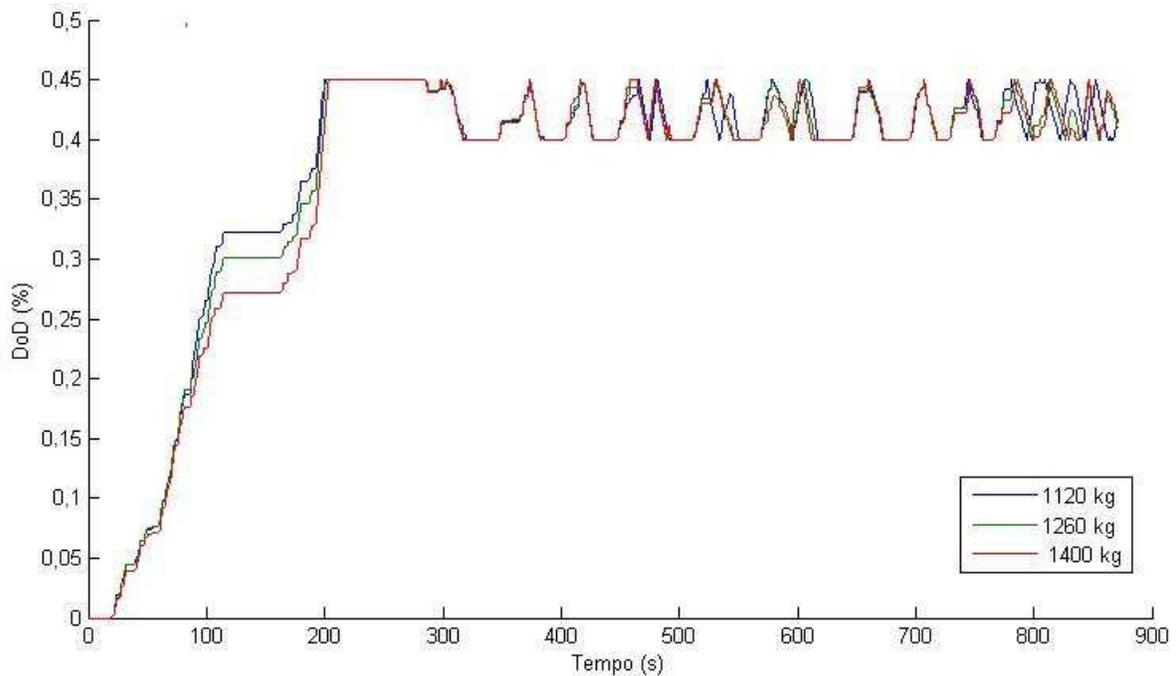


Figura 5.5 - Comportamento do DOD da bateria para o VEH com EGP baseada em regras e MCI como fonte principal propulsora.

Limitação de rotação do MCI - 1200 a 2000 rpm

Limitando-se a rotação do MCI a 1200 a 2000 rpm, tem-se que o VEH apresenta uma maior economia de combustível, visto a Tabela 5.3. Esse comportamento é decorrente da limitação da rotação do MCI que garante uma região de menor consumo específico. Tal limitação é efetuada através do aumento da relação de transmissão, que ocasiona uma redução na rotação e consequentemente um aumento no torque. Porém, quando o VEH está na quinta marcha tal procedimento não é possível, o que explica os pontos de dispersão presentes fora da região limite de atuação do MCI, conforme pode ser visto na Figura 5.6.

O aumento na massa do VEH também ocasionou um aumento no consumo de combustível. Além disso, o desempenho apresentou bom comportamento com 0,999 de correlação entre os perfis

de velocidade, conforme Figura 5.7.

Tabela 5.3 - Consumo de combustível para o VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora e com limitação de faixa de rotação do MCI.

Massa total do veículo (kg)	Consumo no ciclo urbano (l)	Valor km/l
1120	0,4478	26,79
1260	0,4676	25,66
1400	0,481	24,94

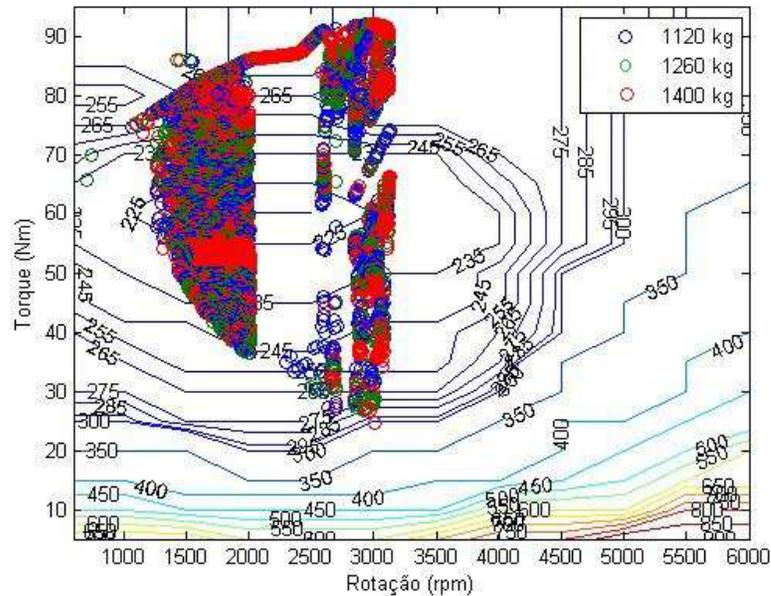


Figura 5.6 - Dispersão do consumo específico do MCI para o para o VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora e com limitação de faixa de rotação do MCI.

A Figura 5.8 permite visualizar o comportamento do DoD que atinge o limite máximo de descarga em 190 segundos, e depois oscila entre os valores máximo e mínimo de carga e descarga. O DoD, neste caso, atinge o limite máximo de descarga em tempo inferior quando comparando com a EGP anterior (que utiliza a troca de marchas recomendada), pelo fato que a redução no consumo de combustível é compensada pelo uso mais frequente do ME e portanto da bateria.

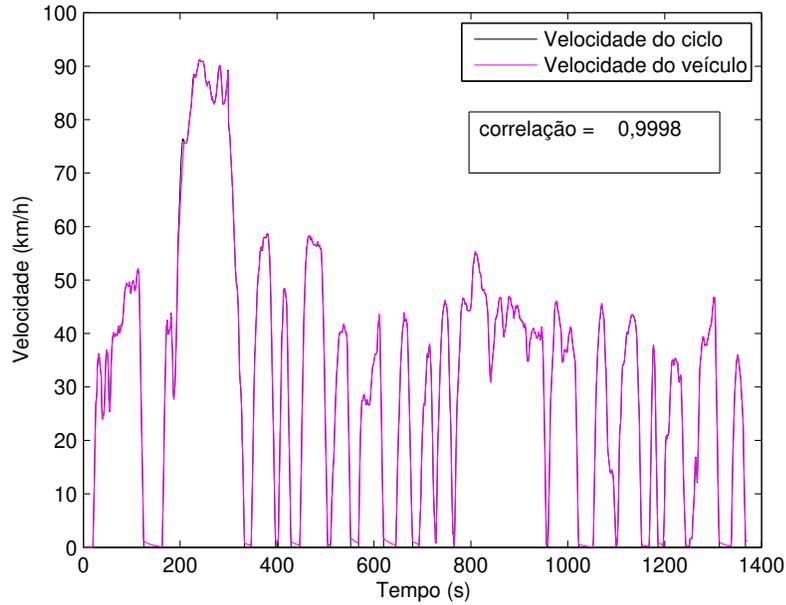


Figura 5.7 - Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora e com limitação de faixa de rotação do MCI.

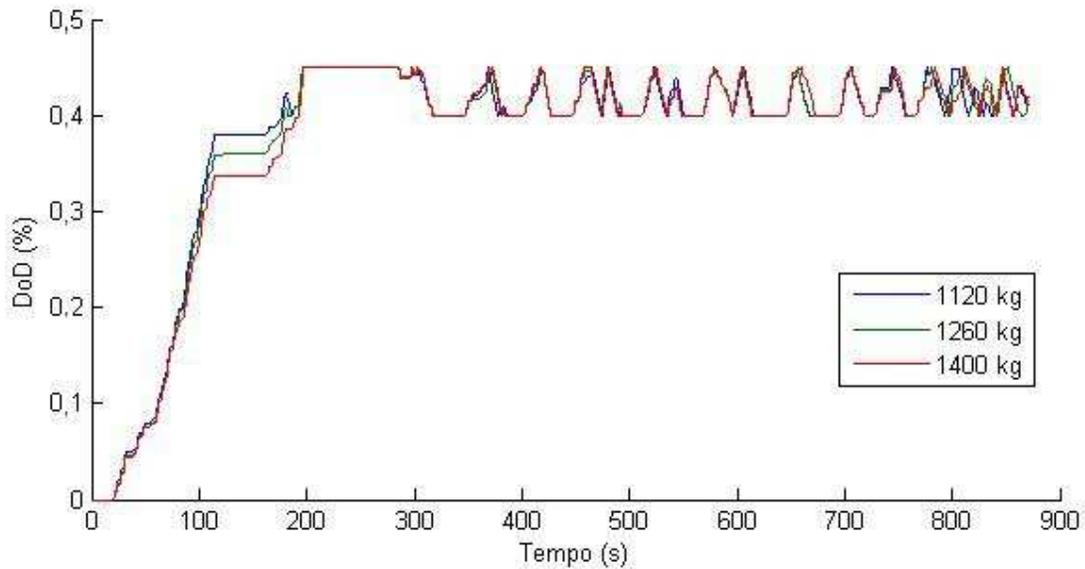


Figura 5.8 - Comportamento do DoD da bateria para o VEH com EGP baseada em regras e com o ME como principal fonte propulsora e com limitação de faixa de rotação do MCI.

5.2.2 MCI atuando com principal fonte propulsora

Troca de marchas recomendada

A EGP baseada em Regras, com o MCI atuando como principal fonte propulsora e a rotação do MCI limitada através da troca de marchas recomendada, apresenta um consumo de combustível dado pela Tabela 5.4, no qual observa-se valores similares ao apresentado para o veículo convencional. Este comportamento é decorrente da EGP adotado que possui o MCI como principal fonte propulsora, neste caso, o ME foi insignificativamente utilizado, assim o comportamento desta EGP se aproxima do comportamento do veículo convencional. Através da Figura 5.10 é possível observar a dispersão do consumo específico no mapa de consumo com a variação de massa do VEH, no qual pode-se notar que o MCI opera em regiões de alto consumo específico.

A Figura 5.9 mostra o desempenho do VEH em relação ao ciclo urbano, no qual também apresentou uma boa correlação de perfis de velocidade (0,999).

Tabela 5.4 - Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora.

Massa total do veículo (kg)	Consumo no ciclo urbano (l)	Valor km/l
1120	0,6603	18,17
1260	0,674	17,79
1400	0,688	17,44

Desta forma, a Figura 5.11 mostra a variação do DoD em cada instante de simulação, e a partir do gráfico do DoD pode-se verificar que a bateria é bem pouco requisitada durante o percurso, sendo que a alteração na massa do VEH acarreta uma variação na descarga máxima atingida, porém em níveis poucos significativos.

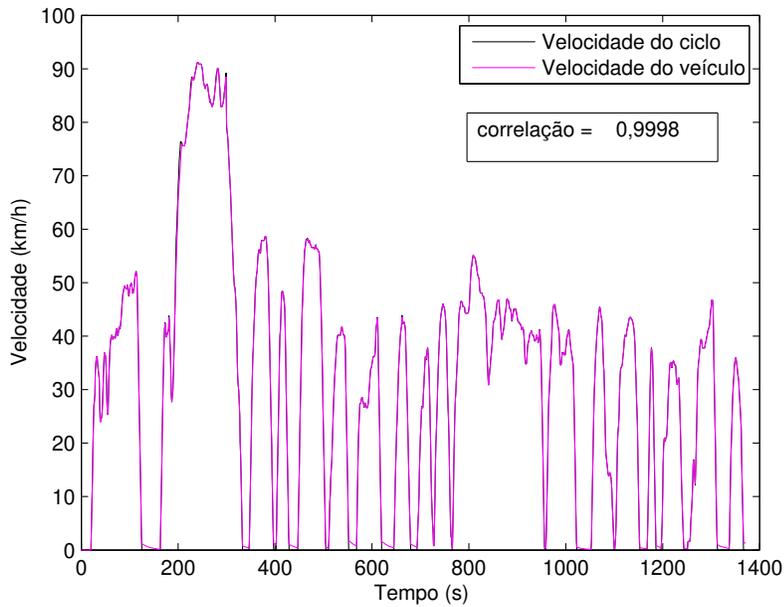


Figura 5.9 - Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora.

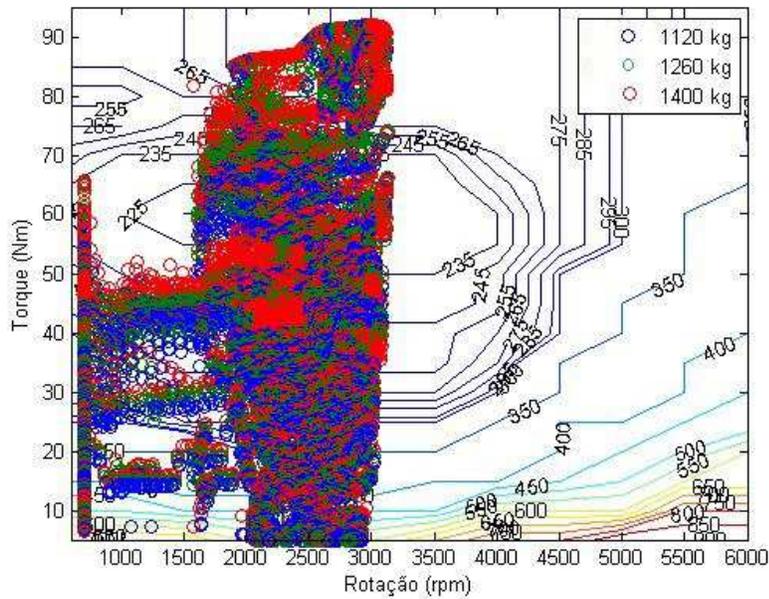


Figura 5.10 - Dispersão do consumo específico do MCI do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora.

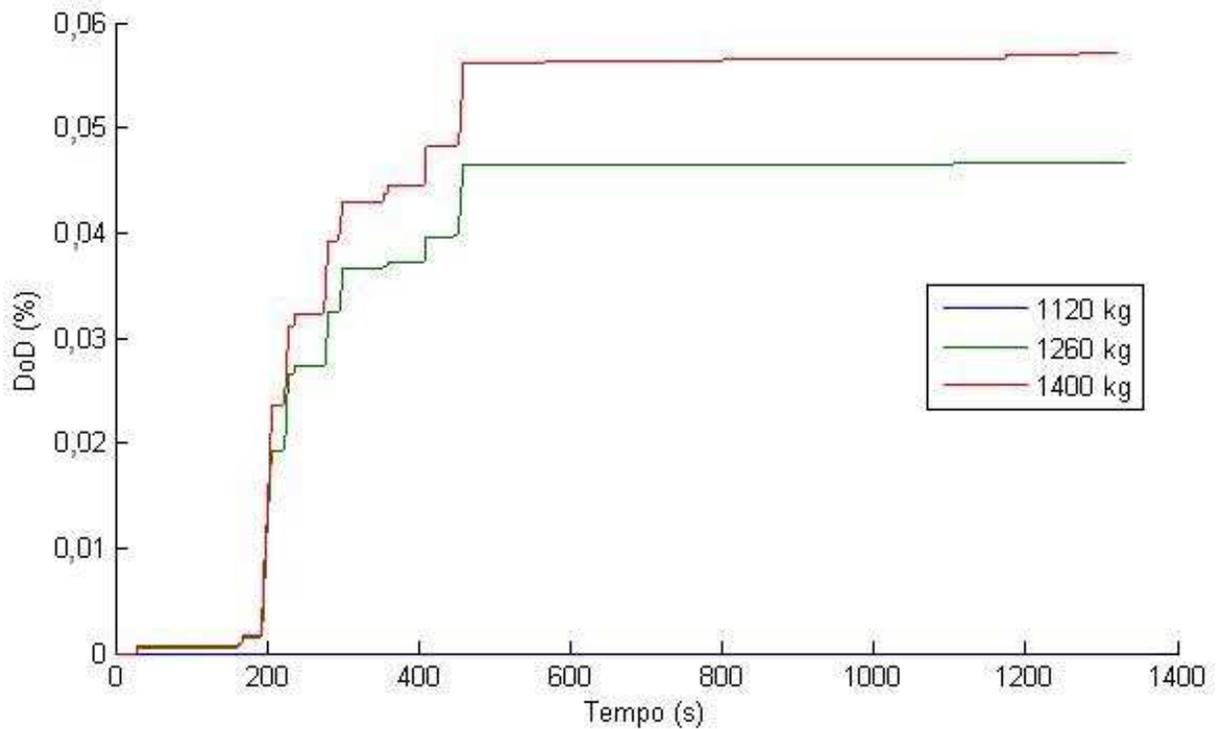


Figura 5.11 - Comportamento do DoD da bateria do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora.

Limitação de rotação do MCI - 1200 a 2000 rpm

Através da limitação de rotação do MCI de 1200 a 2000 rpm, tem-se que o VEH apresenta uma redução no consumo de combustível, idem à EGP que possui o ME como principal fonte propulsora (Tabela 5.5), fato este que é justificado pela alteração da região do consumo específico no mapa de consumo (Figura 5.13).

Tabela 5.5 - Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora e com limitada faixa de rotação.

Massa total do veículo (kg)	Consumo no ciclo urbano (l)	Valor km/l
1120	0,6028	19,9
1260	0,6216	19,3
1400	0,634	18,92

Por meio da limitação de rotação, o MCI apresenta consumo específico em uma região de maior eficiência, embora tal limitação não representa na redução de desempenho do veículo, conforme pode ser visto na Figura 5.12. Neste caso, a bateria apresenta pouca descarga durante o ciclo

urbano, desta forma, o ME continua pouco solicitado pela EGP (Figura 5.13).

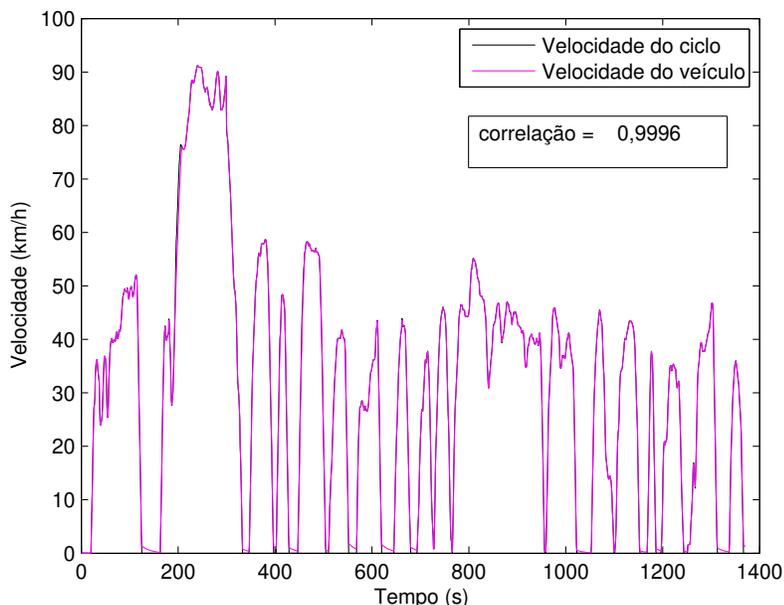


Figura 5.12 - Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora e com limitada faixa de rotação.

Limitação de rotação do MCI - 1200 a 2000 rpm e Limitação de abertura da borboleta a 72%

Por meio da limitação da rotação do MCI em 1200 a 2000 rpm e limitação da abertura da borboleta pode-se atingir uma maior economia de combustível de acordo com a Tabela 5.6. Ainda mesmo com o aumento da massa do veículo o consumo permanece inalterado, fato este decorrente da limitação de abertura da borboleta.

No entanto, o desempenho do VEH apresentou declínio, pois conforme Figura 5.15, o VEH não conseguiu seguir o ciclo imposto devido à limitação de torque do MCI dada pela limitação da abertura borboleta, e também à limitação de torque do ME. Os pontos no ciclo de condução onde o VEH não consegue seguir o ciclo pode ser melhor observado na Figura 5.16.

Neste caso, optou-se por limitar a abertura da borboleta a 72% para que a dispersão do consumo específico não ultrapassa-se a região de maior eficiência dentro do mapa de consumo, desta

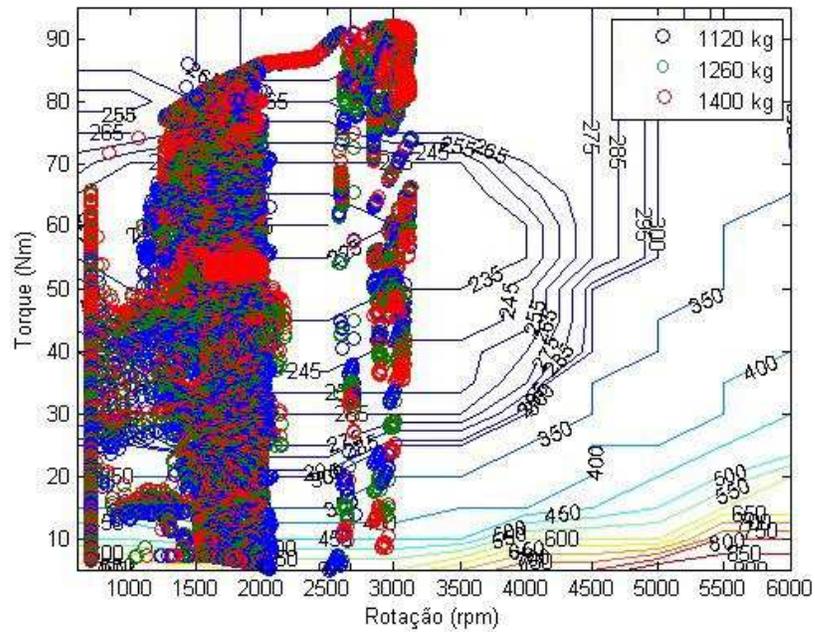


Figura 5.13 - Dispersão do consumo específico do MCI do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora e com limitada faixa de rotação.

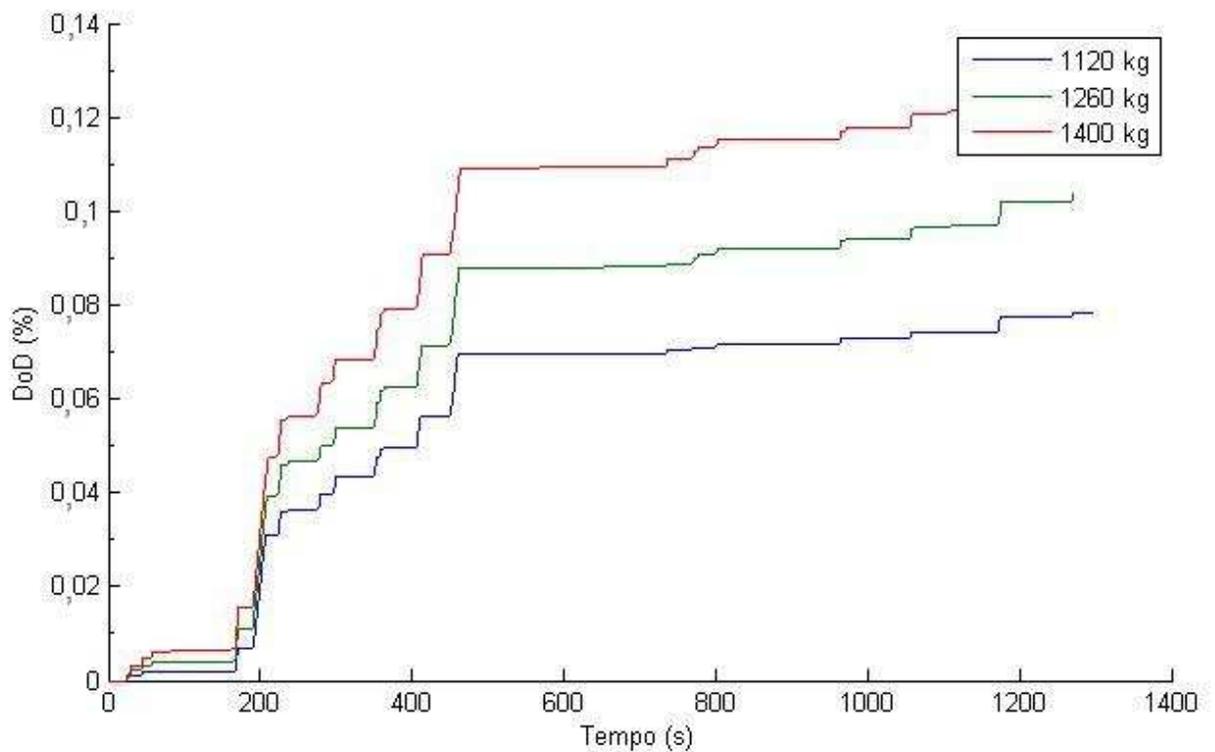


Figura 5.14 - Comportamento do DOD da bateria do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora e com limitada faixa de rotação.

forma, o valor 72% foi obtido por meio de testes. Através da Figura 5.17 pode-se verificar a dispersão do consumo específico no mapa de consumo, considerando-se a variação de massa do VEH, no qual é possível notar que o MCI operou, neste caso, em uma região de menor consumo específico, decorrente da limitação de rotação do MCI e também da limitação da abertura da borboleta, que resultou na limitação do torque de saída do MCI.

Tabela 5.6 - Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação e abertura de borboleta limitados.

Massa total do veículo (kg)	Consumo no ciclo urbano (l)	Valor km/l
1120	0,5243	22,88
1260	0,5253	22,84
1400	0,527	22,77

A Figura 5.18 mostra o comportamento da bateria que, neste caso, apresentou oscilações entre os limites máximo e mínimo de descarga, indicando que o ME foi bastante solicitado devido ao fato que toda vez que o torque do MCI era limitado pela abertura de borboleta, o ME supria o torque requerido, necessitando da energia da bateria.

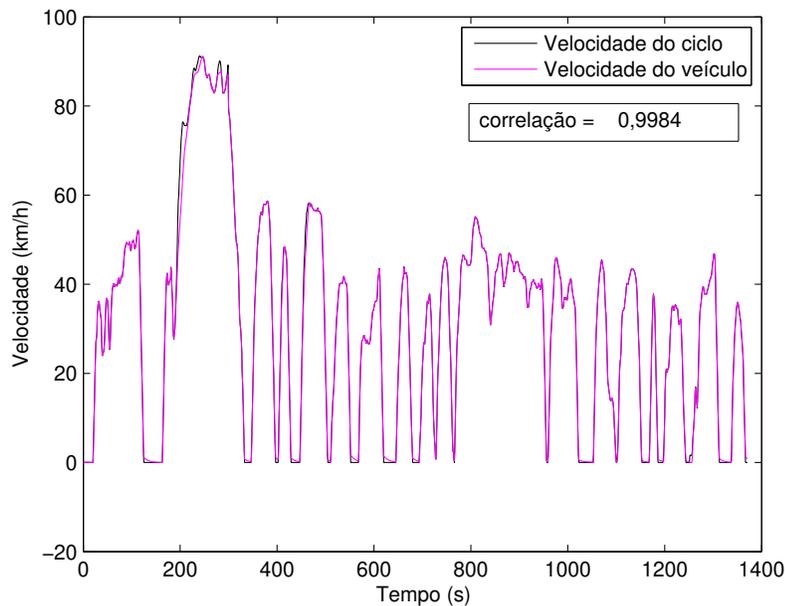


Figura 5.15 - Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação e abertura de borboleta limitados.

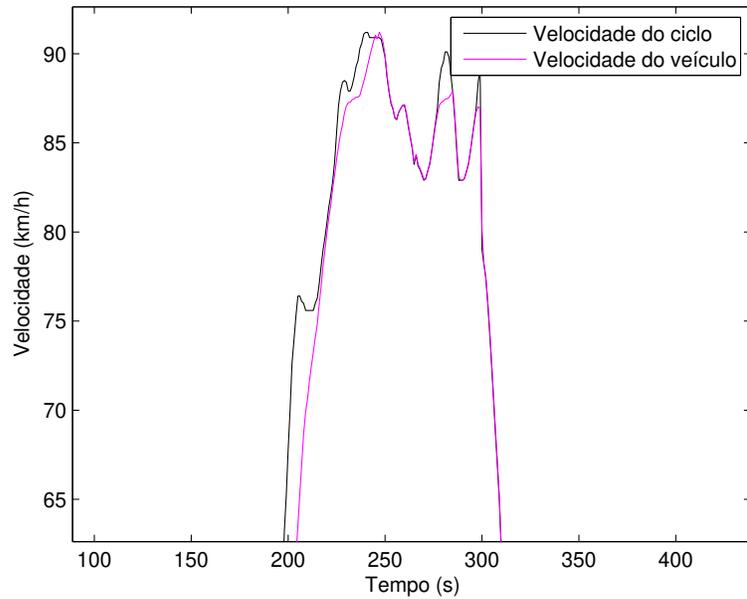


Figura 5.16 - Visualização dos pontos de perfis de velocidade onde o VEH não consegue seguir o ciclo urbano.

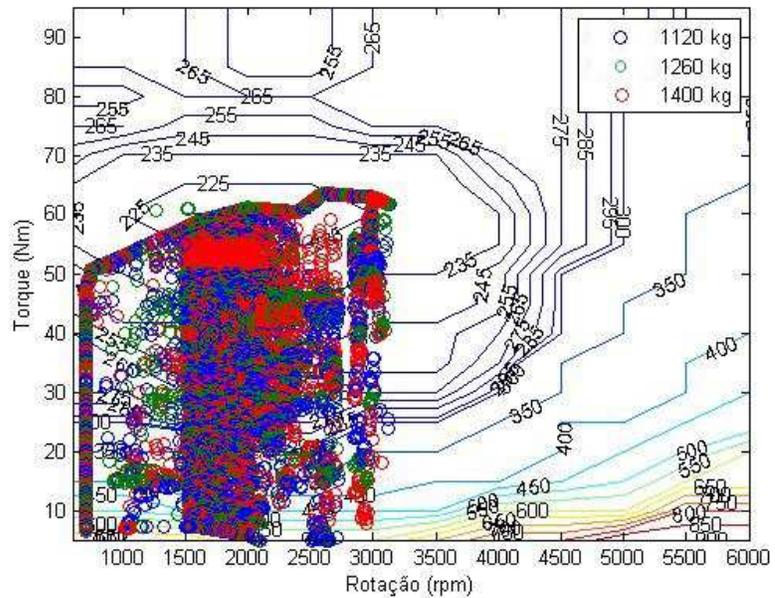


Figura 5.17 - Dispersão do consumo específico do MCI do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação e abertura de borboleta limitados.

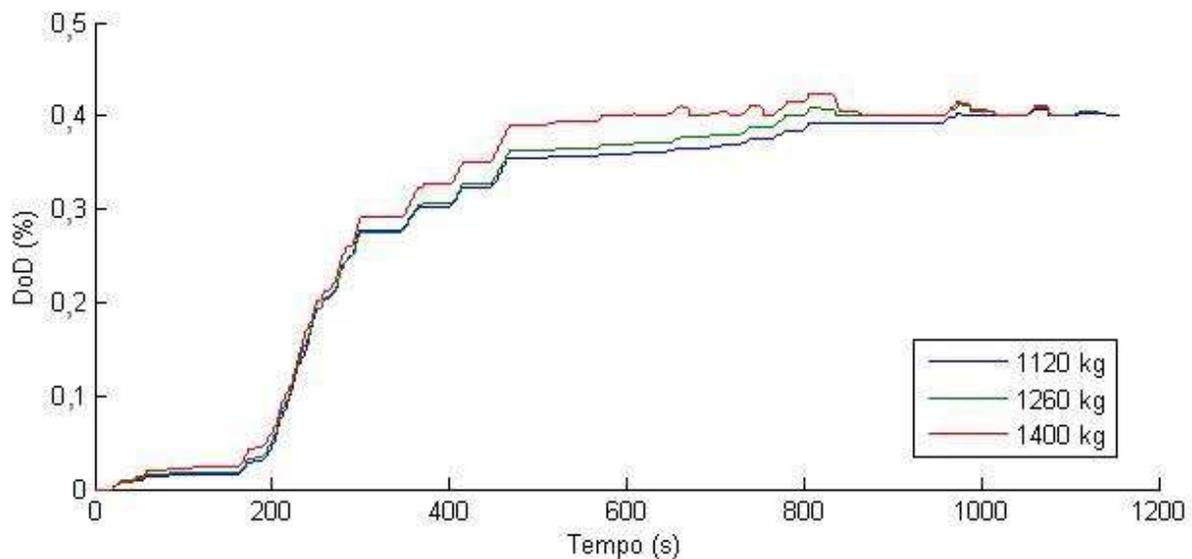


Figura 5.18 - Comportamento do DOD da bateria do VEH com EGP baseada em regras e o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação e abertura de borboleta limitados.

Limitação de rotação do MCI - 1200 a 2000 rpm, Limitação de abertura da borboleta a 72% e limitação do torque do MCI acima de 20 Nm

Este caso é uma complementação da EGP anterior, que além de possuir rotação do MCI e abertura da borboleta limitados, este também apresenta uma limitação de torque de saída do MCI, no qual a EGP tentará evitar que o MCI tenha torque de saída inferior a 20 Nm por esta ser uma região de elevado consumo específico no mapa de consumo. Tal limitação é também efetuada por meio da troca de marchas, pois quando o valor do torque tiver valor inferior a 20 Nm a marcha será aumentada para que ocorra a redução da rotação do MCI e conseqüentemente ocasione no aumento do torque, tirando o par rotação \times torque da região de alto consumo. Porém, em alguns casos, por exemplo, quando o VEH está na quinta marcha, não é possível sua ampliação, não podendo ser realizada a limitação do torque abaixo de 20 Nm.

No entanto, esta estratégia apresentou uma redução considerável no consumo de combustível conforme mostra a Tabela 5.7, onde também observa-se o consumo permaneceu inalterado dada a variação da massa do VEH, fato este decorrente da limitação da borboleta conforme mencionado anteriormente. Por meio da limitação de torque, esta EGP apresentou uma melhoria nos resultados quando comparada às demais EGPs que utilizam o MCI como principal fonte propulsora. De

acordo com a Figura 5.20 pode-se observar que o MCI ainda opera em regiões de elevado consumo específico, abaixo de 20 Nm, o que faz com que o VEH apresente um consumo elevado face às EGPs que possuem o ME como principal fonte propulsora.

Da mesma forma que a EGP anterior, esta também possui uma degradação no desempenho, devido a limitação da abertura da borboleta (Figura 5.19). A bateria tem comportamento similar à estratégia anterior (Figura 5.21) e ainda considerando-se que a bateria tenha uma carga inicial de 55%, ou seja, ($DOD=0.45$), não é constatado nenhuma alteração em relação ao consumo de combustível tomando-se o ciclo de condução urbano. Tal comportamento também é justificado pela limitação da abertura da borboleta.

Tabela 5.7 - Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação, abertura de borboleta e torque de saída limitados.

Massa total do veículo (kg)	Consumo no ciclo urbano (l)	Valor km/l
1120	0,4863	24,67
1260	0,4851	24,73
1400	0,486	24,69

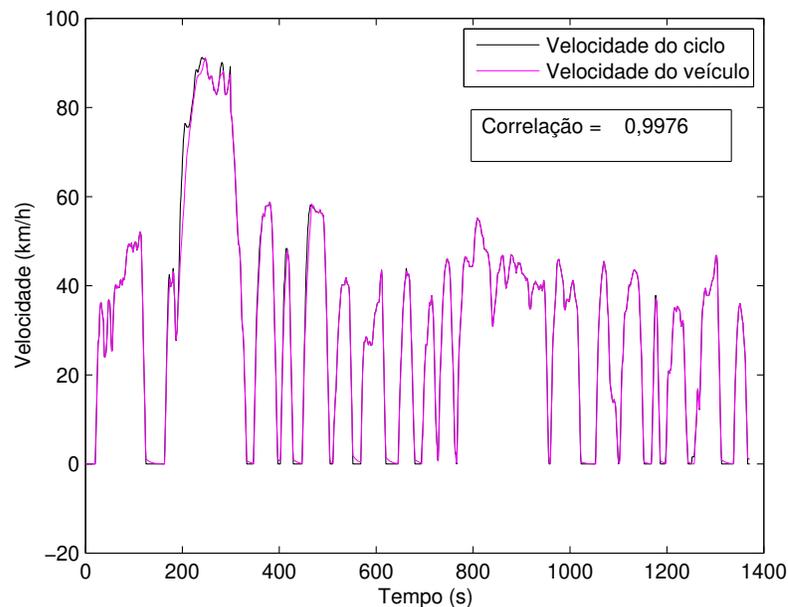


Figura 5.19 - Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação, abertura de borboleta e torque de saída limitados.

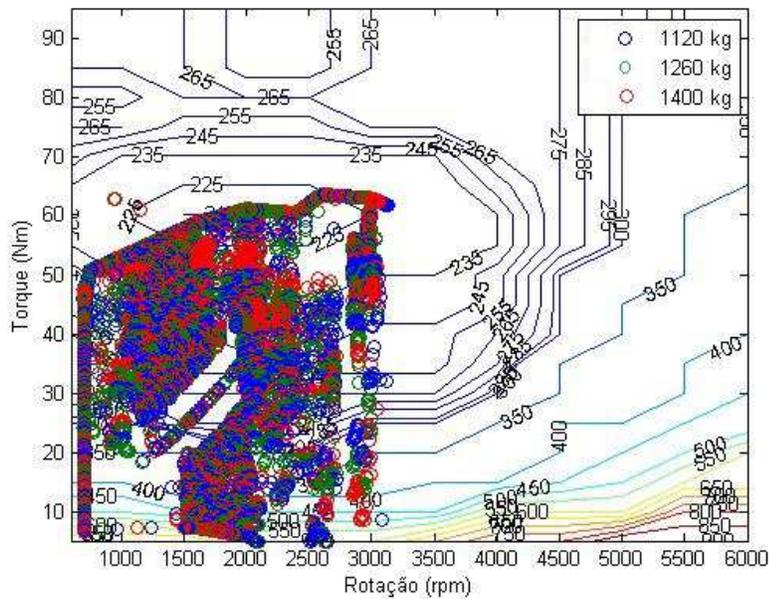


Figura 5.20 - Dispersão do consumo específico do MCI do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação, abertura de borboleta e torque de saída limitados.

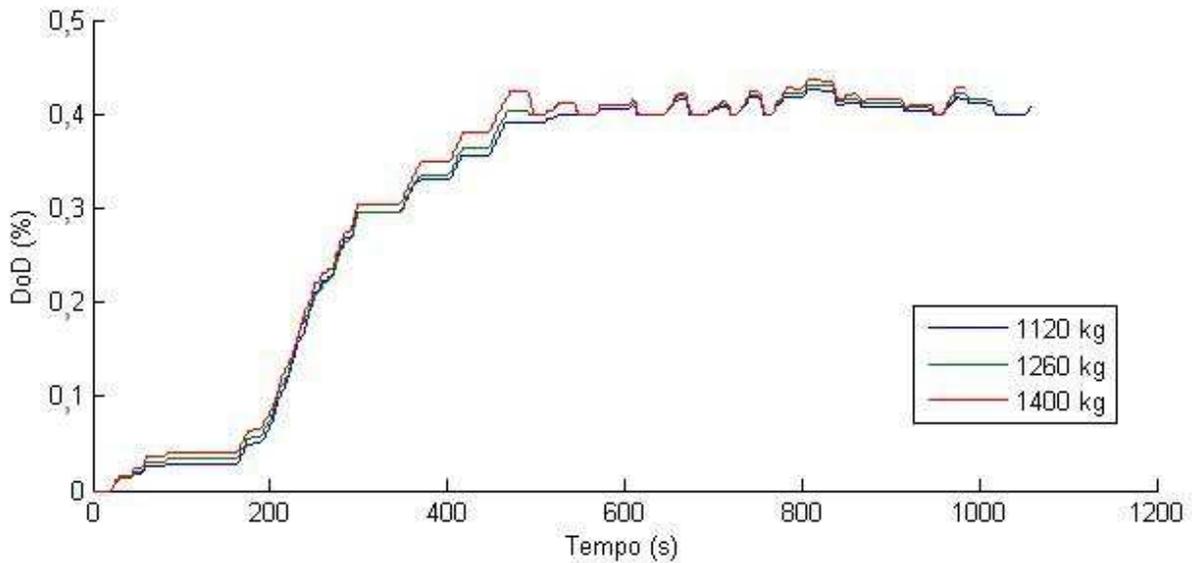


Figura 5.21 - Comportamento do DOD da bateria do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI como principal fonte propulsora com faixa de rotação, abertura de borboleta e torque de saída limitados.

5.3 EGP com regeneração baseado em *Fuzzy*

Esta EGP foi elaborada através da lógica *fuzzy* e o consumo obtido para o ciclo urbano NBR6601 pode ser visto na Tabela 5.8. O consumo se eleva quando a massa do VEH é acrescida, porém em relação às demais EGPs analisada até o momento, esta apresenta uma melhor economia de combustível, fato este que pode ser melhor compreendido quando observada a Figura 5.23 que mostra a dispersão do consumo específico no mapa de consumo. Através desta figura percebe-se que o MCI opera em uma região de menor consumo específico, justificando assim a economia de combustível.

Além dessa EGP possuir uma boa economia de combustível, o desempenho também é adequado, sendo que o VEH consegue seguir o ciclo durante todo o trajeto (Figura 5.22).

Já a bateria sofre descarga até o limite máximo em 300 segundos, e após os 300 segundos, a bateria oscila entre os limites máximo e mínimo de carga e descarga, devido a sua constante solicitação decorrente da operação do ME (Figura 5.24). Porém, a bateria, e conseqüentemente o ME, são solicitados com uma menor frequência frente à EGP baseada em regras, de modo que a EGP baseada em *fuzzy* realiza um melhor gerenciamento das fontes propulsoras. O comportamento da bateria permanece praticamente inalterado mesmo variando-se a massa do VEH.

Quando a bateria possui carga inicial de 55%, o consumo de combustível é maior, passando de 0,4439 l para 0,47 l durante o no ciclo urbano, já que, nesta condição, a bateria encontra-se restrita para fornecer energia para o ME operar como fonte propulsora.

Tabela 5.8 - Consumo de combustível do VEH com EGP baseada em *fuzzy*.

Massa total do veículo (kg)	Consumo no ciclo urbano (l)	Valor km/l
1120	0,4439	27,03
1260	0,4629	25,92
1400	0,481	24,94

A Figura 5.25 mostra um gráfico comparando-se todas as EGPs aqui elaboradas, tal comparação é realizada em função à alteração do número de passageiros, como descrito anteriormente.

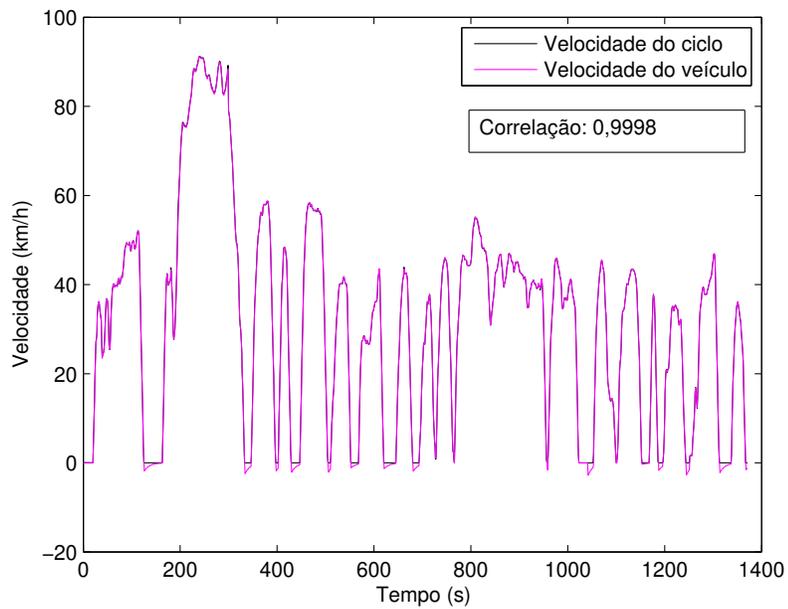


Figura 5.22 - Correlação dos perfis de velocidade do ciclo urbano e do VEH com EGP baseada em *fuzzy*.

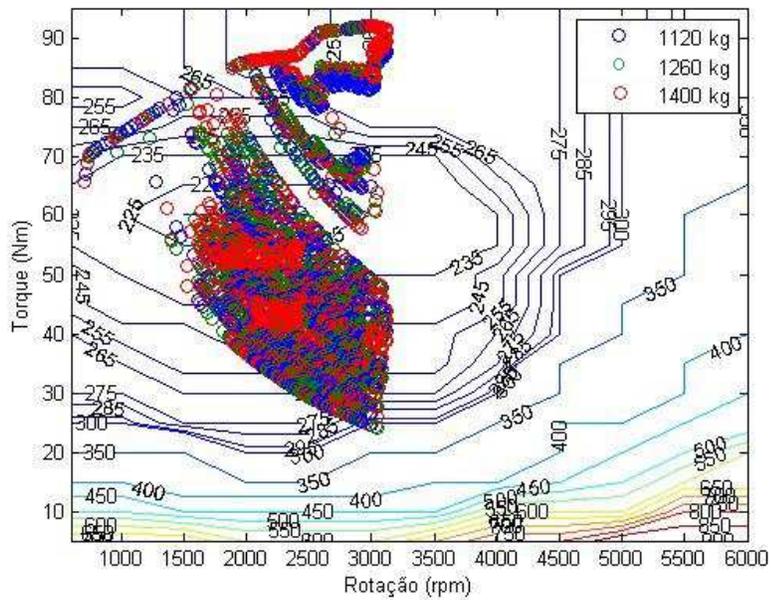


Figura 5.23 - Dispersão do consumo específico do MCI para o VEH com EGP baseada em *fuzzy*

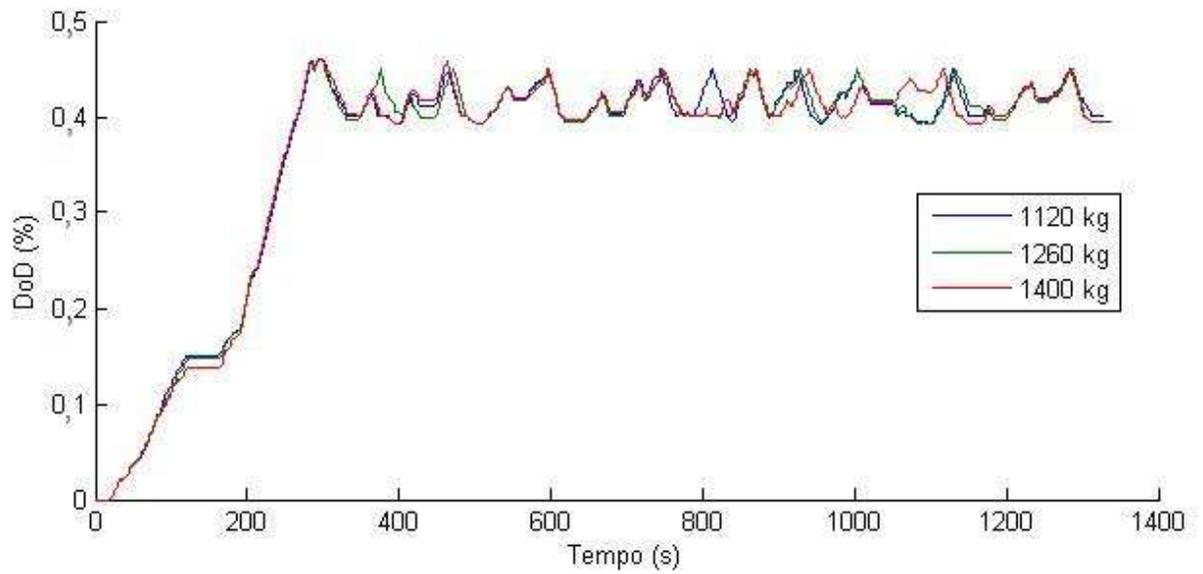


Figura 5.24 - Comportamento do *DoD* da bateria do VEH com EGP baseada em *fuzzy*

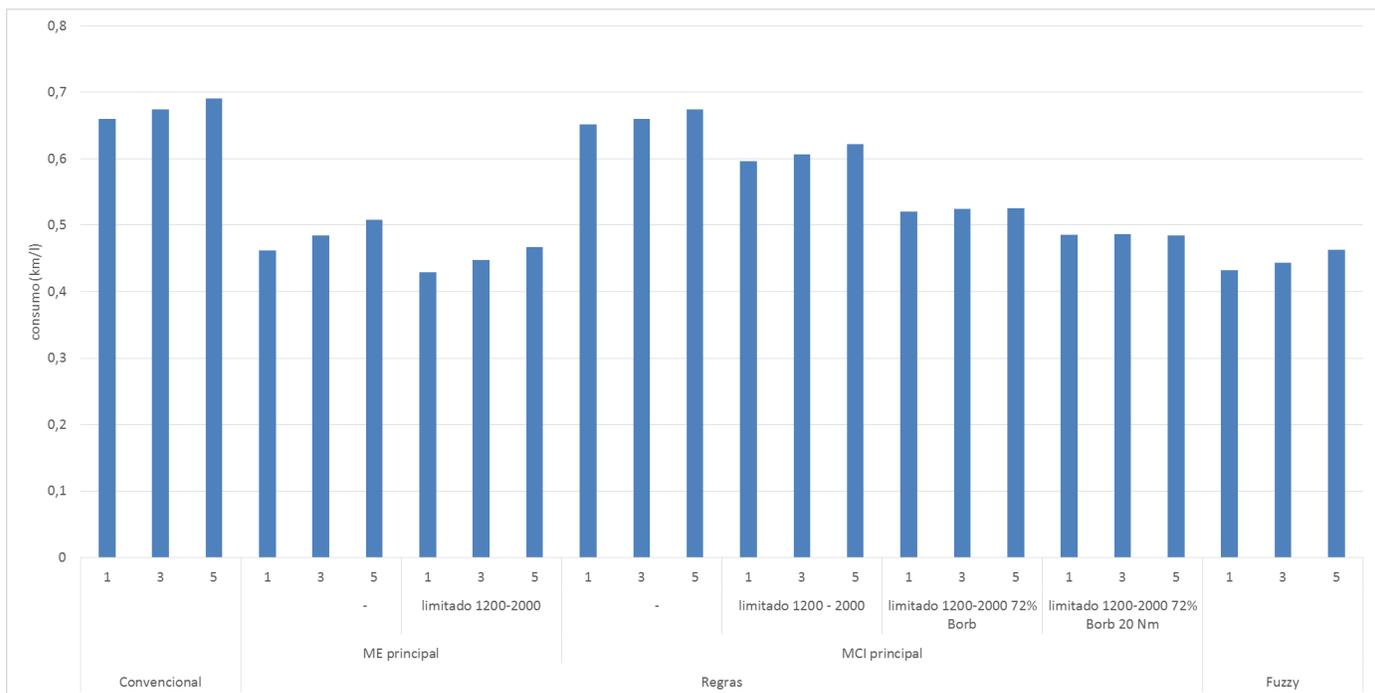


Figura 5.25 - Comparativo das EGPs desenvolvidas para o ciclo urbano

5.4 Análise das EGPs no ciclo rodoviário NBR7024

Com o intuito de se obter o comportamento das EGPs durante o ciclo de condução rodoviário NBR7024 tomou-se as EGPs que apresentaram melhores resultados em termos de economia de combustível quando utilizado o ciclo urbano. A Tabela 5.9 mostra o consumo de combustível para cada EGP analisada no ciclo rodoviário, sendo que este ciclo possui 16 km em 767 segundos conforme visto no capítulo anterior. Conforme pode ser visto pela Tabela 5.9, o consumo no ciclo rodoviário foi alto quando comparado ao ciclo urbano, fato este que é oriundo pela presença de forças resistivas maiores no ciclo rodoviário. Além disso, o ciclo rodoviário possui velocidades elevadas, na faixa de 110 Km/h, e poucos instantes de desaceleração, assim o ME será poucas vezes recarregado, ocasionando em uma redução do auxílio prestado do ME ao MCI para tracionar o veículo.

Tabela 5.9 - Consumo de combustível das EGPs para seguir o ciclo rodoviário NBR7024.

Estratégia abordada	Consumo no ciclo rodoviário (l)	Valor km/l
Veículo convencional	1,18	13,5
EGP com regras com ME e rotação limitada	1,17	13,67
EGP com regras com MCI e todos parâmetros limitados	0,9033	17,71
Fuzzy com troca de marchas de acordo com o fabricante	1,081	15,26

Os valores de consumo de combustível para o ciclo rodoviário é justificado pelas Figura 5.26 e Figura 5.27, que mostram a dispersão do consumo específico para cada EGP. Na Figura 5.26 são visualizadas as dispersões do veículo convencional e do VEH com EGP baseada em regras com o ME como principal fonte propulsora e rotação do MCI limitado, onde é possível verificar que o veículo convencional possui consumo específico em regiões de maior consumo, já o VEH com EGP baseada em regras possui consumo específico em regiões de menor consumo. A Figura 5.27 mostra a dispersão do VEH com as EGPs baseada em regras quando o MCI é a principal fonte propulsora e com limitação na rotação, abertura de borboleta e também no torque de saída, no mesmo gráfico tem-se a dispersão da EGP baseada em *fuzzy*, no qual percebe-se que a dispersão da EGP baseada em *fuzzy* ocupa uma região de menor consumo específico. A EGP baseada em regras com o ME como principal fonte propulsora resulta em pouca economia de combustível para o ciclo rodoviário comparando-se com o consumo do veículo convencional, já que na maior parte do tempo

o VEH estará utilizando potência do MCI, devido às grandes acelerações características desse ciclo de condução utilizar a energia armazenada da bateria, e quando a bateria atinge seu ponto máximo de descarga (*DOD*) há poucas desacelerações para se realizar a frenagem regenerativa e assim carregar a bateria. Neste caso, esta EGP não se revela eficiente para o ciclo rodoviário.

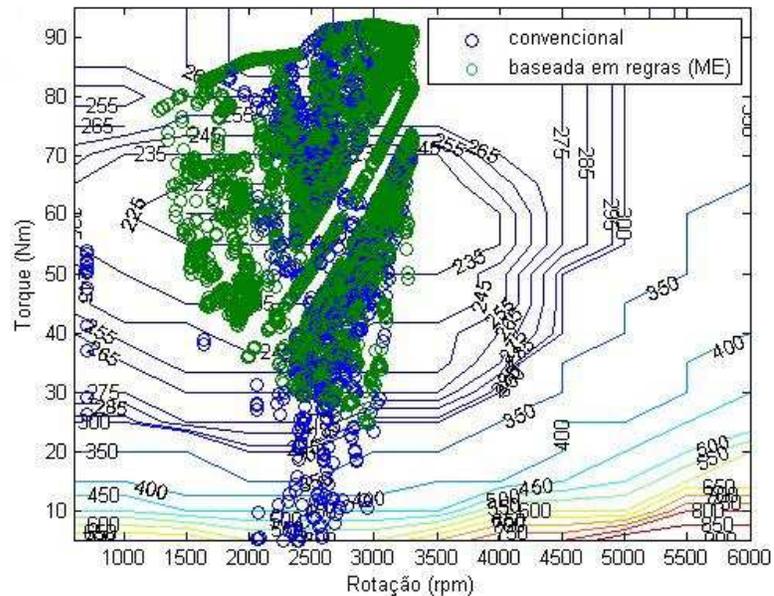


Figura 5.26 - Dispersão do consumo específico do MCI para o VEH com EGP baseada em regras (ME) e para o veículo convencional.

Considerando-se o ciclo de condução rodoviário NBR7024 tem-se que a EGP baseada em regras com o MCI como principal fonte propulsora e contendo o MCI com todos os parâmetros limitados (rotação, abertura de borboleta e torque) e a EGP baseada em *fuzzy* possuem os melhores resultados para a redução de consumo de combustível. Porém, de acordo com a Figura 5.28, a EGP baseada em regras e com os parâmetros do MCI limitados apresenta uma degradação no desempenho, novamente isso ocorre devido à limitação de abertura da borboleta, porém resulta em uma excelente economia de combustível. A EGP baseada em regras consegue seguir adequadamente o ciclo de condução rodoviário e ainda apresenta uma considerável economia de combustível (Figura 5.29).

Por meio da Figura 5.30 observa-se o comportamento da bateria utilizando-se a EGP baseada em regras e com o MCI com parâmetros limitados, e a Figura 5.31 mostra o comportamento da bateria utilizando-se a EGP baseada em *fuzzy*. Percebe-se que a EGP baseada em *fuzzy* atinge a máxima descarga em menor tempo, quando comparado com a bateria da EGP baseada em regras,

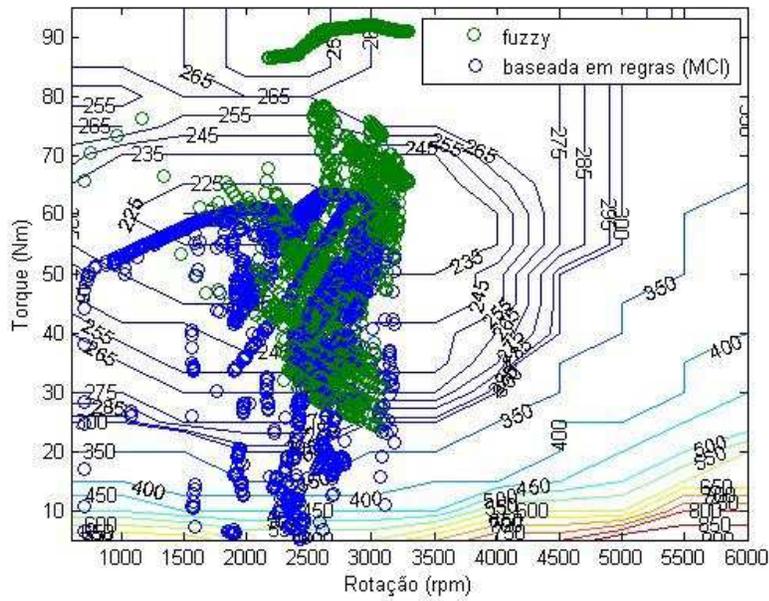


Figura 5.27 - Dispersão do consumo específico do MCI para o VEH com EGP baseada em *fuzzy* e com EGP baseada em regras (MCI)

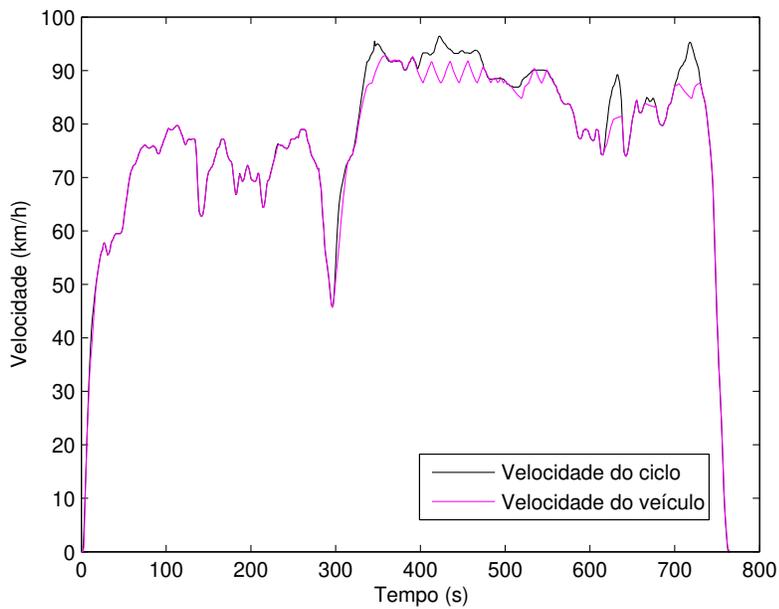


Figura 5.28 - Correlação entre as velocidades do ciclo e do VEH com EGP baseada em regras e com o MCI com parâmetros limitados.

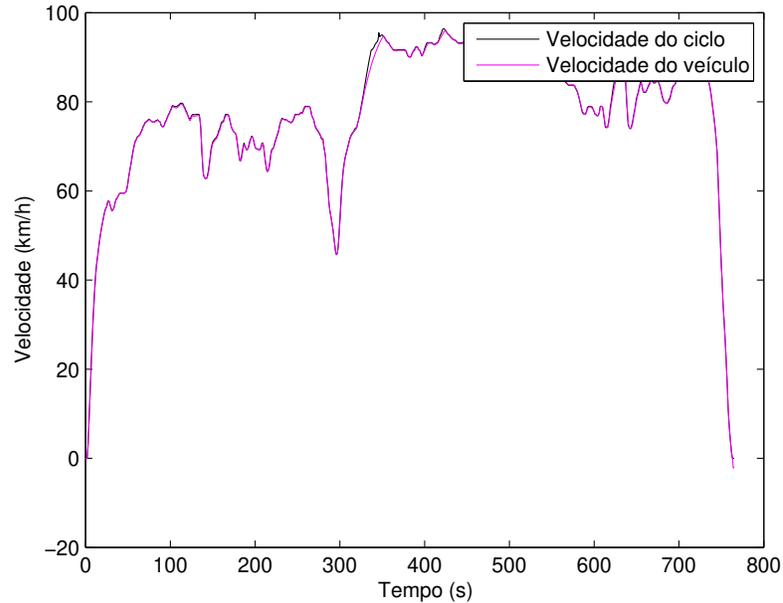


Figura 5.29 - Correlação entre as velocidades do ciclo e do VEH com EGP baseada em *fuzzy*

o que implica em dizer que o ME foi utilizado com maior frequência no início do ciclo rodoviário. Além disso, a bateria da EGP baseada em regras apresenta constantes oscilações, isso se deve ao fato desta EGP sempre aproveitar os poucos momentos de frenagem para carregar a bateria, já a bateria da EGP baseada em *fuzzy* apresenta poucas oscilações, sendo que tal comportamento implica em menos frequentes processos de carregamento da bateria dada pela própria EGP.

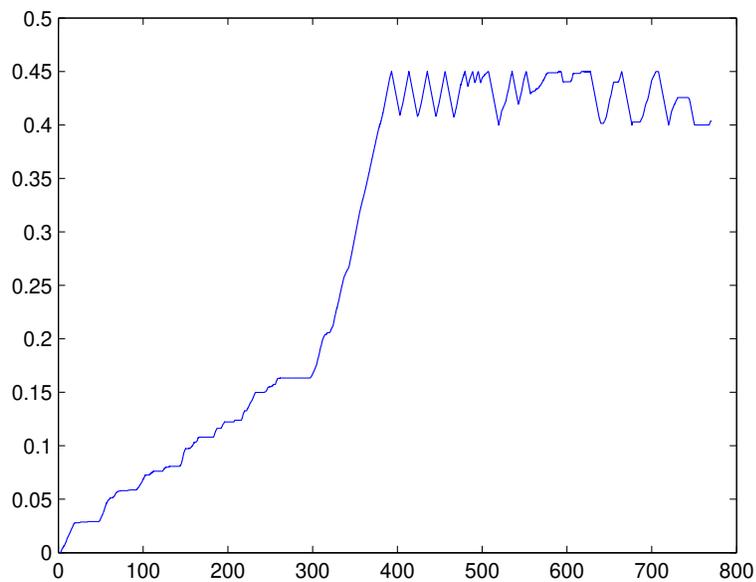


Figura 5.30 - Comportamento da bateria para o VEH seguir o ciclo rodoviário com a EGP baseada em regras e com o MCI com parâmetros limitados.

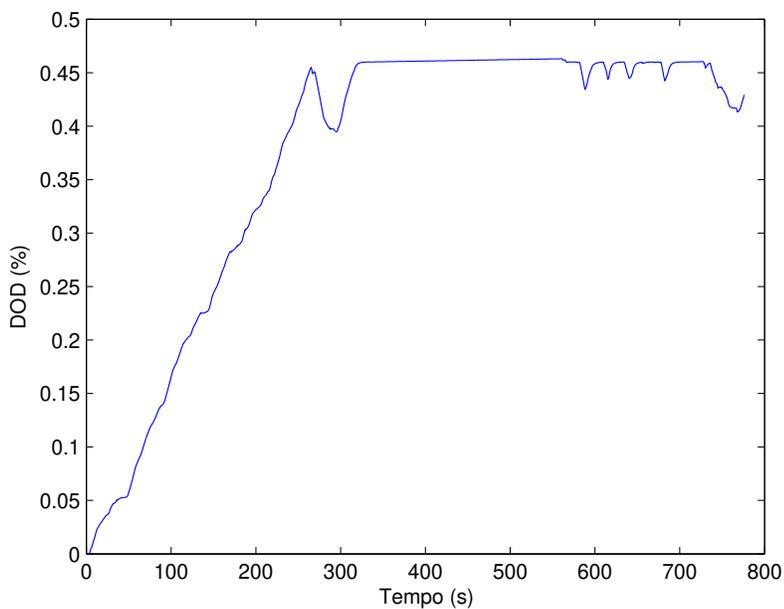


Figura 5.31 - Comportamento da bateria para o VEH seguir o ciclo rodoviário com a EGP baseada em *fuzzy*

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

No Capítulo 2 foi introduzido um histórico do VE e do VEH bem como as configurações dos VEHs e a revisão da literatura das EGPs. Já no capítulo 3 mostrou-se uma revisão teórica das partes fundamentais do VEH como a dinâmica veicular, MCI, ME e baterias, com o intuito de apresentar o embasamento teórico necessário para se modelar esses sistemas.

No capítulo 4 foram abordadas e definidas as modelagens dos sistemas e subsistemas do VEH de configuração paralelo estudado. A modelagem da dinâmica veicular consistiu no reconhecimento de subsistemas fundamentais como o MCI, ME, bateria, diferencial, rodas e sistemas de freios. O ME foi modelado de acordo com as equações dinâmicas apresentadas no Capítulo 3, para uma máquina elétrica CC com campo independente. Este foi capaz de atuar como gerador durante a frenagem do veículo recuperando uma parcela da potência, resultante da frenagem, utilizada no processo de recarga da bateria. Para todas as EGPs abordadas, a potência regenerada foi considerada a mesma de recarga das baterias e fixada em 8 kW. É importante ressaltar que essa potência somente foi utilizada quando alcançado o valor de $DoD_{máx}$ da bateria, e que toda a potência regenerada acima de 8 kW foi descartada.

As estratégias de gerenciamento de potência propostas foram elaboradas e ajustadas por meio de uma série de testes preliminares, em pavimento plano, a fim de que a bateria mantivesse - em todos os instantes de simulação - seu estado de carga e descarga dentro dos limites predeterminados.

A comparação da atuação das EGPs propostas diante as diferentes demandas de potência do veículo em operação no ciclo de condução NBR6601 e também do ciclo de condução NBR7024, para o pavimento plano, são dadas no Capítulo 5. Os resultados mostraram que a EGP fundamentada em sistemas *fuzzy* apresentou desempenho superior na utilização das fontes propulsoras no ciclo de condução NBR6601, resultando em menor consumo de combustível, em comparação às baseadas em regras, pois possibilita maior economia de combustível por permitir que o MCI opere em regiões de maior eficiência face o emprego das EGPs baseadas em regras.

Além disso, utilizando-se a otimização do MCI por meio da sua limitação de rotação é possível obter uma maior economia de combustível, pelo fato de se restringir o MCI a operar em regiões de menor consumo. Dentre as otimizações do MCI analisadas a que apresentou melhor resultado perante a economia de combustível foi a de limitação da rotação a 1200 a 2000 rpm. Limitando-se

a borboleta da borboleta, e o torque mínimo de saída do MCI é possível obter uma considerável redução no consumo de combustível, porém à custas da degradação de desempenho do veículo. Além disso, através da limitação de abertura da borboleta o consumo de combustível para o ciclo urbano mantevesse o mesmo quando utilizada uma bateria com 55% de carga, ao invés de 100%, sendo este comportamento justificado pela limitação de torque de saída proveniente da limitação da borboleta, porém o desempenho em seguir o ciclo imposto é prejudicado.

Quando utilizado o ciclo rodoviário NBR7024 como referência para condução do VEH, a EGP que apresentou melhores resultados foi a EGP baseada em regras e com o MCI atuando como principal fonte propulsora e com a rotação, abertura de borboleta, e torque de saída limitados, isso devido ao ciclo rodoviário ser caracterizado por grandes acelerações, e o MCI ter capacidade suficiente em fornecer potência para suprir a demanda. Desta forma, esta EGP utilizou na maior parte do tempo o MCI, porém com os parâmetros limitados, e utilizou o ME quando este seria necessário para que o consumo específico estivesse localizado em um região de menor consumo. Esta EGP também aproveitou todos os possíveis momentos de frenagem para carregar a bateria, deixando assim o ME de prontidão para fornecer potência quando solicitado.

Para as estratégias desenvolvidas e analisadas, de acordo com os perfis obtidos para o DoD em todas as simulações, pode-se observar que os limites de operação do DoD foram sempre obedecidos. Dessa forma, pode-se concluir que independente da EGP empregada não haverá descarga completa da bateria, e conseqüentemente o fornecimento de energia, não será comprometido diante a solicitação de potência do ME.

O modelo de VEH Paralelo desenvolvido pode servir de base para diversos trabalhos futuros, como também para o próprio aprimoramento do presente modelo. Neste contexto, podem ser realizados(as):

- Estudos mais completos de dinâmica longitudinal, bem como a inserção de modelos mais sofisticados que permitam o estudo da dinâmica vertical e lateral do veículo;
- Estudos referentes ao emprego de outras EGPs que utilizem otimização por programação dinâmica e de EGPs fundamentadas em métodos de otimização estática, por exemplo;
- Análises para a utilização de diferentes motores elétricos, geralmente utilizados como sistemas de propulsão, como os de corrente alternada, e conseqüentemente a utilização de inversores de potência.

REFERÊNCIAS

AKELLA, S.; SIVASHANKAR, N.; GOPALSWAMY, S. Model-based systems analysis of a hybrid fuel cell vehicle configuration. In: IEEE. **American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001.** [S.l.], 2001. v. 3, p. 1777–1782.

ANATONE, M. et al. Control-oriented modeling and fuel optimal control of a series hybrid bus. 2005. Society of Automotive Engineers, 400 Commonwealth Dr, Warrendale, PA, 15096, USA., 2005.

ANDERSON, C. D. J. **Electric and Hybrid Cars: a history.** [S.l.]: Jefferson: McFarland and Company, 2005.

BADIN, F. et al. Evaluation of a true low floor 12m series hybrid bus. **THE 16th**, 1999. 1999.

BARSALI, S.; CERAOLO, M. Dynamical models of lead-acid batteries: implementation issues. **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, 2002. IEEE, v. 17, n. 1, p. 16–23, 2002.

BERTSEKAS, D. **Dynamic programming and optimal control.** [S.l.]: Athena Scientific, 1996.

BOSCH, R. **Gasoline-Engine Management.** [S.l.]: Stuttgart, Germany, 1999.

BRAHMA, A.; GUEZENNEC, Y.; RIZZONI, G. Optimal energy management in series hybrid electric vehicles. In: IEEE. **American Control Conference, 2000. Proceedings of the 2000.** [S.l.], 2000. v. 1, n. 6, p. 60–64.

CACCIATORI, E.; VAUGHAN, N.; MARCO, J. Energy management strategies for a parallel hybrid electric powertrain: Fuel economy optimisation with driveability requirements. In: IET. **Hybrid Vehicle Conference, IET The Institution of Engineering and Technology, 2006.** [S.l.], 2006. p. 157–172.

CERAOLO, M. New dynamical models of lead-acid batteries. **Power Systems, IEEE Transactions on**, 2000. IEEE, v. 15, n. 4, p. 1184–1190, 2000.

CERRUTO, E. et al. Energy flows management in hybrid vehicles by fuzzy logic controller. In: IEEE. **Electrotechnical Conference, 1994. Proceedings., 7th Mediterranean.** [S.l.], 1994. p. 1314–1317.

_____. Fuzzy logic based efficiency improvement of an urban electric vehicle. In: IEEE. **Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994. IECON'94., 20th International Conference on.** [S.l.], 1994. v. 2, p. 1304–1309.

CHAU, K.; CHAN, C.; LIU, C. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 2008. IEEE, v. 55, n. 6, p. 2246–2257, 2008.

CIPOLLONE, R.; SCIARRETTA, A. Analysis of the potential performance of a combined hybrid vehicle with optimal supervisory control. In: IEEE. **Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2006 IEEE.** [S.l.], 2006. p. 2802–2807.

CORRÊA F.C.; SILVA, L. e. D. F. Fuzzy control for hybrid vehicle. In: **21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering.** [S.l.: s.n.], 2011.

DELGADO, A. C. **Algoritmo para Frenagem Regenerativa de uma Máquina Síncrona de Imã Permanente.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2010.

DESARKAR, M. S. et al. **Case study of design of an Engine Control Unit.** 2004.

ECKERT, J. J. **Análise Comparativa entre os Métodos de Cálculo da Dinâmica Longitudinal em Veículos.** Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, 2013.

EHSANI, M. et al. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, 2004.** [S.l.]: CRC Press, 2004.

EHSANI, M.; RAHMAN, K. M.; TOLIYAT, H. A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 1997. IEEE, v. 44, n. 1, p. 19–27, 1997.

FARRALL, S.; JONES, R. Energy management in an automotive electric/heat engine hybrid powertrain using fuzzy decision making. In: IEEE. **Intelligent Control, 1993., Proceedings of the 1993 IEEE International Symposium on.** [S.l.], 1993. p. 463–468.

FERRAZ, C.; DONHA, D. **Sistemas controlados de propulsão de veículos automotores.** [S.l.]: EPUSP, 2006.

FITZGERALD, A.; JR, C. K.; KUSKO, A. Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas. **São Paulo: MacGraw-Hill**, 1975. 1975.

FRIEDMAN, D. A new road: the technology and potential of hybrid vehicles. 2003. 2003.

GEERING, H. **Optimal control with engineering applications**. [S.l.]: Springer Verlag, 2007.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1992.

GU, B.; RIZZONI, G. An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management based on driving pattern recognition. In: ASME. [S.l.], 2006.

HE, X.; PARTEN, M.; MAXWELL, T. Energy management strategies for a hybrid electric vehicle. In: IEEE. **Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference**. [S.l.], 2005. p. 390–394.

HOFMAN, T. et al. Rule-based energy management strategies for hybrid vehicles. **International Journal of Electric and Hybrid Vehicles**, 2007. Inderscience, v. 1, n. 1, p. 71–94, 2007.

JALIL, N.; KHEIR, N.; SALMAN, M. A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle. In: IEEE. **American Control Conference, 1997. Proceedings of the 1997**. [S.l.], 1997. v. 1, p. 689–693.

KENJÓ, T.; NAGAMORI, S. **Permanent-magnet and brushless DC motors**. [S.l.]: Clarendon Press (Oxford and New York), 1985.

LARMINIE, J.; LOWRY, J.; NETLIBRARY, I. **Electric vehicle technology explained**. [S.l.]: Wiley Online Library, 2003.

LEE, H. et al. Torque control strategy for a parallel-hybrid vehicle using fuzzy logic. **Industry Applications Magazine, IEEE**, 2000. IEEE, v. 6, n. 6, p. 33–38, 2000.

LIN, C. et al. Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck. In: IEEE. **American Control Conference, 2001. Proceedings of the 2001**. [S.l.], 2001. v. 4, p. 2878–2883.

_____. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on**, 2003. IEEE, v. 11, n. 6, p. 839–849, 2003.

LOPES, J. **Estratégias de Gerenciamento de Potência em Ônibus de Transporte Urbano Elétrico Híbrido Série**. Tese (Doutorado) — Dissertação (Engenharia Mecânica/EESC): Universidade de São Paulo, 2008.

MILHOR, C. E. **Sistema de Desenvolvimento para Controle Eletrônico dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP)., 2002.

MUSARDO, C. et al. A-ecms: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. **European Journal of Control**, 2005. Godalming, Surrey, UK: Springer-Verlag London Ltd., c1995-. , v. 11, n. 4-5, p. 509, 2005.

NETO, A. C. **Dinâmica Veicular**. [S.l.]: S.I. s. n, 2003.

NOCE, T. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2009.

OLIVEIRA, E. C. de. **Modelagem e simulação de veículos elétricos híbridos**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da USP, 2005.

PAGANELLI, G. et al. Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering**, 2000. Prof Eng Publishing, v. 214, n. 7, p. 705–717, 2000.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An introduction to fuzzy sets: analysis and design**. [S.l.]: the MIT Press, 1998.

PÉREZ, L. et al. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. **Mathematics and Computers in Simulation**, 2006. Elsevier, v. 73, n. 1-4, p. 244–254, 2006.

PHILLIPS, A.; JANKOVIC, M.; BAILEY, K. Vehicle system controller design for a hybrid electric vehicle. In: IEEE. **Control Applications, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2000. p. 297–302.

PISU, P.; RIZZONI, G. A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on**, 2007. IEEE, v. 15, n. 3, p. 506–518, 2007.

PONTRYAGIN V. BOLTYANSKII, R. G. e. E. M. L. **The mathematical theory of optimal processes.** [S.l.]: CRC, 1986.

QUEIROZ, J. de F. **Introdução do veículo híbrido no Brasil: evolução tecnológica aliada à qualidade de vida.** Tese (Doutorado), 2006.

REVOREDO, T. **Modelagem e Gerenciamento de Potência de um Veículo Elétrico Híbrido de Célula a combustível.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

RIBBENS, W. B. **Understanding Automotive Electronics.** [S.l.]: Sams Publishing, 1995.

RIZOULIS, D.; BURL, J.; BEARD, J. **Control strategies for a series-parallel hybrid electric vehicle.** Dissertação (Mestrado) — Michigan Technological University, 2000.

ROUSSEAU, G.; SINOQUET, D.; ROUCHON, P. Constrained optimization of energy management for a mild-hybrid vehicle optimisation sous contraintes de la répartition d'énergie d'un véhicule de type micro-hybride. **Revue Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP**, 2007. v. 62, n. 4, 2007.

SCHOUTEN, N.; SALMAN, M.; KHEIR, N. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on**, 2002. IEEE, v. 10, n. 3, p. 460–468, 2002.

SERRAO, L.; ONORI, S.; RIZZONI, G. A comparative analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 2011. v. 133, p. 031012, 2011.

SERRAO, L.; RIZZONI, G. Optimal control of power split for a hybrid electric refuse vehicle. In: IEEE. **American Control Conference, 2008.** [S.l.], 2008. p. 4498–4503.

SIMÕES, M. G. Controle e modelagem fuzzy. 1999. 1999.

TOYOTA. Fuel systems: Injection duration controls. In: **Toyota Motor Sales.** [S.l.]: USA, 2001.

_____. Fuel systems overview. In: **Toyota Motor Sales.** [S.l.]: USA, 2001.

WAKEFIELD, E. **History of the electric automobile.** [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1994.

WALLMARK, O. **On control of permanent-magnet synchronous motors in hybrid-electric vehicle applications.** Tese (Doutorado) — Chalmers tekniska högsk., 2004.

WALTERMANN, P. Modelling and control of the longitudinal and lateral dynamics of a series hybrid vehicle. In: IEEE. **Control Applications, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on.** [S.l.], 1996. p. 191–198.

WANG, A.; YANG, W. Design of energy management strategy in hybrid electric vehicles by evolutionary fuzzy system part ii: Tuning fuzzy controller by genetic algorithms. In: IEEE. **Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on.** [S.l.], 2006. v. 2, p. 8329–8333.

_____. Design of energy management strategy in hybrid vehicles by evolutionary fuzzy system part i: Fuzzy logic controller development. In: IEEE. **Intelligent Control and Automation, 2006. WCICA 2006. The Sixth World Congress on.** [S.l.], 2006. v. 2, p. 8324–8328.

WEI, X. et al. Model-based fuel optimal control of hybrid electric vehicle using variable structure control systems. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, 2007. v. 129, p. 13, 2007.

WESTBROOK, M. **The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars.** [S.l.]: Iet, 2001.