

JULIANA LOPES

Estratégias de Gerenciamento de Potência em Ônibus de Transporte Urbano Elétrico Híbrido Série

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Costa Neto

São Carlos

2008

*Aos meus Pais Manoel e Lourdes... aos
meus Irmãos Paulo e Renato...*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao Prof. Álvaro Costa Neto pela orientação, oportunidade, e amizade durante todo o tempo de convivência no mestrado.

Agradeço aos meus pais pelo apoio e confiança depositados em mim desde sempre, ao meu irmão Paulo que por muitas vezes mostrou-me passos já trilhados e muitos ainda seguidos.

Aos amigos, tão especiais e importantes em minha vida: Miryam, Tatiane, Olívia, Lidiane e Carlos por todos os momentos vividos, pelas idéias discutidas e pela amizade incondicional.

Aos professores, dos quais muitos ainda reinam em minhas idéias – em especial aos Professores Chiquito e Márcio – e amigos do curso de Física da Universidade Federal de São Carlos pela duradoura amizade e convivência.

Aos professores, Canale, Diógenes e Zilda, e ao amigo Wesley pela especial atenção em momentos decisivos deste trabalho e aos funcionários da USP-EESC pela amizade e prestatividade durante todo este período.

À minha cidade, São Carlos, por toda a infraestrutura universitária que tornou possível a realização de tantos planos.

E à CAPES pelo indispensável apoio financeiro durante a vigência do mestrado.

*“Heaven on Earth
We need it now
I'm sick of all of this
Hanging around
Sick of sorrow
Sick of pain
Sick of hearing again and again
That there's gonna be
Peace on Earth...*

*...Jesus could you take the time
To throw a drowning man a line
Peace on Earth
Tell the ones who hear no sound
Whose sons are living in the
ground
Peace on Earth
No whos or whys
No-one cries like a mother cries
For peace on Earth
She never got to say goodbye
To see the colour in his eyes
Now he's in the dirt
Peace on Earth...”*

Paul David Hewson

Resumo

LOPES, J. **Estratégias de Gerenciamento de Potência em Ônibus de Transporte Urbano Elétrico Híbrido Série**. 2008. 178 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Unidades propulsoras híbrido elétricas são uma alternativa em potencial para a redução do consumo de combustível e emissões de poluentes, quando empregadas em veículos de transporte público. A configuração híbrido elétrica de interesse é a série, na qual as fontes de potência, para o motor elétrico de tração, são compostas por um banco de baterias e uma unidade formada pela junção entre um motor à combustão interna e um gerador. Na presente Dissertação foi realizada a modelagem de um veículo elétrico híbrido série na qual diferentes estratégias de gerenciamento de potência foram investigadas. Dentre as estratégias de interesse, duas são fundamentadas em regras e a terceira em sistemas *fuzzy*. Resultados obtidos comprovaram que a fundamentada em sistemas *fuzzy* possibilita maior economia de combustível, permitindo que o motor à combustão interna forneça menos potência, face o emprego das baseadas em regras. Dessa forma, a utilização de sistemas *fuzzy* no gerenciamento de potência do veículo, permite o emprego de um motor à combustão menos potente, de menor custo, sem o comprometimento do desempenho do veículo. As simulações do presente modelo de veículo híbrido foram realizadas no ambiente Matlab/Simulink® 7.3.0.

Palavras-chave: veículo híbrido elétrico, veículo híbrido elétrico série, estratégia de gerenciamento de potência, sistemas fuzzy, dinâmica longitudinal.

Abstract

LOPES, J. **Energy Management Strategy in Series Hybrid Electric Urban Bus**. 2008. 178 p. Dissertation (Master's degree) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

Hybrid electric propulsion units are a potential alternative to the reduction of fuel consumption and pollutant emissions, when used in public transport vehicles. The electric hybrid configuration of interest is the series, in which the energy supplies to the traction electric motor are composed of batteries and a unit represented by the connection of an internal combustion engine and a generator. This Dissertation presents the modeling of a series hybrid electric vehicle in which different energy management strategies were investigated. Among the strategies of interest, two are based on rules and one on fuzzy systems. The obtained results proved that the strategy based on fuzzy systems improved the fuel economy, allowing the internal combustion engine to supply less power than the use of the strategies based on rules. Therefore, the use of fuzzy systems in the energy management of the vehicle allows for the adoption of a less potent and cheaper internal combustion engine, without compromising the vehicle's performance. The simulations of the present model of the hybrid electric vehicle were performed in the Matlab/Simulink® 7.3.0 environment.

Keywords: hybrid electric vehicle, series hybrid electric vehicle, energy management strategy, fuzzy systems, longitudinal dynamic.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Carro elétrico-gasolina Krieger.....	43
Figura 2.2 - Porsche nº1 Lohner-Wagen de 1900 com dois MEs nas rodas dianteiras.....	44
Figura 2.3 - Um dos primeiros veículos híbridos projetado por Ferdinand Porsche chamado Mixt-Wagen.....	44
Figura 2.4 - Disposição típica do <i>drivetrain</i> de um veículo eletromecânico híbrido com volante de inércia.....	50
Figura 2.5 - Disposição do <i>drivetrain</i> de um veículo eletromecânico híbrido com acumulador hidráulico.....	50
Figura 2.6 - Disposição típica do <i>drivetrain</i> de um VEH Série.....	52
Figura 2.7 - Disposição típica do <i>drivetrain</i> de um VEH Paralelo.....	53
Figura 2.8 - Disposição típica do <i>drivetrain</i> de um VEH Série-Paralelo.....	55
Figura 2.9 - Motores elétricos CC com campo de enrolamento em série (series), a; em derivação (shunt), b; e o com campo independente (separately excited), c.....	57
Figura 2.10 - Diagrama de Ragone para as diferentes fontes de energia apontadas em termos de densidade de energia e densidade de potência.....	66
Figura 2.11 - Regras utilizadas para a estratégia de gerenciamento de energia denominada “Power Split” em VEHs Série.....	81
Figura 2.12 - Bloco esquemático representando o fluxo de potência em VEHs.....	82
Figura 3.1 - Representação de um diagrama em blocos do fluxo de energia em um VEH Série em que as setas com duplo sentido indicam o fluxo de energia entre os sistemas....	86
Figura 3.2 - Sistema de coordenadas SAE.....	87
Figura 3.3 - Modelo do Power Train para um VEH Série.....	89
Figura 3.4 - Forças agindo em um veículo durante frenagem.....	96
Figura 3.5 - Vista em corte transversal de um motor elétrico CC.....	103

Figura 3.6 - Regra da mão-esquerda de Fleming.....	104
Figura 3.7 - Bobina sob a ação de um campo magnético.....	105
Figura 3.8 - Distribuição do fluxo de campo e da corrente no rotor.....	105
Figura 3.9 - Circuito equivalente para um motor de C.C. com ímãs permanentes.....	108
Figura 3.10 - Torque versus velocidade angular de um motor elétrico CC.....	109
Figura 3.11 - Direção da corrente e magnitude da f_{cem} na ação regenerativa.....	110
Figura 3.12 - Representação esquemática de uma máquina de C.C. mostrando as direções de referência um motor (a) e para um gerador (b).....	112
Figura 3.13 - Superfície de torque de um MCI em função da velocidade de rotação “n” e da posição da <i>throttle</i> “ α ”.....	116
Figura 3.14 - Exemplo de um modelo simplificado de circuito para uma bateria em que R é a resistência interna; E, a tensão de circuito aberto; I a corrente e v a tensão de alimentação.....	117
Figura 3.15 - Gráfico da tensão de circuito aberto, E, em função da profundidade de descarga, DoD, para uma bateria de ácido e chumbo.....	117
Figura 4.1 - Diagrama em blocos das equações elétricas e dinâmicas para um motor C.C. com campo independente.....	125
Figura 4.2 - Ciclos de condução ECE 15 (a) e NYCCCOL (b), e perfil de inclinação do pavimento (c).....	130
Figura 4.3 - Distribuição da força de frenagem entre os eixos dianteiro e traseiro para desaceleração máxima de 8.82 m/s^2	131
Figura 4.4 - Diagrama em blocos do sistema em malha fechada, com motorista e dinâmica do veículo.....	133
Figura 4.5 - Representação em diagrama de blocos para o gerenciamento da APU.....	135
Figura 4.6 - Entradas e Saídas do modelo da bateria proposto.....	136
Figura 4.7 - EGP sem regeneração para um VEH Série.....	139
Figura 4.8 - EGP com regeneração da frenagem do veículo para um VEH Série.....	141

Figura 4.9: Representação em diagrama de blocos para a EGP fundamentada em sistemas fuzzy.....	142
Figura 4.10: Representação esquemática de um controlador fuzzy.....	142
Figura 4.11: Representação das variáveis de entrada, P_{dem} (a), DoD (b), e de saída, P_{APU} (c) em função dos conjuntos fuzzy.....	145
Figura 4.12 - Diagrama em blocos para a representação do VEH Série estudado.....	147
Figura 4.13 - Ciclo de condução europeu, ECE 15, (a), e respectivos perfis de potência de demanda (b), de demanda média (c), de demanda dinâmica (d) e composição de (c) e (d) originando (b) como mostrado em (e).....	149
Figura 4.14 - Ciclo de condução NYCCCOL (a), e respectivos perfis de potência de demanda (b), de demanda média (c), de demanda dinâmica (d) e composição de (c) e (d) originando (b) como mostrado em (e).....	150
Figura 5.1 - Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo ECE15 sem regeneração e em pavimento plano.....	154
Figura 5.2 - Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo ECE15 sem regeneração e em pavimento Inclinado.....	155
Figura 5.3 - Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo NYCCCOL sem regeneração e em pavimento plano.....	157
Figura 5.4 - Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo NYCCCOL sem regeneração e em pavimento Inclinado.....	158
Figura 5.5 - Perfil de Potência da APU para o Ciclo ECE15 em pavimento plano (a), e em pavimento inclinado (b), empregando EGP com e sem regeneração.....	160
Figura 5.6 - Perfil de Potência da APU para o Ciclo NYCCCOL em pavimento plano (a), e em pavimento inclinado (b), empregando EGP com e sem regeneração.....	160
Figura 5.7 - Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo ECE15 aplicando sistemas fuzzy em pavimento plano.....	161
Figura 5.8 - Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo ECE15 aplicando sistemas fuzzy em pavimento inclinado.....	163

Figura 5.9 - Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo NYCCCOL aplicando sistemas fuzzy em pavimento plano..... 164

Figura 5.10 - Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo NYCCCOL aplicando sistemas fuzzy em pavimento inclinado..... 165

Lista de Siglas

ADVISOR	<i>advanced vehicle simulator</i>
A-ECMS	<i>Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy</i>
APU	<i>Auxiliary Power Unit</i>
CA	Corrente Alternada
CARB	<i>California Air Resources Board</i>
CC	Corrente Contínua
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CG	Centro de Gravidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CVT	<i>Continuously Variable Transmission</i>
ECMS	<i>Equivalent Consumption Minimization Strategy</i>
EERE	<i>Energy Efficiency and Renewable Energy</i>
EGP	Estratégia de Gerenciamento de Potência
GNV	Gás Natural Veicular
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
MCI	Motor à Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
PD	Programação Dinâmica
PEM	<i>Proton-Exchange Membrane</i>
PI	Proporcional e Integral
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motocicletas
PSAT	<i>Powertrain System Analysis Toolkit</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineering</i>

SI	Sistema Internacional
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VE	Veículo Elétrico
ZEV	<i>Zero Emission Vehicle</i>

Lista de Símbolos

a_x	Aceleração longitudinal do veículo
A	Área frontal do veículo
b	Distância entre o eixo dianteiro e o CG
B	Soma das forças de frenagem atuantes nos eixos dianteiro (B_f) e traseiro (B_r)
B_d	Densidade do fluxo magnético
B_f	Força de frenagem nas rodas dianteiras
B_r	Força de frenagem nas rodas traseira
c	Distância entre o eixo traseiro e o CG
C_a	Coefficiente de arraste aerodinâmico
C_p	Capacidade de Peukert
CR	Carga removida da bateria
CS	Carga fornecida pela bateria
C_{10}	Capacidade em Ampère-hora para uma taxa de descarga de dez horas
D	Coefficiente de atrito viscoso (mancais e ventilação do motor)
DoD	Profundidade de descarga da bateria
$DoD_{máx}$	Limite máximo da profundidade de descarga da bateria
DoD_{min}	Limite mínimo da profundidade de descarga da bateria
Dx	Desaceleração na frenagem
$Dx_{máx}$	Desaceleração máxima na frenagem
E	Força eletromotriz
E_b	Tensão de circuito aberto da bateria
E_a	fcm do circuito de armadura
f	Coefficiente de resistência ao rolamento

f_f	Fator responsável pela distribuição da força de frenagem
F	Força
F_{te}	Força do sistema de tração do veículo
F_x	Força de tração transmitida ao pavimento pelas rodas
F_{xf}	Força de frenagem no eixo dianteiro
$F_{xmáx}$	Força de tração máxima transmitida ao pavimento pelas rodas
F_{xmf}	Máxima força de frenagem no eixo dianteiro
F_{xmr}	Máxima força de frenagem no eixo traseiro
F_{xr}	Força de frenagem no eixo traseiro
g	Aceleração gravitacional
G	Inclinação da pista em porcentagem
h	Altura do CG
I	Corrente elétrica
I_a	Corrente de armadura dos terminais do motor e igual a $2I$
I_c	Corrente do circuito de campo
I_e	Momento de inércia do <i>driveshaft</i>
I_w	Momento de inércia das rodas e dos <i>axle shafts</i>
J	Momento de inércia da carga mecânica que se opõe à rotação do motor
k	Coeficiente de Peukert
K	Constante do ME
K_e	Constante da força contra eletromotriz
K_T	Constante de torque do ME
L	Distância entre eixos
L_a	Auto-indutância do circuito de armadura
L_c	Auto-indutância do circuito de campo
L_d	Comprimento do condutor
m	Número de células da bateria

M	Massa do veículo
M_r	Massa equivalente das componentes do drivetrain em rotação
n	Velocidade de rotação do motor à combustão interna
N	Fator de redução do diferencial
P	Potência resultante da regeneração
P_{APU}	Potência solicitada à unidade de potência APU
$P_{APUmáx}$	Máxima potência solicitada à APU
P_{APUmin}	Mínima potência solicitada à APU
P_0	Potência da regeneração
P_b	Potência da bateria
P_{bcarga}	Potência máxima que pode ser absorvida pela bateria
P_{dem}	Potência de demanda
P_L	Potência dissipada em forma de calor
P_{ot}	Potência disponibilizada pela bateria
P_{perda}	Potência descartada
r	Raio da roda
r_a	Resistência do circuito de armadura
r_c	Resistência do circuito de campo
R	Resistência interna da bateria
R_a	Força de resistência do ar
R_d	Distância do eixo OO' para cada condutor
R_g	Força de resistência devido à inclinação do pavimento
R_r	Força de resistência ao rolamento
R_{rf}	Força de resistência ao rolamento nas rodas dianteiras
R_{rr}	Força de resistência ao rolamento nas rodas traseiras
R_{rt}	Força de resistência ao rolamento total
SoC	Estado de carga da bateria

t	Tempo
T	Torque do motor à combustão interna
T _a	Torque sobre os <i>axle shafts</i>
T _{carga}	Torque da carga mecânica que se opõe à rotação do motor
T _e	Torque do ME de tração e do <i>driveshaft</i>
T _{el}	Torque produzido pelo ME
T _{fmax}	Torque máximo de frenagem
T _{froda}	Torque de frenagem atuante em cada roda
v	Velocidade de um condutor sob a ação de um campo magnético.
v _c	Tensão terminal do circuito de campo
v _t	Tensão terminal do circuito de armadura
V	Tensão nos terminais do ME
V _b	Tensão nos terminais da bateria
V _{vel}	Velocidade longitudinal do veículo
W	Peso do veículo
W _f	Peso dinâmico no eixo dianteiro
W _{fs}	Peso estático sobre o eixo dianteiro
W _r	Peso dinâmico no eixo traseiro
W _{rs}	Peso estático sobre o eixo traseiro
Z	Número total de condutores
α	Posição da <i>throttle</i> em porcentagem
α _e	Aceleração angular do <i>driveshaft</i>
α _w	Aceleração angular das rodas
∅	Fluxo de campo magnético
η	Eficiência resultante do sistema de transmissão do <i>driveshaft</i> às rodas
μ	Máximo coeficiente de adesão e dado por $\frac{Dx}{g}$

μ_0	Coeficiente de atrito estático máximo
v	Razão h/L
θ	Ângulo de inclinação do pavimento em graus
ρ	Densidade do ar
Ω	Velocidade de rotação do ME
ξ	Razão b/L

Sumário

Cap. 1 - Introdução	31
1.1 - Motivação.....	32
1.1.1 - Poluição Veicular e Combustíveis Alternativos.....	33
1.1.2 - Normas de controle de Emissões no Brasil.....	35
1.1.3 - Benefícios da Propulsão Elétrica e Elétrico Híbrida.....	36
1.1.4 - Controle de Potência em VEHS.....	38
1.1.5 - Escopo da Dissertação.....	39
Cap. 2 - Revisão da Literatura	41
2.1 - História do Veículo Elétrico e Elétrico Híbrido.....	41
2.2 - Veículos com Unidades Propulsoras Híbridas.....	46
2.2.1 - Configurações de Veículos Híbridos.....	48
2.2.2 - Veículos Híbridos Puramente Elétricos.....	48
2.2.3 - Veículos Híbridos Eletromecânicos.....	49
2.2.4 - Veículos Híbridos com MCI e ME.....	51
2.2.5 - Veículo Elétrico Híbrido Série.....	52
2.2.6 - Veículo Elétrico Híbrido Paralelo.....	53
2.2.7 - Veículo Elétrico Híbrido Série-Paralelo.....	54
2.3 - Sistemas do VEH.....	55
2.4 - Motores Elétricos.....	55
2.4.1 - Motores Elétricos de Corrente Contínua.....	56
2.4.2 - Motores Elétricos com Campo de Enrolamento em Série.....	57
2.4.3 - Motores Elétricos com Campo de Enrolamento em Derivação.....	58
2.4.4 - Motores Elétricos com Campo Independente.....	58

2.4.5 - Motores Elétricos de Corrente Alternada.....	59
2.4.6 - Motores Elétricos de Indução.....	59
2.4.7 - Motores Elétricos Síncronos.....	60
2.4.8 - Motores Elétricos CC sem Escovas.....	60
2.4.9 - Motores Elétricos de Relutância Variável.....	61
2.5 - Baterias.....	62
2.5.1 - Baterias de Ácido e Chumbo.....	67
2.5.2 - Baterias à base de Níquel.....	68
2.5.3 - Baterias à base de Sódio.....	69
2.5.4 - Baterias de Lítio.....	70
2.5.5 - Baterias de Alumínio-Ar e Zinco-Ar.....	71
2.5.6 - Baterias para Veículos Híbridos.....	71
2.6 - Fontes Alternativas de Energia.....	72
2.6.1 - Célula a Combustível.....	73
2.6.2 - Supercapacitor.....	74
2.7 - Estratégias de Gerenciamento de Potência em VEHS.....	74
2.7.1 - EGP Utilizando Otimização por Programação Dinâmica.....	76
2.7.2 - EGP Aplicando Métodos de Otimização Estática.....	78
2.7.3 - EGP Baseada em Regras e em Sistemas <i>Fuzzy</i>	79
2.7.4 - EGP Baseada em Regras para VEHS Série.....	80
2.7.5 - EGPs Utilizando Sistemas <i>Fuzzy</i> em VEHS.....	81
Cap. 3 - Revisão teórica.....	85
3.1 - Introdução.....	85
3.2 - Dinâmica Veicular.....	86
3.3 - Aceleração Longitudinal do VEH Série.....	88
3.4 - Forças de Resistência ao Movimento.....	92
3.4.1 - Força de Resistência ao Rolamento.....	92

3.4.2 - Força de Resistência Devido à Inclinação do Pavimento.....	94
3.4.3 - Força de Resistência do Ar.....	95
3.5 - Desempenho em Frenagem.....	96
3.5.1 - Efeito das Perdas na Frenagem.....	97
3.5.2 - Análise da Transferência de Carga Dinâmica Durante a Frenagem.....	98
3.6 - Motor Elétrico de Tração.....	102
3.6.1 - Princípios de Motores C.C. com Imãs Permanentes.....	102
3.6.2 - Compreensão de Termos Básicos.....	102
3.6.3 - Regra da Mão-Esquerda de Fleming e Geração de Torque.....	104
3.6.4 - Constante de Torque.....	105
3.6.5 - Constante de Força Contra-eletromotriz (f_{cem}).....	107
3.6.6 - Relação entre Torque e Velocidade Rotacional do ME.....	108
3.6.7 - Regeneração.....	110
3.6.8 - Dinâmica do Motor CC com Campo Independente.....	111
3.6.9 - O Motor CC com Campo Independente Ideal.....	111
3.6.10 - Equações Dinâmicas do ME CC.....	112
3.7 - Motor à Combustão Interna.....	115
3.8 - Bateria.....	116
3.8.1 - Circuito Equivalente da Bateria.....	116
3.8.2 - Modelagem da Capacidade da Bateria.....	118
3.8.3 - Profundidade de Descarga da Bateria.....	120
3.8.4 - Potência Requerida da Bateria.....	121
Cap. 4 - Estudo de Caso.....	123
4.1 - Modelagem da Dinâmica Longitudinal.....	123
4.1.1 - Motor Elétrico de Tração.....	125
4.1.2 - Diferencial.....	127
4.1.3 - Eixos.....	127

4.1.4 - Rodas.....	128
4.1.5 - Ciclo de Condução.....	129
4.1.6 - Sistema de Freios.....	130
4.1.7 - Motorista.....	132
4.2 - Modelagem da Unidade de Potência MCI/gerador.....	133
4.3 - Modelagem da Bateria.....	135
4.4 - Estratégias de Gerenciamento de Potência.....	136
4.4.1 - EGP sem Regeneração Baseada em Regras.....	137
4.4.2 - EGP com Regeneração Baseada em Regras.....	139
4.4.3 - EGP com base em Sistemas <i>Fuzzy</i>	141
4.5 - Representação do VEH Série.....	147
4.6 - Dimensionamento da APU e da Bateria.....	148
Cap. 5 - Resultados.....	153
5.1 - EGP sem Regeneração.....	153
5.1.1 - Ciclo ECE15 sem Regeneração em Pavimento Plano.....	154
5.1.2 - Ciclo ECE15 sem Regeneração em Pavimento Inclinado.....	155
5.1.3 - Ciclo NYCCCOL sem Regeneração em Pavimento Plano.....	156
5.1.4 - Ciclo NYCCCOL sem Regeneração em Pavimento Inclinado.....	157
5.2 - EGP com Regeneração.....	158
5.3 - EGP Fundamentada em Sistemas <i>Fuzzy</i>	161
5.3.1 - Ciclo ECE15 Aplicando Sistemas Fuzzy em Pavimento Plano.....	161
5.3.2 - Ciclo ECE15 Aplicando Sistemas Fuzzy em Pavimento Inclinado.....	162
5.3.3 - Ciclo NYCCCOL Aplicando Sistemas Fuzzy em Pavimento Plano.....	163
5.3.4 - Ciclo NYCCCOL Aplicando Sistemas Fuzzy em Pavimento Inclinado.....	164
Cap. 6 - Conclusões.....	167
Referências.....	171

Capítulo 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. Uma das formas de atuação do homem contra o meio ambiente é através da emissão de poluentes pela utilização de motores à combustão interna (MCI) em carros particulares, ônibus de transporte urbano ou rodoviário, caminhões, etc. Essas emissões contribuem, entre outros fatores, para a poluição do ar e efeito estufa prejudicando a qualidade de vida da população. A adoção da tecnologia propulsora híbrida veicular, como constatado em Badin et al. (1999) e Farral 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.

VEHs, como os descritos na Seção 2.2.4, utilizam duas ou mais fontes de energia para propulsão: um motor à combustão interna e dispositivos secundários de estocagem de energia (fontes de energia) tais como baterias, célula combustível ou ultracapacitores. Nesse caso, um motor elétrico (ME) e/ou um MCI são as unidades propulsoras responsáveis pela tração nas rodas. A classificação desses veículos depende da combinação do MCI e do ME no *drivetrain* e pode ser dada em três diferentes tipos:

- VEH Série: Esta configuração tem sido a mais utilizada na fabricação de ônibus elétrico híbrido para transporte urbano como indicado por Barsali, Miulli e Pissenti (2004).

Neste caso, 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, Salman e Kheir (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, Burl e Beard (2001).

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

Abaixo, na Seção 1.1, é apresentada uma visão geral dos efeitos da poluição veicular na saúde da população bem como a utilização de combustíveis alternativos e o emprego de normas nacionais para o controle de emissões veiculares. Também serão apresentadas algumas características presentes no projeto de veículos híbridos que possibilitam contornar o problema de alto consumo e emissões presentes nos veículos automotores convencionais.

1.1 Motivação

Até meados da década de 80, 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.

Esta Seção está estruturada da seguinte forma: na Seção 1.1.1 são expostos os principais poluentes emitidos por veículos convencionais automotores bem como a utilização de combustíveis alternativos. As leis e normas nacionais para a contenção da poluição veicular são brevemente descritas na Seção 1.1.2 seguida da descrição dos benefícios e viabilidade da propulsão híbrida na Seção 1.1.3. Uma breve descrição da importância do controle de potência em VEHs é dada na Seção 1.1.4 e na Seção 1.1.5 é dado o escopo deste trabalho.

1.1.1 Poluição Veicular e Combustíveis Alternativos

A crescente frota mundial de veículos automotores contribui, a cada instante, para o aumento da emissão de poluentes no ar. Como a maior concentração de veículos está localizada nos grandes centros urbanos, é justamente nesse ambiente que a poluição torna-se um problema agravante para a população. E de acordo com Queiroz (2006, p. 11), “os efeitos dos gases poluentes na saúde estão intimamente ligados à sua solubilidade nas paredes do aparelho respiratório. A poluição do ar afeta o desenvolvimento dos pulmões e o risco de doenças cardíacas.”

Os MCIs, presentes nas mais diversas classes de veículos emitem uma grande quantidade de poluentes que em contato com o sistema respiratório causam danos à saúde da população, tais como os citados por Queiroz (2006, p. 12):

O CO, monóxido de carbono, é uma substância inodora, insípida e incolor, que atua no sangue prejudicando a sua oxigenação. Uma pequena quantidade dessa substância pode saturar uma grande quantidade de hemoglobina diminuindo a capacidade de transportar oxigênio, resultando em intoxicação. Isso pode desencadear doenças do coração e afetar o sistema nervoso central.

O NO_x, óxido de nitrogênio, é uma combinação de oxigênio e nitrogênio. Quando inalado atinge as porções mais periféricas do pulmão devido à sua baixa solubilidade. Com a presença de luz solar, reage formando ozônio (O₃), substância que provoca lesões das células e problemas respiratórios além de contribuir para o “efeito estufa”.

Os hidrocarbonetos são combustíveis não queimados integralmente pelo motor. Sob diversas formas eles podem irritar os pulmões e outros tecidos internos, estão relacionados com alguns casos de câncer e neoplasias fetais além de outras doenças.

O SO₄, óxido de enxofre, causa doenças respiratórias, principalmente em idosos e crianças, e agrava as doenças cardíacas e os problemas pulmonares. Este gás nocivo ainda contribui para a formação de chuva ácida, prejudicial ao meio ambiente.

O material particulado, mistura de fumaça, poeira e fuligem, mantém-se suspenso na atmosfera e pode penetrar nas defesas do organismo e atingir os pulmões. Ele está relacionado a doenças como a asma, bronquite, doenças cardiovasculares e câncer (hybridcars, 2005).

Na tentativa de minimizar os efeitos desse quadro o desenvolvimento de novas tecnologias veiculares e de combustíveis alternativos como o biodiesel, o gás natural veicular (GNV) e o hidrogênio têm conquistado atenção.

O biodiesel é um combustível renovável que pode ser produzido a partir de óleos vegetais, gordura animal ou de óleos/gorduras de restaurante recicladas. É um combustível ambientalmente correto, renovável, biodegradável e reduz substancialmente a quantidade de monóxido de carbono e hidrocarbonetos emitidos no ar. E pode ser misturado até a proporção de 20 para 80 % de diesel derivado do petróleo sem que para isso sejam realizadas modificações nos motores à combustão de acordo com *Energy Efficiency and Renewable Energy- EERE* (2008a).

O GNV é um composto de hidrocarbonetos – principalmente de metano – e pode ser extraído de reservas naturais, e segundo Ferraz (2004, p. 12) “o GNV custa aproximadamente 60 % menos que a gasolina e 20 % menos que o álcool”. Também,

Ferraz (2004) e Queiroz (2006) indicam que veículos que utilizam adequadamente esse combustível podem reduzir as emissões de monóxido de carbono em 76 %, de óxidos de carbono em 80 %, de óxidos de nitrogênio em 84 % e de hidrocarbonetos em 88 %. No entanto, para que todos esses benefícios sejam alcançados a conversão dos motores para a utilização desse combustível deve seguir padrões e normas pré-estabelecidos para a correta instalação do novo sistema de propulsão. A não observância desse aspecto pode elevar as taxas de emissões de gases tóxicos a valores muito acima dos estipulados por lei.

O hidrogênio pode ser utilizado em motores à combustão interna desde que misturado ao GNV. Nos Estados Unidos, este combustível tem um importante papel no desenvolvimento do transporte sustentável, pois pode ser produzido em quantidades ilimitadas através de fontes renováveis. A utilização do combustível originado da mistura hidrogênio/GNV representa um passo inicial para a utilização de hidrogênio puro em veículos de célula combustível. Os veículos que utilizam essa mistura apresentam redução nas taxas de emissões de óxidos de nitrogênio como encontrado em EERE (2008b).

Como mencionado, a utilização desses combustíveis alternativos permite uma notável redução na emissão de poluentes por veículos automotores. No entanto, a devida utilização desses combustíveis acaba barrando em dificuldades como: preços de importação (no caso do GNV), grandes investimentos em infra-estrutura de armazenamento para combustíveis gasosos e adaptação dos próprios MCIs para melhor desempenho e funcionamento.

1.1.2 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 da poluição por automóveis, e PROMOT para o controle da poluição

por motocicletas. Dentre as atuações desses programas estão a fixação de prazos e estabelecimento de limites máximos de emissão e de exigências tecnológicas para veículos automotores nacionais e importados.

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. Os veículos são também submetidos a rígidos ensaios de laboratório, onde as emissões de escapamento são quantificadas e comparadas aos limites máximos em vigor.

O Programa, desde a sua implementação em 1986, reduziu a emissão de poluentes de veículos novos em cerca de 97%. Segundo Ferraz (2004, p. 103), 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.

1.1.3 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 desenvolvimento 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, indicados em Dieselforum (2008), tais como:

- **Motor à 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 a potência requerida em – poucos freqüentes – picos de aceleração. No modo cruzeiro, mais freqüentemente 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 é uma característica 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.

1.1.4 Controle de Potência em VEHS

Para que um VEH apresente condições satisfatórias de operação (bom desempenho e redução de emissões, por exemplo) é importante que a arquitetura e as componentes do híbrido sejam otimizadas, e não menos importante é a escolha da estratégia de gerenciamento de potência (EGP) adequada para o controle do sistema completo. Em um veículo híbrido, a EGP é implementada por um controlador de potência com a função de otimizar a geração e conversão desta entre todos os sistemas do veículo.

Neste trabalho é proposto o estudo de estratégias de gerenciamento de potência para um ônibus elétrico híbrido série de transporte urbano. Primeiramente, a EGP será implantada através de regras e posteriormente pela utilização de sistemas *fuzzy*.

Os VEHS são formados pela interação de sistemas que representam um sistema dinâmico não linear de dispositivos elétricos, mecânicos, químicos e termodinâmicos. Controladores de potência fundamentados em sistemas *fuzzy* têm-se mostrado superiores sobre métodos convencionais no controle de sistemas não-lineares, viabilizando sua aplicação em sistemas elétrico híbridos como comprovado por Cerruto et al. (1994a) e

Cerruto et al. (1994b). A utilização desse tipo de controle possibilita uma metodologia sistemática para o desenvolvimento de um conjunto de regras baseadas no comportamento desejado da EGP adotada. Na presente proposta, o sistema dinâmico representado pelo VEH foi desenvolvido no ambiente Matlab/Simulink® 7.3.0.

1.1.5 Escopo da Dissertação

O trabalho que segue está dividido da seguinte forma: uma breve descrição da história dos VEs e VEHS e a classificação dos diferentes tipos de configurações existentes desses veículos bem como a descrição dos diferentes subsistemas (motores elétricos, baterias e fontes auxiliares de energia, por exemplo) que os formam serão dadas no Capítulo 2. A revisão teórica encontrada no Capítulo 3 expõe os parâmetros e conceitos necessários para a modelagem da dinâmica longitudinal do VEH Série em questão como também para a modelagem dos referentes subsistemas e da EGP. No Capítulo 4 é realizado o estudo de caso para o VEH Série com EGPs fundamentadas em regras e em sistemas *fuzzy*. E a análise dos resultados e conclusões será dada nos Capítulos 5 e 6, respectivamente.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

É importante ressaltar que o VEH teve sua origem de projeto baseada na estrutura do veículo puramente elétrico. E segundo Larminie e Lowry (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 veículos elétricos pode também ser direcionada para o desenvolvimento e aplicação em veículos elétrico híbridos.

Este capítulo apresenta na Seção 2.1 uma breve descrição da história do VE bem como da necessidade do surgimento da tração veicular híbrida a partir deste. Na Seção 2.2 são citadas as diferentes classificações de veículos com propulsão puramente elétrica e elétrico híbrida e os principais sistemas deste último são descritos na Seção 2.3. E na Seção 2.4 são discutidas EGPs encontradas na literatura para VEHs.

2.1 História do Veículo Elétrico e Elétrico Híbrido

O veículo elétrico híbrido tem sua origem no veículo elétrico. 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 motor elétrico 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 motor elétrico levaram inventores a pensar na possibilidade de usar a bateria de Volta para acionar um motor elétrico 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 conhecida “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 ½ kWh fornecendo 20 V de tensão a um motor elétrico de ½ 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 motor à combustão interna 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* (carruagem sem cavalos) 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 veículos elétricos embora os veículos à gasolina tenham sido desenvolvidos rapidamente neste período. Em 1903 havia mais veículos elétricos em Londres que veículos com motores à combustão interna, 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 motores à combustão interna haviam ganhado o mercado do transporte particular. Nos EUA, em 1912, apesar da crescente frota de 30.000 veículos elétricos, a produção de veículos à gasolina chegou a 900.000 unidades. Diante desse quadro, nesse mesmo período entre 1900 e 1912, surgiram idéias para melhorar a distância percorrida e o desempenho dos veículos elétricos por meio da adoção da configuração híbrida. Como exemplos podem ser citados os modelos *French Electroautomobile* de 1900 e o carro elétrico-gasolina Krieger de 1903 (Fig. 2.1), em que ambos possuíam um motor elétrico e um motor à gasolina para fornecer tração combinada às rodas dianteiras.

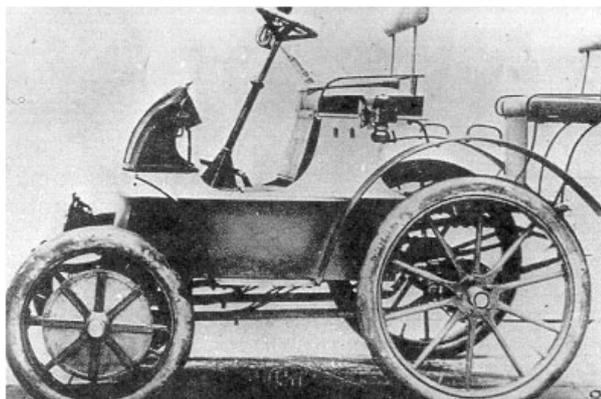


Figura 2.1: Carro elétrico-gasolina Krieger.

Fabricantes inovadores, em 1900, como Ferdinand Porsche também desenvolveram carros elétricos, em particular o Porsche No.1 Lohner-Wagen (Fig. 2.2) com dois motores elétricos acoplados às rodas dianteiras. Também, desenvolveu carros de corrida como o modelo Lohner-Porsche Rennwagen que carregava 1.800 kg de baterias a fim de alcançar longas distâncias. Ferdinand Porsche foi responsável por um dos primeiros veículos elétrico híbridos que se chamava 'Mixt-Wagen' (Fig. 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 motores elétricos localizados nas rodas dianteiras.

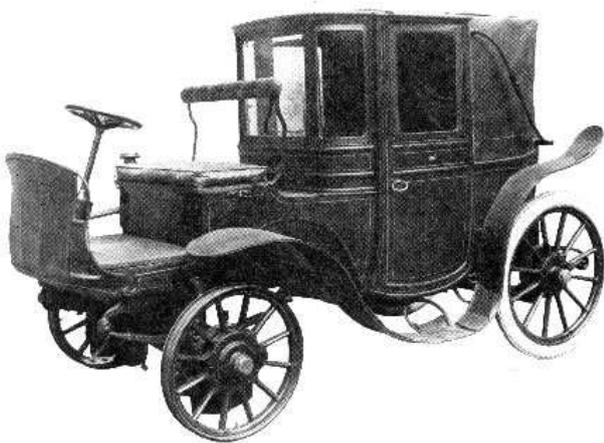


Figura 2.2: Porsche nº1 Lohner-Wagen de 1900 com dois MEs nas rodas dianteiras.



Figura 2.3: Um dos primeiros veículos híbridos projetado por Ferdinand Porsche, chamado Mixt-Wagen.

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 motor elétrico responsável pela força de tração no eixo traseiro. Neste arranjo, sempre que o motor ou o motor à combustão 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 motor elétrico auxiliaria o motor à combustão em picos de

potência ou no modo gerador carregando o conjunto de baterias. O arranjo descrito é conhecido nos dias de hoje como veículo híbrido paralelo. A grande desvantagem do modelo de veículo híbrido, *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 veículo elétrico, 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 o veículo elétrico passou a ser uma saída para a superação de problemas ambientais causados por emissões dos MCI's. Nos anos 60 a maior parte dos veículos elétricos 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 veículos elétricos 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. Veículos elétricos 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 veículos elétricos. A liderança foi do programa Ford/GE patrocinado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos 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 veículo elétrico de baixo custo encorajado pela decisão do governo na isenção de impostos de pequenos veículos elétricos. Em 1988, na França, foram produzidos 500 veículos elétricos 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 veículos elétricos. 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 Veículos com Unidades Propulsoras Híbridas

Chau e Wong (2002) assinalam que qualquer veículo que tenha mais de uma fonte de propulsão pode ser classificado como um veículo elétrico híbrido, mas esse termo é mais freqüentemente utilizado para veículos que combinam motores elétricos com motores à combustão interna.

O sistema automotivo convencional utiliza um MCI coplado à uma transmissão e às rodas através de uma caixa de engrenagem que é utilizada como dispositivo de acoplamento entre o motor e sua carga. A fim de fornecer potência suficiente às rodas para um adequado desempenho em aceleração em pavimento inclinado, é necessário que o MCI opere em sua máxima potência oferecendo, quase sempre, potência dez vezes maior para tracionar as

rodas à mesma velocidade ao longo de pavimento plano. Este aspecto torna impossível operar o motor à combustão eficientemente a potências relativamente baixas requeridas em condições normais de operação.

Melhorias significantes podem ser obtidas na eficiência de MCIs e no sistema de transmissão através da utilização de uma transmissão continuamente variável (*continuously variable transmission* - CVT). Quando essas características são combinadas ao controle otimizado da injeção de combustível, é possível assegurar que o MCI opere próximo de condições otimizadas em uma maior faixa de velocidades e condições de carga. No entanto, essas melhorias são limitadas pela eficiência relativamente baixa do motor à combustão e da CVT. Também não é possível recuperar a energia perdida durante a frenagem em contraste aos veículos elétricos e elétrico híbridos, nos quais a energia pode retornar para a bateria durante a frenagem. No caso do VEH, é possível operar o motor à combustão em torno de carga e velocidade angular constantes e, portanto, com alta eficiência e em condições de baixa emissão.

Nos veículos elétrico híbridos o motor à combustão é solicitado quando a potência requerida não pode ser suprida pelo motor elétrico ou pela bateria. O período no qual o veículo pode ser operado com energia fornecida somente pelas baterias deve ser o maior possível, indo de encontro às normas de restrição de emissão nas cidades. Para isto é necessário que haja um balanço entre o dimensionamento da bateria e do motor a combustão para a elaboração dos algoritmos utilizados no controle desses veículos determinando, assim, o sucesso particular de qualquer combinação híbrida de encontro aos objetivos operacionais.

2.2.1 Configurações de Veículos Híbridos

Como mencionado, todo veículo com mais de uma fonte de propulsão pode ser classificado como híbrido; para um tratamento mais abrangente, nesta Seção, serão consideradas configurações de veículos elétrico híbridos encontradas na literatura. Estritamente falando, segundo Westbrook (2001), isto inclui todos os veículos elétricos que apresentem dois diferentes tipos de baterias, ou uma célula combustível e uma bateria, ou uma bateria e um ultracapacitor. Essa classificação também inclui veículos elétricos nos quais a bateria principal é auxiliada nos picos de potência pela energia armazenada em um volante de inércia ou em um acumulador hidráulico. Finalmente, também estão presentes nessa categoria os veículos híbridos nos quais a bateria é utilizada junto a um motor à combustão interna na garantia de alta eficiência combinada com alcance ilimitado.

2.2.2 Veículos Híbridos Puramente Elétricos

A energia de propulsão nesta classe de veículos é totalmente armazenada ou gerada eletricamente e a potência utilizada – proveniente das fontes elétricas principal e auxiliar – é totalmente gerenciada e combinada por meios eletro/eletrônicos. Os veículos híbridos puramente elétricos utilizam baterias ou supercapacitores especiais, como fontes de potência secundária, em adição à bateria principal. Estas fontes de potência secundárias são responsáveis pelo fornecimento de alta potência em curtos períodos de tempo requeridos em picos de operação, como por exemplo, durante aceleração. Isto é necessário, pois, algumas baterias com alta densidade de energia possuem baixa densidade de potência.

Outra combinação de veículo híbrido puramente elétrico, que atualmente está em desenvolvimento, de crescente interesse devido às melhorias em célula a combustível, é o veículo elétrico à célula a combustível com uma bateria auxiliar, como adotado por

Revoredo (2007) e exposto por Emadi et al. (2005) em suas pesquisas. Neste caso, a bateria pode fornecer altas correntes requeridas no acionamento, e pode também servir como um dispositivo de nivelamento de carga, permitindo que a célula a combustível opere inicialmente à baixa potência até que seja aquecida o suficiente para operar com saída estável. Este arranjo melhora a eficiência total do sistema e também permite ao veículo utilizar os benefícios da frenagem regenerativa.

Se altas acelerações são requeridas, então o supercapacitor pode ser considerado como fonte de potência auxiliar. Uma das características dos supercapacitores é sua alta densidade de potência e baixa densidade de energia uma vez que são capazes de estocar altas taxas de carga se comparados às baterias químicas. Neste contexto, e conforme apresentado por Gao (2005), em condições de altas taxas de recarga, como as que ocorrem durante a frenagem regenerativa, os supercapacitores podem substituir eficientemente as baterias químicas.

2.2.3 Veículos Híbridos Eletromecânicos

Segundo Larminie e Lowry (2003), Shen e Veldpaus (2004) e Westbrook (2001), uma classe adicional de VEH apresenta bateria assistida por um dispositivo acumulador de energia mecânico tal como um volante de inércia ou um acumulador hidráulico. A disposição dos principais subsistemas que integram esses veículos é mostrada nas Figs. 2.4 e 2.5, em que o volante de inércia ou o acumulador hidráulico são conectados à linha de potência fornecida pela bateria e ao motor elétrico de tração através de um controlador central. Este controlador é responsável pelo funcionamento desejado do motor de tração elétrica, do volante de inércia ou do acumulador hidráulico, e pelo fluxo de potência para (ou da) bateria.

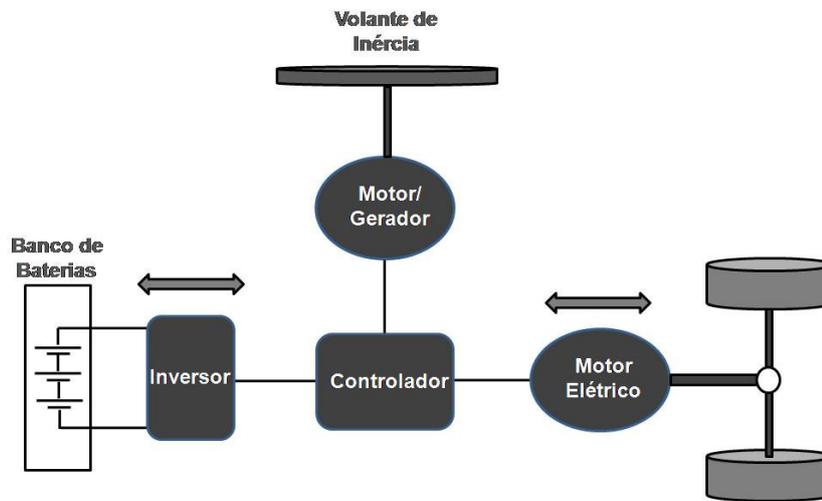


Figura 2.4: Disposição típica do drivetrain de um veículo eletromecânico híbrido com volante de inércia.

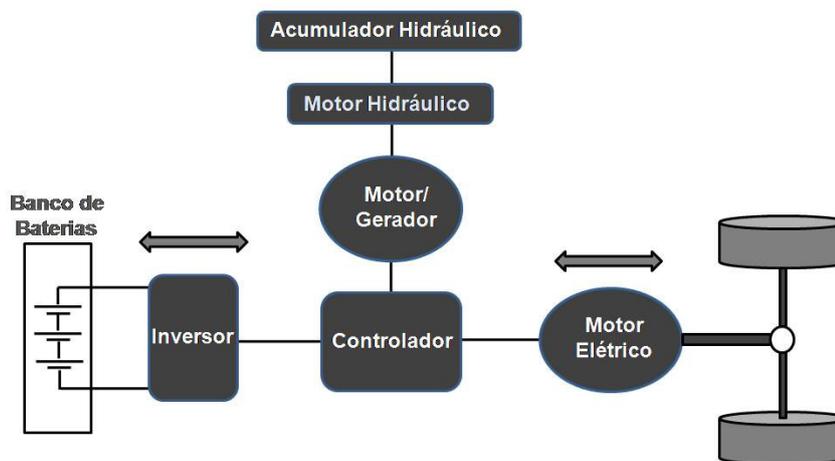


Figura 2.5: Disposição típica do drivetrain de um veículo eletromecânico híbrido com acumulador hidráulico.

O controlador opera com um algoritmo que otimiza o fluxo de energia para máxima eficiência do sistema de modo que a potência requerida em velocidades constantes seja somente fornecida pela bateria. No entanto, em situações de aceleração, a potência é requerida a partir do volante de inércia ou do acumulador hidráulico. Durante frenagem, a

máquina elétrica de tração atua como gerador e a energia regenerada é usada tanto para recarregar a bateria como para manter o volante de inércia a alta velocidade ou o acumulador hidráulico recarregado.

Ambos os sistemas, acumulador hidráulico e volante de inércia, são capazes de fornecer, ou absorver durante regeneração, mais que 500 W/kg durante aceleração ou frenagem e tipicamente armazenar energia acima do valor de 0.5 kWh. Além disso, esses sistemas possuem eficiência na utilização de energia em torno de 98 % se comparadas à eficiência das baterias químicas. Porém, existem sérios riscos associados à utilização e funcionamento desses sistemas como, por exemplo, a desintegração do volante de inércia do veículo em um acidente.

2.2.4 Veículos Híbridos com MCI e ME

A configuração de veículo híbrido mais explorada até os dias de hoje é a que utiliza em sua arquitetura um motor a combustão interna e um motor elétrico. Este tipo de veículo híbrido é objeto principal de estudo nesta Dissertação e por conveniência, a partir deste ponto, a sigla VEH será referente a um veículo híbrido com unidades propulsoras elétrica e à combustão. Como exposto por Westbrook (2001), são várias as combinações possíveis entre um motor à combustão e um motor elétrico. Em um extremo, o MCI pode ser usado como fonte principal de propulsão com o ME atuando como fonte auxiliar fornecendo o excedente de potência exigida em altas acelerações ou em pavimento inclinado. No outro extremo, um ME pode ser o sistema de propulsão principal, enquanto a unidade de potência auxiliar referente ao MCI pode ser utilizada para fornecer o excedente de potência e para recarregar a bateria. Existem três principais configurações nas quais as componentes do sistema híbrido, aqui descrito, podem ser arrançadas. Como já citado no Capítulo 1, uma delas é o VEH Série, no qual a transferência da potência fornecida pelo ME para a

propulsão do veículo é essencialmente elétrica. E outra configuração é o VEH Paralelo no qual a transferência da potência a partir das duas fontes é essencialmente mecânica.

2.2.5 Veículo Elétrico Híbrido Série

No VEH Série o MCI é usado para gerar potência elétrica por meio de um gerador. Esta potência gerada mecanicamente é combinada com a potência da bateria em um controlador. Este controlador, então, compara a demanda de potência com a velocidade das rodas e a saída de torque disponível do sistema de propulsão principal, e usa seu algoritmo para determinar a quantidade de potência que deve ser utilizada a partir de cada fonte de propulsão. Esta análise considera todos os parâmetros operacionais relevantes incluindo eficiência, emissões, estado de carga da bateria, e condições especiais de operação. O controlador também é responsável pelo controle da potência absorvida no modo regenerativo, direcionando-a para a bateria.

Existe um grande número de vantagens nas possíveis formas de utilização da configuração híbrida série presente na Fig. 2.6.

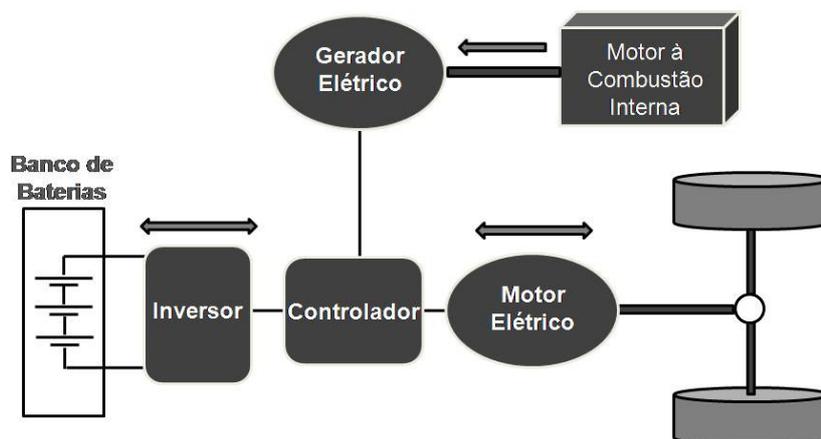


Figura 2.6: Disposição típica do drivetrain de um VEH Série.

Neste veículo, é possível acionar o MCI próximo a uma velocidade constante e dividir a sua potência de saída tanto para carregar a bateria como para fornecer potência para tração das rodas. É importante ressaltar que neste caso o motor à combustão não apresenta conexão direta com as rodas do veículo. No entanto, o híbrido série também apresenta desvantagens como, por exemplo, a necessidade de um alternador/retificador não presente no híbrido paralelo. Também, como exposto por Rizoulis, Burl e Beard (2001), a eficiência do sistema total é reduzida pela dupla conversão de potência mecânica para elétrica, armazenando parte dessa potência na bateria, e então convertendo essa energia novamente de elétrica para mecânica a fim de mover o veículo.

2.2.6 Veículo Elétrico Híbrido Paralelo

Um VEH Paralelo apresenta ambos os sistemas de propulsão, MCI e ME, conectados à transmissão. Um diagrama esquemático para um híbrido paralelo é mostrado na Fig. 2.7. Nessa configuração, o veículo pode ser propulsionado pelo MCI, pelo ME, ou por ambos ao mesmo tempo, sendo possível escolher livremente a quantidade de energia proveniente de cada fonte a fim de satisfazer a demanda de potência em qualquer instante de tempo. Para este tipo de veículo híbrido, existem várias maneiras de configurar o uso do MCI e do ME como citado por Westbrook (2001).

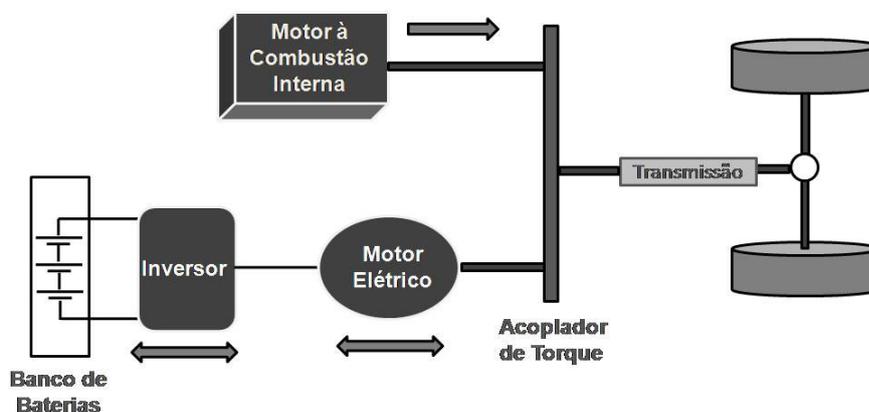


Figura 2.7: Disposição típica do drivetrain de um VEH Paralelo.

Além das estratégias propostas por Ehsani, Gao e Butler (1999) e Schouten, Salman e Kheir (2002), a estratégia mais comum consiste em utilizar somente o motor elétrico em baixas velocidades, desde que mais eficiente que o MCI, operando este último em altas velocidades. Esta configuração de veículo pode ter uma CVT no lugar de uma transmissão escalonada fixa, uma CVT torna possível a escolha dos pontos de operação mais eficientes do MCI. Como no VEH Série, o Paralelo também pode recuperar energia através da frenagem regenerativa. A vantagem da configuração paralela encontra-se nos poucos estágios de conversão de energia, se comparados aos da configuração série, resultando em uma menor parcela de energia perdida.

2.2.7 Veículo Elétrico Híbrido Série-Paralelo

A terceira configuração na linha dos VEHs: a configuração Série-Paralela é a combinação das resultante configurações descritas nas Seções 2.2.4.1 e 2.2.4.2. Nesse caso, o ME, o gerador, o MCI e as rodas do veículo são conectadas através de uma engrenagem satélite. A Fig. 2.8 mostra a disposição típica do *drivetrain* para esta configuração de veículo.

De acordo com Rizoulis, Burl e Beard (2001), este VEH opera todo o tempo como uma combinação das configurações série e paralela. A comparação das duas configurações descritas acima leva a conclusão de que em condições de operação urbanas é dominante a configuração série híbrida, e em condições de operação em auto-estrada o comportamento híbrido paralelo é preferível. Desse modo, a configuração Série-Paralela combina os aspectos positivos da Série em relação à economia de combustível, em trânsito urbano, com as vantagens da Paralela em relação à eficiente transmissão de energia para as rodas.

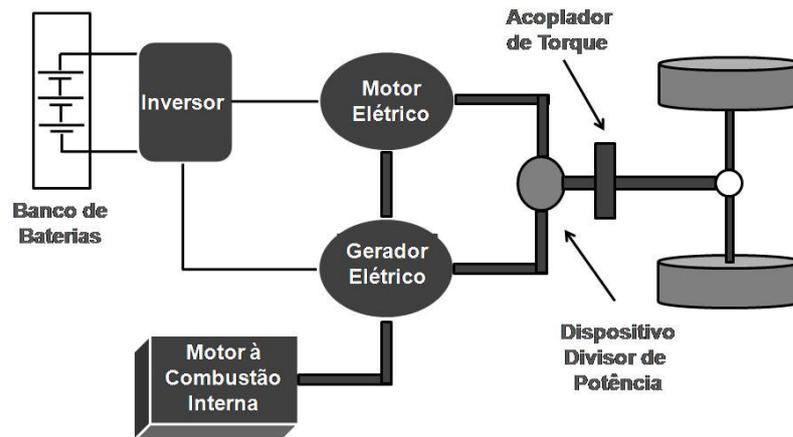


Figura 2.8: Disposição típica do drivetrain de um VEH Série-Paralelo.

2.3 Sistemas do VEH

Nesta Seção são descritos os principais tipos de baterias e motores elétricos utilizados em VEs e em VEHs como fontes de energia e unidades propulsoras, respectivamente. No presente trabalho não serão considerados dispositivos eletrônicos tais como inversores de potência.

2.4 Motores Elétricos

A conversão de potência elétrica em mecânica é fundamental para os VEs e VEHs. De acordo com Larminie e Lowry (2003), até a década de 60, os motores de corrente contínua (CC) foram largamente utilizados como sistemas de propulsão. Desde então, com o surgimento de dispositivos de chaveamento (*power switching*) eletrônicos, para altas correntes, tornou-se possível a conversão direta da corrente da bateria para corrente alternada (CA) de frequência e amplitude variáveis. Com estes avanços, os motores de indução e motores síncronos puderam ser empregados como unidades propulsoras

veiculares. O emprego destes tem mostrado considerável vantagem em custo, dimensão, peso e confiabilidade como sistemas de propulsão se comparados aos de CC.

Os itens desta Seção descrevem as diferentes categorias de motores, e algumas de suas características básicas, utilizados em VEs ou VEHS como sistemas de propulsão.

2.4.1 Motores Elétricos de Corrente Contínua.

Veículos com tração elétrica podem utilizar um número variado de motores elétricos, porém o modelo mais simples de ME para esta aplicação é o motor elétrico CC com escovas (*Brushed DC Electric Motor*). Este motor representa um bom ponto de partida, pois as questões mais importantes relacionadas ao controle de motores elétricos podem ser facilmente explicadas com referência a este tipo.

Um motor elétrico CC pode ser facilmente controlado; se a tensão de alimentação é reduzida, então o máximo torque decrescerá proporcionalmente conforme analisado por Larmini e Lowry (2003) e Kenjo e Nagamori (1985). Em outras palavras, qualquer torque e velocidade podem ser obtidos abaixo dos valores máximos pré-estabelecidos.

No entanto, a redução ou aumento da tensão de alimentação não é a única forma de controlar um motor elétrico CC. Também, é possível obter um controle através da variação do fluxo magnético quando bobinas são utilizadas no fornecimento do campo no lugar de ímãs permanentes. Caso o fluxo magnético seja reduzido, o torque máximo cairá permitindo ao motor operar em uma larga faixa de valores de torque e velocidade. Este método de controle é aconselhável especialmente em regiões de operação do veículo de alta velocidade e baixo torque como indicado por Larmini e Lowry (2003). De forma geral, os motores elétricos CC com escovas são bastante flexíveis quanto ao método de controle, especialmente se o fluxo magnético puder ser variado.

Uma vantagem em usar eletroímãs para fornecer campo magnético é que a intensidade do campo magnético pode ser controlada pela variação da corrente elétrica, e também neste caso, o custo associado à produção de campo magnético forte é relativamente baixo. A principal desvantagem é que o campo de enrolamento consome corrente elétrica e gera calor, mas na prática, o controle extra do campo magnético pode freqüentemente resultar em uma operação mais eficiente do motor. O resultado é que os motores elétricos CC com campo de enrolamento são ainda freqüentemente utilizados em veículos elétricos.

De acordo com Fitzgerald, Kingsley e Kusko (1975) e Larmini e Lowry (2003), existem três tipos clássicos de motores elétricos CC com campo de enrolamento em série (*series*), em derivação (*shunt*) e o com campo independente (*separately excited*) como mostrado na Fig. 2.9. Os motores em série e em derivação não possibilitam o controle adequado da velocidade e do torque necessário em um VE, porém o motor com campo independente desperta real interesse para essa aplicação.

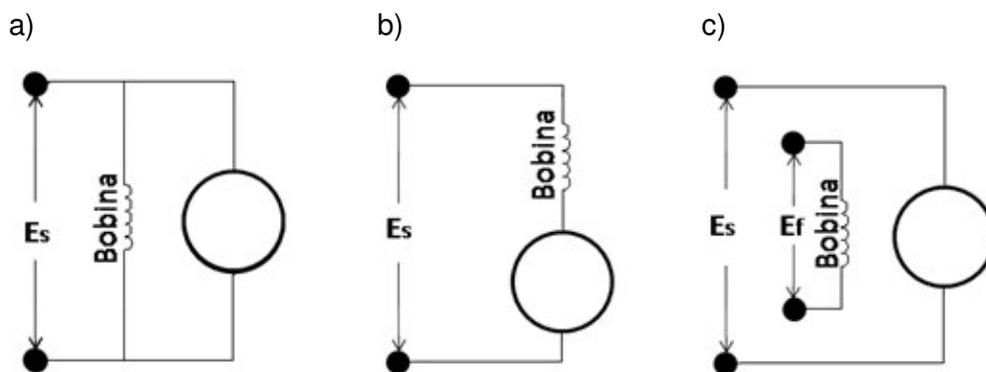


Figura 2.9: Motores elétricos CC com campo de enrolamento: (a) em série (*series*), (b) em derivação (*shunt*) e (c) com campo independente (*separately excited*).

2.4.2 Motores Elétricos com Campo de Enrolamento em Série

As características desse motor são particularmente favoráveis à aplicação em VEs, pois fornecem excelente aceleração combinada com a redução controlada da velocidade em

pavimento inclinado e com altas velocidades em pavimento plano. Somada a estas vantagens, está a utilização de controladores de tensão e resistividade relativamente simples, logo, pode-se concluir que este tipo de motor tem sido largamente utilizado em veículos elétricos desde os primeiros protótipos até os dias atuais como indicado por Westbrook (2001). Outra característica desses motores está no alto valor de torque alcançado a baixas velocidades e rápido decaimento com o aumento desta; este aspecto é importante para certas aplicações como, por exemplo, no acionamento de um MCI.

2.4.3 Motores Elétricos com Campo de Enrolamento em Derivação

Segundo Westbrook (2001), é particularmente difícil controlar esse tipo de motor, e desde que controladores eletrônicos começaram a ser utilizados, melhorando a sua eficiência e controlabilidade, seu uso tem ganhado espaço em alguns veículos elétricos de baixo custo.

2.4.4 Motores Elétricos com Campo Independente

Recentemente, com a disponibilidade de eletrônica de potência com capacidade de controlar altas correntes a altas tensões, as correntes de campo e armadura podem ser controladas de forma independente. Com este motor é possível obter qualquer combinação entre os tipos de motores descritos acima. Por estas razões, o motor com campo independente é largamente utilizado como motor de tração. Parece provável que em vista da simplicidade e baixo custo de sistemas de controle e a maturidade da tecnologia, esses motores irão permanecer em serviço por algum tempo. Para Larminie e Lowry (2003) e Westbrook (2001), a longo prazo, a tecnologia dos motores CA tem muito mais a oferecer em eficiência, confiabilidade, peso e tamanho em comparação aos de corrente contínua.

2.4.5 Motores Elétricos de Corrente Alternada

Segundo Westbrook (2001), motores de corrente alternada são apropriados para o uso em veículos de tração elétrica e podem ser classificados em três categorias: motores de indução, motores síncronos e motores de relutância variável. Motores síncronos e de indução têm sido utilizados por vários anos em diversas aplicações industriais e seu uso em veículos elétricos só foi possível com a criação de inversores de alta potência, alta eficiência e frequência variável. Os motores de relutância variável exigem sofisticados controladores eletrônicos e seu uso e utilidade em veículos elétricos encontra-se em processo de investigação. Motores que apresentam rotores permanentemente magnetizados, tais como o motor síncrono conhecido como 'motor CC sem escovas' (*brushless DC motor*), têm despertado considerável interesse para aplicações veiculares e alguns veículos utilizando estas máquinas já foram construídos.

2.4.6 Motores Elétricos de Indução

A simples construção destes motores, razoável custo e baixa manutenção devido à ausência de escovas e de um comutador, tornam esses motores bastante atrativos para a aplicação veicular. Também oferecem a capacidade de alcançar velocidades maiores que um motor CC e como a saída do motor é proporcional ao produto do torque pela velocidade angular de rotação, é possível reduzir seu peso e tamanho desde que um apropriado conjunto de engrenagens seja utilizado. Um exemplo citado por Westbrook (2001) é a razão potência/peso de 0,37 kW/kg para um motor em derivação usado em um carro elétrico Daihatsu Hi-Jet, comparado com a mesma razão de 1,0 kW/kg para um motor CA de indução utilizado no modelo GM EV1.

2.4.7 Motores Elétricos Síncronos

Os motores síncronos com rotor cilíndrico (*wound rotor*) podem apresentar saída na faixa que se estende entre poucos quilowatts a muitos megawatts, no entanto motores com ímãs permanentes são limitados a uma faixa de operação entre 100 W a 100 kW. Visto que carros elétricos geralmente necessitam de motores na faixa de 5 a 50 kW, motores de ímãs permanentes são muito indicados para tal aplicação e oferecem alta eficiência, pois não é requerida potência durante o funcionamento do motor para indução de corrente no rotor. Dessa forma, os motores síncronos são menores que os de indução, e motores com a razão potência/peso acima de 3,0 kW/kg têm sido construídos para uso em veículos elétricos. No entanto, o custo dos ímãs de terra rara e a eletrônica complexa de controladores/inversores dos quais esses motores necessitam têm restringido sua utilização como sistemas de tração. Motores de ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB), citados por Westbrook (2001), são empregados na produção de VEs e VEHs da Toyota, Honda e Nissan.

2.4.8 Motores Elétricos CC sem Escovas

Uma versão especial dos motores síncronos é o motor de ímã permanente auto-síncrono, com inversor, também chamado de motor CC sem escovas. As vantagens desses motores estão na alta eficiência e rotor de simples construção. No entanto o custo considerável relativo à necessidade de ímãs permanentes no rotor é o maior problema. Apesar da corrente através das bobinas do motor alternar, deve existir uma fonte de corrente contínua (sendo este o motivo pelo qual esses motores são freqüentemente classificados como CC). São muito empregados em equipamentos computacionais, mas também são utilizados em aplicações de alta potência como em VEs. Nesse caso, precisam de controladores mais sofisticados que possam variar a corrente da bobina (e o torque) para produzir um sistema

de acionamento bastante flexível. Alguns dos VEs mais sofisticados utilizam esses motores para tração, e como esses motores precisam de um ímã permanente resistente para o rotor (não há de corrente induzida) são considerados mais eficientes apresentando potência específica ligeiramente melhor.

2.4.9 Motores Elétricos de Relutância Variável

A categoria final de motores elétricos com potencial aplicação para propulsão de VEs e VEHs são os de relutância variável e são melhor categorizados como um tipo especial de motor síncrono. No motor de relutância variável, o rotor pode ser simplesmente formado por ferro magnetizado reduzindo potencialmente seu custo. Devido à simplicidade do rotor e à eficiência de todo o princípio de relutância variável, este motor pode oferecer melhorias na potência por unidade de massa, volume, confiabilidade e flexibilidade no uso. Também, desde que o rotor não é de ímã permanente, não existe força contra-eletromotriz, implicando no alcance de altas velocidades. Embora o pico de eficiência desses motores esteja ligeiramente abaixo do motor CC sem escovas, os motores de relutância variável mantêm seu nível de eficiência acima do range de velocidade e torque alcançados por qualquer outro motor.

Uma característica interessante da tecnologia de motores elétricos é que não existe um vencedor óbvio. Todos os tipos de motores descritos nesta Seção são utilizados em projetos atuais de VEs e VEHs.

Todos os motores discutidos aqui são capazes de operar em uma faixa de potência entre 5 e 50 kW requerida por carros elétricos. A escolha do tipo de motor elétrico do sistema de propulsão deve levar em consideração características como eficiência, peso, volume e custo do sistema de propulsão completo incluindo controladores, motores e transmissão mecânica.

Os tipos de motores elétricos descritos acima são capazes de operar como geradores se os circuitos de controle forem devidamente projetados e, portanto podem ser utilizados na frenagem regenerativa. Para ser efetiva, a frenagem regenerativa deve ser aplicada sobre todo ciclo de operação do veículo e os freios dinâmicos somente usados como um dispositivo de segurança.

2.5 Baterias

Dentre os diferentes tipos e modelos de VEs e VEHS, em quase todos os casos, a bateria é um sistema de fundamental importância. No veículo elétrico clássico, a bateria é o único sistema de armazenagem de energia, como também a componente de maior custo, peso e volume. A bateria é um componente indispensável em VEHS com a função de armazenar e fornecer energia continuamente. O entendimento da tecnologia da bateria e de seu desempenho é vital para qualquer aplicação em VEs e VEHS.

A bateria de ácido e chumbo é a do tipo recarregável mais conhecida. Existe um grande número de materiais e eletrólitos que podem ser combinados para formar uma bateria. No entanto, somente um número relativamente pequeno dessas combinações tem sido desenvolvido para a produção de baterias elétricas recarregáveis apropriadas para uso em veículos. Entre estas, segundo Larminie e Lowry (2003) e Westbrook (2001), incluem as baterias de ácido e chumbo, ferroníquel, *sodium sulphur* e cloreto metálico de sódio. Existem também baterias que podem ser mecanicamente reabastecidas, as principais são as alumínio-ar e zinco-ar. Apesar de todas as diferentes possibilidades já testadas, por volta de 150 anos de desenvolvimento, ainda não foi desenvolvida uma bateria apropriada que permita o uso difundido de VEs. No entanto, avanços na tecnologia de baterias oferecem uma visão otimista para o futuro.

A partir do ponto de vista de fabricantes de VEs, a bateria pode ser tratada como uma 'caixa preta' com grande variedade de critérios de desempenho. Estes critérios incluem energia específica, densidade de energia, potência específica, tensões típicas, eficiência ampère-hora, eficiência energética, disponibilidade comercial, custo, temperaturas de operação, taxas de autodescarga, número de ciclos de vida e taxas de recarga. Alguns desses critérios serão discutidos a seguir.

A compreensão da natureza química presente em uma bateria é de grande importância para a sua devida manutenção bem como para o cumprimento dos requisitos de desempenho evitando, assim, características indesejáveis como vida limitada, autodescarga e eficiência reduzida. Esse conhecimento básico também é necessário em consideração ao provável risco de acidentes e ao impacto global da presença de produtos químicos de baterias sobre o meio ambiente.

Nos seqüentes tópicos estão descritas as características básicas de desempenho dos mais importantes tipos de baterias existentes para aplicação em VEs e VEHS.

- Tensão de Bateria e de Célula

Todas as células possuem tensões nominais e quando conectadas em série podem fornecer a tensão total requerida. Baterias de tração para VEs são usualmente especificadas em 6 V ou 12 V. Na prática esta tensão varia de acordo com o fluxo de corrente, por exemplo, quando a corrente flui da bateria, a tensão cai, e quando flui para a bateria (processo de recarga), a tensão aumenta.

- Capacidade ampère-hora

A carga elétrica que a bateria pode fornecer é o parâmetro de maior importância, sua unidade no sistema internacional (SI) é o Coulomb. No entanto esta unidade é inconvenientemente pequena e em seu lugar é utilizada a unidade Ampère-hora (fluxo de um ampère em uma hora). Uma bateria com capacidade de 10 Ampère-hora pode fornecer 1 Ampère-hora por 10 horas ou 2 Ampère-hora por 5 horas, ou na teoria 10 Ampère-hora por uma hora. No entanto, na prática, este comportamento não é presenciado para a maior parte das baterias. Se uma bateria pode ser capaz de fornecer 1 ampère por 10 horas, e caso seja exigida uma corrente de 10 ampères, a bateria irá gastar menos de uma hora para cumprir a solicitação. Se a corrente é drenada de forma lenta, a capacidade da bateria aumenta e caso contrário a capacidade cai consideravelmente. Este comportamento deve-se às reações químicas que ocorrem dentro das células e esse efeito é mais notável em baterias de ácido e chumbo. A capacidade de baterias usadas em VEs como sistemas de tração é usualmente cotada para uma descarga de 5 horas; e é freqüentemente representada pela letra "C".

- Energia Armazenada

A energia armazenada em uma bateria depende de sua tensão e da carga armazenada. No SI a unidade utilizada é o Joule, mas por representar um número muito pequeno, a unidade utilizada é o watt-hora, que representa a energia equivalente de trabalho à potência de um watt por uma hora. A energia em watt-hora pode ser expressa por:

$$\text{Energia em watt-hora} = \text{tensão} \times \text{ampère-hora} = V \times C.$$

Como V e C são variáveis dependentes do modo de utilização da bateria, a energia armazenada é, então, uma quantidade variável e reduz se a energia for drenada rapidamente.

- Energia Específica

Energia específica é a energia armazenada por quilograma de massa da bateria. Sua unidade é Wh/kg. Uma vez conhecida a capacidade de energia (Wh) de uma bateria, necessária para aplicação em VEs, essa grandeza pode ser dividida pela energia específica (Wh/kg) para dar uma primeira aproximação da massa da bateria. Dessa forma, essa grandeza pode ser utilizada como um guia para o dimensionamento da bateria.

- Densidade de Energia

Densidade de energia é a energia armazenada por metro cúbico de volume da bateria. Esta grandeza também é outro importante parâmetro, pois a capacidade de energia da bateria (Wh) dividida por sua densidade de energia (Wh.m^{-3}) pode fornecer o volume da bateria requerida. O volume de uma bateria pode ter considerável impacto no projeto de um veículo elétrico. Assim como a energia específica, a densidade de energia é um dado nominal.

- Potência Específica

Potência específica é a quantidade de potência requerida por quilograma da bateria. A unidade mais comum para esta variável é o W/kg. Baterias que apresentam alta energia específica são sistemas com baixa potência específica, o que significa que são ótimas para armazenar energia, porém podem disponibilizá-la vagarosamente. Também, alta potência específica resulta em baixa energia específica para qualquer tipo particular de bateria, pois energia rapidamente liberada da bateria, ou seja, a altas potências, reduz a energia disponibilizada.

A comparação entre potência e energia específicas de diferentes fontes de energia é freqüentemente realizada através do conhecido diagrama de Ragone, exposto na Fig. 2.10.

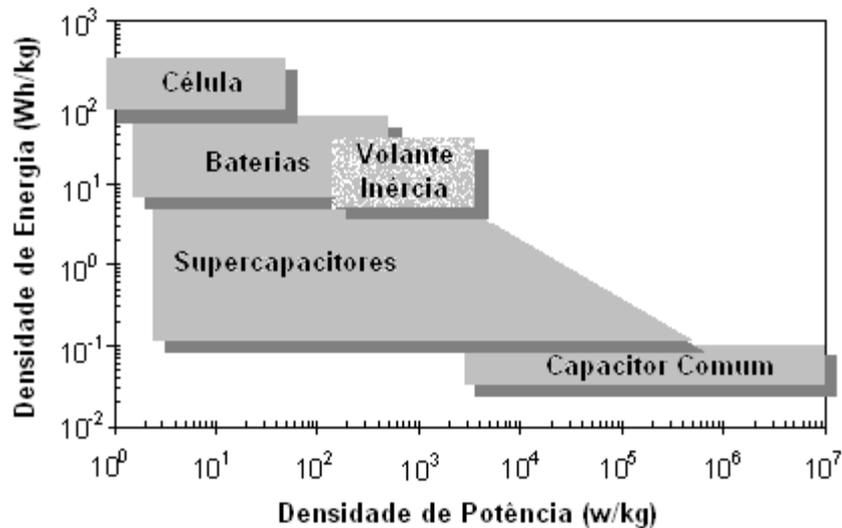


Figura 2.10: Diagrama de Ragone para as diferentes fontes de energia apontadas em termos de densidade de energia e densidade de potência.

- Eficiência Ampère-hora

Em uma situação ideal, uma bateria deveria retornar toda a carga que possui apresentando, dessa forma, eficiência de 100 %, no entanto, esse valor é sempre menor. O valor preciso da eficiência varia de acordo com o tipo de bateria, temperatura de operação, taxa de descarga e estado de carga.

- Eficiência de Energia

Este é outro importante parâmetro e é definido como a razão entre a energia elétrica fornecida pela bateria para a quantidade de energia elétrica requerida a fim de retornar ao estado de carga antes do processo de descarga. Deve ficar claro que a eficiência de energia de uma bateria variará de acordo com o modo de como é operada. Se a bateria for

descarregada ou carregada rapidamente, por exemplo, a eficiência da energia será reduzida consideravelmente.

- Taxa de Alto-Descarga

Muitas baterias são descarregadas quando não são utilizadas e este comportamento é conhecido como alto-descarga. Esta característica implica que algumas baterias não podem permanecer inativas por muito tempo sem a necessidade de serem carregadas. As taxas de alto-descarga variam de acordo com o tipo de bateria e com fatores como temperatura.

- Vida da Bateria e Número de Ciclos de Descarga

Muitas baterias recarregáveis serão submetidas somente a poucas centenas de ciclos para 20 % de carga. No entanto, esse número exato depende do tipo de bateria, e também de detalhes de projeto e do modo como é utilizada. Este é um dado muito importante na especificação da bateria, pois reflete seu tempo de vida e conseqüentemente o perfil do projeto de um VE ou VEH.

2.5.1 Baterias de Ácido e Chumbo

A bateria mais conhecida e amplamente utilizada em VEs é a bateria de ácido e chumbo. Essas baterias são bem estabelecidas comercialmente e são as recarregáveis mais baratas por quilowatt-hora de carga. No entanto, apresentam baixa energia específica e por esse motivo não são indicadas para VEs que operem por longas distâncias. Nesse sentido, essas baterias continuarão inevitavelmente a serem empregadas em VEs, que operem em curtas distâncias. Também apresentam uma grande variedade de potência específica quando

comparadas aos outros tipos. A sua utilização é aconselhável em VEHs, pois somente uma quantidade limitada de energia é armazenada, porém liberada e absorvida rapidamente. Essas baterias apresentam energia específica de 20 a 35 Wh/kg, potência específica em torno de 250 W/kg e número de ciclos de vida acima de 800 para 80 % de capacidade.

2.5.2 Baterias à base de Níquel

Estas baterias incluem a de ferroníquel, de níquel e zinco, de níquel e cádmio e a de hidreto metálico de níquel. Duas destas serão brevemente descritas abaixo, a hidreto metálico de níquel mostrando-se a mais promissora. A bateria de níquel e zinco apresenta desempenho razoável, porém limitado ciclo de vida.

- **Bateria de Níquel e Cádmio (NiCad):** foi considerada como uma das principais competidoras para a de ácido e chumbo no uso em VEs e apresenta energia específica quase duas vezes maior. A bateria de NiCad tem a vantagem de apresentar alta potência específica, longo ciclo de vida, uma grande variedade de temperaturas de operação (-40°C a $+80^{\circ}\text{C}$), baixa autodescarga e boa capacidade de armazenagem de energia. Estas baterias podem ser fabricadas em um diferente número de tamanhos e formas, embora seja difícil a produção de exemplares maiores para aplicação veicular. Elas também são bastante robustas mecânica e eletricamente e podem ser recarregadas dentro de uma hora.

Um lado negativo está na tensão de operação de cada célula que é de 1,2 V por célula, dessa forma dez células são necessárias para uma tensão nominal de 12 V se comparadas às 6 células para a de ácido e chumbo. Esta característica explica parcialmente o alto custo associado a este tipo de bateria. Outro problema está no elevado custo do cádmio e também por ser ambientalmente nocivo.

- **Bateria de Hidreto Metálico de Níquel (NiMH):** esta bateria tem substituído recentemente o tipo níquel e cádmio em diversas aplicações em VEs, pois oferecem melhor

desempenho sem oferecer os riscos tóxicos do cádmio ao meio ambiente. Essas baterias podem apresentar energia específica maior que 70 Wh/kg combinada com alta potência específica de 200 W/kg. Como a bateria de níquel e cádmio, as de NiMH também podem ser carregadas em uma hora. De todos os novos sistemas de baterias, a NiMH é considerada uma das mais avançadas e são utilizadas em diversos VEs e VEHs incluindo o Toyota Prius. Esta bateria é considerada uma das mais promissoras para o futuro.

2.5.3 Baterias à base de Sódio

Na década de 80 várias baterias à base de sódio foram desenvolvidas. A principal característica dessa bateria em relação às demais está na sua alta temperatura de operação, e por este motivo sua utilização prática só é possível em grandes sistemas como em VEs. A condição de operação a altas temperaturas tem limitado seu desenvolvimento comercial. Os principais tipos de baterias nessa categoria são:

- **Bateria de *Sodium Sulphur***: foi a primeira desenvolvida pela Ford Research Laboratories em Dearborn, EUA na década de 60 como uma nova abordagem para resolver o problema da bateria com energia e potência específicas suficientes para aplicação em VEs. Esta bateria apresenta alta energia específica de 110 Wh/kg, alta potência específica de 150 W/kg e é capaz de 1000 ciclos de descarga em uso. Para que essa bateria opere eficientemente é necessário manter sua temperatura em torno de 350 °C.

- **Baterias de Cloreto de Sódio-Níquel**: este tipo opera a uma temperatura ligeiramente menor que a anterior (300 °C) e apresenta energia e potência específicas similares à anterior. Em caso de danos, essa bateria é potencialmente menos perigosa que a anterior devido à natureza relativamente inofensiva do contato entre os elementos químicos que as formam. Esta bateria pode ser encontrada no Fiat Pálio elétrico desenvolvido a pedido da hidrelétrica Itaipu, segundo Contreiras (2008).

2.5.4 Baterias de Lítio

Baterias de Lítio recarregáveis começaram a ser comercializadas na década de 80. Apresentam considerável aumento no custo e na energia específica em relação a outras baterias recarregáveis. Os três tipos de baterias de lítio aqui analisadas são:

- **Sulfeto de Lítio-Ferro:** a terceira bateria de alta temperatura com potencial aplicação em VEs é a sulfeto de lítio-ferro. O elemento lítio é particularmente adequado para uso em baterias por ser capaz de compor eletrodos de elevado potencial fornecendo a possibilidade de grande armazenagem de energia. No entanto, o lítio apresenta alta reatividade limitando o tipo de eletrólito que pode ser usado. Apresentam excelente desempenho com máxima energia específica de 150 Wh/kg e potência específica de 300 W/kg. Seu número de ciclos é em torno de 1000 e espera-se que seu custo seja aproximado ao de outras baterias de alta temperatura. Também existem sérios problemas ambientais com a reciclagem destas baterias devido à alta toxicidade do Lítio.

- **Bateria de Polímero de Lítio:** o lítio também tem sido utilizado em um tipo inteiramente diferente de bateria que utiliza polímeros condutores. Baterias desse tipo, adequadas para VEs, têm sido desenvolvidas por Hydro Quebec e 3M Company em conjunto com a USABC, e tem apresentado energia específica em torno de 150 Wh/kg e potência específica em torno de 300 W/kg. Essas baterias são robustas e insensíveis aos danos causados por choques e vibrações e são potencialmente de baixo custo.

- **Bateria de Íon de Lítio:** apresenta uma considerável vantagem no peso em relação a outras baterias e esta característica a torna uma candidata altamente atrativa para futuros VEs. Sua energia específica, por exemplo, é quase três vezes maior que a de ácido e chumbo e pode fornecer energia a um VE para razoável alcance. Apresentam potência específica em torno de 120 kW/kg e vida de 1000 ciclos. Suas propriedades e potencial flexibilidade para empacotamento as tornam atrativas para aplicação em VEs. São também

particularmente convenientes para produção de baixo custo e representam a melhor esperança para aplicação economicamente viável em VEs nos próximos 20 anos.

2.5.5 Baterias de Alumínio-Ar e Zinco-Ar

Existe outra classe de baterias muito promissoras para uso em VEs: as metal-ar. Nessa classe de baterias os eletrodos de metal que podem ser utilizados são o zinco, alumínio, magnésio e lítio. Destes, o zinco e o alumínio são os mais indicados para aplicação veicular.

Essas baterias representam um desenvolvimento inteiramente diferente, pois não podem ser carregadas simplesmente com a reversão da corrente. É através da troca dos eletrodos negativos esgotados que se dá o processo de recarga. Nesse ponto de vista, os eletrodos de metal podem ser considerados como um tipo especial de combustível. A potência específica dessas baterias é geralmente de baixa para média (alumínio-ar 30 W/kg; zinco-ar 80-140 W/kg), no entanto, apresentam energia específica muito alta em torno de 220 Wh/kg. A baixa potência específica da bateria alumínio-ar exige uma bateria auxiliar em paralelo, tanto para fornecer o adicional de potência solicitada na aceleração, como para absorver a potência resultante da frenagem regenerativa.

É possível prever o uso de baterias zinco-ar em VEHS de longo alcance como em ônibus e caminhões. No entanto, como esta bateria não pode fornecer energia suficiente ou absorver energia regenerada durante a frenagem, algumas vantagens dos VEHS como redução na emissão e consumo de combustível podem ser perdidas.

2.5.6 Baterias para Veículos Híbridos

No caso de baterias para veículos híbridos o ciclo de carga e portanto a frequência de descarga da bateria depende da configuração híbrida utilizada. Geralmente, devido às

estratégias de gerenciamento de potência entre as fontes de um VEH, as baterias não devem sofrer com profundos níveis de descarga permanecendo em estado de carga otimizado na maior parte de sua vida. Esta característica tende a estender o tempo de vida das baterias quando comparadas a baterias freqüentemente sujeitas a profundos ciclos de descarga em veículos puramente elétricos. Baterias com alta potência específica para VEHs representam uma vantagem, pois permitem alta taxa de recarga durante a frenagem regenerativa.

2.6 Fontes Alternativas de Energia

Existe uma variedade de outras tecnologias que permitem armazenar ou gerar potência em VEs e em VEHs. Algumas dessas tecnologias não são capazes de armazenar ou gerar energia suficiente para que um veículo alcance longas distâncias, mas outras apresentam potencial para uso como parte do sistema de armazenagem de energia para auxiliar na aceleração e/ou aceitar energia regenerada da frenagem. Dentre as mais conhecidas podem ser citadas o supercapacitor, a célula a combustível e o volante de inércia.

Somente a célula a combustível e o volante de inércia podem fornecer potência suficiente para operar um veículo elétrico por um bom alcance. Desenvolvimentos recentes em células a combustível fizeram delas a fonte de potência mais provável, a curto prazo, para propulsão elétrica. Segundo Larminie e Lowry (2003), as propostas para células a combustível que podem funcionar diretamente com uso de metanol ou gasolina, e que necessitam de reformadores para convertê-los em hidrogênio, tornam as células especialmente atrativas.

Volantes de inércia ainda têm um grande obstáculo de segurança para sobrepor como, por exemplo, as conseqüências de efeitos giroscópicos em uso normal ou em um acidente ao usuário.

Outras fontes de energia, como o supercapacitor, não podem armazenar energia suficiente para um veículo alcançar longas distâncias, no entanto, devido à sua alta potência específica, são úteis quando utilizados em conjunto com outra fonte de energia como uma bateria ou ainda com outras fontes de potência primária tal como um MCI.

Abaixo é dada uma breve descrição da célula a combustível e do supercapacitor.

2.6.1 Célula a Combustível

O hidrogênio é um combustível volátil que pode ser queimado diretamente em um MCI convencional com emissão de vapor de água e uma quantidade muito baixa de óxidos de nitrogênio. No entanto, essa não é a melhor forma de utilizá-lo como uma fonte de combustível, pois sua eficiência, nesse caso, é limitada em 25 % pelo MCI e pela caixa de engrenagens. Porém, Larminie e Lowry (2003) indicam que a utilização do hidrogênio em uma célula a combustível produz eletricidade capaz de alimentar um ME de tração, apresentando, nesse caso, eficiência energética em torno de 40 % com tecnologia atual.

A célula a combustível é um dispositivo no qual a eletricidade é produzida a partir da reação do hidrogênio com oxigênio. Na década de 60 a célula a combustível tornou-se um dispositivo prático na geração de energia elétrica devido ao desenvolvimento de um eletrólito apropriado para controlar a transferência de íons de hidrogênio entre os dois gases. Este eletrólito permite o fluxo de corrente elétrica em um circuito externo do lado em que se encontra o hidrogênio para o lado em que se encontra o oxigênio, e reprime a reação explosiva que normalmente ocorre quando estes dois gases são induzidos a formar água.

Desenvolvimentos mais recentes desta tecnologia resultaram em uma célula menor e mais leve conhecida como PEM (*proton-exchange membrane*) e que opera entre 60 e 100 °C. Devido à sua portabilidade esta célula é particularmente apropriada para aplicações em automóveis. Células PEMs geram eletricidade entre 0.6 e 0.7 V com potência específica

equivalente a 120 W/kg. A energia específica depende da quantidade de hidrogênio disponível para alimentar a célula. Uma desvantagem que as células apresentam, quando utilizadas em veículos, é o grande número de módulos de 0.7 V necessários para obter uma sensível tensão de trabalho entre 200 e 300 V e, portanto um grande número de conexões elétricas é também requerido.

2.6.2 Supercapacitor

Em um supercapacitor, a interface entre o eletrodo condutivo e uma solução eletrolítica forma uma camada na qual é armazenada carga. Esta interface tem um material dielétrico de espessura muito fina. Se este dielétrico for combinado com um material de grande área superficial, como o carbono, produzirá baixa tensão e alta capacitância.

O uso de supercapacitores como dispositivos de estocagem de energia para atender a completa demanda de potência de um VE parece estar ainda um pouco distante e desenvolvimentos consideráveis são exigidos para que isto se torne possível. Como citado acima, sua alta potência específica oferece vantagem quando utilizados em VEs em combinação com uma bateria tal como a zinco-ar, que apresenta alta energia específica, ou em um VEH como um dispositivo de nivelamento de carga. Estes dispositivos também podem ser recarregados muito rapidamente tanto por uma fonte de potência externa como pela frenagem regenerativa, não requerem manutenção, não deterioram com o uso e são relativamente de baixo custo.

2.7 Estratégias de Gerenciamento de Potência em VEHs

Estratégias de gerenciamento de potência, para VEHs, geralmente tem 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 *powertrain* do veículo.

Dependendo da aplicação, algumas topologias de *powertrain* podem ser mais indicadas que outras por fornecerem menor consumo e melhor dirigibilidade. A escolha da topologia apropriada requer estudos preliminares do ciclo de condução, dimensionamento do veículo, desempenho desejado, e condições de auto-estrada ou não de operação. Uma vez determinada a topologia do veículo, o projeto de uma EGP efetiva é a chave principal para um VEH eficiente.

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.

A fim de satisfazer a essas exigências, algumas EGPs para VEHs são propostas na literatura. Em particular, segundo Lin et al. (2001), as estratégias de controle podem ser classificadas em três grupos: otimização por programação dinâmica (PD) como em Lin et al. (2003) e Pérez et al. (2006); utilização de métodos por otimização estática de acordo com Pisu, Koprubasi e Rizzoni (2005) e Musardo, Rizzoni e Staccia (2005), e técnicas de controle inteligente como o baseado em regras e sistemas *fuzzy* utilizados por Schouten, Salman e Kheir (2002), Lee et al. (2000) e Cerruto et al. (1994).

Em aplicações práticas, o comportamento real do veículo será significativamente diferente para cada solução ótima adotada. Abaixo serão analisados alguns trabalhos encontrados na literatura quanto à abordagem de EGPs em VEHs.

2.7.1 EGP Utilizando Otimização por Programação Dinâmica

Segundo Revoredo (2007), o método de otimização que utilize programação dinâmica obtém uma solução ótima global em problemas com restrições e não-lineares. A PD tem sido freqüentemente utilizada em problemas de otimização voltados para o gerenciamento do fluxo de energia em veículo elétrico híbridos.

Segundo Musardo, Rizzoni e Staccia (2005), o gerenciamento de energia de um VEH Paralelo é tratado como um problema de otimização global cujo objetivo é a determinação da divisão de potência entre o MCI e o ME que minimize o consumo e emissão de poluentes. A solução para este problema pode ser vista como uma seqüência de comandos que a cada instante de tempo alcança seus objetivos. Nesse ponto de vista, a otimização representada pelo gerenciamento de energia pode ser alcançada pela programação dinâmica. 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 um dado instante de tempo é avaliado pelo algoritmo da PD. A proposta de aproximação por PD, em Musardo, Rizzoni e Staccia (2005), tem a vantagem de tratar em um tempo razoável um problema de otimização, que caso contrário, seria difícil de validar.

Lin et al. (2001), em sua pesquisa apresenta um procedimento para a melhoria da estratégia de gerenciamento de energia em um caminhão elétrico híbrido paralelo baseado na otimização dinâmica de um dado ciclo de condução. Neste, técnicas de PD são utilizadas para determinar as ações de controle ótimo a fim de minimizar o consumo de combustível no ciclo de condução em questão. As leis de feedback dos algoritmos da programação dinâmica 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 programação dinâmica é possível

extrair regras de fácil implementação. Essas regras são então utilizadas como algoritmo de controle e segundo os autores, os algoritmos baseados em regras podem ser melhorados significativamente através desse tipo de procedimento.

Um procedimento para o projeto de uma estratégia de gerenciamento de potência quase-ótima em um VEH Paralelo é apresentado por Lin et al. (2003). 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 PD é utilizada para encontrar ações de controle ótimas incluindo a seqüência de transição de marcha e a divisão de potência entre o ME e o MCI enquanto as restrições impostas à descarga da bateria são obedecidas. Através da análise do comportamento das ações de controle da PD foram extraídas regras quase-ótimas que, ao contrário dos sinais de controle da PD, são implementáveis. A adoção deste procedimento resultou em uma significativa redução na emissão para um pequeno custo adicional no consumo de combustível.

Pérez et al. (2006), em sua pesquisa, analisa a divisão de potência entre as fontes de energia (MCI/Gerador e bateria) para 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 do veículo. O problema é tratado como um de otimização dinâmica sujeito a restrições e solucionado por uma aproximação de programação dinâmica. O objetivo de controle para o veículo em questão é minimizar o consumo de combustível enquanto o veículo opera em um ciclo de condução.

Diante dos trabalhos citados acima pode-se notar que o método de PD é geralmente utilizado como base para a melhoria de um algoritmo de controle que torna-se, depois de tal procedimento, quase-ótimo. Também, apesar da PD ser uma ferramenta perfeita para o controle ótimo de um VEH, encontrando uma solução ótima para o problema, apresenta alguns obstáculos para seu uso efetivo. O algoritmo de uma programação dinâmica é sempre baseado em hipóteses fundamentais, e isso implica numa aproximação global para

um problema que tenha certa extensão no tempo, ou seja, o problema deve ser conhecido e bem formulado por toda a sua duração. Dessa forma, para a aplicação em VEHs, a PD depende do conhecimento prévio do ciclo de condução sobre o qual o consumo de combustível deve ser minimizado, segundo Musardo, Rizzoni e Staccia (2005).

Além do conhecimento prévio do ciclo de condução, outra desvantagem da aplicação de programação dinâmica em VEHs, está no alto custo associado à implementação computacional. Em vista desses aspectos, uma aproximação mais flexível e de baixo custo no estudo de estratégias de gerenciamento de potência em VEHs pode ser dada por métodos de otimização instantânea como o conhecido por *Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS).

2.7.2 EGP Aplicando Métodos de Otimização Estática

Apesar do método de programação dinâmica representar uma poderosa ferramenta para a solução de um problema de otimização global, como o representado pelo gerenciamento de energia em um VEH, não é um método apropriado para aplicações em tempo real. A principal idéia de um controle em tempo real é a redução do critério global para um problema de otimização instantânea, introduzindo uma função custo dependente apenas de variáveis do sistema no tempo corrente. Dessa forma, um controle em tempo real utilizado em VEHs dispensaria a necessidade do conhecimento prévio do ciclo de condução como destacado por Beck, Bollig e Abel (2007).

Devido à imposição de auto sustentabilidade do estado de carga da bateria, a função custo deve levar em consideração não somente o consumo de combustível mas também as variações na energia elétrica armazenada na bateria como mostrado por Pisu, Koprubasi e Rizzoni (2005). Para tratar esses aspectos, várias aproximações para a minimização da função de custo têm sido propostas. Uma das aproximações mais difundidas na literatura

para aplicação em VEHs é a ECMS e consiste em avaliar a função custo instantânea como uma soma do consumo de combustível com o consumo de combustível equivalente relacionado à variação do estado de carga da bateria. A idéia por trás do consumo de combustível equivalente é que toda a variação no estado de carga da bateria deverá ser compensada no futuro pelo acionamento do MCI. E como a energia elétrica e a energia do combustível não são diretamente comparáveis, um fator de equivalência é então necessário.

A ECMS é fortemente dependente da definição da função custo equivalente do uso dos fatores de conversão. Infelizmente, esses fatores variam com as condições de acionamento do veículo de modo que quando definidos para um determinado ciclo de condução, podem vir a apresentar pobre desempenho ou péssimas condições de carga e recarga para outros ciclos.

Em Musardo, Rizzoni e Staccia (2005) é proposta uma nova técnica, baseada na ECMS, chamada *Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy (A-ECMS)*. Nessa nova técnica, um algoritmo adaptativo é utilizado para a estimativa dos fatores de conversão de acordo com as condições de acionamento correntes permitindo que estes sejam automaticamente ajustados independentes do ciclo de operação escolhido.

2.7.3 EGP Fundamentada em Regras e em Sistemas *Fuzzy*

Estratégias de gerenciamento de potência fundamentadas em regras e em sistemas *fuzzy* podem ser freqüentemente encontrados na literatura devido à facilidade de implementação em controladores que apresentam desempenho aceitável, como citado por Revoredo (2007). Na Seção 2.7.4 serão analisadas EGPs fundamentadas em regras e na Seção 2.7.5 serão expostos alguns trabalhos que exploram com exclusividade o emprego de sistemas *fuzzy* no gerenciamento de potência em VEHs.

2.7.4 EGP Baseado em Regras para VEHS Série

Nesta Seção serão brevemente descritas duas estratégias de gerenciamento de potência baseadas em regras que segundo Jalil, Kheir e Salman (1997) são chamadas de *thermostat* e *power split*.

Thermostat: Esta estratégia oferece um método de controle robusto para VEHS Série na qual a atividade ou não do MCI é baseado no estado de carga da bateria. Para tal, dois valores (mínimo e máximo) do estado de carga são escolhidos de tal forma que os valores compreendidos por estes representem a região de maior eficiência de operação da bateria. A estratégia *thermostat* tem a seguinte lógica: se o estado de carga alcança o valor mínimo permitido, então o MCI será acionado e operará em seu ponto de maior eficiência para carregar a bateria até que o seu valor máximo seja alcançado. Uma vez alcançado o valor máximo do estado de carga, o MCI será desativado e permanecerá neste estado até que o valor mínimo do seja novamente atingido.

Power Split: Nesta EGP a potência de demanda (P_{dem}) do sistema de tração pode ser destinada ao MCI, à bateria ou à combinação entre estas duas fontes. Aqui, a estratégia anterior é também utilizada principalmente para manter a bateria em seu estado de operação otimizado. Nesta estratégia, assim como a bateria, o MCI também é operado entre dois valores de potência mínimo (P_{min}) e máximo ($P_{máx}$) de tal forma que os valores compreendidos por estes representem a região de maior eficiência de operação do MCI.

Neste caso, a bateria é responsável por toda demanda de potência abaixo do valor representado por P_{min} , como também pelo excedente de potência quando a demanda de potência do sistema de tração for maior que $P_{máx}$. Ou seja, sempre que a potência de demanda estiver entre P_{min} e $P_{máx}$ o responsável pelo suprimento será o MCI. Caso a potência de demanda seja maior que $P_{máx}$ ambas as fontes serão responsáveis pelo fornecimento de potência ao sistema de tração.

A Fig. 2.11 ilustra o conjunto de regras que satisfazem as condições citadas acima para a estratégia de gerenciamento de energia denominada *power split*.

- ❖ A estratégia *Thermostat* opera no plano de fundo da EGP.
- ❖ Se o valor mínimo do estado de carga é alcançado, então:
 - MCI é ativado
 - $P_{MCI} \leq P_{m\acute{a}x}$
 - $P_{bat} = P_{dem} - P_{MCI}$
- ❖ Se o valor máximo do estado de carga é alcançado, então:
 - MCI está desativado se $P_{dem} \leq P_{min}$
 - $P_{MCI} = 0$
 - $P_{bat} = P_{dem}$
 - MCI é ativado se $P_{min} \leq P_{dem} \leq P_{m\acute{a}x}$
 - $P_{MCI} = P_{dem}$
 - $P_{bat} = 0$
 - MCI permanece ativado se $P_{dem} \geq P_{m\acute{a}x}$
 - $P_{MCI} = P_{m\acute{a}x}$
 - $P_{bat} = P_{dem} - P_{MCI}$
- ❖ Em qualquer situação, se o $P_{dem} \leq 0$, a frenagem regenerativa é ativada

Figura 2.11: Regras utilizadas para a estratégia de gerenciamento de energia denominada *Power Split* em VEHS Série.

2.7.5 EGPs Utilizando Sistemas *Fuzzy* em VEHS

São muitos os trabalhos encontrados na literatura que utilizam sistemas *fuzzy* na estratégia de gerenciamento de potência em VEHS Série e Paralelo.

Farrall e Jones (1993) justificam a utilização de um controle fundamentado em sistemas *fuzzy* por serem capazes de implementar um processo de tomada de decisão no qual a consequência das ações não podem ser facilmente previstas ou observadas. Neste caso, o controlador baseado em sistemas *fuzzy* é utilizado no gerenciamento de potência de um VEH Paralelo no qual a posição do pedal do acelerador ou do freio do veículo é entrada do controlador. Baseado no algoritmo de controle *fuzzy*, o controlador determinará a posição da *throttle* (entrada do MCI) e a corrente de armadura para o motor elétrico. O processo de tomada de decisão é realizado continuamente no tempo.

Cerruto et al. (1994a) destaca a importância do emprego da tecnologia de tração híbrida em transporte público urbano na contenção da poluição do ar e alto nível de ruídos sonoros presentes nestes grandes centros. Para o gerenciamento de potência do veículo proposto utilizam-se sistemas *fuzzy* na melhoria da eficiência do veículo destacando a conveniência de uma aproximação qualitativa na solução de tal problema. O fluxo de potência entre a unidade de geração, o ME e a bateria formam o VEH como mostrado na Fig. 2.12. As principais trocas energéticas são: da unidade de geração para o ME de tração; da unidade de geração para o banco de baterias; do banco de baterias para o ME, e do ME para o banco de baterias.

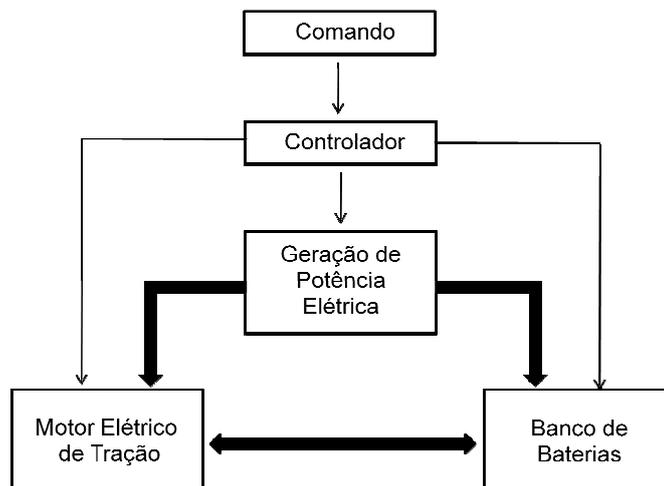


Figura 2.12: Bloco esquemático representando o fluxo de potência em VEHs

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 da 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. Baseado no 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 idéia básica aplicada ao controle do 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. Obviamente, 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) ressalta a viabilidade de sistemas *fuzzy* quando aplicados em sistemas complexos, compostos por subsistemas elétricos, mecânicos e eletroquímicos como os presentes em um VEH. Neste caso, a EGP também é voltada para um VEH Série de transporte urbano. As razões da aplicação de sistemas *fuzzy* estão conectadas à complexidade do modelo matemático de todo o veículo composto por vários sistemas e também do fato de que algumas quantidades físicas não podem ser facilmente detectadas. Aqui, a EGP é baseada em dois níveis de controle, no qual o primeiro 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 tem o objetivo de ajustar a potência gerada com base na avaliação do estado de carga em cada ponto de parada do veículo e comparar 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). Os resultados obtidos de simulações mostraram resultados satisfatórios da aplicação de sistemas *fuzzy* em EGP para VEHs de transporte urbano.

Lee et al. (2000) em sua pesquisa estuda um VEH Paralelo para transporte urbano ressaltando a importância de manter a bateria em um estado de carga aceitável através de uma EGP que não sacrifique o desempenho em acionamento do veículo. A tomada de decisão através de um controle baseado em sistemas *fuzzy* é indicada para sistemas incertos e não lineares tais como em aplicações veiculares. A EGP proposta é imune às influências de diferentes motoristas em diferentes ciclos de condução. A elaboração de regras apropriadas à implementação dos sistemas *fuzzy* considerou dados da produção de torque, de emissões e consumo de combustível obtido através de ensaios em dinamômetro.

A partir desse ponto, foram investigados diferentes padrões de motoristas como também analisou-se a carga mecânica sobre o veículo durante um ciclo de condução cujos dados obtidos também foram utilizados na formulação das regras. 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.

Schouten, Salman e Kheir (2002) em sua pesquisa desenvolvem um controlador baseado em sistemas *fuzzy* para um VEH Paralelo. Um conjunto de regras foi desenvolvido através do comando do motorista, do estado de carga da bateria e da velocidade do conjunto MCI/gerador. Essas regras têm a principal função de determinar a divisão entre as duas principais fontes de potência, MCI e o ME, bem como a função de otimizar a eficiência operacional de todas as componentes. Os resultados obtidos mostram 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 (2006a) em sua pesquisa propõem um novo método promissor fundamentado em sistemas *fuzzy* para a EGP de um VEH Paralelo. Seu trabalho divide-se em duas fases, na primeira fase, um controlador *fuzzy* é empregado para quantificar o comportamento do gerenciamento de potência. Na segunda fase, Wang e Yang (2006b), um algoritmo genético foi utilizado para o refinamento dos parâmetros do controlador *fuzzy* com o objetivo de minimizar o consumo de combustível. Os autores declaram ter empregado um método inovador capaz de sobrepor a dificuldade freqüentemente encontrada no ajuste de funções. Os resultados obtidos revelam que o “sistema *fuzzy* promissor” para EGP fornece uma plataforma para um novo sistema de gerenciamento de potência resultando na melhoria de desempenho do VEH Paralelo em questão.

Capítulo 3

Revisão Teórica

Este capítulo apresenta a revisão teórica, necessária na descrição e modelagem dos sistemas que constituem o VEH Série presente no estudo de caso do Capítulo 4. Uma revisão teórica de dinâmica veicular é apresentada nas Seções 3.2 à 3.5.2. Na Seção 3.6 é feita a revisão teórica dos sistemas equivalentes ao motor elétrico de tração e ao gerador. As Seções 3.7 e 3.8 apresentam a descrição do motor à combustão interna e da bateria, respectivamente.

3.1 Introdução

Em geral, os sistemas de interesse que compõem um VEH Série, como citado na Seção 2.2.4 são:

- o motor elétrico de tração;
- o gerador;
- o motor à combustão interna e
- a bateria.

Nesta configuração de veículo híbrido, o motor elétrico é o sistema responsável pela tração nas rodas do veículo. O motor à combustão interna, de acordo com as Seções 1.1.3 e 2.2.4.1, é acoplado ao gerador e o sistema resultante dessa união representa uma das fontes de energia ou de potência para o ME de tração. Um segundo sistema, uma bateria (ou um banco de baterias) com capacidade de geração e absorção de energia é também responsável pelo cumprimento da demanda de potência do sistema de tração elétrica como,

por exemplo, indicado por Barsali, Miulli e Possenti (2004), Jalil, Kheir e Salman (1997) e Wältermann (1996).

A Fig. 3.1 apresenta um diagrama em blocos indicando a direção do fluxo de potência em um VEH Série entre os sistemas citados acima.

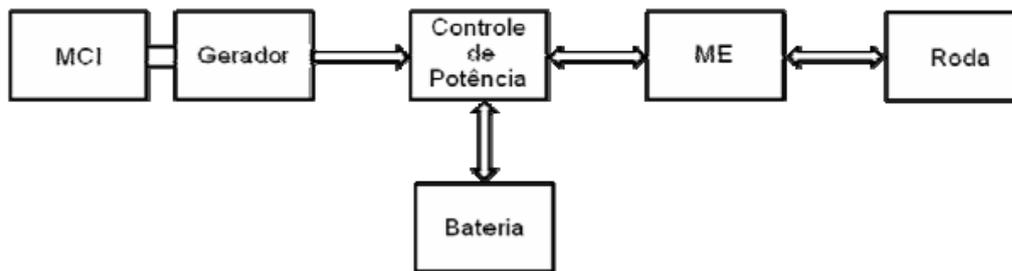


Figura 3.1: Representação de um diagrama em blocos do fluxo de energia em um VEH Série em que as setas com duplo sentido indicam o fluxo de potência entre os sistemas.

O bloco “controle de potência”, representado na Fig. 3.1, é responsável pela implantação da estratégia de gerenciamento de potência necessária para gerenciar o fluxo de energia entre todos os sistemas e avaliar a energia disponibilizada pela bateria como mostrado por Phuc et al. (2006), Wang e Yang (2006a e b), Lee et al. (2000). Para a devida validação do VEH Série 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 desenvolvido por Neto [ca. 2003].

3.2 Dinâmica Veicular

A dinâmica veicular é a área de conhecimento que descreve os movimentos do veículo, considerando, por exemplo, a aceleração e frenagem, sobre o pavimento. O comportamento dinâmico veicular é determinado pelas forças impostas sobre o veículo, a partir dos pneus

em contato com o solo, da gravidade e da aerodinâmica do veículo de acordo com Gillespie (1992).

Por uma questão de conveniência de estudo e análise preliminar, costuma-se dividir o estudo da dinâmica de veículos em três grandes áreas, como adotado por Neto [ca. 2003]:

- **Dinâmica longitudinal:** estuda o movimento longitudinal (x) e rotações em torno de (y) em resposta a torques aplicados às rodas.
- **Dinâmica vertical:** compreende o movimento vertical (z) e as rotações em torno de (x) e (y) em função de irregularidades da 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 inercial, fixado ao veículo, 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 3.2.

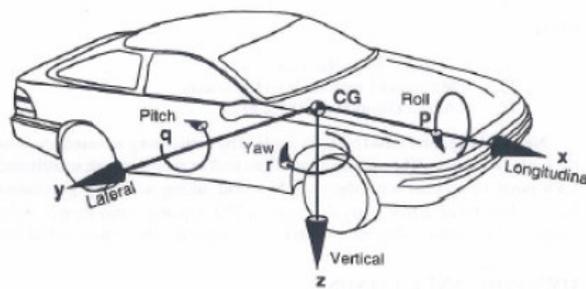


Figura 3.2: Sistema de coordenadas SAE.

Na qual: x – movimentos longitudinais, positivos para a frente do veículo;

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 [ca. 2003].

Neste trabalho, a dinâmica veicular de interesse para o estudo de caso desenvolvido no Capítulo 4 é a longitudinal.

3.3 Aceleração Longitudinal do VEH Série

Gillespie (1992) afirma que uma estimativa 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. Na Fig. 3.3 os elementos para este estudo são mostrados.

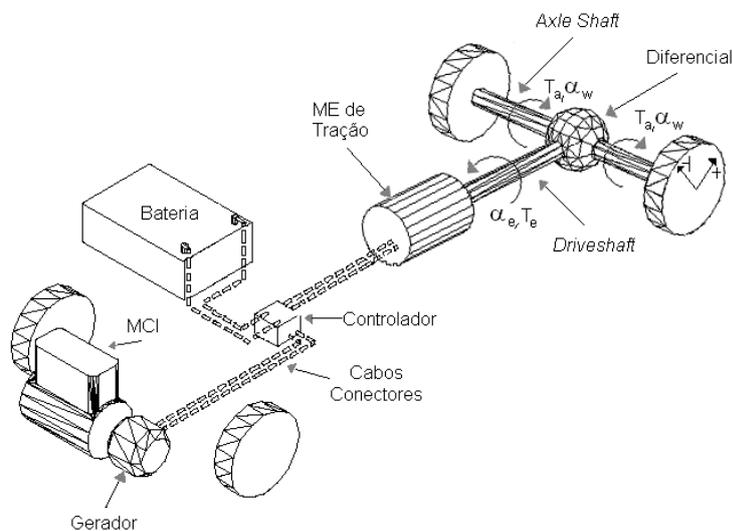


Figura 3.3: Modelo do Power Train para um VEH Série.

O objetivo é obter a aceleração do veículo a partir do torque fornecido pelo ME de tração. Para isto, seguem as hipóteses simplificadoras:

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

Baseado no estudo desenvolvido por Neto [ca. 2003] e Gillespie (1992), o torque T_a atuante nos *axle shafts* para acelerar as rodas e fornecer força de tração ao pavimento é amplificada pela relação de transmissão do diferencial N e é determinado pela segunda lei de Newton por:

$$T_a = (T_e - I_e \alpha_e) N, \quad (3.1)$$

na qual:

$T_a \triangleq$ torque sobre os *axle shafts*;

$T_e \triangleq$ torque do ME de tração e do *driveshaft*;

$I_e \triangleq$ momento de inércia do *driveshaft*;

$\alpha_e \triangleq$ aceleração angular do *driveshaft*, e

$N \triangleq$ fator de redução do diferencial.

Conseqüentemente, o torque resultante da força de tração no solo também é obtido aplicando-se a segunda lei de Newton como mostrado na eq. (3.2):

$$F_x r = T_a - I_w \alpha_w, \quad (3.2)$$

na qual: $F_x \triangleq$ força de tração transmitida ao pavimento pelas rodas;

$r \triangleq$ raio da roda;

$I_w \triangleq$ momento de inércia das rodas e dos *axle shafts*, e

$\alpha_w \triangleq$ aceleração angular das rodas.

A aceleração angular do *driveshaft* pode ser escrita em função da aceleração angular do *axle shaft* como segue:

$$\alpha_e = N\alpha_w, \quad (3.3)$$

substituindo a eq. (3.1) e (3.3) na eq. (3.2) e lembrando que a aceleração longitudinal do veículo (a_x) é igual à aceleração angular pelo produto do raio da roda, tem-se que:

$$a_x = r\alpha_w, \quad (3.4)$$

na qual: $a_x \triangleq$ aceleração longitudinal do veículo.

Dessa forma, obtém-se a força de tração entre o contato das rodas com o pavimento dada por:

$$F_x = \frac{T_e N}{r} - (I_w + I_e N^2) \frac{a_x}{r^2}, \quad (3.5)$$

Até o momento, não foram consideradas ineficiências devido ao atrito mecânico e viscoso entre as componentes do *driveline*. Segundo Gillespie (1992), os efeitos das perdas mecânicas podem ser aproximados pela adição de um valor de eficiência no primeiro termo do lado direito da eq. (3.4), resultando:

$$F_x = \frac{T_e N \eta}{r} - (I_w + I_e N^2) \frac{a_x}{r^2}, \quad (3.6)$$

na qual: $\eta \triangleq$ eficiência resultante do sistema de transmissão do *driveshaft* às rodas.

O segundo termo do lado direito da eq. (3.6) representa a “perda” de força de tração devido aos momentos de inércia do ME e das componentes do *drivetrain*.

Uma vez definida a força de tração F_x , é possível prever o desempenho da aceleração do veículo. A expressão para a aceleração deve considerar todas as forças em oposição ao movimento do veículo tendo a forma:

$$Ma_x = F_x - R_r - R_a - R_g, \quad (3.7)$$

na qual: $M \triangleq$ massa do veículo;

$R_r \triangleq$ força de resistência ao rolamento;

$R_a \triangleq$ força de resistência do ar, e

$R_g \triangleq$ força de resistência devido à inclinação do pavimento.

Substituindo a eq. (3.7) na eq. (3.6), a aceleração longitudinal do veículo é, então, dada por:

$$a_x = \left(\frac{1}{M + M_r} \right) \left[\frac{T_e \cdot N \cdot \eta}{r} - R_r - R_a - R_g \right], \quad (3.8)$$

em que: $M_r \triangleq$ massa equivalente das componentes (*driveshaft*, *axle shafts* e rodas) do *drivetrain* em rotação, como indicado por Neto [ca. 2003] e Gillespie (1992), e dada por:

$$M_r = \frac{(I_w + I_e N^2)}{r^2}. \quad (3.9)$$

As forças de resistência ao movimento do veículo são descritas na seqüente Seção.

3.4 Forças de Resistência ao Movimento do Veículo

Canale (1989) em seu trabalho afirma que as forças de resistência que atuam durante o movimento do veículo são as forças de:

1. $R_r \triangleq$ resistência ao rolamento;
2. $R_g \triangleq$ resistência devido à inclinação do pavimento;
3. $R_a \triangleq$ resistência do ar;

3.4.1 Força de Resistência ao Rolamento

O material que compõe o pneumático sofre deformações cíclicas devido à carga sobre a roda e ao movimento de rolamento. Estas deformações, por efeito da histerese do material e do atrito ao escorregamento, produzem transformação de parte da energia do movimento em energia térmica no próprio pneumático, resultando no aumento de sua temperatura de trabalho. Este aumento, quando excessivo, acelera o processo de envelhecimento do material tornando-o quebradiço e reduzindo com isso sua vida útil por desgaste. Esta energia perdida em forma de calor pode ser traduzida através de uma força contrária ao movimento da roda, chamada “força de resistência ao rolamento”. Esta força atua em todos os instantes desde o início do movimento. As principais fontes de resistência ao rolamento, como abordado por Canale (1989), nas quais os dois primeiros fatores são os de maior importância, são:

- a) Deformação elástica do pneumático na região de contato;
- b) Penetração do pneumático no solo;
- c) Escorregamento adicional nas curvas e
- d) Circulação de ar dentro do pneu e o efeito da ventilação externa.

Considerando um veículo operando em pavimento com inclinação θ , a força de resistência ao rolamento total R_{rt} presente em seu movimento é dada pela soma das forças agindo nas rodas traseiras R_{rr} e dianteiras R_{rf} e é igual a:

$$R_{rt} = R_{rr} + R_{rf} = f \cdot W \cdot \cos \theta, \quad (3.10)$$

na qual: $R_{rt} \triangleq$ força de resistência ao rolamento total;

$R_{rr} \triangleq$ força de resistência ao rolamento nas rodas traseiras;

$R_{rf} \triangleq$ força de resistência ao rolamento nas rodas dianteiras;

$f \triangleq$ coeficiente de resistência ao rolamento;

$W \triangleq$ peso do veículo;

$\theta \triangleq$ ângulo de inclinação do pavimento em graus.

$W \cdot \cos \theta \triangleq$ força normal à superfície de rolamento devido à inclinação do pavimento.

Como, geralmente os ângulos normais de inclinação dos pavimentos são pequenos, pode-se assumir que para qualquer um desses ângulos o valor de $\cos \theta$ é 1. Assim a eq.(3.10) fica:

$$R_{rt} = R_{rr} + R_{rf} = f \cdot W. \quad (3.11)$$

O erro introduzido por essa simplificação é somente de 5 % para um pavimento com inclinação de 32 %.

O coeficiente de resistência ao rolamento “f” é um fator adimensional que expressa o efeito de complicadas e interdependentes propriedades físicas do pneumático em contato com o solo. Obter e padronizar as condições de medidas citadas acima é quase sempre uma difícil tarefa dada a complexidade do número de variáveis envolvidas. O valor de “f”

pode ser estimado diante dos fatores como solo, pressão interna do pneumático, raio do pneumático, velocidade, força de tração, carga radial e temperatura.

Para cálculos com menor precisão de desempenho, como apontado por Canale (1989), pode-se adotar os valores para “f” como os dados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Coeficientes de resistência ao rolamento (*f*).

	Concreto	Dureza Média	Areia
Carros Passageiros	0,015	0,10	0,30
Caminhões Pesados	0,012	0,08	0,25
Tratores	0,02	0,04	0,20

3.4.2 Força de Resistência Devido à Inclinação do Pavimento

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

$$R_g = W \cdot \sin \theta. \quad (3.12)$$

É usual, na literatura, encontrar a inclinação do pavimento em porcentagem de acordo com a eq. (3.13):

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

na qual: $G \triangleq$ inclinação do pavimento em porcentagem.

Pode-se notar que para ângulos pequenos é possível assumir que $\sin \theta \cong \tan \theta$, implicando em:

$$R_G = W \cdot \sin \theta \cong W \cdot \tan \theta = \frac{W \cdot G}{100}, \quad (3.14)$$

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

3.4.3 Força de Resistência do Ar

Veículos em movimento, evidentemente, produzem um escoamento de ar. O “sopro” desse ar faz aparecer “forças aerodinâmicas” e “torques aerodinâmicos” em relação ao CG do veículo e em relação aos pontos de contato das rodas no pavimento. As forças aerodinâmicas são calculadas em função da velocidade do veículo, da direção e velocidade do vento local, do tamanho e forma da carroceria, além de outros fatores, como assinalado por Cunha (1998) e Canale (1989).

De acordo com as leis aerodinâmicas, um veículo movendo-se através do ar sofre uma força de resistência “ R_a ” dada por:

$$R_a = \frac{C_a \cdot \rho \cdot A \cdot V_{vel}^2}{2}, \quad (3.15)$$

em que: $\rho \triangleq$ densidade do ar;

$C_a \triangleq$ coeficiente de arraste aerodinâmico;

$A \triangleq$ área frontal do veículo;

$v_r \triangleq$ velocidade relativa entre o veículo e o ar, e

$g \triangleq$ aceleração gravitacional.

A influência da densidade do ar deve ser considerada em cálculos de maior exigência de precisão de desempenho. A diferença entre densidades extremas pode ser de 20 % ou menos.

A força de resistência do ar nos veículos é originada basicamente de três fatores: resistência de forma, atrito do ar com as laterais do veículo e fluxo de ar através do automóvel para refrigeração ou ventilação. E segundo Canale (1989) esses três fatores devem ser considerados no coeficiente de resistência do ar “ ” que possui um valor particular para cada veículo.

3.5 Desempenho em Frenagem

A capacidade de frear, que determina a habilidade do veículo de diminuir sua velocidade ou parar, é um fator importante de desempenho do mesmo. O desempenho em desaceleração é uma das características mais importantes do comportamento do veículo, uma vez que está intimamente relacionado à segurança de operação deste como destacado em Neto [ca. 2003] e Gillespie (1992).

As forças, em consideração, que agem no veículo durante a frenagem, podem ser vistas na Fig. 3.4.

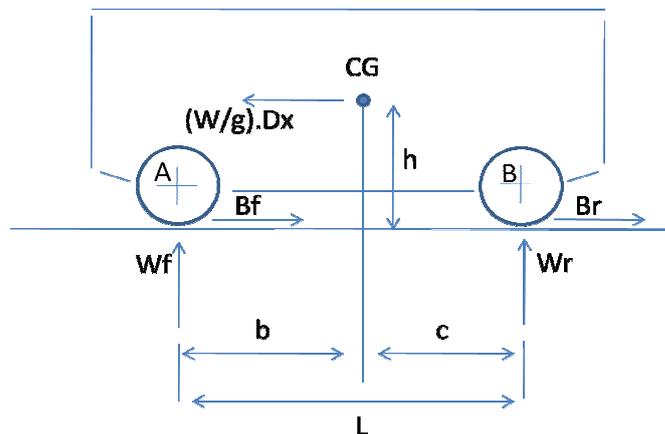


Figura 3.4: Forças agindo em um veículo durante frenagem.

Nesta figura: $L \triangleq$ distância entre eixos;

$b \triangleq$ distância entre o eixo dianteiro e o CG;

$c \triangleq$ distância entre o eixo traseiro e o CG;

$h \triangleq$ altura do CG;

$W_f \triangleq$ peso dinâmico no eixo dianteiro;

$W_r \triangleq$ peso dinâmico no eixo traseiro;

$B_f \triangleq$ força de frenagem nas rodas dianteiras;

$B_r \triangleq$ força de frenagem nas rodas traseiras, e

$D_x \triangleq$ desaceleração na frenagem.

Como apontado por Neto [ca. 2003] e Gillespie (1992), os aspectos de interesse no estudo da frenagem de um veículo podem ser citados o tempo, a distância e a máxima desaceleração que dependem dos seguintes fatores:

- Tipo de freio
- Distribuição da força de frenagem
- Geometria do veículo
- Características do contato pneu/pavimento

3.5.1 Efeito das Perdas na Frenagem

As forças sobre um veículo que contribuem para a desaceleração durante a frenagem são originadas de um número de diferentes fontes. Embora as forças atuantes nos freios representem a fonte primária de frenagem, outras, como apontado por Canale (1989) e Neto [ca. 2003], podem ser citadas:

- **força de resistência ao rolamento:** esta força sempre atua no sentido oposto ao movimento do veículo. A força de resistência dada pela eq. (3.11) contribui para a desaceleração total do veículo com um valor em torno de 0.01 g.

- **força de resistência do ar:** como visto na Seção 3.4.3, esta força é proporcional ao quadrado da velocidade, assim, a baixas velocidades pode ser desprezada. Em condições normais de operação do veículo esta força pode contribuir com 0.03 g na desaceleração total.

- **efeito freio motor:** durante a frenagem, o ME opera como um gerador (como será discutido na Seção 3.6.7) produzindo torque negativo e conseqüentemente atuando na desaceleração do veículo.

3.5.2 Análise da Transferência de Carga Dinâmica Durante a Frenagem

A máxima desaceleração é obtida quando todas as rodas são freadas simultaneamente de acordo com a máxima adesão possível como apontado por Canale (1989), Neto [ca. 2003] e Gillespie (1992).

Os fatores preponderantes na força de frenagem sobre um eixo são a força normal e o coeficiente de atrito. Durante a frenagem ocorre uma transferência de carga dinâmica do eixo traseiro para o dianteiro de tal forma que a carga sobre um eixo é igual à soma da carga transferida e da carga estática. Assim, a distribuição ideal das forças de frenagem varia com esta transferência de carga e conseqüentemente com a desaceleração aplicada ao veículo.

Para o estudo da transferência de carga dinâmica durante a frenagem não serão consideradas as forças de resistência, ao movimento do veículo, descritas acima e na Seção 3.5.1. De acordo com a Fig. 3.4, é considerado um modelo veicular em pavimento sem inclinação no qual as somatórias dos torques, segundo Gillespie (1992), em torno dos pontos A e B são dadas por:

$$W_f = \frac{1}{L}(c \cdot W + B \cdot h) \quad (3.16)$$

$$W_r = \frac{1}{L}(b \cdot W - B \cdot h) \quad (3.17)$$

na qual: $B \triangleq$ soma das forças de frenagem atuantes nos eixos dianteiro (B_f) e traseiro (B_r).

A somatória das forças paralelas ao solo é:

$$B = B_f + B_r = WgD_x. \quad (3.18)$$

Substituindo a eq. (3.18) nas eqs. (3.16) e (3.17):

$$W_f = \frac{c}{L} \cdot W + \frac{h}{L} \cdot \frac{W}{g} \cdot D_x, \quad (3.19)$$

$$W_r = \frac{b}{L} \cdot W - \frac{h}{L} \cdot \frac{W}{g} \cdot D_x. \quad (3.20)$$

Nas eqs. (3.19) e (3.20), o primeiro termo representa o peso estático sobre o eixo dianteiro (W_{fs}) e sobre o eixo traseiro (W_{rs}), respectivamente. Reescrevendo as eqs. (3.19) e (3.20):

$$W_f = W_{fs} + \frac{h}{L} \cdot \frac{W}{g} \cdot D_x, \quad (3.21)$$

$$W_r = W_{rs} - \frac{h}{L} \cdot \frac{W}{g} \cdot D_x, \quad (3.22)$$

nas quais: $W_{fs} \triangleq$ peso estático sobre o eixo dianteiro, e

$W_{rs} \triangleq$ peso estático sobre o eixo traseiro.

O segundo termo do lado direito das eqs. (3.21) e (3.22) representa a transferência de carga dinâmica que ocorre durante a frenagem.

Em cada eixo, a máxima força de frenagem será dada por:

$$F_{xmf} = \mu \cdot W_f = \mu \cdot \left(\frac{c}{L} \cdot W + \frac{h}{L} \cdot \frac{W}{g} \cdot D_x \right), \quad (3.23)$$

$$F_{xmr} = \mu \cdot W_r = \mu \cdot \left(\frac{b}{L} \cdot W - \frac{h}{L} \cdot \frac{W}{g} \cdot D_x \right), \quad (3.24)$$

em que: $F_{xmf} \triangleq$ máxima força de frenagem no eixo dianteiro;

$F_{xmr} \triangleq$ máxima força de frenagem no eixo traseiro, e

$\mu \triangleq$ máximo coeficiente de adesão e dado por $\frac{D_x}{g}$.

Assim, pode-se ver que a máxima força de frenagem depende da desaceleração e é diferente para cada eixo.

Substituindo $\frac{c}{L}$ por $\left(1 - \frac{b}{L}\right)$ na eq. (3.23), tem-se:

$$F_{xmf} = \mu \cdot W \left(\left(1 - \frac{b}{L}\right) + \frac{h}{L} \cdot \frac{D_x}{g} \right), \quad (3.25)$$

$$F_{xmr} = \mu \cdot W \cdot \left(\frac{b}{L} - \frac{h}{L} \cdot \frac{D_x}{g} \right). \quad (3.26)$$

Agora, acompanhando o raciocínio desenvolvido por Neto [ca. 2003] a fim de expressar F_{xmr} em função de F_{xmf} , tem-se que chamando $\frac{b}{L}$ de ξ e $\frac{h}{L}$ de v e substituindo:

$$F_{xmf} = W \cdot \mu \left((1 - \xi) + v \cdot \frac{D_x}{g} \right), \quad (3.27)$$

$$F_{xmr} = W \cdot \mu \left(\xi - v \cdot \frac{D_x}{g} \right), \quad (3.28)$$

A representação das forças de frenagem dianteira e traseira (eqs. (3.27) e (3.28)) normalizadas e somadas fornece:

$$\frac{F_{xmr}}{W} = \frac{D_x}{g} - \frac{F_{xmf}}{W}, \quad (3.29)$$

que representa a relação direta entre as forças de frenagem nos eixos dianteiro e traseiro.

A fim de expressar a força normalizada $\frac{F_{xmr}}{W}$ da eq. (3.29) somente em função da força $\frac{F_{xmf}}{W}$, também normalizada, segue-se o procedimento abaixo.

Reescrevendo a eq. (3.27):

$$\frac{F_{xmf}}{W} = \frac{D_x}{g} \cdot (1 - \xi) + \left(\frac{D_x}{g} \right)^2 \cdot v, \quad (3.30)$$

e reagrupando os termos em função de $\frac{D_x}{g}$:

$$\left(\frac{D_x}{g} \right)^2 \cdot v + \frac{D_x}{g} \cdot (1 - \xi) - \frac{F_{xmf}}{W} = 0, \quad (3.31)$$

tem-se uma equação de segundo grau na qual o termo $\frac{D_x}{g}$ é dado por:

$$\frac{D_x}{g} = -\frac{(1 - \xi)}{2v} + \sqrt{\left(\frac{1 - \xi}{2v} \right)^2 - \frac{F_{xmf}}{Wv}}. \quad (3.32)$$

Substituindo a eq. (3.32) na eq. (3.29) obtêm-se a força máxima de frenagem no eixo traseiro em função da correspondente força no eixo dianteiro, como apresentado por Neto [ca. 2003]:

$$\frac{F_{xmr}}{W} = \sqrt{\left(\frac{1 - \xi}{2v}\right)^2 - \frac{F_{xmf}}{Wv} - \frac{(1 - \xi)}{2v} - \frac{F_{xmf}}{W}}. \quad (3.33)$$

Esta equação representa uma curva de uma função raiz quadrada em F_{xmf} ou uma parábola em F_{xmr} . A eq. (3.33) é utilizada para analisar o desempenho de um freio em função de sua distribuição de forças de frenagem dianteira e traseira.

3.6 Motor Elétrico de Tração

Como citado na Seção 2.3, os VEs e VEHS podem apresentar em sua configuração, diferentes tipos de MEs como sistemas de tração. No entanto, a forma mais simples de um motor elétrico, é o motor CC com escovas. Segundo Larminie e Lowry (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.

3.6.1 Princípios de Motores CC com Imãs Permanentes

Esta Seção está focada sobre os princípios básicos de motores CC com imãs permanentes como os utilizados por Kenjo e Nagamori (1985).

3.6.2 Compreensão de Termos Básicos

Dentre os diferentes tipos de motores elétricos de corrente contínua, segundo Kenjo e Nagamori (1985), na Fig. 3.5 podem ser vistos os componentes e os termos básicos pelos quais são formados e conhecidos.

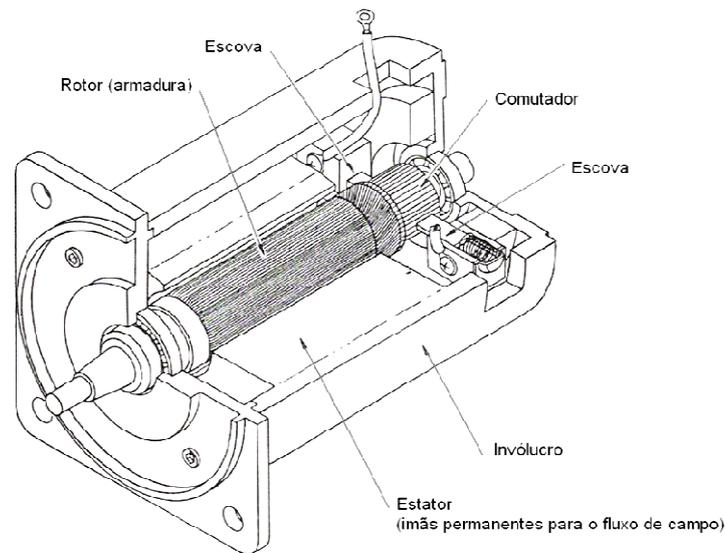


Figura 3.5: Vista em corte transversal de um motor elétrico CC.

De acordo com a Fig. 3.5:

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 Fig. 3.5 o sistema de campo é formado por dois ímãs permanentes 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 Fig. 3.5 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 Fig. 3.5 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.

3.6.3 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 Fig. 3.6 mostra a atuação de uma força sobre um condutor, pelo qual flui corrente elétrica, quando colocado em um campo magnético. A direção desta força é determinada pela regra da mão-esquerda como ilustrado na mesma figura, e sua magnitude é dada pela eq. (3.34):

$$F = B_d I L_d, \quad (3.34)$$

na qual: $F \triangleq$ força;

$B_d \triangleq$ densidade do fluxo magnético;

$I \triangleq$ corrente elétrica, e

$L_d \triangleq$ comprimento do condutor.

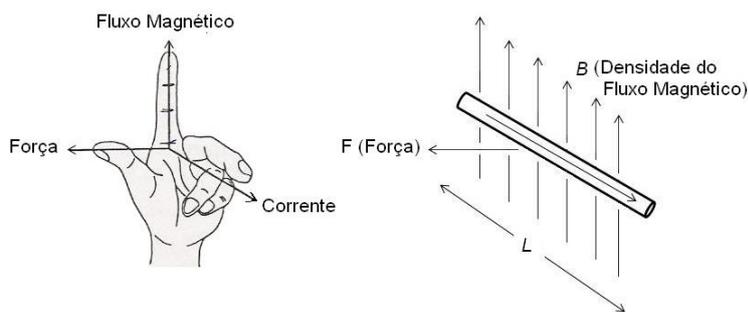


Figura 3.6: Regra da mão-esquerda de Fleming.

O torque obtido quando uma única bobina é colocada em um campo magnético é ilustrado na Fig. 3.7. Nesta figura, existem dois condutores presentes, \overline{AB} e \overline{CD} e a magnitude da força que age em cada condutor é determinada pela eq. (3.34). As direções das forças presentes em cada um dos segmentos condutores citados são opostas. Na Fig. 3.7 o torque T em torno do eixo OO' tem sentido horário e dado pela eq. (3.35):

$$T_{el} = 2R_d F = 2R_d B_d I L_d, \tag{3.35}$$

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

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

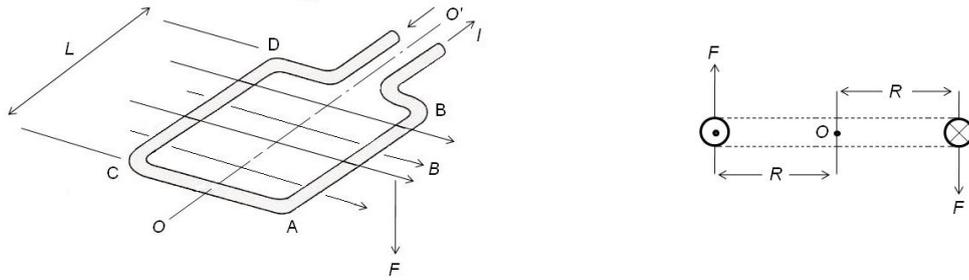


Figura 3.7: Bobina sob a ação de um campo magnético.

3.6.4 Constante de Torque

A armadura do motor apresenta distribuição de corrente conforme a ilustrada na Fig. 3.8. Nesta figura pode-se observar que o fluxo de corrente nos condutores da direita do eixo OO' terá sentido orientado do “leitor para o plano da folha”, e o fluxo condutor à esquerda do eixo OO' terá o 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.

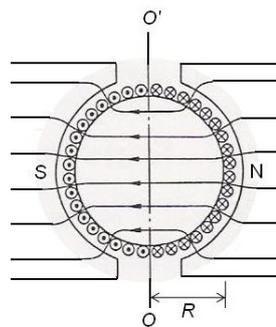


Figura 3.8: Distribuição do fluxo de campo e da corrente no rotor.

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 OO' igual a:

$$T_{el} = ZR_d B_d L_d I_a / 2 \quad (3.36)$$

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

$$\phi = \pi R_d L_d B_d, \quad (3.37)$$

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

E substituindo a eq. (3.37) na eq. (3.36) tem-se:

$$T_{el} = (Z/\pi)\phi I_a / 2. \quad (3.38)$$

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:

$$K_T = (Z/2\pi)\phi, \quad (3.39)$$

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

Agora, substituindo a eq. (3.39) na eq. (3.38) obtém-se a equação para o torque em função da constante de torque K_T dada pela eq. (3.40):

$$T_{el} = K_T \cdot I_a. \quad (3.40)$$

3.6.5 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 eq. (3.41):

$$E = vB_dL_d, \quad (3.41)$$

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 pólos 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 soma é chamada de força contra eletromotriz e seu valor é diretamente proporcional à velocidade angular de rotação do motor elétrico e é dada por:

$$E = K_e \Omega, \quad (3.42)$$

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:

$$K_e = K_T \equiv K, \quad (3.43)$$

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.

3.6.6 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 Fig. 3.9. Neste circuito, a resistência de armadura r_a está em série com a fem E .

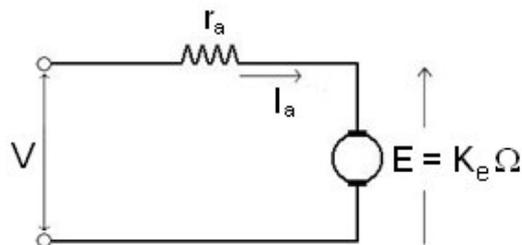


Figura 3.9: Circuito equivalente para um motor de C.C. com ímãs permanentes.

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

$$V = r_a I_a + K_e \Omega, \quad (3.44)$$

na qual: $V \triangleq$ tensão nos terminais do ME, e

$r_a \triangleq$ resistência do circuito de armadura.

E isolando a corrente de armadura da eq. (3.44):

$$I_a = (V - K_e \Omega) / r_a \quad (3.45)$$

Agora, substituindo a eq. (3.45) na eq. (3.40), obtém-se a equação que fornece o comportamento do torque do motor em função da velocidade de rotação, conforme destacado por Kenjo e Nagamori (1985) e Larminie e Lowry (2003):

$$T_{el} = K_T \cdot I_a = K_T / r_a (V - K_e \Omega). \quad (3.46)$$

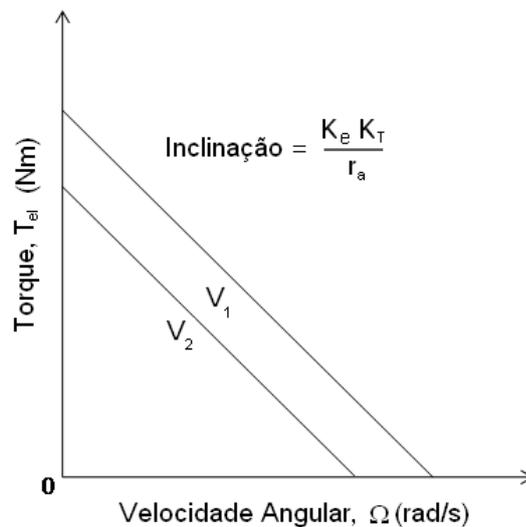


Figura 3.10: Torque versus velocidade angular de um motor elétrico CC.

A Fig. 3.10 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 e Lowry (2003). No

entanto, é importante destacar que somente os motores CC e os sem escovas de CC apresentam este comportamento.

3.6.7 Regeneração

Agora, considerando o circuito equivalente da Fig. 3.11 será discutido o caso no qual a corrente retorna para a fonte de potência do motor. Quando o motor opera à tensão terminal V 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 eq. (3.47):

$$I_a = \frac{E - V}{r_a}. \quad (3.47)$$

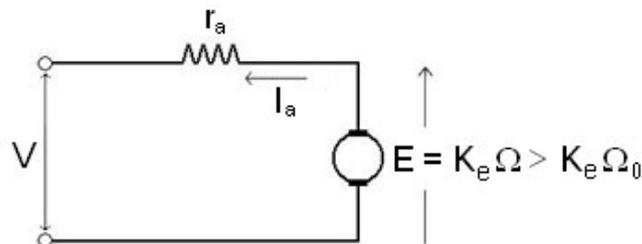


Figura 3.11: Direção da corrente e magnitude da fcm na ação regenerativa.

A potência resultante da regeneração é dada pela eq. (3.48):

$$P = P_0 - P_L = (K_e \Omega - r_a I_a) I_a, \quad (3.48)$$

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 eq. (3.47), obtém-se que a potência regenerada é igual ao produto da tensão da fonte pela corrente de armadura:

$$P = V I_a. \quad (3.49)$$

3.6.8 Dinâmica do Motor CC com Campo Independente.

Como discutido na Seção 2.4, em VEs e em VEHS os motores síncronos e assíncronos podem ser utilizados como sistemas 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 Wältermann (1998) em sua pesquisa. Neste trabalho, o ME utilizado como sistema de tração para o estudo de caso será um CC com campo independente.

3.6.9 O Motor CC com Campo Independente Ideal

A representação esquemática do modelo de motor elétrico CC com campo independente é mostrada na Fig. 3.12 como também indicada por Fitzgerald, Kingsley e Kusko (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 Fig. 3.12a, 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.

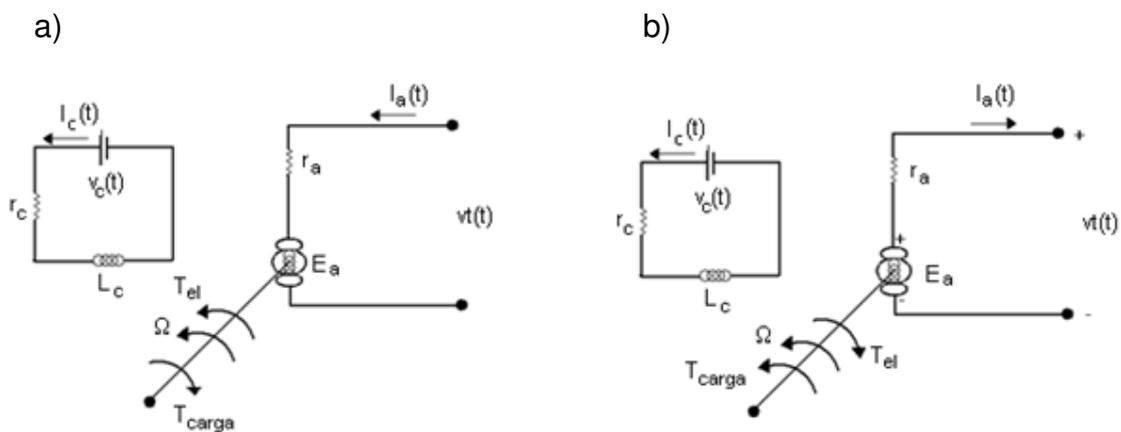


Figura 3.12: Representação esquemática de uma máquina de C.C. mostrando as direções de referência um motor (a) e para um gerador (b).

A Fig. 3.12b, mostra os sentidos de referência para a máquina atuando como um gerador, e neste caso, como citado na Seção 3.6.6 o T_{carga} terá o mesmo sentido da velocidade de rotação do eixo da máquina e sentido contrário ao do T_{el} .

3.6.10 Equações Dinâmicas do ME CC

Os termos de acoplamento eletromecânico são o torque produzido pelo motor e a fcm dados pelas eqs. (3.40) e (3.42). De acordo com Fitzgerald, Kingsley e Kusko (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 C.C. ideal da Fig. 3.12, a eq. (3.50) para o circuito do campo é:

$$v_c(t) = r_c I_c(t) + L_c \frac{dI_c(t)}{dt}, \quad (3.50)$$

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 $v_c(t)$ 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 C.C. com ímãs permanentes.

Com as direções de referência para motores (Fig. 3.12a), a equação de tensão para o circuito de armadura é dada por:

$$v_t(t) = r_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a, \quad (3.51)$$

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 eq. (3.51) com condições iniciais nulas ou sistema inicialmente desenergizado fornece:

$$V_t(s) = E_a(s) + (r_a + sL_a)I_a(s), \quad (3.52)$$

e isolando $I_a(s)$:

$$I_a(s) = \frac{(V_t(s) - E_a(s))}{(r_a + sL_a)}, \quad (3.53)$$

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

$$T_{el} - T_{carga} - D\Omega = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (3.54)$$

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 eq. (3.54) com condições iniciais nulas tem-se:

$$T_{el}(s) - T_{carga}(s) = (D + sJ)\Omega(s), \quad (3.55)$$

e isolando $\Omega(s)$:

$$\Omega(s) = \frac{(T_{el}(s) - T_{carga}(s))}{D + sJ}. \quad (3.56)$$

Já para os sentidos de referência do gerador (Fig. 3.12b), as transformadas de Laplace das equações de tensão de armadura e torque são dada por:

$$V_t(s) = E_a(s) - (r_a + sL_a)I_a(s), \quad (3.57)$$

$$T_{carga}(s) - T_{el}(s) = (D + sJ)\Omega(s), \quad (3.58)$$

3.7 Motor à Combustão Interna

Segundo Wältermann (1996) e Schouten, Salman e Kheir (2002), geralmente, a modelagem de MCIs em VEHs é realizada por meio de mapas de torque em função da posição da *throttle* (α) e da velocidade de rotação do motor (n):

$$T = f(\alpha, n), \quad (3.59)$$

na qual: $T \triangleq$ torque do motor à combustão interna;

$\alpha \triangleq$ posição da *throttle* em porcentagem, e

$n \triangleq$ velocidade de rotação do motor à combustão interna.

A aproximação obtida pela utilização de mapas ignora efeitos complexos sobre as variáveis do sistema formado pelo MCI bem como seu comportamento transiente. Neste contexto, a modelagem de MCIs através de mapas apresenta precisão suficiente para a modelagem de VEHs.

Rizoulis, Burl e Beard (2001) destacam que o desenvolvimento de uma estratégia de controle para um veículo híbrido é dependente das características de operação do MCI. Nesta Dissertação, a operação do MCI é baseada em mapas de torque e potência em função da posição da *throttle* (α) e da velocidade de rotação do MCI (n) sobre as quais a estratégia de gerenciamento de energia do VEH será controlada.

A fim de visualizar a dependência entre as variáveis da eq. (3.59), obteve-se o torque para diferentes posições fixas da *throttle* sobre as possíveis velocidades de rotação alcançadas pelo MCI. Na Fig. 3.13 é possível visualizar o torque do MCI em Nm como função de sua velocidade em rpm e da posição da *throttle* em porcentagem.

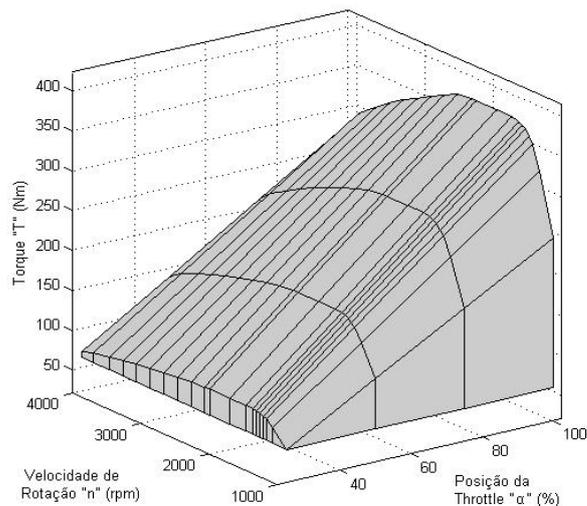


Figura 3.13: Superfície de torque de um MCI em função da velocidade de rotação “ n ” e da posição da throttle “ α ”.

3.8 Bateria

É possível construir modelos de baterias que sejam capazes de descrever detalhados fundamentos físicos e químicos. Porém, segundo Larminie e Lowry (2003) a modelagem de uma bateria é notoriamente difícil e imprecisa dependendo de parâmetros como temperatura, e tempo de uso e manuseio, por exemplo. Neste contexto, o modelo de bateria aqui proposto é restrito às considerações expostas nas Seções que seguem e fundamentadas nos modelos utilizados por Cerruto et al. (1994), Larminie e Lowry (2003) e Teo (2007).

3.8.1 Circuito Equivalente da Bateria

A primeira tarefa na simulação do desempenho de uma bateria é construir um circuito equivalente cujos elementos apresentem comportamento previsível. Neste trabalho é considerado o circuito equivalente básico mostrado na Fig. 3.14.

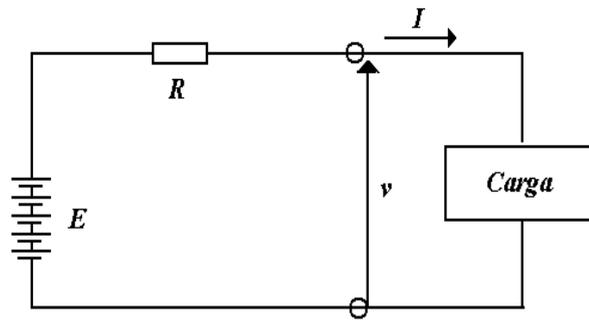


Figura 3.14: Exemplo de um modelo simplificado de circuito para uma bateria em que R é a resistência interna; E , a tensão de circuito aberto; I a corrente e v a tensão de alimentação.

Apesar do simples circuito equivalente da bateria, os valores dos parâmetros de circuito (E e R) não são constantes. A tensão de circuito aberto E é o primeiro parâmetro importante a ser estabelecido e que varia com a profundidade de descarga (*depth of discharge*, DoD) da bateria. No caso de uma bateria de ácido e chumbo, o valor de E é aproximadamente proporcional ao DoD da bateria como mostrado na Fig. 3.15.

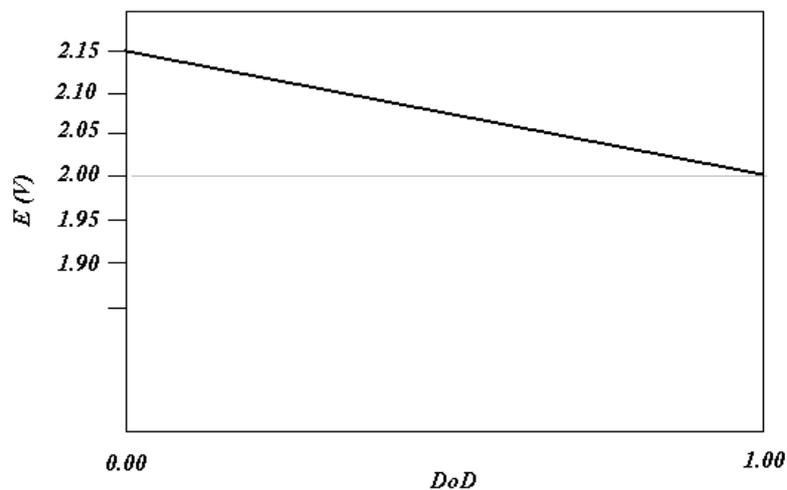


Figura 3.15: Gráfico da tensão de circuito aberto, E , em função da profundidade de descarga, DoD, para uma bateria de ácido e chumbo.

Considerando que a profundidade de descarga seja variável e assumindo valor igual zero quando completamente carregada e valor igual a um quando descarregada, então E é dada por:

$$E_b = m \cdot (2.15 - \text{DoD} \cdot (2.15 - 2.00)), \quad (3.60)$$

na qual: $E_b \triangleq$ tensão de circuito aberto da bateria;

$m \triangleq$ número de células da bateria, e

$\text{DoD} \triangleq$ profundidade de descarga da bateria.

O valor da resistência interna também precisa ser definido e seu valor é aproximadamente constante para uma bateria, mas também é afetado pelo DoD e pela temperatura. Uma aproximação de primeira ordem para a resistência interna de uma bateria de ácido e chumbo pode ser dada por:

$$R = m \cdot \frac{0.022}{C_{10}}, \quad (3.61)$$

em que: $R \triangleq$ resistência interna da bateria, e

$C_{10} \triangleq$ capacidade em Ampère-hora para uma taxa de descarga de dez horas.

3.8.2 Modelagem da Capacidade da Bateria

Como visto na Seção 2.5, uma bateria apresenta capacidade menor que a esperada, caso altas taxas de descarga de corrente sejam solicitadas. Por esse motivo, é importante prever o efeito da corrente sobre a capacidade, e para isso utiliza-se o modelo de Peukert do comportamento da bateria. Embora este modelo não seja muito preciso a baixas

correntes, para altas correntes é capaz de modelar o comportamento de uma bateria com exatidão.

Esse modelo parte do pressuposto de que existe uma capacidade, chamada Capacidade de Peukert, dada por:

$$C_p = I^k \cdot t, \quad (3.62)$$

na qual: $C_p \triangleq$ Capacidade de Peukert;

$k \triangleq$ coeficiente de Peukert, e

$t \triangleq$ tempo.

O valor de k é constante e igual a 1.2 para baterias de ácido e chumbo. Na prática, a Capacidade de Peukert é calculada como no seguinte exemplo: uma bateria com capacidade nominal de 76 Ah para uma taxa de descarga de 5 hs tem capacidade de 76 Ah se descarregada à uma corrente de:

$$I = 10/5 = 8 \text{ A}. \quad (3.63)$$

Se o coeficiente de Peukert é 1.2, então a Capacidade de Peukert é:

$$C_p = 8^{1.2} \cdot 5 = 78.6 \text{ Ah}. \quad (3.64)$$

Conhecida a Capacidade de Peukert, é possível obter o tempo de descarga da bateria caso seja solicitada uma corrente I qualquer, ou seja, neste exemplo, o tempo de descarga é dado por:

$$t = C_p / I^k. \quad (3.65)$$

3.8.3 Profundidade de Descarga da Bateria

Seja δt o intervalo de tempo em segundos entre cálculos consecutivos, para uma solicitação de corrente constante, a carga efetiva removida da bateria será igual ao produto $\delta t \cdot I^k$. No entanto, para que a unidade de carga possa ser convertida para a unidade em Ah, torna-se necessário dividir δt por 3600. Seja CR_n a carga total removida de uma bateria no n -ésimo passo de simulação, então pode-se dizer que:

$$CR_{n+1} = CR_n + (\delta t \cdot I^k)/3600 \text{ Ah}, \quad (3.66)$$

na qual: $CR \triangleq$ carga removida da bateria.

É importante estabelecer que esta é a carga removida das placas da bateria e não a carga total fornecida pela bateria ao veículo e que é dada por:

$$CS_{n+1} = CS_n + (\delta t \cdot I)/3600 \text{ Ah}, \quad (3.67)$$

na qual: $CS \triangleq$ carga fornecida pela bateria.

A carga fornecida pela bateria (CS) normalmente resultará em um valor menor em relação à carga removida das placas (CR) devido às reações de alto descarga que ocorrem dentro da bateria.

A profundidade de descarga da bateria é dada pela razão entre a carga removida e a capacidade original, assim no n -ésimo passo de simulação tem-se:

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p}. \quad (3.68)$$

Dessa forma, os valores encontrados para DoD podem ser utilizados no cálculo da tensão de circuito aberto E da eq. (3.60) e conseqüentemente no cálculo da tensão nos terminais da bateria como na eq.(3.69):

$$V_b = E - R \cdot I, \quad (3.69)$$

na qual: $V_b \triangleq$ tensão nos terminais da bateria.

Na literatura, é comum encontrar o termo “estado de carga” do termo em inglês *state of charge*, que é definido como a diferença entre a máxima carga possível da bateria (100%) e a quantidade de descarga imposta, ou seja:

$$\text{SoC}_n = 1 - \text{DoD}_n, \quad (3.70)$$

em que: $\text{SoC} \triangleq$ estado de carga da bateria.

3.8.4 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 elétrica diretamente da bateria no caso de VEs. Desse ponto de vista é interessante simular a operação de uma bateria a uma certa potência que à corrente. Em geral, a potência pode ser dada por:

$$P_b = V_b \cdot I, \quad (3.71)$$

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

A eq. (3.71) combinada com a eq. (3.69) fornece:

$$P_b = V_b \cdot I = (E - R \cdot I) \cdot I = E \cdot I - R \cdot I^2, \quad (3.72)$$

e isolando I tem-se:

$$I = \frac{(-E + \sqrt{E^2 + 4 \cdot R \cdot P_b})}{2 \cdot R}, \quad (3.73)$$

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

Capítulo 4

Estudo de Caso

Neste capítulo são apresentadas e definidas as modelagens dos sistemas e subsistemas do VEH Série em questão. A modelagem da dinâmica longitudinal e do ME de tração são apresentadas na Seção 4.1. Nas Seções 4.2 e 4.3 são definidos os modelos dos sistemas equivalentes às fontes de energia MCI/gerador e bateria, respectivamente. Na Seção 4.4 são abordadas as EGPs utilizadas no gerenciamento do fluxo de potência do veículo. Na Seção 4.5 é apresentada a união dos sistemas analisados, através de um fluxograma, para composição do veículo proposto, e o dimensionamento das fontes de energia do veículo é dado na Seção 4.6.

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. Esse procedimento possibilita a adoção de uma massa equivalente do veículo, à qual são somadas as inércias rotativas, que por sua vez, dependem das relações de transmissão conforme analisado na Seção 3.2.

O estudo da dinâmica longitudinal de veículos elétricos ou elétrico híbridos, não difere do realizado para veículos convencionais. De acordo com a análise realizada para veículos convencionais, o reconhecimento de alguns subsistemas fundamentais como o motor de

tração, diferencial, eixos, rodas e sistema de freios são também necessários para a modelagem da dinâmica longitudinal em VEHs.

Os principais subsistemas – considerados neste trabalho – envolvidos no estudo da dinâmica longitudinal para um VEH Série são descritos na Fig. 3.3. O sistema de propulsão, considerado com tração nas rodas dianteiras, consiste de um motor elétrico utilizado na tração das rodas motoras, um diferencial, eixos rígidos (*driveshaft e axle shafts*) e rodas.

O modelo veicular proposto foi obtido no ambiente Matlab/Simulink® 7.3.0. A utilização de outros softwares como o *advanced vehicle simulator - ADVISOR* e *Powertrain System Analysis Toolkit - PSAT*, construídos no ambiente Matlab/Simulink® 7.3.0, especificamente para a simulação de VEHs como utilizados por Ferraz (2004) e Rousseau, Sharer e Pasquier (2001), por exemplo, tem sido amplamente explorados na literatura.

As características inerentes à modelagem do veículo proposto são:

Configuração de VEH: Série.

Massa total, M: 18000 Kg.

Altura do CG, h: 1.5 m.

Entre eixos, L: 8 m.

Distância do centro de massa ao eixo dianteiro, b: 3 m.

Área frontal, A: 8 m².

Coefficiente de resistência ao rolamento, f: 0,012.

Coefficiente de arraste aerodinâmico, C_a: 0,79.

Aceleração da gravidade, g: 9,8 m/s².

Densidade do ar, ρ: 1,23 Kg/m³.

Raio da roda, r: 0,507 m.

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

4.1.1 Motor Elétrico de Tração

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, Burl e Beard (2001). No caso de VEs ou VEHS Série, nos quais o sistema de propulsão é composto por um ou mais motores elétricos, também se torna necessário o conhecimento de tais curvas de caracterização como a representada pela Fig. 3.10. A importância do reconhecimento dessas curvas está na identificação das regiões limites de operação do ME.

O sistema de tração monomotor, neste trabalho, foi modelado de acordo com as equações dinâmicas, apresentadas na Seção 3.6.10, 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 eq. (3.40), que representa a relação direta entre a corrente de armadura e o torque elétrico desenvolvido pelo rotor, e da união desta com as eqs. (3.53) e (3.56) é possível construir um diagrama em blocos equivalente para a modelagem do ME como o representado pela Fig. 4.1.

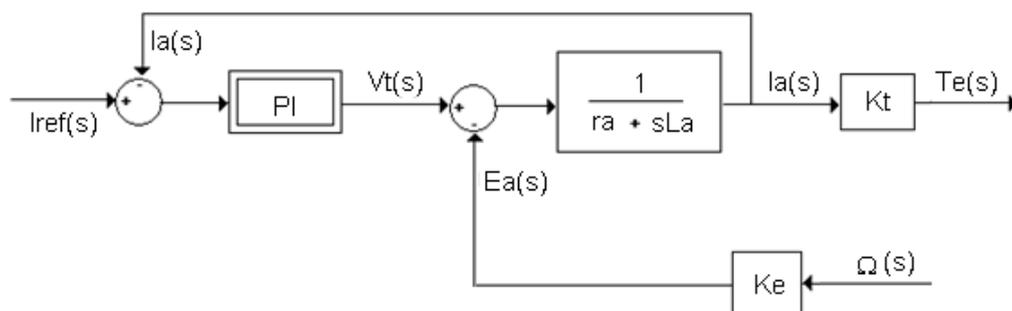


Figura 4.1: Diagrama em blocos das equações elétricas e dinâmicas para um motor C.C. com campo independente.

Baseado no estudo realizado por Wältermann (1996), e conforme indicado na Fig. 4.1, utiliza-se um controlador proporcional e integral (PI) para a geração do valor da tensão do circuito de armadura $V_t(s)$ da eq. (3.52). 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 $V_t(t)$ for constante.

De acordo com a eq. (3.8), o torque, T_e , produzido pelo motor de tração é, então, utilizado no cálculo da aceleração longitudinal e conseqüentemente da velocidade do veículo. A velocidade do veículo e a velocidade de rotação motor de tração são relacionadas pela eq. (4.1):

$$\Omega = \frac{V_{vel}N\eta}{r}, \quad (4.1)$$

na qual: $V_{vel} \triangleq$ velocidade longitudinal do veículo. Dessa forma, obtém-se Ω para o cálculo da fcm do circuito de armadura.

Como citado na Seção 3.6.7, 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 motor elétrico, 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, exigido pelo sinal de referência do motorista. Outra

característica deste modelo está na desconsideração de coeficientes de perda (ou fuga) pelo ferro e/ou pelo 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 foram retiradas de Fitzgerald, Kingsley e Kusko (1975) e são:

- $K_T = K_e = 1,27 \text{ V.s/rad}$
- $r_a = 0,0144 \text{ ohm}$
- $L_a = 0,011 \text{ H}$

4.1.2 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.

Para a modelagem do diferencial foram assumidos: $N = 12$; e $\eta = 0.9$.

4.1.3 Eixos

Os eixos no sistema de transmissão do VEH Série em questão são o *driveshaft* e os *axle shafts*. Na modelagem do sistema de transmissão, os eixos são na maioria das vezes considerados rígidos, porém em uma modelagem mais completa deve-se levar em conta a elasticidade dos eixos como exposto por Gillespie (1992).

Os eixos são considerados rígidos e representados por suas inércias. Como discutido na Seção 3.3, a massa equivalente das componentes (*driveshaft*, *axle shafts* e rodas) do *drivetrain* em rotação é dada pela eq. (3.9) e, neste caso, igual a 10 % do valor da massa do veículo, ou seja: $M_r = 1800 \text{ Kg}$.

4.1.4 Rodas

A roda e o pavimento são considerados rígidos, e como fator limitante é considerado que a força transmitida ao pavimento pelas rodas do veículo não ultrapasse o valor representado por:

$$F_{x\text{máx}} = W\mu_0, \quad (4.2)$$

na qual: $\mu_0 \triangleq$ valor máximo do coeficiente de atrito estático das superfícies em contato.

O valor limite imposto pela eq. (4.2) garante que não haverá escorregamento das rodas se $F_{x\text{máx}}$ não for ultrapassada. Segundo Canale (1989), é assumido o valor de μ_0 igual a 0,9 para condições de operação em asfalto seco. E sendo W é igual a 176400 N, a força de tração máxima ($F_{x\text{máx}}$) não deve exceder o valor de 158760 N, evitando o escorregamento das rodas.

No caso de rodas elásticas (pneumático), durante todo o movimento do veículo haverá escorregamento do pneu no contato com o pavimento. Nessa situação a força longitudinal deve ser modelada em função da força normal e do escorregamento do pneu. Também, não se aplicam as leis de atrito e rolamento descritas para as rodas rígidas, pois a principal diferença está no contato com o pavimento em que o pneumático apresenta uma grande área de contato. Quando as fibras comprimidas se expandem, elas escorregam sobre a superfície do pavimento, originando um “escorregamento parcial”. Assim, pode-se concluir

que todo o torque transmitido ao pavimento por uma roda elástica resulta em um escorregamento parcial da mesma.

4.1.5 Ciclo de Condução

No modelo proposto, são desconsideradas irregularidades de pavimento, considerando-se apenas sua inclinação em porcentagem. O ciclo de condução é a entrada principal do modelo completo de VEH Série 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 de condução novaiorquino, NYCCCOL, e o segundo é o ciclo de condução europeu, ECE 15, também utilizado por Ferreira (2007). Estes dois ciclos são apropriados para o estudo do VEH Série em questão, uma vez que retratam o perfil de velocidade adequado para um ônibus de transporte urbano.

Na Fig. 4.2 (a) e (b) estão os perfis de velocidade por tempo que representam os ciclos NYCCCOL e o ECE15 sem repetições e a inclinação do pavimento considerada é dada pela Fig. 4.2 (c). Para que todo o perfil de inclinação do pavimento seja varrido durante uma simulação, o ciclo ECE 15 deve ser repetido por onze vezes e o NYCCCOL repetido por quatro vezes.

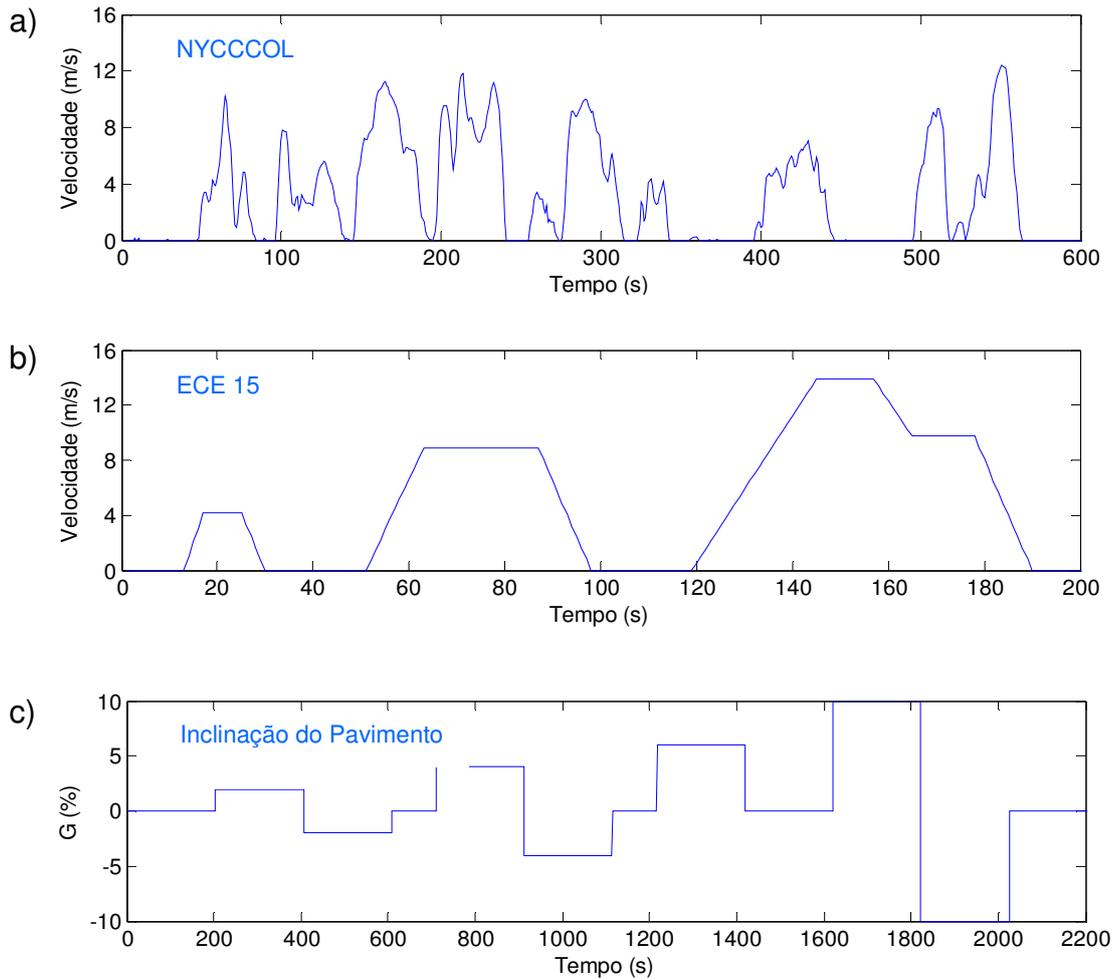


Figura 4.2: Ciclos de condução ECE 15 (a) e NYCCCOL (b), e perfil de inclinação do pavimento (c).

4.1.6 Sistema 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, determinado pela atuação do motorista.

A máxima desaceleração obtida sem o travamento das rodas é dada pela relação:

$$D_{x\text{máx}} = g\mu_0, \quad (4.3)$$

e neste caso sendo igual a $8,82 \text{ m/s}^2$. Dessa forma, o peso dinâmico no eixo dianteiro e no eixo traseiro, dadas pelas eqs. (3.16) e (3.17), para uma desaceleração de $8,82 \text{ m/s}^2$ é igual a 140018 N e 36382 N , respectivamente.

A distribuição real das forças de frenagem é obtida de forma bastante simples, pode-se observar que o peso dinâmico no eixo traseiro é aproximadamente 26 % do peso dinâmico no eixo dianteiro para uma desaceleração de $8,82 \text{ m/s}^2$. Assim o fator (f_f) responsável pela distribuição da força de frenagem, nessa situação é igual a 0.26.

$$F_{xr} = f_f F_{xf}, \quad (4.4)$$

na qual: $F_{xr} \triangleq$ força de frenagem no eixo traseiro;

$F_{xf} \triangleq$ força de frenagem no eixo dianteiro, e

$f_f \triangleq$ fator responsável pela distribuição da força de frenagem.

Através das eqs. (4.4) e (3.33) é possível obter a distribuição real e ideal das forças de frenagem entre os eixos dianteiro e traseiro. A Fig. 4.3 ilustra a distribuição real e ideal dessas forças para a desaceleração máxima de $8,82 \text{ m/s}^2$. Pode-se ver que para acelerações acima de $0,9g$ ou $8,82 \text{ m/s}^2$ as rodas traseiras travam primeiro.

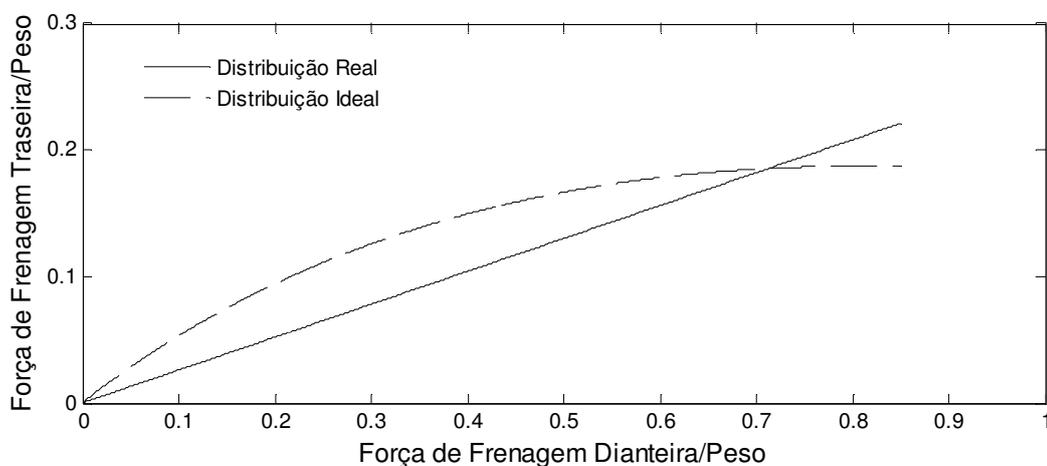


Figura 4.3: Distribuição da força de frenagem entre os eixos dianteiro e traseiro para desaceleração máxima de $8,82 \text{ m/s}^2$.

A partir da massa total do veículo e da máxima desaceleração de $8,82 \text{ m/s}^2$, a força de frenagem desenvolvida pelo veículo é de 158760 N . O torque máximo de frenagem, portanto, é igual ao produto da força de frenagem pelo raio da roda e igual a 80491 Nm . Dessa forma, o torque de frenagem atuante em cada roda é dado por:

$$2(1 + f_f)T_{\text{roda}} = T_{\text{fmax}}, \quad (4.5)$$

na qual: $T_{\text{roda}} \triangleq$ torque de frenagem atuante em cada roda, e

$T_{\text{fmax}} \triangleq$ torque máximo de frenagem.

De acordo com a eq. (4.5) o torque de frenagem atuante em cada roda do veículo nas condições de operação citadas é igual a 31940 Nm .

A precedente análise foi realizada para um caso extremo, ou seja, para a aceleração máxima de $8,82 \text{ m/s}^2$, acima da qual surge o escorregamento das rodas.

4.1.7 Motorista

O motorista exerce papel fundamental no controle de desempenho tornando possível caracterizar o veículo como um sistema de malha fechada. Os parâmetros controlados pelo motorista são o pedal do acelerador e do freio. Assume-se que o torque produzido pelo ME varia linearmente com a posição do pedal do acelerador como utilizado por Cunha (1998).

Do ponto de vista de controle, o motorista pode ser modelado como um controlador PI, que atua através do sinal de torque de referência, para o motor elétrico de tração. Este controlador é projetado de forma que a entrada seja o erro entre a velocidade desejada (velocidade de referência do ciclo de condução) e a velocidade atual do veículo, e a saída (sinal de controle) seja o torque transmitido às rodas. O diagrama em blocos do sistema em

malha fechada que representa atuação do motorista e da dinâmica do veículo pode ser visto na Fig. 4.4.

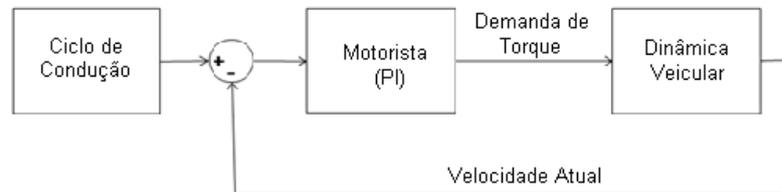


Figura 4.4: Diagrama em blocos do sistema em malha fechada, com motorista e dinâmica do veículo.

O torque de saída do controlador PI, através da eq. (3.40), é interpretado como a corrente de referência de armadura $I_{ref}(s)$ para o ME de tração conforme descrito na Seção 4.1.2.

4.2 Modelagem da Unidade de Potência MCI/gerador

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

O mapeamento do gráfico da Fig. 3.13 foi obtido com a velocidade de rotação do MCI variando de 1000 a 4000 rpm em intervalos de aproximadamente 100 rpm e com a posição da *throttle* para uma abertura de 25 a 100 % em intervalos de 25 %. Assim, para cada posição fixa de abertura *throttle* varre-se todas as velocidades de rotação para as quais são obtidos o torque, a potência e 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.

Na literatura, alguns trabalhos chamam a unidade de potência formada pela união do MCI com um gerador de unidade de potência auxiliar (*auxiliary power unit*, APU) e como será chamada a partir deste momento. A APU é geralmente responsável pelo fornecimento da demanda de potência média, enquanto a bateria (ou um banco de baterias) é responsável pelo suprimento dos picos de potência para o sistema de tração elétrica. O dimensionamento prévio das fontes pode ser dado pela verificação da potência solicitada durante o ciclo de condução utilizado. Na Seção 4.6 é justificado o dimensionamento adotado para a APU e para o banco de baterias.

Na Fig. 4.5, tem-se a representação em diagramas de blocos para a APU, a entrada P_{APU} corresponde à solicitação de potência média à APU pela EGP adotada. Como medida simplificadora, a entrada “Velocidade de referência”, corresponde à velocidade fixa de rotação do MCI de menor consumo específico, e igual a 1500 rpm. O bloco “Pot (Watt) x alfa (%)” determina para cada valor de entrada de P_{APU} , o valor da posição da *throttle* que por sua vez é entrada do bloco “MCI” no qual está o mapa tridimensional da Fig. 3.15 que simula o comportamento do MCI. Os valores admitidos pela entrada P_{APU} para a posição da *throttle* são correspondentes à “Velocidade de referência” de 1500 rpm.

As equações dinâmicas (eqs. (3.57) e (3.58)) da Seção 3.6.10 para um gerador de corrente contínua com campo independente são empregadas na simulação da APU esquematizada em diagrama de blocos na Fig. 4.5. O controlador PI simula o comportamento da fonte de tensão do gerador através do erro obtido entre a diferença da velocidade angular real do eixo do gerador e do correspondente valor de referência (“Velocidade de referência”).

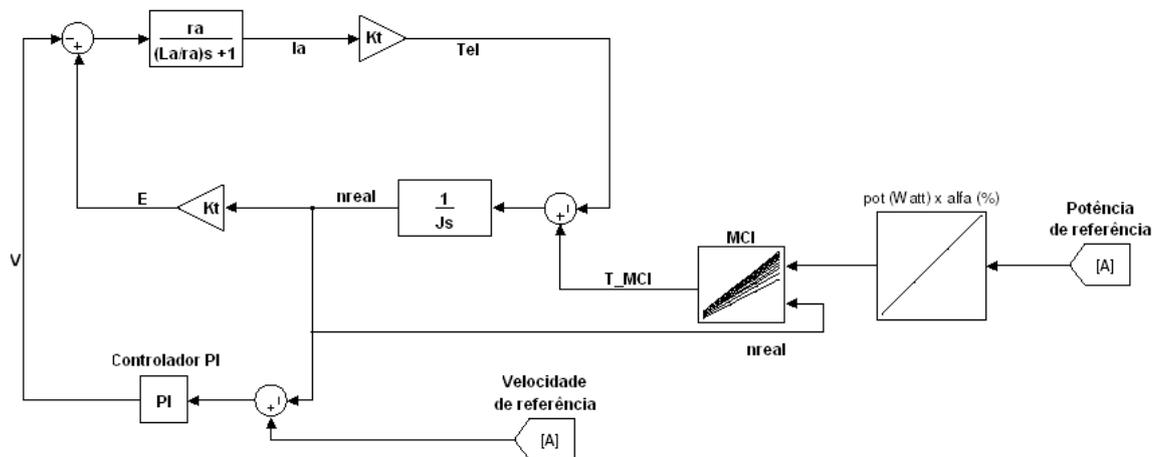


Figura 4.5: Representação em diagrama de blocos para o gerenciamento da APU.

As constantes utilizadas para o equacionamento da modelagem do gerador foram retiradas de Fitzgerald, Kingsley e Kusko (1975), e são:

- $K_T = 1,27 \text{ V.s/rad}$;
- $r_a = 0,0144 \text{ ohm}$;
- $L_a = 0,011 \text{ H}$;
- $J = 200 \text{ Kg.m}^2$.

4.3 Modelagem da Bateria

A bateria utilizada como uma das fontes de energia para o VEH Série é do tipo ácido e chumbo. A modelagem desta segue a descrição realizada na Seção 3.8 da Revisão Teórica e 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 Fig. 4.6 estão ilustradas as entradas e saídas do modelo de bateria proposto.

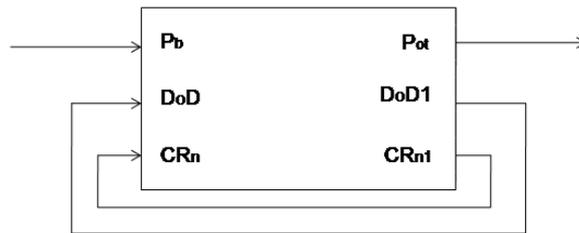


Figura 4.6: Entradas e Saídas do modelo da bateria proposto.

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

- Número de células, $N_{ocells} = 240$;
- Capacidade = 32 Ah;
- Coeficiente de Peukert, $k = 1,12$.

4.4 Estratégias de Gerenciamento de Potência

Na Seção 2.7, das três categorias de EGPs mais difundidas na literatura, as fundamentadas em regras e em sistemas *fuzzy* são as de interesse para o estudo de caso realizado neste Capítulo. De forma geral, a EGP – atendendo a solicitação de potência do sistema de tração 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 três diferentes EGPs, nas quais duas são baseadas em regras, e a terceira fundamentada em sistemas *fuzzy*. Para estas três estratégias considera-se que a APU é a responsável pelo fornecimento da potência média de demanda e o banco

de baterias pelo fornecimento dos picos de potência, acima deste valor médio. As estratégias de interesse são classificadas por:

- 1- EGP sem regeneração baseada em regras,
- 2- EGP com regeneração baseada em regras,
- 3- EGP fundamentada em sistemas *fuzzy*.

4.4.1 EGP sem Regeneração Baseada em Regras

Essa EGP foi obtida a partir da apresentada por Revoredo (2007), e sua principal característica está na desconsideração da energia originada durante a frenagem do veículo no processo de recarga do banco de baterias. Nesta, 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 à APU de P_{APU} 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 e P_{dem} são identificadas como as entradas e P_{APU} e P_b como as saídas da EGP.

A APU opera fornecendo o valor de potência solicitado pelo motorista (P_{dem}), atuando em sua capacidade máxima quando necessário ($P_{APUmáx}$), e quando P_{dem} ultrapassa o valor de $P_{APUmáx}$, o banco de baterias é a fonte responsável pelo fornecimento da potência excedente. A EGP opera dessa maneira até que o limite máximo do DoD ($DoD_{máx}$) do banco de baterias seja alcançado. 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 (P_{perda}). Em situação de carga, o banco de baterias, preferivelmente, não será utilizado e a APU atuará à potência máxima carregando o banco de baterias nos momentos em que P_{dem} for menor $P_{APUmáx}$.

Nesse contexto, quando a diferença entre $P_{APUmáx}$ e P_{dem} for maior que P_{bcarga} , a APU fornecerá potência igual à soma de P_{dem} e P_{bcarga} . Quando essa diferença for menor que o valor de P_{bcarga} , então a APU atuará à potência máxima e a carga regenerada pelo banco de baterias será igual à diferença entre P_{dem} e $P_{APUmáx}$.

Também, durante o processo de recarga da bateria, podem ocorrer situações em que P_{dem} seja maior que $P_{APUmáx}$, e segundo Revoredo (2007) surgem duas opções:

- a) Acionar o banco de baterias para o fornecimento da potência excedente necessária ao atendimento de P_{dem} , e
- b) Não acionar o banco de baterias atuando apenas a unidade APU em seu valor máximo $P_{APUmáx}$.

Escolhida a situação “a” compromete-se a vida útil da bateria em função do aumento dos ciclos de utilização, porém garante-se o desempenho desejado do veículo pelo motorista. E escolhida a situação “b” garante-se que a bateria seja utilizada somente dentro de sua região otimizada de operação, ou seja, entre os limites $DoD_{máx}$ e DoD_{min} , porém compromete-se o desempenho do veículo.

A fim de que a solicitação de potência do motorista seja sempre satisfeita em detrimento ao processo de recarga e utilização fora da região ótima do banco de baterias, optou-se pela situação “a”. A representação da EGP sem regeneração descrita pode ser vista na Fig. 4.7.

Como o estudo de caso refere-se a um VEH Série voltado para transporte urbano, nos momentos em que o veículo não estiver em movimento, ou seja, nos pontos de parada para embarque ou desembarque de passageiros, P_{dem} será nula. Nessa situação, assume-se que a APU ficará encarregada pela recarga do banco de baterias uma vez alcançado $DoD_{máx}$, caso contrário, a APU não será acionada.

Região de Operação Otimizada da Bateria: $DoD > DoD_{m\acute{a}x}$		Região de Recarga da Bateria: $DoD \leq DoD_{m\acute{a}x}$	
Se	Então	Se	Então
$P_{dem} > P_{APUm\acute{a}x}$	$P_{APU} = P_{APUm\acute{a}x}$ $P_b = P_{dem} - P_{APUm\acute{a}x}$ $P_{perde} = 0$	$P_{dem} > P_{APUm\acute{a}x}$	$P_{APU} = P_{APUm\acute{a}x}$ $P_b = P_{dem} - P_{APUm\acute{a}x}$ $P_{perde} = 0$
$P_{APUm\acute{a}x} > P_{dem} > 0$	$P_{APU} = P_{dem}$ $P_b = 0$ $P_{perde} = 0$	$P_{APUm\acute{a}x} > P_{dem} > 0$ e $P_{APUm\acute{a}x} - P_{dem} > P_{bcarga}$	$P_{APU} = P_{dem} + P_{bcarga}$ $P_b = -P_{bcarga}$ $P_{perde} = 0$
$P_{dem} = 0$	$P_{APU} = 0$ $P_b = 0$ $P_{perde} = 0$	$P_{APUm\acute{a}x} > P_{dem} > 0$ e $P_{APUm\acute{a}x} - P_{dem} < P_{bcarga}$	$P_{APU} = P_{APUm\acute{a}x}$ $P_b = P_{dem} - P_{APUm\acute{a}x}$ $P_{perde} = 0$
$P_{dem} < 0$	$P_{APU} = 0$ $P_b = 0$ $P_{perde} = P_{dem}$	$P_{dem} = 0$	$P_{APU} = P_{bcarga}$ $P_b = -P_{bcarga}$ $P_{perde} = 0$
		$P_{dem} < 0$	$P_{APU} = P_{bcarga}$ $P_b = -P_{bcarga}$ $P_{perde} = P_{dem}$

Figura 4.7: EGP sem regeneração para um VEH Série.

4.4.2 EGP com Regeneração Baseada em Regras

Assim como na EGP sem regeneração, quando a demanda de potência do motorista é maior que a potência máxima que a APU pode fornecer, a diferença também é fornecida pelo banco de baterias.

Neste caso, a potência regenerada é entendida como o negativo de P_{dem} . Durante a frenagem, quando a máquina elétrica de tração atua como gerador transformando energia cinética em elétrica como descrito na Seção 3.6.7, é possível armazenar essa energia, ou potência, desde que a bateria encontre-se acima do limite máximo ótimo $DoD_{m\acute{a}x}$. Esta EGP atua de tal forma que durante a frenagem se:

- i) a potência regenerada for maior que o valor de P_{bcarga} , então o excedente é descartado.
- ii) a potência regenerada for menor que o valor de P_{bcarga} , então a bateria absorverá a potência regenerada e conseqüentemente nada será perdido.

Similar à EGP da Seção 4.4.1, esta segue o comportamento descrito anteriormente até que o limite máximo do DoD do banco de baterias seja alcançado. Em situação de carga, o banco de baterias, preferivelmente, não será utilizado até que seu limite máximo de carga otimizado ($DoD_{m\acute{a}x}$) seja atingido.

Uma vez alcançado o valor de $DoD_{m\acute{a}x}$, quando a diferença entre $P_{APUm\acute{a}x}$ e P_{dem} for maior que P_{bcarga} , então a APU fornecerá potência igual à soma de P_{dem} e P_{bcarga} . Quando essa diferença for menor que o valor de P_{bcarga} , então a APU atuará à potência máxima e a carga regenerada pelo banco de baterias será igual à diferença entre P_{dem} e $P_{APUm\acute{a}x}$.

Também, durante o processo de recarga da bateria, opta-se pelo cumprimento da solicitação de potência do motorista em detrimento ao processo de recarga e utilização fora da região ótima do banco de baterias. Ainda na situação de recarga da bateria, durante frenagem, ou seja, durante regeneração de potência seguem as situações i e ii analisadas acima. A representação da EGP com regeneração de potência durante a frenagem descrita nesta Seção pode ser vista na Fig. 4.8.

Espera-se que nessa estratégia, a unidade de potência APU seja menos solicitada durante o ciclo de condução ao contrário da EGP sem regeneração, uma vez que potência é reaproveitada da frenagem, acarretando conseqüentemente no menor tempo de uso da APU no carregamento do banco de baterias.

Região Otimizada da Bateria: $DoD > DoD_{máx}$		Região de Recarga da Bateria: $DoD \leq DoD_{máx}$	
Se	Então	Se	Então
$P_{dem} > P_{APUmáx}$	$P_{APU} = P_{APUmáx}$ $P_b = P_{dem} - P_{APUmáx}$ $P_{perde} = 0$	$P_{dem} > P_{APUmáx}$	$P_{APU} = P_{APUmáx}$ $P_b = P_{dem} - P_{APUmáx}$ $P_{perde} = 0$
$P_{APUmáx} > P_{dem} > 0$	$P_{APU} = P_{dem}$ $P_b = 0$ $P_{perde} = 0$	$P_{APUmáx} > P_{dem} > 0$ e $P_{APUmáx} - P_{dem} > R_{bcarga}$	$P_{APU} = P_{dem} + P_{bcarga}$ $P_b = -P_{bcarga}$ $P_{perde} = 0$
$P_{dem} = 0$	$P_{APU} = 0$ $P_b = 0$ $P_{perde} = 0$	$P_{APUmáx} > P_{dem} > 0$ e $P_{APUmáx} - P_{dem} < R_{bcarga}$	$P_{APU} = P_{APUmáx}$ $P_b = P_{dem} - P_{APUmáx}$ $P_{perde} = 0$
$P_{dem} < 0$	$P_{APU} = 0$ $P_b = 0$ $P_{perde} = P_{dem}$	$P_{dem} = 0$	$P_{APU} = R_{bcarga}$ $P_b = -R_{bcarga}$ $P_{perde} = 0$
		$ -P_{dem} < R_{bcarga}$	$P_{APU} = R_{bcarga} - -P_{dem} $ $P_b = -P_{dem} - P_{APU}$ $P_{perde} = 0$
		$ -P_{dem} > R_{bcarga}$	$P_{APU} = 0$ $P_b = -R_{bcarga}$ $P_{perde} = -P_{dem} - R_{bcarga}$

Figura 4.8: EGP com regeneração da frenagem do veículo para um VEH Série.

4.4.3 EGP Fundamentada em Sistemas 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”. Estes sistemas, por serem baseados em regras linguísticas, 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.

As referências citadas na Seção 2.7.5 indicam que os sistemas *fuzzy* apresentam-se bastante apropriados para o controle de VEHs. Esta Seção discute as bases de

implementação de sistemas *fuzzy* no gerenciamento de potência para o veículo elétrico híbrido em questão.

Pode-se ver na Fig. 4.9, que a EGP fundamentada em sistemas *fuzzy* foi utilizada no controle da potência fornecida pela APU, com base na potência de demanda do sistema de tração elétrica e na profundidade de descarga do banco de baterias.

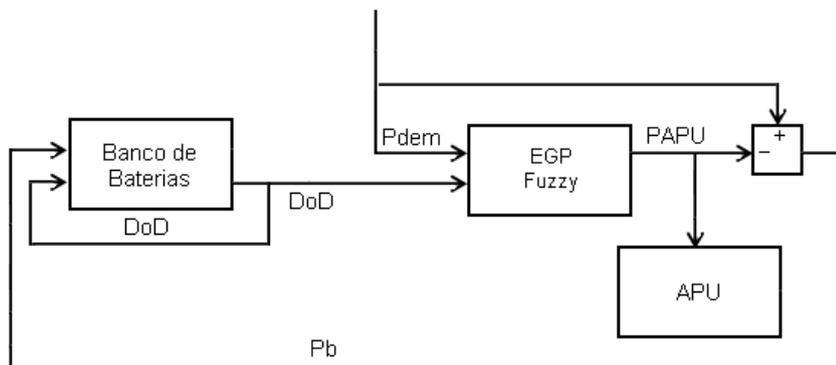


Figura 4.9: Representação em diagrama de blocos para a EGP fundamentada em sistemas *fuzzy*.

Segundo Pedrycz e Gomide (1998), o diagrama esquemático de um controlador *fuzzy* pode ser representado como na Fig. 4.10:

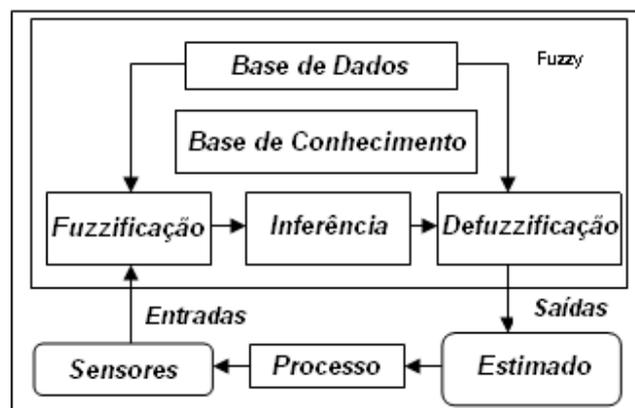


Figura 4.10: Representação esquemática de um controlador *fuzzy*.

A descrição dos blocos que compõem o diagrama da Fig. 4.10 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 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 lingüísticas. Neste caso, as entradas e saídas são denominadas por: potência de demanda do sistema de tração elétrica (P_{dem}), profundidade de descarga do banco de baterias (DoD), e potência solicitada à APU (P_{APU}). Em geral, as principais características das variáveis lingüísticas são:

1. Nome da variável lingüística;
2. Os nomes dos termos lingüísticos associados à variável: conjunto de termos;
3. O domínio no qual cada variável lingüística é definido: universo de discurso;
4. Conjuntos *fuzzy* que representam cada valor pertencente aos conjuntos de termos da variável lingüística: 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 da solicitação de potência da APU face as estratégias baseadas em regras. Nesse contexto, as variáveis lingüísticas que representam os conjuntos *fuzzy* das entradas e saídas para a EGP em questão foram determinados como segue:

- Potência de demanda do sistema de tração (P_{dem}): esta variável de entrada foi especificada no universo de discurso entre -310,050 e 563,400 kW, com conjunto de termos {MB (muito baixo), B (baixo), M (médio) e A (alto)} representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Fig. 4.11a. 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 NYCCCOL e em pavimento inclinado.
- Profundidade de descarga do banco de baterias (DoD): foi especificada no universo de discurso entre 0 e 1, com conjunto de termos {BA (baixo), ME (médio) e AL (alto)} representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Fig. 4.11b. Os limites definidos para o universo de discurso são os mesmos para os quais DoD é definido no modelo da bateria.
- Solicitação de potência à APU (P_{APU}): esta variável de saída foi especificada no universo de discurso entre 0 e 70 kW, com conjuntos de termos {Z (zero), BAI (baixo) e ALT (alto)} representados por seus respectivos conjuntos *fuzzy*, como ilustrado na Fig. 4.11c. Os limites do universo de discurso definidos, neste caso, são os valores máximo e mínimo da potência disponibilizada pela APU.

Os tipos de funções de pertinência associados aos conjuntos *fuzzy* mais freqüentemente encontrados na literatura são triângulos e trapezóides, por serem gerados com facilidade, segundo Shaw e 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.

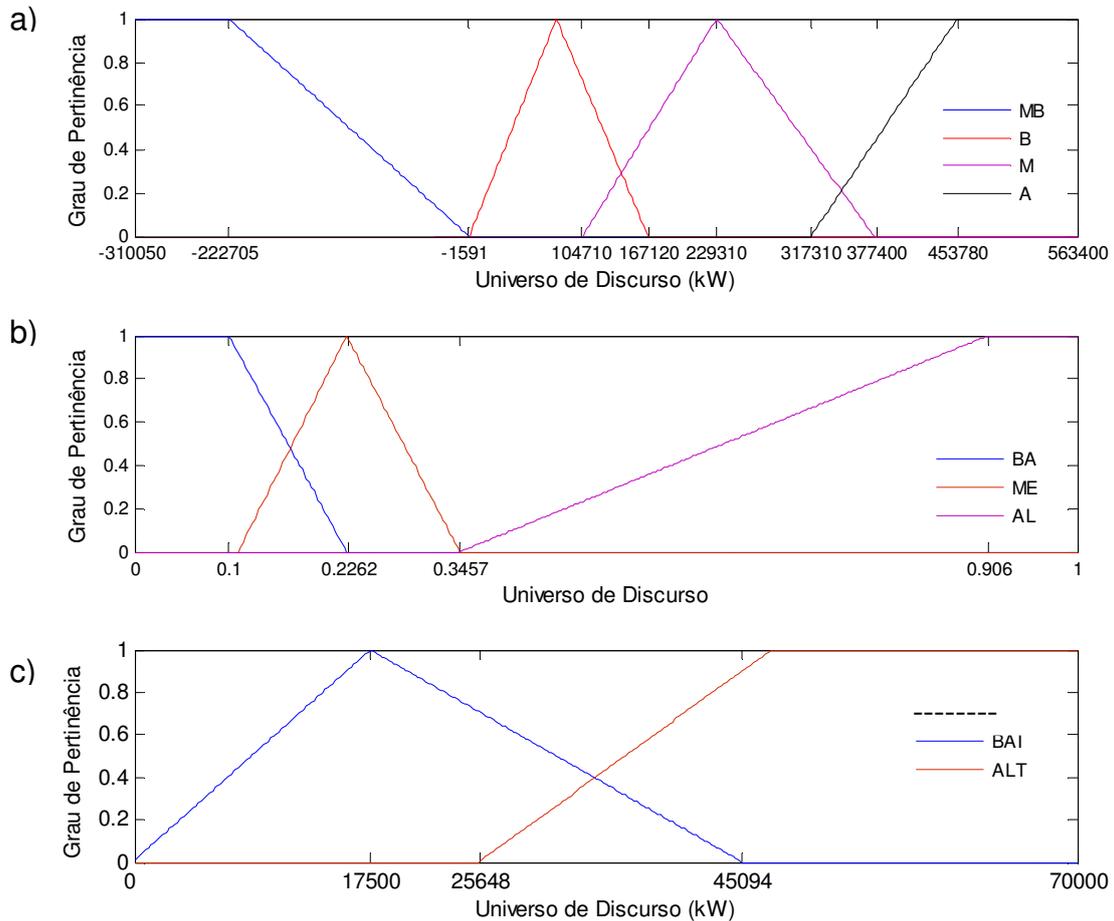


Figura 4.11: Representação das variáveis de entrada, P_{dem} (a), DoD (b), e de saída, P_{APU} (c) em função dos conjuntos fuzzy.

Para a validação do processo de inferência *fuzzy* é necessário mapear o conhecimento relacionada ao sistema estudado através das “regras *fuzzy*”. Estas regras podem ser implementadas a partir do conhecimento especialista do processo, sendo descritas de forma lingüística utilizando-se a estrutura “Se - Então”.

Todo o processo de conhecimento expresso pelas regras é dado da seguinte forma:

R1: Se (P_{dem} é MB) e (DoD é BA), então (APU é Z)

R2: Se (P_{dem} é MB) e (DoD é ME), então (APU é Z)

R3: Se (P_{dem} é MB) e (DoD é AL), então (APU é Z)

(...)

R12: Se (P_{dem} é A) e (DoD é AL), então (APU é ALT)

Dessa forma, são obtidas doze 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 0,4.

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 obtido 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 centro de área da região *fuzzy* resultante.

4.5 Representação do VEH Série

Na Fig. 4.12 podem ser vistos os sistemas, descritos separadamente nas Seções anteriores deste capítulo, que constituem o VEH Série em questão.

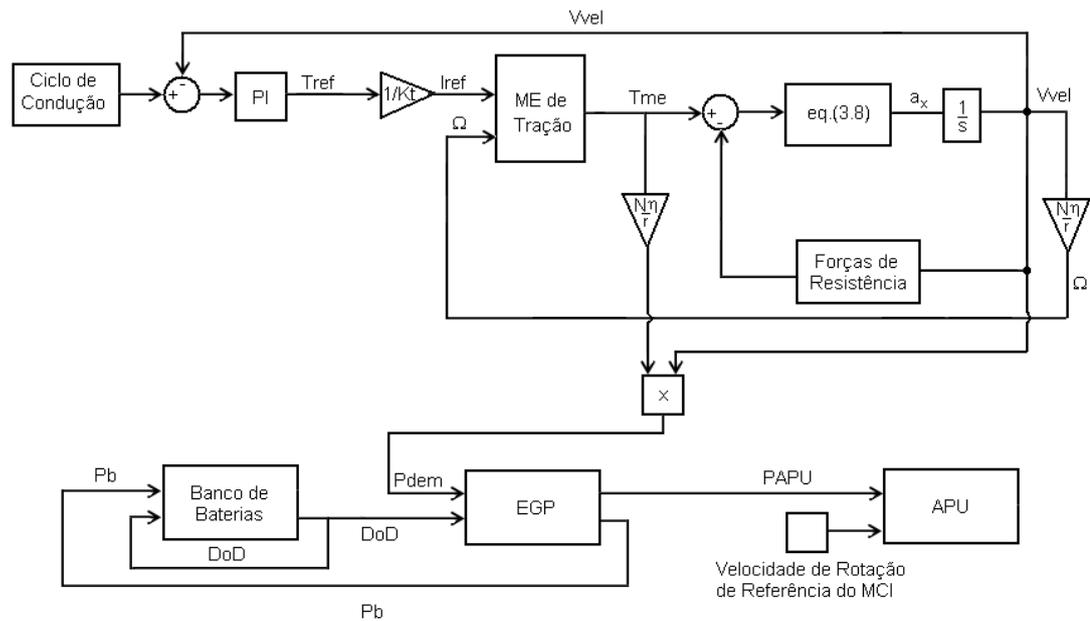


Figura 4.12: Diagrama em blocos para a representação do VEH Série estudado.

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

- i. A velocidade longitudinal de referência do ciclo de condução é comparada com a velocidade real do veículo.
- ii. O controlador PI, que neste caso simula a atuação do motorista, gera um torque de referência que representa o torque necessário para que o veículo atinja a velocidade desejada.

- iii. Este torque gera um sinal de referência para a corrente de armadura que juntamente com a velocidade de rotação do rotor do ME, no bloco “ME de Tração”, geram o sinal de torque do motor elétrico de tração.
- iv. A potência de demanda, P_{dem} , necessária ao ME é solicitada à APU e ao banco de baterias através da EGP como indicado na figura.

4.6 - Dimensionamento da APU e da Bateria

As fontes de potência – APU e banco de baterias – são dimensionadas com base na potência de demanda do sistema de tração, durante a operação do veículo no ciclo de condução ao qual é submetido.

Vale ressaltar a importância da análise da potência de demanda em pavimento inclinado, uma vez que a P_{dem} exigida em tal situação é maior que a exigida em pavimento plano, evitando, assim, subestimar dimensionamento das fontes de potência.

Como adotado por Ehsani, Gao e Butler (1999), a APU e o banco de baterias são dimensionados para fornecer, em suas regiões otimizadas de operação, potência de demanda média e dinâmica, respectivamente, para o sistema de tração. Os perfis de potência de demanda total, média e dinâmica em pavimento inclinado para os ciclos ECE15 e NYCCCOL foram calculados pela eq. (4.5) e são dados pelas Figs. 4.13 e 4.14.

$$P_{dem} = F_{te} \cdot V_{vel} = \left((M + M_r) a_x + R_r + R_a + R_g \right) \cdot V_{vel}, \quad (4.5)$$

na qual: $F_{te} \triangleq$ força do sistema de tração do veículo, e dada por:

$$F_{te} = \frac{T_e N \eta}{r}. \quad (4.6)$$

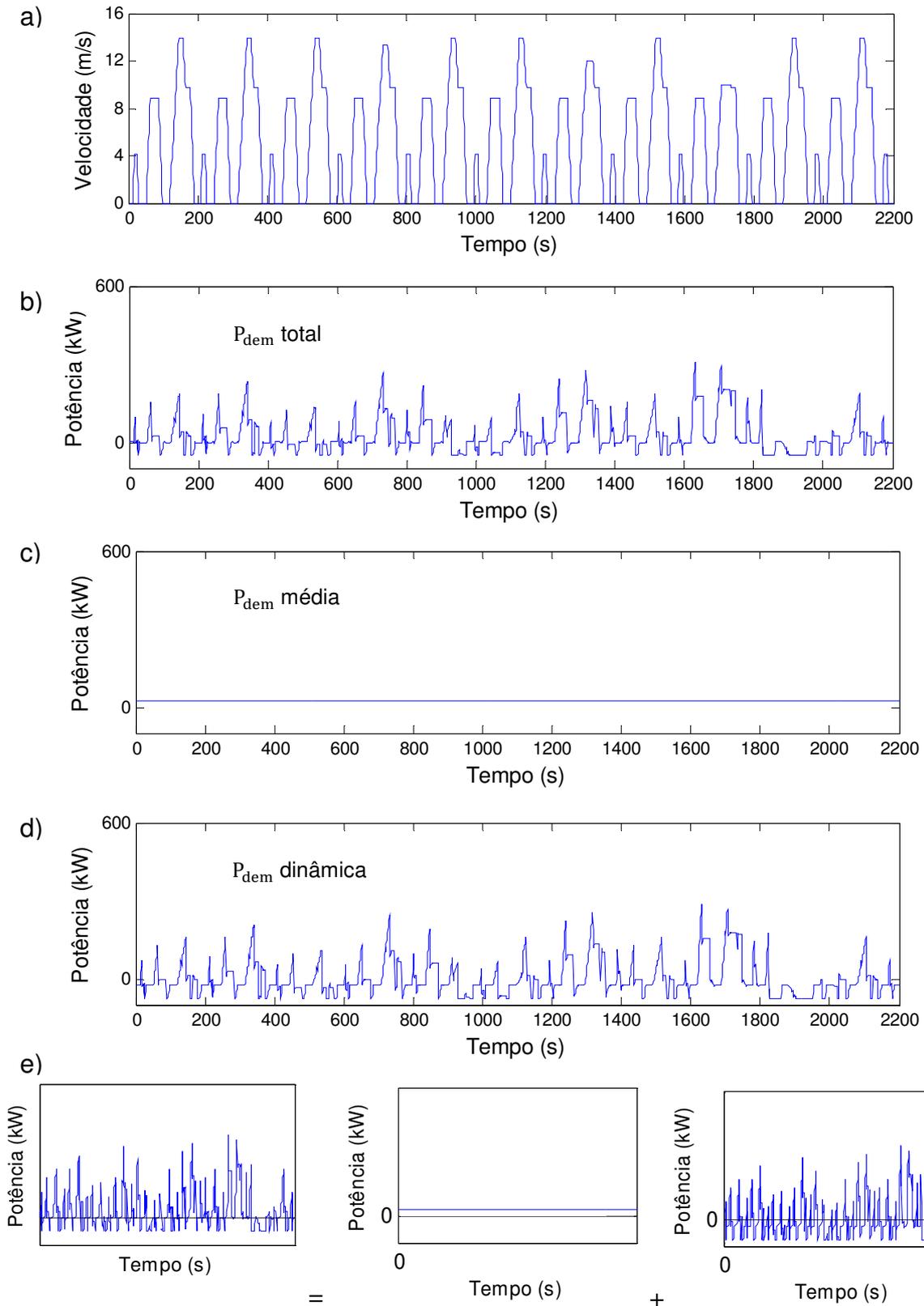


Figura 4.13: Ciclo de condução europeu, ECE 15, (a), e respectivos perfis de potência de demanda (b), de demanda média (c), de demanda dinâmica (d) e composição de (c) e (d) originando (b): (e).

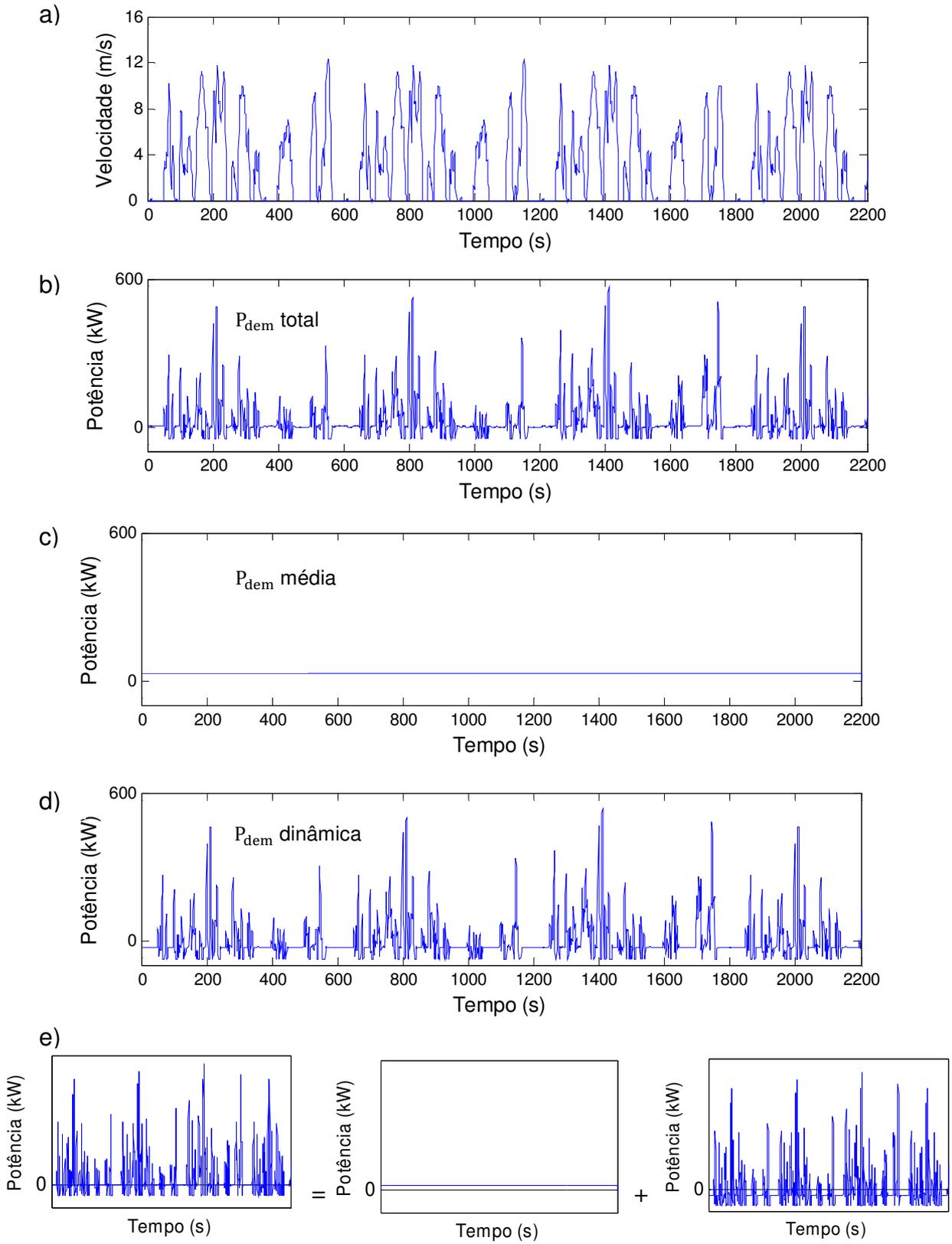


Figura 4.14: Ciclo de condução NYCCCOL (a), e respectivos perfis de potência de demanda (b), de demanda média (c), de demanda dinâmica (d) e composição de (c) e (d) originando (b): (e).

Para os ciclos de condução utilizados, tem-se:

Tabela 4.1- Limitação dos valores máximos, da velocidade do veículo, alcançados em função da inclinação do pavimento.

G	V _{vel}
0 %	60 km/h
2 %	54 km/h
4 %	48 km/h
6 %	43 km/h
8 %	39 km/h
10 %	36 km/h

Tabela 4.2 - Valores da potência de demanda média e dinâmica, e aceleração e desaceleração máximas para os ciclos analisados.

	P _{dem_média}	P _{dem_dinâmica}	a _{x_máx}	D _{x_máx}
ECE 15	25 kW	310 kW	1,32 m/s ²	0,97 m/s ²
NYCCCOL	27 kW	563,4 kW	2,98 m/s ²	2,84 m/s ²

De acordo com a tabela 4.2 podem ser observados aspectos, citados nas Seções anteriores deste capítulo, como, por exemplo, o de aceleração e desaceleração máximas dos ciclos analisados inferiores a 8,82 m/s². A observância desse aspecto assegura que os pneus do veículo não escorreguem durante a aceleração ou que não travem durante frenagem, uma vez que os limites impostos pelas eq. (4.2) e (4.3) não são superados.

Também, da tabela 4.2, pode-se observar que os valores da potência de demanda média e dinâmica para os ciclos analisados são próximos. Assim, pode-se assegurar uma única

configuração para o dimensionamento das fontes de potência capazes de satisfazer a potência de demanda do veículo operando em qualquer um dos ciclos.

Na Seção 4.4, na qual são explícitas as EGPs de interesse neste trabalho, a APU é a fonte responsável pelo fornecimento de potência até seu limite otimizado máximo ($P_{APUmáx}$) que, para a configuração adotada, está em torno de 70 kW. Acima deste valor e até a máxima solicitação de potência igual a 563,4 kW, o responsável pelo fornecimento de potência é o banco de baterias.

Capítulo 5

Resultados

Neste Capítulo, são analisadas as três estratégias de gerenciamento de potência propostas. As principais análises referem-se à observância do DoD, entre os valores pré-determinados ($DoD_{m\acute{a}x}$ e $DoD_{m\acute{i}n}$), e da potência disponibilizada pela APU diante o emprego das EGPs.

Cada EGP é aplicada aos dois ciclos de condução de interesse, ECE15 e NYCCCOL, considerando-se ainda operação do veículo em pavimento plano e inclinado, no qual este último obedece ao perfil de inclinação de pavimento dado pela Fig. 4.2 (c).

É importante ressaltar que todas as simulações realizadas foram iniciadas com o banco de baterias inicialmente carregado, ou seja, para o DoD inicial igual 0, e os respectivos limites máximos e mínimos foram fixados em 0,4 e 0,9, respectivamente. Também, os perfis de potência de P_{bat} e P_{APU} foram obtidos para diferentes escalas a fim de facilitar a visualização do comportamento das fontes dada a solicitação de potência.

Para a obtenção de todos os perfis de potência e de DoD, nas figuras abaixo, o ciclo de condução ECE15 foi repetido por vinte e uma vezes, e o NYCCCOL por sete vezes.

5.1 EGP sem Regeneração

Nesta estratégia, como citado na Seção 4.4.1, a potência resultante da atuação do motor de tração como gerador, durante a frenagem, não é utilizada para a recarga do banco de baterias. Abaixo seguem os perfis de potência solicitada à APU, ao banco de baterias, bem

como o perfil do DoD, obtidos pelo emprego desta EGP, para os ciclos de condução em pavimento plano e inclinado.

5.1.1 Ciclo ECE15 sem Regeneração em Pavimento Plano

A Fig. 5.1 mostra os perfis de potência, disponibilizada pela APU e pelo banco de baterias, e o perfil do DoD segundo a EGP, sem regeneração, aplicada ao ciclo de condução ECE15 em pavimento plano.

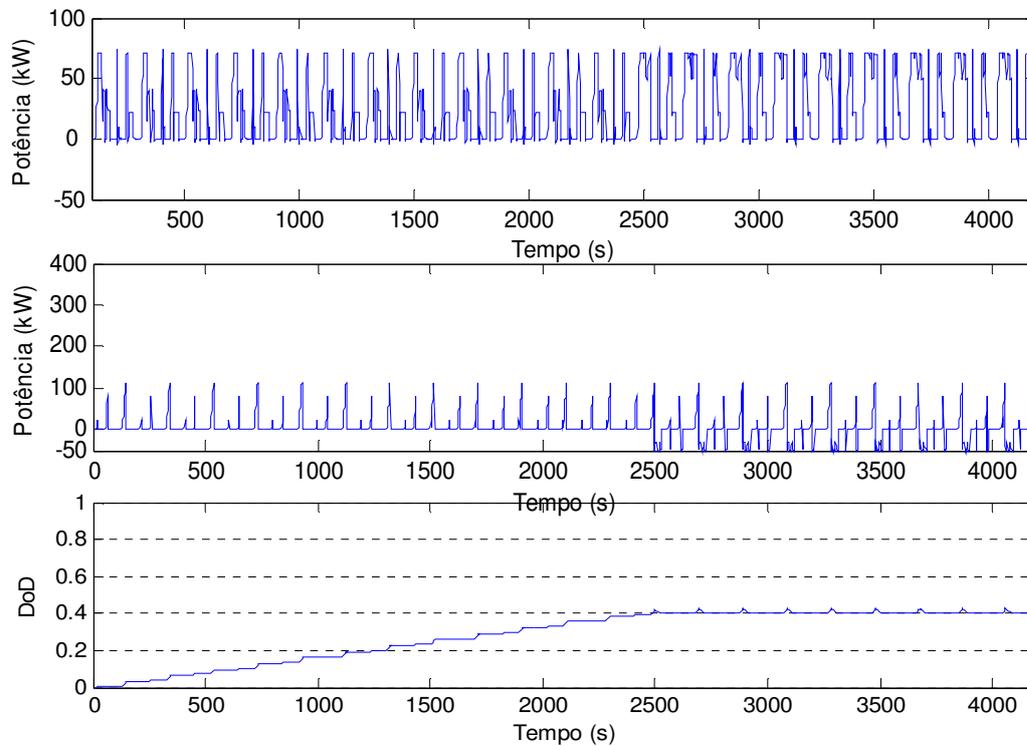


Figura 5.1: Respective perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo ECE15 sem regeneração e em pavimento plano.

Pode-se observar que o DoD atinge seu limite máximo igual a 0,4 em 2500 segundos de simulação. Uma vez alcançado este valor limite, o DoD apresenta pequenas variações nos instantes em que o valor da potência de demanda supera o valor de $P_{APU_m\acute{a}x}$.

Também, quando empregada esta EGP, uma vez alcançado o $DoD_{máx}$, a APU é utilizada com freqüência no carregamento do banco de baterias fazendo com que o MCI opere por mais tempo – consumindo mais combustível – face o emprego da EGP com regeneração.

5.1.2 Ciclo ECE15 sem Regeneração em Pavimento Inclinado

A Fig. 5.2 mostra os perfis de potência, disponibilizada pela APU e pelo banco de baterias, e o perfil do DoD segundo a EGP, sem regeneração, aplicada ao ciclo de condução ECE15 em pavimento inclinado.

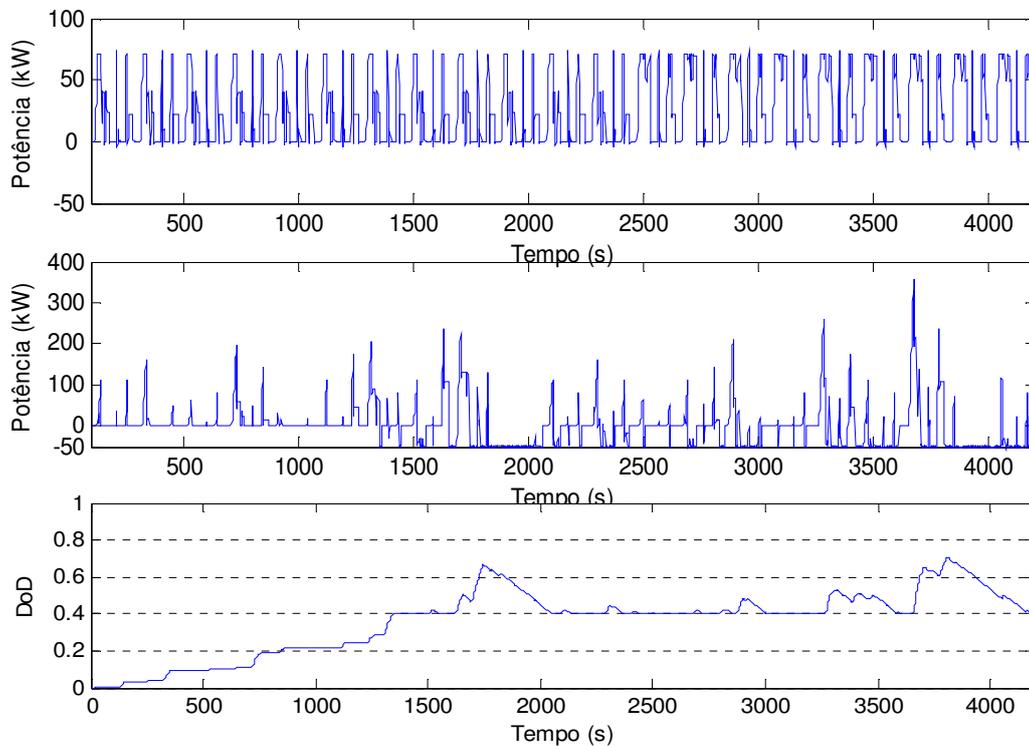


Figura 5.2: Respective perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo ECE15 sem regeneração e em pavimento inclinado.

Em relação à situação anterior, devido à consideração da força resistiva “ R_g ” da inclinação do pavimento, pode-se observar na Fig. 5.2, que a máxima potência disponibilizada pelo banco de baterias é quase 250 kW maior.

As maiores variações do DoD, em relação à situação anterior, são devidas às altas solicitações de potência do banco de baterias (acima de 200 kW), mesmo em processo de recarga. Assim, uma vez alcançado o $DoD_{m\acute{a}x}$, quanto maior a demanda de potencia, maior será a taxa de descarga do banco de baterias acarretando o aumento da variação do DoD, e, caso contrário, o DoD só diminui com a redução da solicitação de potência desta fonte.

Os perfis de solicitação de potência da APU, neste caso e no anterior, são similares, uma vez que a potência máxima fornecida por esta fonte não supera o valor de 70 kW. Este valor representa 20 % da potência máxima que o banco de baterias pode disponibilizar mesmo estando em processo de recarga. Ou seja, mesmo alcançado o $DoD_{m\acute{a}x}$, é o banco de baterias a fonte responsável pelo fornecimento de alta potência ao sistema de tração elétrica.

5.1.3 Ciclo NYCCCOL sem Regeneração em Pavimento Plano

A Fig. 5.3 mostra os perfis de potência, disponibilizada pela APU e pelo banco de baterias, e o perfil do DoD segundo a EGP, sem regeneração, aplicada ao ciclo de condução NYCCCOL em pavimento plano.

Uma vez alcançado o valor $DoD_{m\acute{a}x}$, nos instantes de tempo em que a solicitação de P_{dem} for nula ou negativa, a APU fornecerá potência igual à de carga para o banco de baterias. Neste caso, em relação aos anteriores, são nítidas tanto a atuação da APU no processo de recarga do banco de baterias como as variações sofridas pelo DoD quando o banco de baterias se encontra em processo de recarga e ao mesmo tempo fornecendo potência.

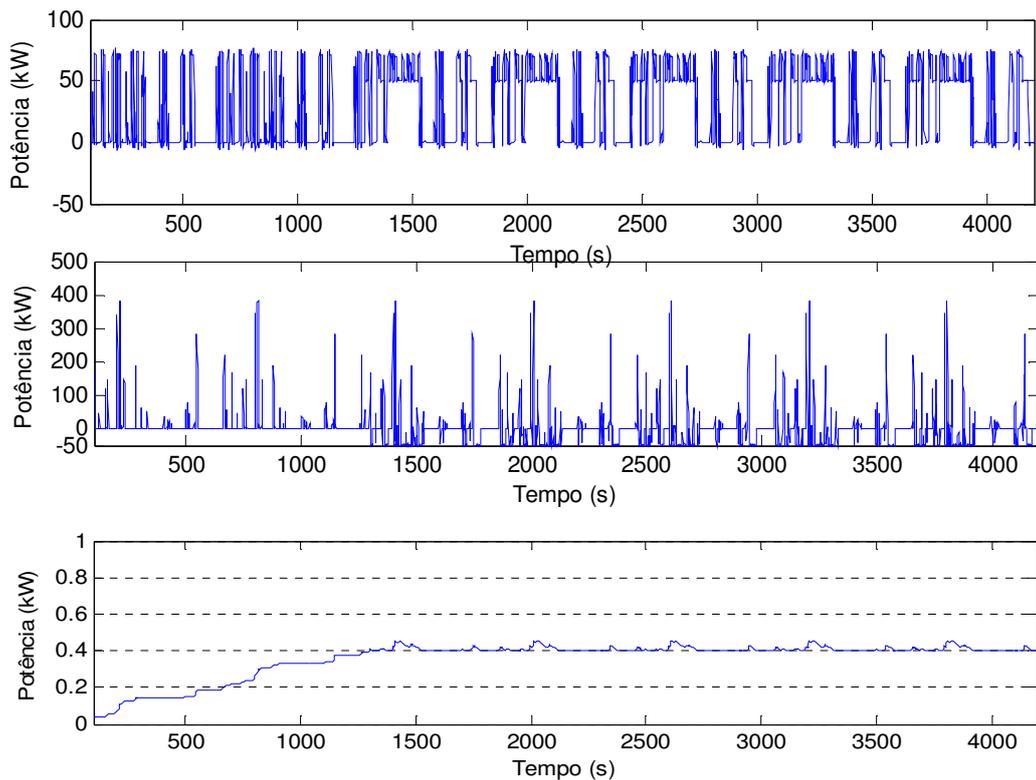


Figura 5.3: Respective perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo NYCCOL sem regeneração e em pavimento plano.

5.1.4 Ciclo NYCCOL sem Regeneração em Pavimento Inclinado

A Fig. 5.4 mostra os perfis de potência, disponibilizada pela APU e pelo banco de baterias, e o perfil do DoD segundo a EGP, sem regeneração, aplicada ao ciclo de condução NYCCOL em pavimento inclinado.

Em relação ao caso anterior, pode-se observar a atuação da APU em um intervalo de tempo maior, pois devido à presença da força resistiva “ R_g ” da inclinação do pavimento, a solicitação de potência do sistema de tração durante todo o intervalo de simulação também é maior. Esta situação resulta no aumento da potência solicitada ao banco de baterias, mesmo em processo de recarga, acarretando em uma atuação significativa da APU no fornecimento da potência de carga.

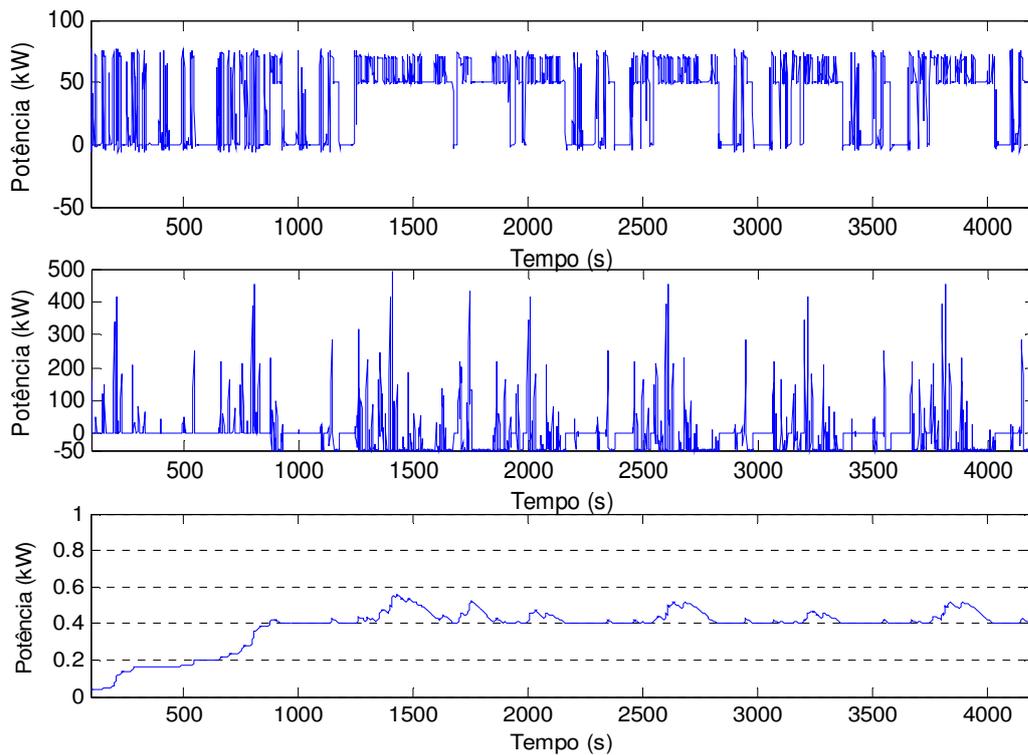


Figura 5.4: Respective perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo NYCCOL sem regeneração e em pavimento Inclinado.

5.2 EGP com Regeneração

Para EGP com regeneração, como citado na Seção 4.4.2, uma parcela fixa da potência resultante (P_{bcarga}) da atuação do motor de tração como gerador, durante a frenagem, é utilizada para a recarga do banco de baterias.

O perfil do DoD para o emprego destas duas EGPs é idêntico, pois a APU – para a EGP sem regeneração – ou a APU somada à potência regenerada – para a EGP com regeneração – conseguem suprir, em todos os instantes de tempo, a solicitação de P_{bcarga} do banco de baterias. Assim, nesta Seção, convém analisar a demanda de potência de carga da APU para o banco de baterias, em relação às situações analisadas para EGP sem regeneração.

Nas Figs. 5.5 e 5.6, estão expostos os perfis de potência da APU para os ciclos de condução ECE15 e NYCCCOL em pavimento plano e inclinado e sob as estratégias de gerenciamento de potência com e sem regeneração. Pode-se ver que quando a EGP sem regeneração é empregada, uma vez alcançado o valor $DoD_{máx}$, a APU atua por mais tempo no processo de recarga do banco de baterias em relação ao emprego da estratégia com regeneração. Neste caso, tem-se o aproveitamento da potência da frenagem, que contribui para diminuição de solicitação de potência da APU no processo de recarga do banco de baterias. Ou seja, a APU fornece potência, para recarga do banco de baterias somente nos momentos em que:

- i. o veículo estiver parado para embarque ou desembarque, ou
- ii. a potência regenerada durante a frenagem for menor que a potência de carga do banco de baterias.

A atuação da APU por um tempo menor implica diretamente na economia de combustível e viabilização do emprego de um sistema de propulsão elétrica que possibilite a recuperação de potência durante frenagem.

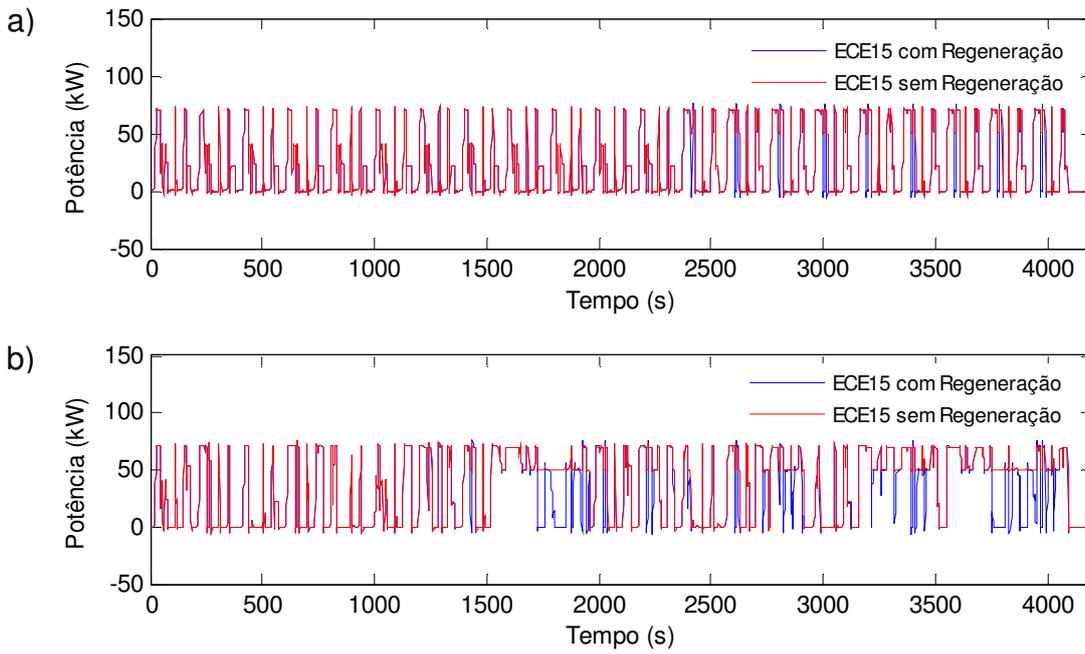


Figura 5.5: Perfil de Potência da APU para o Ciclo ECE15 em pavimento plano (a), e em pavimento inclinado (b), empregando EGP com e sem regeneração.

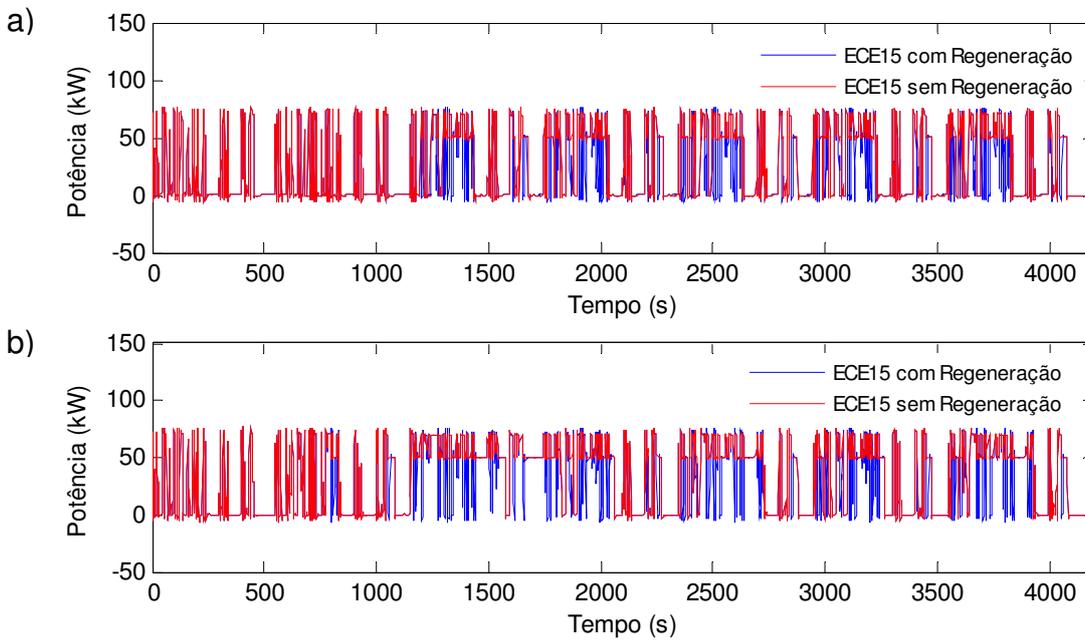


Figura 5.6: Perfil de Potência da APU para o Ciclo NYCCCOL em pavimento plano (a), e em pavimento inclinado (b), empregando EGP com e sem regeneração.

5.3 EGP Fundamentada em Sistemas *Fuzzy*

Abaixo seguem os perfis de potência solicitada à APU, ao banco de baterias, assim como o perfil do DoD, obtidos pelo emprego da EGP fundamentada em sistemas *fuzzy*, para os ciclos de condução de interesse em pavimento plano e inclinado.

5.3.1 Ciclo ECE15 Aplicando Sistemas *Fuzzy* em Pavimento Plano

A Fig. 5.7 mostra os perfis de potência, disponibilizada pela APU e pelo banco de baterias, e o perfil do DoD segundo a EGP fundamentada em sistemas *fuzzy*, aplicada ao ciclo de condução ECE15 em pavimento plano.

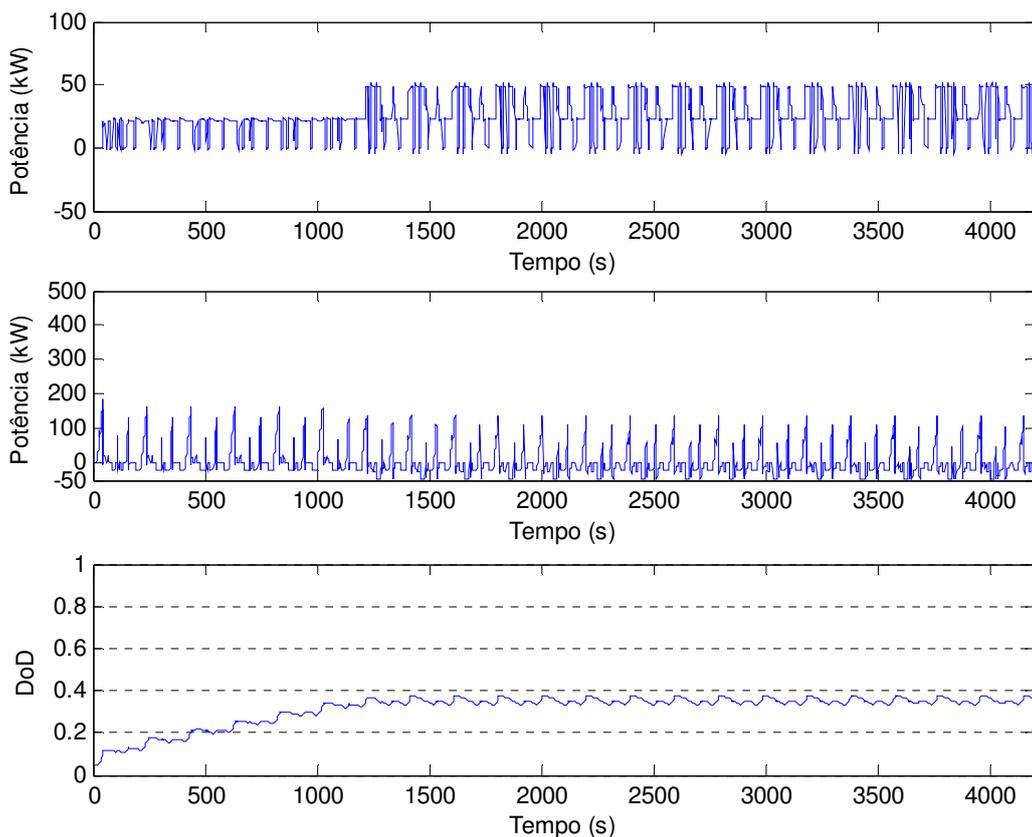


Figura 5.7: Respective perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo ECE15 aplicando sistemas *fuzzy* em pavimento plano.

Pode-se observar que a APU fornece potência em torno de 20 kW enquanto o valor de $DoD_{m\acute{a}x}$ não é alcançado, a partir do qual passa a fornecer potência não superior a 50 kW. Em relação às EGPs baseadas em regras, este resultado, no primeiro momento, apresenta um ganho de potência de 50 kW e no segundo momento, um ganho de 20 kW.

Quanto ao perfil do DoD, comparado ao obtido na Seção 5.1.1, pode-se ver que este apresenta estabilidade abaixo de seu valor máximo.

5.3.2 Ciclo ECE15 Aplicando Sistemas *Fuzzy* em Pavimento Inclinado

A Fig. 5.8 mostra os perfis de potência, disponibilizada pela APU e pelo banco de baterias, e o perfil do DoD segundo a EGP fundamentada em sistemas *fuzzy*, aplicada ao ciclo de condução ECE15 em pavimento inclinado.

Neste caso, também pode-se observar a menor utilização da APU quando comparada às EGPs baseadas em regras. Porém tem-se um sensível aumento na variação do DoD em relação ao mesmo ciclo de condução analisado na Seção 5.1.2. Este comportamento pode ser explicado pela ativação de regras que indicam baixa solicitação de potência da APU quando a potência de demanda atinge valores altos. Dessa forma, o banco de baterias, que se encontra em estado de carga, torna-se a fonte responsável pelo cumprimento, quase integral, da solicitação da potência de demanda.

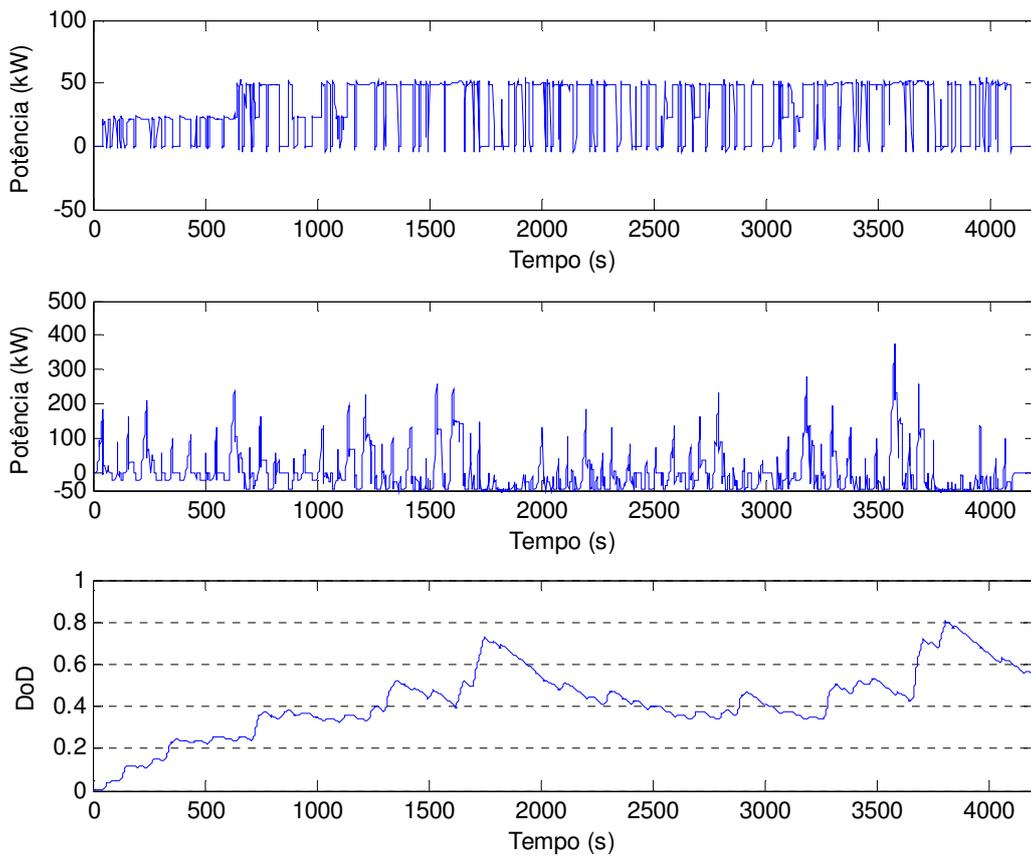


Figura 5.8: Respectivos perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo ECE15 aplicando sistemas fuzzy em pavimento inclinado.

5.3.3 Ciclo NYCCCOL Aplicando Sistemas *Fuzzy* em Pavimento Plano

A Fig. 5.9 mostra os perfis de potência, disponibilizada pela APU e pelo banco de baterias, e o perfil do DoD segundo a EGP fundamentada em sistemas *fuzzy*, aplicada ao ciclo de condução NYCCCOL em pavimento plano.

O perfil do DoD comparado ao da Seção 5.1.3 apresenta maiores variações durante o tempo de simulação, porém, na média, está abaixo do valor máximo de DoD.

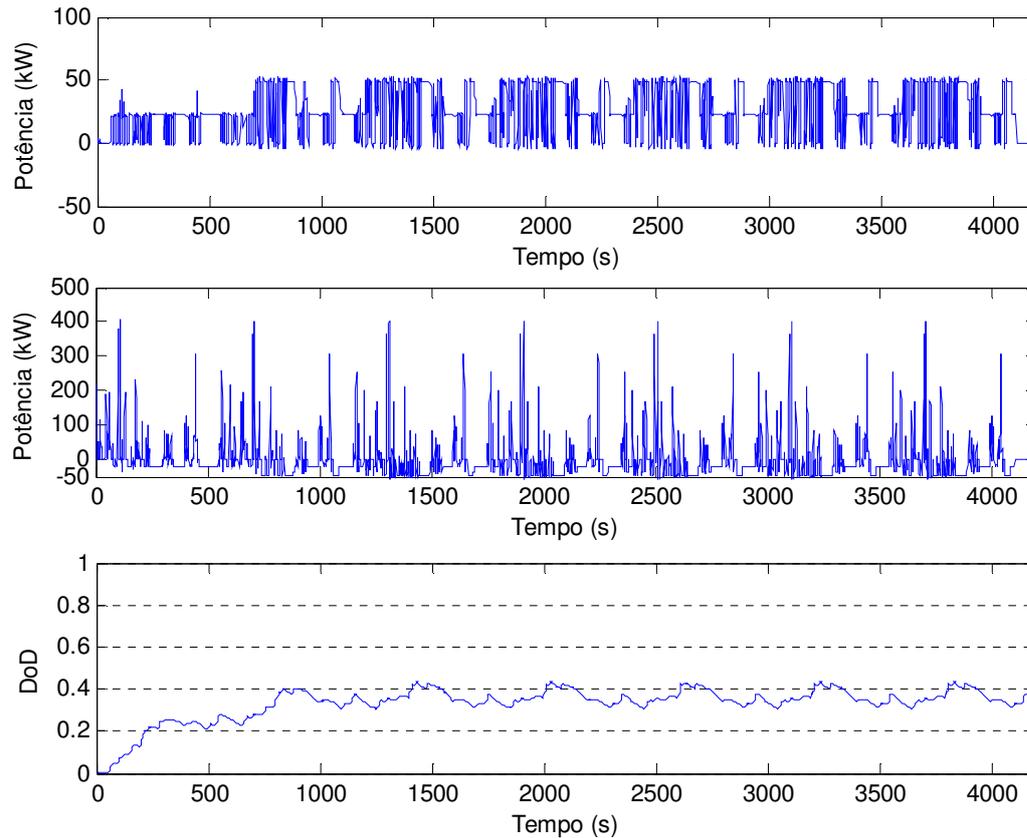


Figura 5.9: Respective perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo NYCCCOL aplicando sistemas fuzzy em pavimento plano.

5.3.4 Ciclo NYCCCOL Aplicando Sistemas *Fuzzy* em Pavimento Inclinado

A Fig. 5.10 mostra os perfis de potência, disponibilizada pela APU e pelo banco de baterias, e o perfil do DoD segundo a EGP fundamentada em sistemas *fuzzy*, aplicada ao ciclo de condução NYCCCOL em pavimento inclinado.

Também, o perfil do DoD comparado ao da Seção 5.1.4, apresenta maiores variações durante o tempo de simulação, porém, na média, apresentam o mesmo comportamento em relação aos valores máximos e mínimos alcançados nesta simulação.

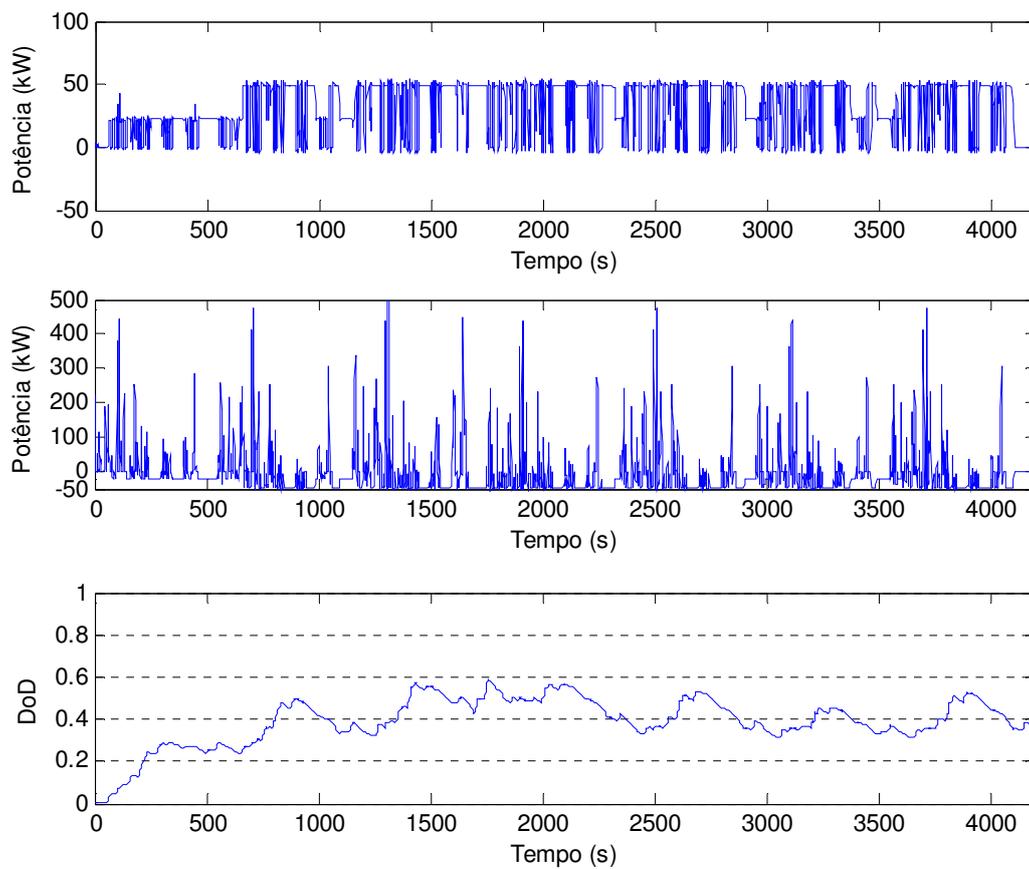


Figura 5.10: Respective perfis de Potência, da APU e da bateria, e DoD do banco de baterias para o Ciclo NYCCOL aplicando sistemas fuzzy em pavimento inclinado.

Capítulo 6

Conclusões

No Capítulo 4 foram apresentadas e definidas as modelagens dos sistemas e subsistemas do VEH Série estudado. A modelagem da dinâmica veicular consistiu no reconhecimento de subsistemas fundamentais como o motor elétrico de tração, diferencial, eixos, rodas e sistemas de freios. O sistema de tração monomotor 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 do banco de baterias. Para as três EGPs abordadas, a potência regenerada foi considerada a mesma de recarga do banco de baterias e fixada em 50 kW. É importante ressaltar que a potência regenerada somente passou a ser utilizada uma vez alcançado o valor de $DoD_{m\acute{a}x}$ do banco de baterias, e que toda a potência regenerada acima de 50 kW foi descartada.

A modelagem do diferencial deu-se em termos de seu fator de redução e eficiência, suficiente para o estudo da dinâmica longitudinal aqui abordada. Os eixos, *driveshaft* e os *axle shafts*, foram considerados rígidos e representados por suas respectivas inércias apresentando contribuição de 10 % na massa total do veículo. As rodas e o pavimento foram considerados rígidos e, conseqüentemente, como fator limitante, a força de tração máxima transmitida ao pavimento pelas rodas foi de 158760 N, evitando o escorregamento das rodas. Os ciclos de condução utilizados, ECE 15 e NYCCCOL, que retratam o perfil de velocidade no tempo adequado para um ônibus de transporte urbano, foram considerados em pavimento plano e inclinado. A importância da análise da potência de demanda, do

sistema de tração, em pavimento inclinado evitou subestimar o dimensionamento das fontes uma vez que a potência exigida em tal situação é maior que a exigida em pavimento plano.

Os parâmetros considerados na atuação do motorista – que tornou possível caracterizar o veículo como um sistema de malha fechada – foram os pedais do acelerador e do freio. Do ponto de vista de controle, o motorista foi modelado como um controlador PI atuando através do torque de referência para o motor elétrico de tração.

A modelagem da fonte de potência APU compreendeu a utilização de um mapa tridimensional – da posição da *throttle* versus velocidade de rotação versus torque – do motor à combustão interna, assim como a utilização do mesmo modelo do motor elétrico de tração operando como gerador. A APU, no modelo veicular proposto, atuou no fornecimento da potência de demanda média exigida pelo veículo operando nos ciclos de condução utilizados. Já o banco de baterias, do tipo ácido e chumbo, atuou no fornecimento da potência de demanda dinâmica solicitada pelo veículo operando nestes mesmos ciclos.

As estratégias de gerenciamento de potência propostas foram elaboradas e ajustadas por meio de uma série de testes preliminares, em pavimento plano e inclinado, a fim de que o banco de baterias mantivesse – em todos os instantes de simulação – seu estado de carga dentro dos limites pré determinados.

Em posse dos valores de aceleração e desaceleração máximos, encontrados para o veículo operando nos ciclos de condução propostos em pavimento plano e inclinado, pode-se comprovar que são inferiores ao valor limite de $8,82 \text{ m/s}^2$. A observância desse aspecto assegurou que os pneus do veículo não escorreguem durante a aceleração ou que não travem durante frenagem.

As simulações e análises realizadas no Capítulo 5 deram validade à metodologia utilizada no dimensionamento das fontes de potência bem como à determinação dos valores de $P_{APU\text{máx}}$, P_{bcarga} , $DoD_{\text{máx}}$ e DoD_{min} . As EGP's estudadas nesta dissertação foram elaboradas,

através da utilização desses valores limites e de acordo com o papel desempenhado por cada fonte, APU e banco de baterias.

A comparação da atuação das três EGPs propostas diante as diferentes demandas de potência do veículo em operação nos ciclos de condução ECE15 e NYCCCOL, para pavimento plano e inclinado, são dadas no Capítulo 5. Os resultados mostraram que a estratégia de gerenciamento de potência fundamentada em sistemas *fuzzy* apresentou desempenho superior na utilização da fonte de potência, APU, em comparação às baseadas em regras. Para esta estratégia, a APU fornece potência em torno de 20 kW até o instante de simulação em que o valor de $DoD_{m\acute{a}x}$ não é alcançado, a partir do qual passa a fornecer potência não superior a 50 kW. Em comparação com as EGPs baseadas em regras, este resultado, no primeiro momento, apresenta um ganho de potência de 50 kW e no segundo momento, um ganho de 20 kW.

Tais resultados comprovam que a EGP fundamentada em sistemas *fuzzy* possibilita maior economia de combustível por permitir que o motor à combustão interna forneça menos potência face o emprego das EGPs baseadas em regras. Esta análise permite, também, a possibilidade de que o MCI seja redimensionado para fornecer potência máxima de 50 kW, no lugar de 70 kW, permitindo o emprego de um MCI menos potente, de menor custo, sem o comprometimento do desempenho do veículo.

Para as três estratégias, 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 do banco de baterias, e conseqüentemente o fornecimento de energia, juntamente com a APU, não será comprometido diante a solicitação de potência do sistema de tração elétrica.

O modelo de VEH Série 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;
- Substituições das fontes de potência APU por pilhas de células a combustível, e do banco de baterias de ácido e chumbo por um à base de níquel ou de lítio, bem como a inserção de um módulo de ultracapacitores;
- 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

BADIN, F. et al. (1999). Evaluation of a true low floor 12m series hybrid bus. In: THE 16th INTERNATIONAL ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM, 1999, Beijing. **Proceedings...** [S.l.: s.n.]. p.1-12.

BARSALI, S.; MIULLI, C.; POSSENTI, A. A Control Strategy to Minimize Fuel Consumption of Series Hybrid Electric Vehicles. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v.19, n.1, p.187-195, march 2004.

BECK, R.; BOLLIG, A.; ABEL, D. Comparison of Two Real-Time Predictive Strategies for the Optimal Energy Management of a Hybrid Electric Vehicle. **Oil and Gas Science and Technology**. Editions Technip, Paris Cedex 15, 75737, France, v.64, n.4, p.635-643, Aug 2007.

CANALE, A.C. (1989). **Automobilística: Dinâmica e Desempenho**. São Paulo: Érica.

CERRUTO, E. et al. (1994). Energy Flows Management in Hybrid Vehicles by Fuzzy Logic Controller. In: 7th MEDITERRANEAN ELECTROTECHNICAL CONFERENCE, 3., 1994, Antalya. **Proceedings...** IEEE, Piscataway, NJ, USA. p.1314-1317.

CERRUTO, E. et al. (1994). Fuzzy Logic Based Efficiency Improvement of an Urban Electric Vehicle. In: 20th INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, CONTROL AND INSTRUMENTATION, 1994, Bologna. **Proceedings...** IEEE, Los Alamitos, CA, USA. p.1304-1309.

CHAU, K.T.; WONG, Y.S. Overview of power management in hybrid electric vehicles. **Energy conversion and Management**. Elsevier Science Ltd, v.43, n.15, p.1953-1968.

CUNHA, R.H. **Modelagem e Análise da Dinâmica Longitudinal de Veículos Automotivos**. 1998. 93p. Dissertação (Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

DIESELFORUM, (2008). Diesel-Electric Hybrid Vehicles. Disponível em: <<http://www.dieselforum.org/fileadmin/templates/whitepapers/diesel-electric.pdf>>. Acesso em: 27 May 2008.

ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY, (2008). Biodiesel. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/afdc/fuels/biodiesel.html>>. Acesso em: 27 May 2008.

ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY, (2008). Hydrogen/Natural Gas (HCNG) Fuel Blends. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/afdc/fuels/natural_gas_blends.html>. Acesso em: 27 May 2008.

EHSANI, M.; GAO, Y.; BUTLER, K.L. Application of Electrically Peaking Hybrid (ELPH) Propulsion System to a Full-Size Passenger Car with Simulated Design Verification. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ, USA, v.48, n.6, p.1779-1787, Nov 1999.

EMADI, A. et al. Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Institute of electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States, v.54, n.3, p.763-770, May 2005.

FARRAL, S.D.; JONES, R.P. (1993). Energy Management in an automotive electric/heat engine hybrid powertrain using fuzzy decision making. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT CONTROL, 1993, Chicago. **Proceedings...** IEEE, Piscataway, NJ, USA. p.463-468.

FERRAZ, C.V. **Sistemas Controlados de Propulsão de Veículos Automotores**. 2004. 149p. Dissertação (Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

FERREIRA, A.A. **Sistema Supervisório de Gestão de Múltiplas Fontes de Suprimento para Aplicações em Veículos Elétricos**. 2007. 187p. Tese (Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2007.

FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C.J.; KUSKO, A. (1975). **Máquinas Elétricas**. Tradução de Josafá A. Neves. Brasil: McGraw-Hill.

GAO, W. Performance Comparison of Fuel Cell-Battery Hybrid Powertrain and a Fuel Cell-Ultracapacitor Hybrid Powertrain. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States, v.54, n.3, p.846-855, May 2005.

GILLESPIE, T.D. (1992). **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: SAE, Inc.

IBAMA, (2008). Proconve - Redução na Emissão de Monóxido de Carbono. Goiânia. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/go/index.php?id_menu=24&id_arq=90>. Acesso em: 29 maio 2008.

JALIL, N.; KHEIR, N.A.; SALMAN, M. (1997). A Rule-Based Energy Management Strategy for a Series Hybrid Vehicle. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1., 1997, Albuquerque. **Proceedings...** IEEE, Piscataway, NJ, USA. p.689-693.

KENJO, T.; NAGAMORI, S. (1985). **Permanent-Magnet and Brushless DC Motors**. Estados Unidos: Oxford University Press.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. (2003). **Electric Vehicle Technology Explained**. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd.

LEE, H.D. et al. (2000). Torque Control Strategy for a Parallel-Hybrid Vehicle Using Fuzzy Logic. **IEEE Industry Applications Magazine**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ, USA, v.6, n.6, p.36-38, Nov 2000.

LIN, C.C. (2001). Energy Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2001, Arlington. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. p.2878-2883.

LIN, C.C. Power Management Strategy for a Parallel Hybrid Electric Truck. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, v.11, n.6, p.839-849, Nov 2003.

MUSARDO, C.; RIZZONI, G.; STACCIA, B. (2005). A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management. In: 44th IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, AND THE EUROPEAN CONTROL CONFERENCE 2005, 2005, Seville. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States. p.1816-1823.

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

PEDRIYCZ, W.; GOMIDE, F. (1998). **An Introduction to Fuzzy Sets – Analysis and Design**. MIT Press: Cambridge, USA.

PÉREZ, L.V. et al. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. **Mathematics and Computers in Simulation**. Elsevier, Amsterdam, 1000 AE, Netherlands, v.73, n.1-4 SPEC. ISS, p.244-254, Nov 2006.

PHUC, D.H. et al. (2006). Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Driver Vehicle Following Model. In: SICE-ICASE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE, 2006, Bexco. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States. p.555-560.

PISU, P.; KOPRUBASI, K.; RIZZONI, G. (2005). Energy Management and Drivability Control Problems for Hybrid Electric Vehicles. In: 44th IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL, AND THE EUROPEAN CONTROL CONFERENCE 2005, 2005, Seville. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Piscataway, NJ 08855-1331, United States. p.1824-1830.

QUEIROZ, J.F. **Introdução do veículo híbrido no Brasil: Evolução tecnológica aliada à qualidade de vida.** 2006. 71p. Dissertação (Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

REVOREDO, T.C. **Modelagem e Gerenciamento de Potência de um Veículo Elétrico Híbrido de Célula a Combustível.** 2007. 149p. Dissertação (Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2007031601.pdf>>. Acesso em: 14 ABR.2008.

RIZOULIS, D.; BURL, J.; BEARD, J. (2001). Control Strategies for a Series-Parallel Hybrid Electric Vehicle. In: SAE 2001 WORLD CONGRESS, 2001, Detroit. **Proceedings...** SAE. P.139-157.

ROUSSEAU, A.; SHARER, P.; PASQUIER, M. Validation Process of a HEV System Analysis Model: PSAT. In: SAE 2001 WORLD CONGRESS, 2001, Detroit. **Proceedings...** SAE. p.27-38.

SCHOUTEN, N.J.; SALMAN, M.A.; KHEIR, N.A. Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v.10, n.3, p.460-468, May 2002.

SHAW, I.S.; SIMÕES, M.G. (1999). **Controle e Modelagem Fuzzy.** 1.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda.

SHEN, S.; VELDPAUS, F.E. Analysis and Control of a Flywheel Hybrid Vehicular Powertrain. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v.12, n.5, p.645-660, Sept 2004.

WÄLTERMANN, P. (1998). Modelling and Control of the Longitudinal and Lateral Dynamics of a Series Hybrid Vehicle. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS, 1998, Dearborn. **Proceedings...** IEEE, Piscataway, NJ, USA. p.191-198.

WANG, A.; YANG, W. (2006). Design of Energy Management Strategy in Hybrid Vehicles by Evolutionary Fuzzy System Part I: Fuzzy Logic Controller Development. In: 6th WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, 2006, Dalian. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States. p.8324-8328.

WANG, A.; YANG, W. (2006). Design of Energy Management Strategy in Hybrid Vehicles by Evolutionary Fuzzy System Part II: Tuning Fuzzy Controller by Genetic Algorithms. In: 6th WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, 2006, Dalian. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Piscataway, NJ 08855-1331, United States. p.8329-8333.

WESTBROOK, M.H. (2001). **The Electric and Hybrid Electric Car.** The Institution of Electrical Engineers, London: SAE.

WINNISCHOFER, G. **Modelamento e veículo híbrido-elétrico para transporte coletivo.** 106p. Dissertação (Sistemas de Potência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CONTREIRAS, I. Pálio elétrico, um veículo do futuro. **HÍBRIDA, a primeira revista latino-americana sobre veículos elétricos,** Rio de Janeiro, v.0, 2008. No prelo.