



FABIO MAZZARIOL SANTICIOLLI

Otimização dos Armazenadores de Energia Elétrica de um Veículo Híbrido em Função do Ciclo de Condução

20/2014

**CAMPINAS
2014**



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FABIO MAZZARIOL SANTICIOLLI

**Otimização dos Armazenadores de Energia
Elétrica de um Veículo Híbrido em Função do
Ciclo de Condução**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO(A)
ALUNO(A).....Fabio..Mazzariol..Santiciolli.....
....., E ORIENTADA PELO(A)
PROF(A). DR(A)...Franco..Giuseppe..Dedini.....

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

**CAMPINAS
2014**

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

Sa59o Santiciolli, Fabio Mazzariol, 1989-
Otimização dos armazenadores de energia elétrica de um veículo híbrido em função do ciclo de condução / Fabio Mazzariol Santiciolli. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

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

1. Veículos elétricos híbridos. 2. Sistemas dinâmicos diferenciais. 3. Simulação computacional. I. Dedini, Franco Giuseppe, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Optimization of the electric energy storage systems of a hybrid electric vehicle in function of the driving cycle

Palavras-chave em inglês:

Hybrid electric vehicles

Differential dynamic systems

Computer simulation

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Franco Giuseppe Dedini [Orientador]

Niederauer Mastelari

Paulo Carlos Kaminski

Data de defesa: 14-02-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS INTEGRADOS**

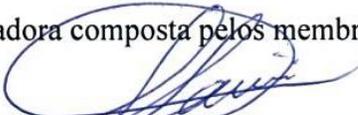
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Otimização dos Armazenadores de Energia
Elétrica de um Veículo Híbrido em Função do
Ciclo de Condução**

Autor: **Fabio Mazzariol Santicioli**

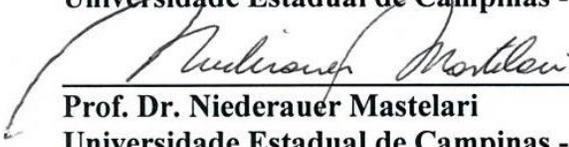
Orientador: Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



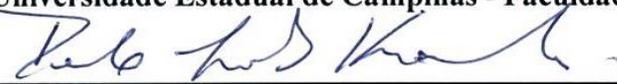
Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini

Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr. Niederauer Mastelari

Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr. Paulo Carlos Kaminski

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Mecânica

Campinas, 14 de fevereiro de 2014.

Dedicatória:

Dedico este trabalho a Adriana, Angela e Beatriz.

Agradecimentos:

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais Angelo e Beatriz, exemplos de amizade, amor, garra e luta. Ao amor da minha mãe, que a agigantou nos momentos de dificuldade e que é base sólida para seus filhos. Pelo incentivo, carinho e orientação.

À minha irmã Angela, pela amizade, companheirismo e incentivo por toda vida.

À minha namorada Adriana, por dividir comigo seu amor e sua cultura, pela amizade confiante, por colorir meus horizontes e por compartilharmos nossos caminhos e objetivos.

À Bete e ao Danilo pela acolhida calorosa.

À minha família, pelas experiências vividas, pelos ensinamentos, pela cooperação mútua e pelo amor que nos une.

Aos meus amigos, colegas do Laboratório de Sistemas Integrados, Adriana, André, Arthur, Diego, Eduardo, Fernanda, Heron, Jony, Ludmila e Marília pelos debates e cooperações que me ajudaram a alcançar os objetivos, pelo ambiente de trabalho saudável e pela amizade.

Ao corpo docente da Faculdade de Engenharia Mecânica por me suprir dos conhecimentos que embasaram este trabalho.

Às Secretarias de Graduação e Pós Graduação da FEM, pelo apoio e suporte.

Ao Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini pela orientação por meio das questões que envolvem a temática discutida, pela oportunidade e pela confiança.

Ao grupo Schaeffler e à Companhia Paulista de Força e Luz pelo apoio financeiro.

A todos, muito obrigado!

*“O homem é um animal que adora tanto as novidades
que se o rádio fosse inventado depois da televisão
haveria uma correria a esse maravilhoso
aparelho completamente sem imagem.”*

Millôr Fernandes

Resumo

Este trabalho tem a intenção de contribuir com o projeto de veículos elétricos híbridos com foco no compromisso entre economia de combustível e custo de rodagem. Com esta finalidade, faz-se uma revisão sobre a modelagem de alguns dos principais subsistemas dos veículos elétricos híbridos, como ultracapacitores, baterias, motores elétricos e motores de combustão interna, bem como sobre as formas de associação destes subsistemas em torno do veículo completo. Também se revisam os fatores que compõe a dinâmica veicular longitudinal como o Arrasto Aerodinâmico, a Resistência à Rolagem e a Resistência ao Aclive. Após o domínio dos subsistemas mais importantes e da dinâmica veicular, montam-se modelos matemáticos de veículos completos e em torno de simulações computacionais. Neste estudo fazem-se quatro tipos de simulações principais, uma relativa a um veículo convencional e outras três versões alternativas hibridizadas, variando-se o modo de associação entre baterias, ultracapacitores, *choppers* e motores elétricos. Em sequência, para cada versão otimizam-se os armazenadores em função da capacidade de tração elétrica e do ciclo brasileiro normatizado de condução urbana. Por fim faz-se uma análise crítica dos resultados.

Palavras Chave: Veículos Elétricos Híbridos; Sistemas Dinâmicos Diferenciais; Simulação Computacional

Abstract

This research intends to contribute to the design of hybrid electric vehicles focusing on compromise between fuel economy and running costs. For this purpose, it contains a review on the modeling of some of the main subsystems of hybrid electric vehicles, such as ultracapacitors, batteries, electric motors and internal combustion engines, as well as the forms of associating these subsystems around the whole vehicle. It also revises the factors that compose the longitudinal vehicle dynamics like Aerodynamic Drag, Rolling Resistance and Uphill Resistance. After the dominance of the main subsystems and vehicle dynamics, it describes the mathematical models of complete vehicles and around computer simulations. This study contains four main types of simulations, relative to a conventional vehicle and three other alternatives hybridized versions, varying the mode of association between batteries, ultracapacitors, choppers and electric motors. In sequence, to the amount of electric traction and the Brazilian standardized urban driving cycle are the parameters that command the optimization of each version is the energy stores. Finally it finishes in a critical analysis of the results.

Key Words: Hybrid Electric Vehicles, Differential Dynamic Systems, Computer Simulation

Lista de Ilustrações

2.1	Dois VEs “Morris & Salom’s Electroboat” usados como taxi em Manhattan em 1898	2
2.2	Woods Gasoline-Electric com MCI e ME na dianteira acoplados a um Eixo Cardan e diferencial, transmitindo tração para eixo traseiro. Baterias se encontram debaixo dos bancos traseiros.	4
2.3	Na linha superior tem-se o Toyota Prius 2013 e na linha inferior, Honda Insight 2013	5
2.4	Trem de potência conceitual de um VEH	6
2.5	Fluxo de massa e energia em um VEH Série	8
2.6	Fluxo de massa e energia em um VEH Paralelo	9
2.7	Fluxo de massa e energia em um VEH Série Paralelo	11
2.8	Energia específica e potência específica para as fontes de energias dos VEHs	12
2.9	Comportamento da tensão nos terminais de uma célula com a variação da corrente, evidenciando as perdas ôhmicas e por polarização	16
2.10	Em “A” tem-se a tensão em função do tempo em descarga constante para três tipos de bateria. Já em “B” tem-se a influência da temperatura na tensão da bateria ao longo de um processo de descarga	17
2.11	Em “A”, tem-se a variação da tensão de uma bateria no tempo para diferentes intensidades de corrente de descarga, crescente de 1 a 5. Já em “B”, tem-se a diminuição da corrente de descarga (crescente de 1 a 4) à medida que a tensão cai ao nível da tensão de corte	18
2.12	Longevidade de uma bateria	18
2.13	Modelo Abstrato de bateria	19
2.14	Circuito elétrico equivalente de um ultracapacitor	20
2.15	Em “A” tem-se a geometria básica de um sistema composto de cilindro, pistão, biela e manivela. Em “B” tem-se as fases de um motor de 4 tempos ICE: admissão, compressão, expansão e escape, respectivamente.	22
2.16	Mapa de potência e eficiência energética em função da rotação	26

2.17	Envelopes de torque e potência, delimitadores da operação de um motor elétrico típico	27
2.18	Seções transversais dos motores	27
2.19	Estrutura simplificada de motor DC	28
2.20	Vista explodida de um Motor DC de campo axial	29
2.21	Regiões típicas de maior eficiência para motores PMSM, IM e SEM	32
2.22	Superfície de integração para o cálculo do fluxo	33
2.23	Circuito equivalente do PM DC	34
2.24	<i>Chopper</i> de operação abaixadora	36
2.25	<i>Chopper</i> de operação elevadora	36
2.26	Classes dos <i>choppers</i>	37
2.27	Exemplo de <i>chopper</i> Classe C	38
2.28	Configuração Paralelo Semiativo	39
2.29	Configuração Paralelo Ativo	40
2.30	Esquema elétrico da configuração UCs/Baterias	40
2.31	Esquema elétrico da configuração Baterias/UCs	41
2.32	Esquema elétrico da configuração Cascata	41
2.33	Esquema elétrico da configuração Múltiplas Entradas	42
2.34	Esquemático das forças atuantes na dinâmica longitudinal veicular	44
2.35	Coefficiente de resistência à rolagem em função da velocidade do veículo	45
2.36	Variação do coeficiente de resistência à rolagem dado o aumento de pressão e temperatura durante um trajeto	47
2.37	À esquerda tem-se o comportamento de f em função da pressão de inflação dos pneus e da dureza da pista. À direita tem-se a variação de f em função do material dos pneus e da temperatura	47
2.38	Comparação entre equações de coeficiente de resistência à rolagem	48
2.39	Consumo médio dos automóveis a gasolina e a etanol produzidos no ano de 2011 e o esperado para 2016 e 2017 segundo o novo regime automotivo	52
3.1	Trem de potência tradicional	55

3.2	Topologia simplificada do modelo de veículo convencional de tração dianteira estudado.	55
3.3	Diagrama corpo livre das inércias do veículo convencional	55
3.4	Topologia simplificada do modelo de veículo híbrido paralelo estudado.	58
3.5	Associação elétrica e mecânica dos N motores elétricos	58
3.6	Diagrama corpo livre das inércias do veículo híbrido	59
3.7	Configuração Paralelo Semiativo adotada	60
3.8	Em “A”, esquema elétrico do <i>chopper</i> abaixador. Em “B”, tem-se um <i>chopper</i> elevador no sentido direto e abaixador no sentido inverso.	60
3.9	Configuração Paralelo Ativo adotada	63
3.10	Em “A”, tem-se o esquema elétrico do <i>chopper</i> abaixador. Em “B”, tem-se um <i>chopper</i> elevador no sentido direto e abaixador no sentido inverso, configuração Paralelo Ativo	63
3.11	Configuração Cascata adotada	64
3.12	Diagrama de blocos do MCI	65
3.13	Diagrama de Blocos do Modelo Convencional	66
3.14	Diagrama de blocos para obtenção de T_{Obj}	66
3.15	Mapa MCI para aberturas de borboleta de zero a 100%	67
3.16	Perfil de Marchas recomendadas	68
3.17	Mapa de consumo em g/kWh	68
3.18	Diagrama de Blocos do Modelo Híbrido.	70
3.19	Diagrama de Blocos do trem de potência elétrico. Em laranja tem-se o sinal lógico de chaveamento do <i>chopper</i> , enquanto em azul tem-se sinais numéricos.	71
3.20	Distribuição de torque em potência	71
3.21	Distribuição de torque em frenagem	72
3.22	Subfunções de <i>Fitness</i>	76
3.23	Composição lógica dos <i>choppers</i> de tração	78
3.24	Equacionamento elétrico no modo de operação abaixador	79
3.25	Equacionamento elétrico no modo de operação elevador	80
3.26	Equacionamento elétrico no modo de regeneração em altas velocidades	80
3.27	Armazenadores na configuração Paralelo Semiativo	81

3.28	Armazenadores na configuração Paralelo Ativo	82
3.29	Ultracapacitores de tração	83
3.30	Composição lógica dos <i>choppers</i> dos armazenadores cascata	83
3.31	Equacionamento dos armazenadores cascata no modo de operação abaixador	84
3.32	Equacionamento dos armazenadores cascata no modo de operação elevador	84
4.1	Perfil de velocidades da norma e perfil obtido pela simulação convencional	85
4.2	Distância percorrida pelo veículo convencional simulado	86
4.3	Perfil das marchas utilizadas durante a simulação convencional	86
4.4	Consumo de combustível da simulação do veículo convencional	87
4.5	Consumo de combustível de um VEH ideal em função do número de MEs	88
4.6	Rendimento de combustível de um VEH ideal em função do número de MEs	88
4.7	Consumo elétrico de um VEH ideal em função do número de MEs	89
4.8	Custo demandado pelo VEH ideal para percorrer um ciclo em função do número de MEs	89
4.9	<i>Fitness</i> médio para cada geração do algoritmo de otimização da associação Paralelo Semiativo	90
4.10	Custo para cumprimento de um ciclo para associação Paralelo Semiativo	91
4.11	Consumo total de combustível e de eletricidade para o caso Paralelo Semiativo	92
4.12	Perfil de velocidades da norma e perfil obtido pela simulação de VEH Paralelo Semiativo otimizado com 1ME	93
4.13	Distância percorrida pelo VEH Paralelo Semiativo otimizado com 1ME	93
4.14	Torques dos Motores Elétricos para associação Paralelo Semiativo	94
4.15	Corrente em cada célula para associação Paralelo Semiativo	95
4.16	Corrente sobre ultracapacitor Paralelo Semiativo	96
4.17	Potência nos armazenadores da associação Paralelo Semiativo	96
4.18	Estado de carga dos armazenadores em associação Paralelo Semiativo	97
4.19	<i>Fitness</i> médio para cada geração do algoritmo de otimização da associação Paralelo Ativo	98
4.20	Custo para cumprimento de um ciclo para associação Paralelo Ativo	99
4.21	Consumo total de combustível e de eletricidade para o caso Paralelo Ativo	99
4.22	Torques dos Motores Elétricos para associação Paralelo Ativo	100

4.23	Corrente em cada célula para associação Paralelo Ativo	101
4.24	Corrente sobre o ultracapacitor Paralelo Semiativo	101
4.25	Corrente sobre o ultracapacitor Paralelo Ativo	102
4.26	Potência nos armazenadores da associação Paralelo Ativo	103
4.27	Estado de carga dos armazenadores em associação Paralelo Semiativo	103
4.28	<i>Fitness</i> médio para cada geração do algoritmo de otimização da associação Cascata	104
4.29	Torques do Motor Elétrico para associação Cascata	105
4.30	Corrente em cada célula para associação Cascata	105
4.31	Corrente sobre o ultracapacitor Paralelo Ativo na associação Cascata	106
4.32	Corrente sobre os ultracapacitores associados em Cascata	107
4.33	Potência nos armazenadores da associação Cascata	107
4.34	Estado de carga dos armazenadores em associação Cascata	108

Lista de Tabelas

2.1	Modos de operação para cada arquitetura de VEH	11
2.2	Dados comparativos dos tipos de baterias	15
2.3	Comparação qualitativa entre tipologias	31
3.1	Dados da transmissão C510	69
3.2	Demais parâmetros do Veículo Convencional	69
3.3	Dados dos motores PM DC de campo axial	73
3.4	Dados da célula PL-383562	73
3.5	Dados do ultra capacitor EMHSR-0166C0-048R0S	73
3.6	Valores de TUSD e TE para consumidores residenciais	75
3.7	Valores de ICMS para o Grupo Residencial	75
4.1	Principais resultados da otimização do VEH com associação Paralelo Semiativo	91
4.2	Principais resultados da otimização do VEH com associação Paralelo Ativo	98
4.3	Principais resultados da otimização do VEH com associação Cascata	104
4.4	Principais resultados do trabalho, abrangendo número de MEs, massa de hibridização, rendimento do combustível e custos de rodagem.	108

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

A	área frontal do veículo	[m ²]
B	campo magnético	[T]
B_R	amortecimento do rotor	[N.s/rad]
B_V	amortecimento viscoso dos mancais do volante de inércia	[N.s/rad]
C	capacitância	[F]
C_C	capacitância dos capacitores cascata	[F]
C_{CAP}	capacitância de estado de carga	[F]
C_d	coeficiente de arrasto aerodinâmico	
C_{PA}	capacitância do capacitor paralelo ativo	[F]
C_{TL}	capacitância de transiente longo	[F]
C_{TS}	capacitância de transiente curto	[F]
D	diâmetro do cilindro	[m]
DOH	grau de hibridização	
E	tensão na célula	[V]
E₀	tensão em circuito aberto na célula	[V]
E_{cl}	energia cinética linear	[J]
E_{cr}	energia cinética rotacional	[J]
E_V	energia cinética do volante de inércia	[J]
f	coeficiente de resistência ao rolamento	
F	relação combustível ar	
f₀	constante “zero” de resistência ao rolamento	
f₁	constante “um” de resistência ao rolamento	
f₂	constante “dois” de resistência ao rolamento	
F_a	arrasto aerodinâmico	[N]
F_g	resistência ao aclave	[N]
F_r	resistência à rolagem	[N]

g	aceleração da gravidade	[m/s ²]
I	momento de inércia complementar do veículo	[kg.m ²]
i	corrente elétrica	[A]
I₁	corrente mínima	[A]
I₂	corrente máxima	[A]
i_{arm}	corrente sobre os armazenadores	[A]
I_{bat}	corrente na bateria	[A]
I_{BATT}	corrente na célula	[A]
I_d	momento de inércia do diferencial	[kg.m ²]
I_{de}	momento de inércia do diferencial elétrico	[kg.m ²]
I_{eq}	inércia equivalente	[kg.m ²]
I_m	momento de inércia do motor de combustão	[kg.m ²]
I_t	momento de inércia da transmissão	[kg.m ²]
i_{UC}	corrente no ultracapacitor	[A]
J	momento de inércia equivalente à massa do veículo	[kg.m ²]
J_R	momento de inércia do rotor	[kg.m ²]
J_V	momento de inércia do volante de inércia	[kg.m ²]
K	constante do pneu radial	
k	relação entre t ₁ e T - razão cíclica	
K_e	constante do motor	[V.s/rad]
K_T	constante de torque	[N.m/A]
L	indutância	[H]
l₁	comprimento de uma espira	[m]
l₂	largura de uma espira	[m]
L_a	indutância de armadura	[H]
L_{elev}	indutor de elevação	[H]
L_{elevC}	indutor de elevação para associação cascata	[H]
L_{elevPA}	indutor de elevação para associação paralelo ativo	[H]
L_p	curso do pistão	[m]
L_{smooth}	indutor de suavização	[H]
L_{smoothC}	indutor de suavização para associação cascata	[H]

m	massa do veículo	[kg]
\dot{m}_a	vazão mássica de ar	[kg/s]
\dot{m}_{ae}	vazão mássica de ar teórica	[kg/s]
m_{bat}	massa das baterias	[kg]
\dot{m}_c	vazão mássica de combustível	[kg/s]
m_{cel}	massa de cada célula	[kg]
m_{cp}	massa do ultracapacitor em paralelo semiativo	[kg]
m_{cpC}	massa de um dos ultracapacitores em cascata	[kg]
m_{cpPA}	massa do ultracapacitor em paralelo ativo	[kg]
m_{cpTot}	massa dos ultracapacitores	[kg]
m_{hTot}	massa total de hibridização	[kg]
m_{MET}	massa dos motores elétricos	[kg]
n	rotação do MCI	[rpm]
N	número de motores elétricos	
N_d	relação de transmissão do diferencial	
N_{de}	relação de transmissão do diferencial elétrico	
n_r	número de voltas no rotor	
N_t	relação de transmissão da transmissão	
N_{td}	relação de transmissão total	
p	pressão de inflação do pneu	[Pa]
pa	proporção de acoplamento da embreagem	
p_{atm}	pressão atmosférica	[Pa]
PCI	poder calorífico inferior	[J/kg]
P_{ICE}	potência do motor de combustão	[W]
P_{ME}	potência do motor elétrico	[W]
Q	carga do capacitor ideal	[C]
\vec{r}	versor radial	
r	raio do pneu	[m]
R	constante universal dos gases	[J/(kg.K)]
R_a	resistência de armadura	[Ω]
R_C	resistência interna do capacitor	[Ω]

R_i	resistência interna	[Ω]
r_r	raio do rotor	[m]
R_{TL}	resistência de transiente longo	[Ω]
R_{TS}	resistência de transiente curto	[Ω]
SOC	estado de carga	
SOC_{min}	estado de carga mínimo	
T	período de chaveamento	[s]
t₁	tempo de chave fechada	[s]
t₂	tempo de chave aberta	[s]
T_{amb}	temperatura do ambiente	[K]
T_b	torque no motor DC	[N.m]
T_c	torque na embreagem	[N.m]
T_d	torque no diferencial	[N.m]
T_e	torque de eixo	[N.m]
T_f	torque do freio ideal	[N.m]
T_{fm}	torque do freio motor do MCI	[N.m]
T_{fm_min}	torque limite do freio motor do MCI	[N.m]
T_L	torque de resistência	[T]
T_m	torque no motor de combustão	[N.m]
T_{m_Obj}	torque objetivo do freio motor do MCI	[N.m]
T_{ME}	torque do motor elétrico	[N.m]
T_{ME_Nom}	torque nominal do motor elétrico	[N.m]
T_{ME_Obj}	torque objetivo do motor elétrico	[N.m]
T_{Obj}	torque de objetivo	[N.m]
T_r	torque de resistência	[N.m]
T_t	torque na transmissão	[N.m]
T_v	torque de acionamento do volante de inércia	[N.m]
V	velocidade longitudinal do veículo	[m/s]
V_{bat}	tensão nos terminais da bateria	[V]
V_{BATT}	tensão nos terminais da célula	[V]
V_c	tensão sobre capacitor ideal	[V]

V_O	tensão sobre a carga	[V]
V_{Obj}	velocidade instantânea do ciclo de condução	[m/s]
V_{OC}	tensão de circuito aberto da célula	[V]
V_S	tensão da fonte	[V]
V_{SOC}	tensão de estado de carga	[V]
V_{TL}	tensão de transiente longo	[V]
V_{TS}	tensão de transiente curto	[V]
V_{UC_C}	tensão no capacitor de carga	[V]
V_{UC_D}	tensão no capacitor de descarga	[V]
V_{ucPA}	tensão no capacitor paralelo ativo	[V]
V_{vento}	velocidade do vento	[m/s]
W	peso do veículo	[N]
\dot{W}_e	potência de eixo	[W]
W_f	carga sobre eixo dianteiro	[N]
\dot{W}_f	potência de atrito	[W]
\dot{W}_i	potência indicada	[W]
W_r	carga sobre eixo traseiro	[N]
x	constante tempos de um motor de combustão	

Letras Gregas

α	inclinação da pista	[rad]
β	proporção de abertura de borboleta	
ΔI	diferença entre corrente máxima e mínima	[A]
ϵ	energia do capacitor ideal	[J]
η	rendimento do trem de potência de combustão	
η_c	queda de tensão devida ao gradiente de concentração	[V]
η_{ct}	queda de tensão devida à ativação	[V]
η_i	rendimento indicado	
η_m	rendimento mecânico	
η_v	rendimento volumétrico	

θ	posição angular	[rad]
θ_d	posição angular do diferencial	[rad]
θ_m	posição angular do motor de combustão	[rad]
θ_R	posição angular do rotor	[rad]
θ_t	posição angular da transmissão	[rad]
θ_{temp}	temperatura de pneus	[°C]
λ	fluxo concatenado	[Wb]
ξ	força contra eletromotriz	[V]
ρ	densidade do ar	[kg/m ³]
τ	constante de tempo do capacitor ideal	[s]
Φ	fluxo magnético	[Wb]
ω	velocidade angular das rodas	[rad/s]
ω_R	velocidade angular do rotor	[rad/s]
ω_V	velocidade angular do volante de inércia	[rad/s]

Abreviações

CC	Corrente Contínua
ICE	Ignição por Centelha
ICO	Ignição por Compressão
IM	<i>Induction Machine</i> - Motor de Indução
MCI	Motor de Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
MO	Modo de Operação
Motor DC	Motor de Corrente Contínua
PM DC	Motor de Corrente Contínua com Ímãs Permanentes
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i> - Motor Síncrono de Ímã Permanente
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação Por Largura de Pulso
SRM	<i>Switched Reluctance Machine</i> - Motor de Relutância Comutado
UC	Ultracapacitor
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido

VI Volante de Inércia

Siglas

IPI Imposto de Produtos Industrializados

MERCOSUL Mercado Comum do Sul

SAE Sociedade de Engenharia Automotiva

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica	2
2.1	O histórico dos Veículos Elétricos Híbridos	2
2.2	O conceito de Veículo Elétrico Híbrido	6
2.3	Classificações quanto à Arquitetura	7
2.3.1	VEH Série	7
2.3.2	VEH Paralelo	9
2.3.3	VEH Série Paralelo	10
2.3.4	VEH Plug-in	11
2.4	Subsistemas	12
2.4.1	Fontes de energia	12
2.4.1.1	Baterias	13
2.4.1.1.1	Materiais	14
2.4.1.1.2	Dinâmica das Baterias	15
2.4.1.2	Ultracapacitores	20
2.4.1.3	Volantes de inércia	21
2.4.2	Motor de combustão interna	22
2.4.3	Motores elétricos	26
2.4.3.1	Motor de Corrente Contínua (DC)	28
2.4.3.2	Motor de Indução (IM)	30
2.4.3.3	Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM)	30
2.4.3.4	Motor de Relutância Comutado (SRM)	31
2.4.3.5	Comparações entre os Motores	31
2.4.3.6	Equacionamento PM DC	32
2.4.4	Conversores - <i>Choppers</i>	35
2.4.5	Associações entre Armazenadores Elétricos, Choppers e MEs	38
2.4.5.1	Configuração Paralelo Semiativo	39

2.4.5.2	Configuração Paralelo Ativo	39
2.4.5.3	Configuração UCs/Baterias	40
2.4.5.4	Configuração Baterias/UCs	41
2.4.5.5	Configuração Cascata	41
2.4.5.6	Configuração Múltiplas Entradas	42
2.5	Gerenciamento de Energia	42
2.6	Dinâmica Veicular Longitudinal	44
2.6.1	Resistência à Rolagem	44
2.6.2	Arrasto Aerodinâmico	49
2.6.3	Resistência ao Aclive	49
2.7	Métodos de Otimização	50
2.8	Novo Regime Automotivo	51
3	Modelagem e Simulação	53
3.1	Modelo de Veículo Convencional	54
3.2	Modelo de VEH Paralelo	58
3.2.1	Modelo de VEH Paralelo com Associação Paralelo Semiativo	59
3.2.2	Modelo de VEH Paralelo com Associação Paralelo Ativo	62
3.2.3	Modelo de VEH Paralelo com Associação Cascata	64
3.3	Simulação do Modelo Convencional	65
3.4	Simulação dos Modelos Híbridos	69
3.4.1	Simulação do Modelo de VEH Paralelo Semiativo	78
3.4.2	Simulação do Modelo de VEH Paralelo Ativo	80
3.4.3	Simulação do Modelo de VEH Cascata	82
4	Resultados	85
4.1	Resultados do Modelo Convencional	85
4.2	Resultados dos Modelos Híbridos Elétricos	87
4.2.1	Resultados do Modelo VEH Paralelo Semiativo	90
4.2.2	Resultados do Modelo VEH Paralelo Ativo	97
4.2.3	Resultados do Modelo VEH Cascata	104
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	109
	Referências	110

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de veículos elétricos híbridos (VEHs) é flagrante na atualidade. Um dos objetivos deste desenvolvimento é produzir veículos menos dependentes dos combustíveis, fontes de energia normalmente tidas como poluidoras e/ou com preços instáveis. Ao acrescentar uma matriz energética elétrica, indicada como menos poluente e mais estável, as emissões dos veículos são mitigadas e os efeitos das flutuações do mercado de combustíveis afetam menos o custo de rodagem.

Partindo de uma plataforma convencional, a versão hibridizada consumirá menos combustível, mas terá sucesso comercial se o preço de rodagem for inferior ou igual ao preço original. Para tal, o veículo deve ser projetado com atenção a este fato.

O objetivo deste trabalho é contribuir com o projeto de veículos elétricos híbridos, mostrando que a simulação computacional do automóvel hibridizado é capaz de indicar configurações favoráveis em função de parâmetros preestabelecidos. Para isso, é feita uma revisão sobre a modelagem dinâmica de alguns dos principais subsistemas dos VEHs, como ultracapacitores, baterias, conversores, motores elétricos e motores de combustão interna. Além dos subsistemas, a revisão abrange a dinâmica longitudinal veicular, compreendendo o Arrasto Aerodinâmico, a Resistência à Rolagem, a Resistência ao Aclive, a tração dos trens de potência e a análise das inércias.

Possuindo os modelos dinâmicos, os valores dos parâmetros típicos destes modelos são encontrados na literatura, compatíveis com aplicação em veículos híbridos, e os modelos matemáticos completos dos veículos podem ser montados e simulados computacionalmente. Neste estudo são feitos quatro tipos de simulações principais, sendo uma baseada em um veículo convencional e outras três versões alternativas hibridizadas, variando-se o modo de associação entre baterias, ultracapacitores, conversores e motores elétricos. Cada associação atribui padrões de trabalho diferentes para cada tipo de armazenador, influenciando no desempenho do veículo. Em sequência, cada versão tem seus armazenadores otimizados em função da potência de tração elétrica e do ciclo brasileiro normatizado de condução urbana. Ao final do trabalho é feita uma análise dos resultados e uma observação sobre suas limitações e seus êxitos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O histórico dos Veículos Elétricos Híbridos

Os primeiros veículos elétricos (VEs) surgiram na década de 30 do século XIX, mais especificamente em 1835 com o Professor Strating na Holanda e em 1839 com Robert Anderson na Escócia (LOPES, 2008 e RAMOS, 2011). Dada a imaturidade dos sistemas elétricos da época, estes primeiros inventos tinham dificuldades operacionais que os limitavam ao campo do experimento.



Figura 2.1: Dois VEs “Morris & Salom’s Electroboat” usados como taxi em Manhattan em 1898
(KCSTUDIO, 2012)

Com o advento das baterias chumbo-ácido em 1859 e com a evolução dos motores elétricos, os VEs começaram a ter seu desenvolvimento acelerado a partir da década de 1870, e dois dos primeiros VEs que se destacam datam de 1881. Um deles foi concebido por William Ayrton e John Perry, era dotado de um motor de 0,5CV alimentado por 10 células chumbo-ácido que totalizavam uma tensão de 20V e capacidade de 1,5kWh (LOPES,2008). O outro foi criado

por Frenchman Gustave e era impulsionado por um motor de 0,1HP alimentado por bateria de chumbo-ácido. O peso total de veículo e passageiro era aproximadamente 160kg, desempenhando uma velocidade máxima de 15km/h e uma autonomia de 16km. Nestas configurações os veículos elétricos ainda não eram atraentes para os consumidores quando comparados às carruagens e aos cavalos (WAKEFIELD, 1998).

O primeiro carro elétrico com sucesso comercial foi lançado em 1895. Nomeado “Morris & Salom’s Electroboat”, possuía 2 motores de 1,5HP e baterias com autonomia de 4 horas (suficiente para aproximadamente 40 km) recarregáveis em 90 minutos. Atingia velocidade máxima de 32km/h (KCSTUDIO, 2012). Este veículo pode ser observado na Figura 1.1.

Em 1897, M. A. Darracq apresentou no Salão de Paris um VE dotado de frenagem regenerativa. Este conceito, como é visto adiante neste texto, permite que o motor elétrico opere como gerador e, assim, a energia cinética do veículo pode ser convertida (parcialmente) em energia elétrica para recarregar as baterias. (ANDERSON, 2010)

A partir de 1900 as vendas de carros elétricos entraram em uma crescente que teve seu auge em 1912. Entretanto, em sequência houve uma queda que levou ao fim das vendas em 1921. Este movimento foi devido à competição com os carros de combustão, que tiveram seu desenvolvimento paralelo ao dos carros elétricos e começaram a se mostrar mais vantajosos no contexto da época. Tais vantagens que levaram os automóveis de combustão ao domínio do mercado eram maior autonomia e maior velocidade, além da precariedade da rede elétrica fora das cidades (LOPES, 2008). Somados a estes fatores, também há o desenvolvimento do motor de partida elétrico, que dispensou o acionamento à manivela dos motores de combustão interna (MCI), e o início da produção em linha de Henry Ford de modelos a combustão como “T” que tinham preços altamente competitivos. Desde então, até o surgimento dos carros elétricos modernos, a tração elétrica ficou restrita a transportes ferroviários, metroviárias e veículos industriais especiais (RAMOS, 2011).

Neste mesmo período em que as opções de motorização competiam entre si, surgiu o carro elétrico híbrido. A intenção era aliar a estabilidade dos MEs (motores elétricos) com a autonomia e o desempenho dos MCIs, não sendo o consumo um parâmetro crítico na época. Os dois primeiros carros híbridos foram apresentados por Pieper no Salão de Paris em 1899. Um deles tinha ambos MCI e ME integrados diretamente à transmissão, sendo o ME apenas um auxiliar para o MCI em momentos de alta demanda, concepção classificada como paralela. O outro

veículo era derivado de um elétrico puro com a adição de um MCI associado a um gerador para carregar as baterias e aumentar a autonomia, sem incremento de potência trativa, em uma concepção classificada como série (SOUZA, 2010). As classificações dos veículos elétricos híbridos (VEHs) são abordadas adiante no texto.

O principal VEH desta geração foi o “Woods Gasoline-Electric”, lançado em 1916, que contava com um MCI e um ME ligados ao um Eixo Cardan e diferencial para transmitir tração para as rodas traseiras. Este veículo pode ser visto na Figura 1.2. A elevada complexidade dos veículos híbridos os tornava mais caros que os demais, levando-os à exclusão do mercado na década de 20 do séc. XX (LOPES, 2008).



Figura 2.2: Woods Gasoline-Electric com MCI e ME na dianteira acoplados a um Eixo Cardan e diferencial, transmitindo tração para eixo traseiro. Baterias se encontram debaixo dos bancos traseiros. (GLINTON, 2012)

O desenvolvimento de carros híbridos foi retomado a partir dos anos 1970, motivado pelas crises de abastecimento de combustível e pelo início da conscientização ambiental. Mas a redução de tamanho dos MCIs e a introdução de injeção eletrônica nas décadas seguintes diminuíram consideravelmente o consumo de combustível. Já o emprego de catalizadores, também em conjunto com a injeção eletrônica, reduziu as emissões, fazendo com que a necessidade da solução híbrida não fosse emergencial para as montadoras (SOUZA, 2010).

Nos anos 1990, a pressão por tecnologias mais limpas e econômicas voltou a aumentar, tanto pela volatilidade dos preços dos derivados de petróleo como pelo arrocho das legislações ambientais. No estado da Califórnia nos EUA, por exemplo, a partir de 1998 pelo menos 2% das vendas das montadoras seriam obrigatoriamente de veículos de emissões nulas, aumentando para 5% em 2001 e 10% em 2003. Ainda nos EUA, iniciou-se um programa governamental pioneiro para obtenção de VEHs que percorressem 35km/l. Outro exemplo de ação do estado em prol dos VEHs ocorreu no Reino Unido com a isenção de impostos (LOPES,2008).

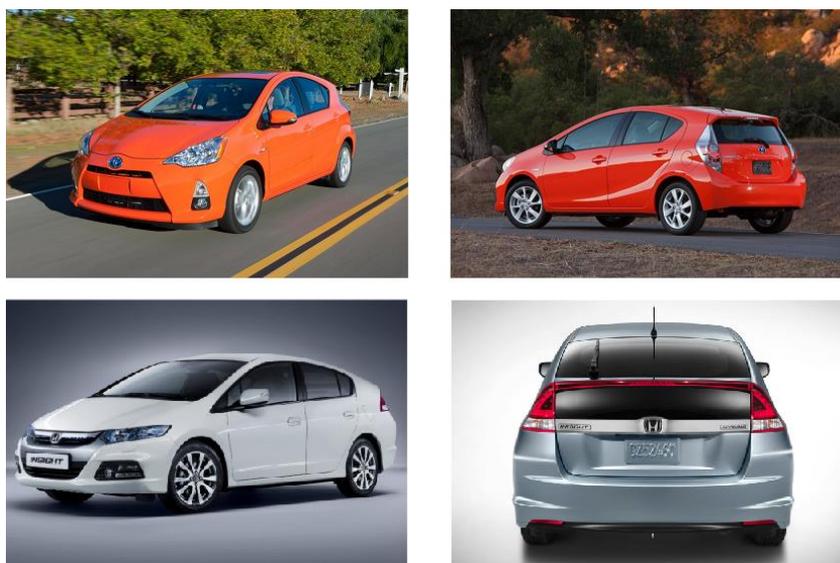


Figura 2.3:Na linha superior tem-se o Toyota Prius 2013 (JSC, 2012) e na linha inferior, Honda Insight 2013 (ZETRA, 2012 e EA, 2012 , respectivamente)

Deste então, observa-se o desenvolvimento de VEHs nos três mais importantes polos automobilísticos do planeta. Como ícones deste movimento na Europa tem-se o protótipo Chico, da Volkswagen, dotado de baterias de Ni-MH, um ME de indução e um pequeno MCI de 2 cilindros para recarregar as baterias e fornecer potência extra em momentos de alta demanda. Já a Renault comercializou o Next com um MCI de 750cc e dois MEs ligados mecanicamente ao sistema de transmissão, atingindo a marca de 29,4km/l com desempenho nivelado ao dos veículos convencionais. Nos EUA, os primeiros carros elétricos híbridos modernos com maior notoriedade foram os conceitos GM Precept e Ford Prodigy, ambos com MCI diesel em paralelo com ME, frutos do programa governamental. Por fim, no Japão em 1997 foi lançado o Toyota Prius e em 1999, o Honda Insight (SOUZA, 2010). Estes dois últimos são os VEH de maior sucesso

mundial, já sofreram diversas evoluções e continuam sendo produzidos até o momento. Os modelos 2013 destes japoneses podem ser vistos na Figura 1.3.

2.2 O conceito de Veículo Elétrico Híbrido

Veículo Elétrico Híbrido é todo veículo cujo trem de potência total é composto por pelo menos dois trens de potência alimentados por diferentes fontes de energia, como se pode ver na Figura 2.4. Cada trem de potência possui uma fonte de energia e um conversor de energia que podem ter fluxo unidirecional ou bidirecional. Os trens de potência são unidos por uma ou mais transmissões de natureza qualquer, preferencialmente mecânicas ou elétricas, originando topologias que têm implicações sobre a construção do veículo e o gerenciamento de energia (EHSANI, et al, 2007).

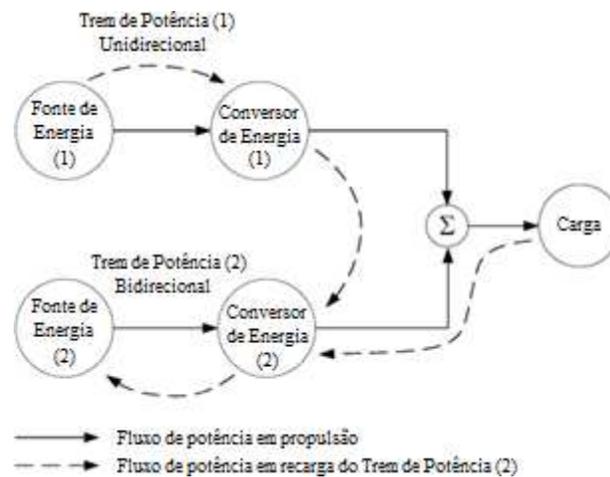


Figura 2.4: Trem de potência conceitual de um VEH - adaptado de Ehsani et al. (2007)

A Figura 2.4 mostra o fluxo de energia do VEH mais comum. Neste caso, um trem de potência possui fluxo unidirecional de energia, pois o conversor não pode ser revertido, como os MCIs. Já o outro trem de potência tem um fluxo bidirecional de energia pelo fato de ambos conversor e fonte de energia poderem ser revertidos, como os motores/geradores elétricos e as

baterias recarregáveis, por exemplo. Neste formato, sem restrições de interação entre os trens de potência, o VEH tem os seguintes modos de operação (MO) (EHSANI, et al, 2007):

- 1) apenas o trem de potência 1 entrega potência para a carga;
- 2) apenas o trem de potência 2 entrega potência para a carga;
- 3) os trens de potência entregam potência para a carga ao mesmo tempo;
- 4) o trem de potência 2 obtém potência da carga, o que se chama frenagem regenerativa;
- 5) o trem de potência 2 obtém potência do trem de potência 1;
- 6) o trem de potência 2 obtém potência do trem de potência 1 e da carga ao mesmo tempo;
- 7) o trem de potência 1 entrega potência para a carga e para o trem de potência 2 ao mesmo tempo;
- 8) o trem de potência 1 entrega potência para o trem de potência 2, que entrega potência para a carga;
- 9) o trem de potência 1 entrega potência para a carga, que entrega potência para o trem de potência 2.

2.3 Classificações quanto à Arquitetura

2.3.1 VEH Série

Um VEH série possui um trem de potência elétrico composto por armazenadores ligados a um sistema conversor/controlador responsável pela interação entre os armazenadores e o próximo estágio com um ou mais motores elétricos. Este sistema elétrico de tração é ligado à transmissão/carga. O VEH série é completado pelo trem de potência de combustão, dotado de tanque de combustível e MCI. A transmissão de potência entre este e o trem de potência elétrico é feita por meio de um gerador (SOUZA, 2010). O sistema completo pode ser visto na Figura 2.5.

O VEH série pode tracionar como um VE puro, apenas com o trem de potência elétrico entregando potência à carga, modo de operação número 2 (MO#2). A tração também pode ser feita com a assistência da potência fornecida pelo trem de potência de combustão para o trem de

potência elétrica, MO#8. Neste modo de operação, caso a potência entregue pelo gerador exceda o necessário para a tração, há a recarga dos armazenadores, o que ocorre de modo planejado pelo conversor/controlador.

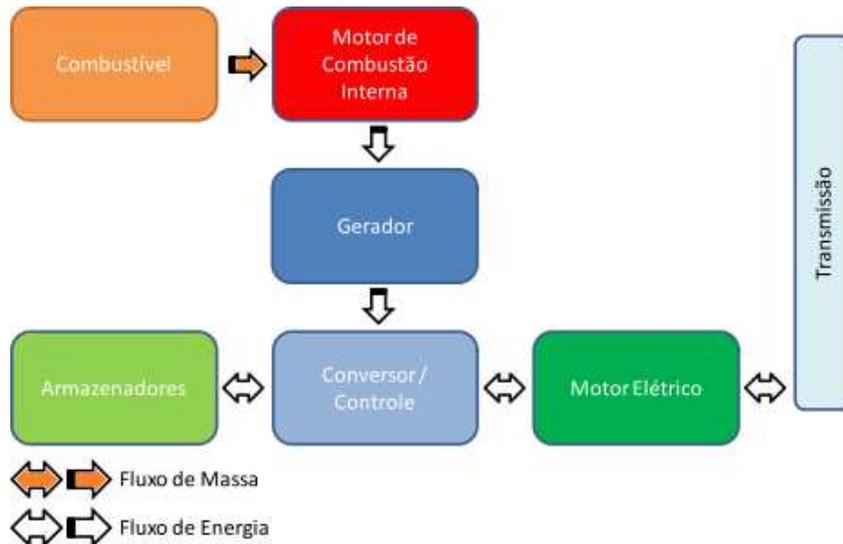


Figura 2.5: Fluxo de massa e energia em um VEH Série (SOUZA, 2010)

A recarga dos armazenadores também pode ser feita por meio de frenagem regenerativa pura, MO#4, ou em frenagem regenerativa associada à obtenção de potência a partir do trem de potência a combustão, MO#6. Ainda é possível fazer a recarga dos armazenadores com o veículo parado, MO#5, com o trem de potência a combustão fornecendo potência para o trem de potência elétrica, que não entrega potência para transmissão/carga.

Como o trem de potência a combustão não tem acoplamento mecânico com a transmissão/carga, o MCI pode operar em uma região de melhor compromisso entre rendimento global do sistema e o respeito às especificações de carga e descarga das baterias para maior longevidade das mesmas.

Outras vantagens que podem ser listadas para os VEH série são: uso de uma única fonte de torque motriz, o que facilita o controle dinâmico; aproveitamento da curva de torque dos MEs que pode ser projetada de modo a dispensar variações de relação de transmissão; construção simplificada do veículo, pois o MCI é ligado a um gerador que o integra ao sistema total por ligações elétricas, dispensando mecanismos complexos como caixas de câmbio. Já as desvantagens são: o VEH série requer pelo menos duas máquinas elétricas, o gerador e o ME;

grande demanda de potência sobre o ME, que é a única fonte de tração, o que implica na necessidade de um grande ME ou de mais de um; o conjunto MCI e gerador tende a ocupar grandes espaços no veículo (EHSANI, et al, 2007).

2.3.2 VEH Paralelo

Um VEH paralelo tem seus trens de potência conectados mecanicamente à transmissão/carga. É comum o trem de potência de combustão ser composto de tanque de combustível e MCI e um trem de potência elétrico composto de armazenadores, elemento de conversão/controle e ME(s) (SOUZA, 2010). Pode-se ver o diagrama de fluxo de massa e energia de um VEH paralelo na Figura 2.6.

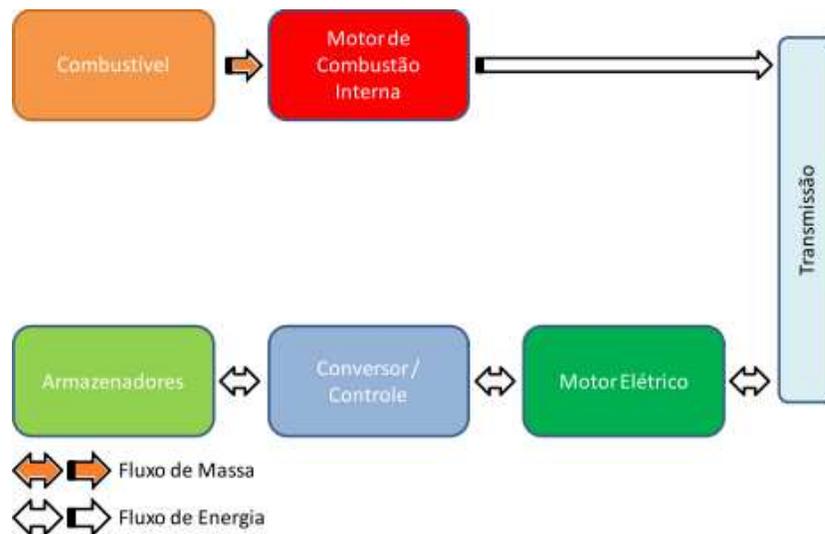


Figura 2.6: Fluxo de massa e energia em um VEH Paralelo (SOUZA, 2010)

Nesta arquitetura, a tração pode ser feita por um trem de potência trabalhando sozinho, havendo funcionamento exclusivo a combustão ou exclusivo elétrico, MO#1 e MO#2. Ambos também podem fornecer potência em conjunto para a transmissão/carga, MO#3.

As opções de modos de recarga dos armazenadores elétricos são mais restritas para VEHs paralelos do que para os VEHs série. Agora, existe apenas a frenagem regenerativa, MO#4, ou a

transmissão de potência do trem de potência a combustão para a transmissão/carga seguida da obtenção de potência da transmissão/carga pelo trem de potencia elétrico, MO#9. É possível haver transferência direta de potência entre o trem de potência a combustão e o trem de potência elétrico, MO#5, mas apenas para os VEH paralelos que tenham MCI e ME diretamente acoplados entre si e ambos desconectáveis do resto da transmissão, o que exclui, por exemplo, VEH paralelos com MEs “in-wheel” (termo em inglês usado para designar motores elétricos montados dentro das rodas do veículo).

As vantagens do VEH paralelo são: ligação direta entre os trens de potência e a transmissão/carga eliminando as perdas devido à conversão da energia mecânica do trem de potência a combustão para o trem de potência elétrico por meio de um gerador como ocorre na arquitetura série; eliminação do gerador, o que torna o sistema mais compacto. Já as desvantagens são: necessidade de controlar máquinas de tração de diferentes naturezas; impossibilidade o MCI operar permanentemente em faixa ótima por estar diretamente acoplado à tração (EHSANI, et al, 2007).

2.3.3 VEH Série Paralelo

Na forma mais complexa de construção, os VEHs podem ser montados de forma série paralela, como visto na Figura 2.7. O elevado grau de interação entre os trens de potência demanda gerador, embreagens e transmissões planetárias (EHSANI, et al, 2007).

Esta arquitetura permite todos os modos de operação dos VEHs paralelo e VEHs série, além do MO#7, onde o trem de potência a combustão pode entregar potência diretamente para a transmissão/carga e para o trem de potência elétrico simultaneamente. Tal versatilidade permite o melhor gerenciamento de energia possível perante as mais variadas situações. Mas o aumento do número de componentes e consequentes prováveis aumentos da massa, do número de pontos de perda de energia (acoplamentos, conversões, entre outros) e do custo o produto, o uso desta arquitetura normalmente é inibido.

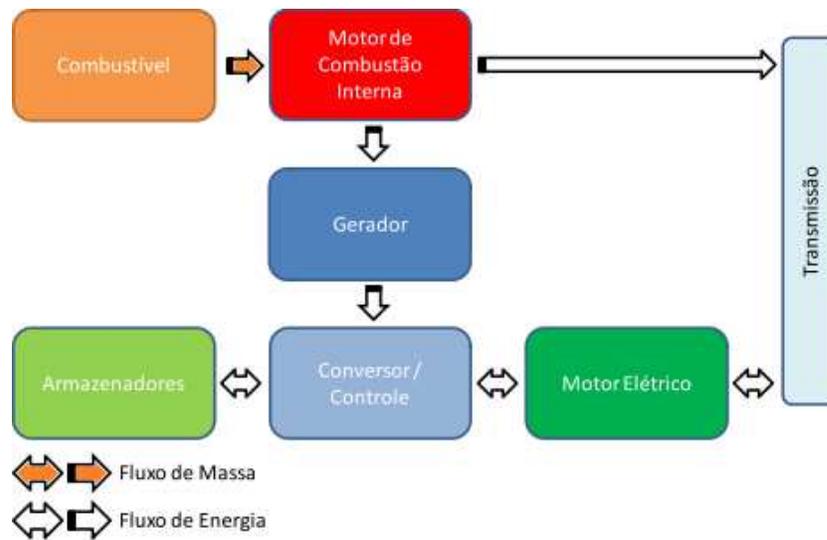


Figura 2.7: Fluxo de massa e energia em um VEH Série Paralelo (SOUZA, 2010)

Os modos de operação que cada arquitetura de pode desempenhar estão sintetizados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Modos de operação para cada arquitetura de VEH

	Modo de operação (MO)								
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Série		X		X	X	X		X	
Paralelo	X	X	X	X	*				X
Série Paralelo	X	X	X	X	X	X	X	X	X

* Possível somente para ME e MCI diretamente acoplados si e ambos desconectáveis do resto da transmissão

2.3.4 VEH Plug-in

Um VEH plug-in é aquele que pode ter suas baterias carregadas ligando-se o veículo à rede elétrica. Isto abre possibilidade de diversas estratégias de gerenciamento de energia de um ponto de vista global, como a venda de energia dos VEH para a rede em períodos de elevada demanda e compra de energia em períodos de menor demanda da rede e menor tarifa para o consumidor (GOMES, 2010).

O uso de energia da rede tende a aumentar o rendimento energético global comparado à recarga por meio do MCI, pois o rendimento das usinas geradoras de energia elétrica e da rede de distribuição tende a ser maior que o rendimento de um MCI acoplado a um gerador (GOMES, 2010).

2.4 Subsistemas

2.4.1 Fontes de energia

Apesar do foco dado principalmente às baterias e ao combustível, os VEHS possuem mais alternativas de fontes de energia. Dentre elas pode-se destacar os volantes de inércia, ultra capacitores, e as células de combustível.

É conveniente classificar as fontes de energia dentro dois parâmetros, potência específica (potência por massa de fonte) e energia específica (energia por massa de fonte). A Figura 2.8 apresenta um mapa comparativo entre as estas principais fontes de energia.

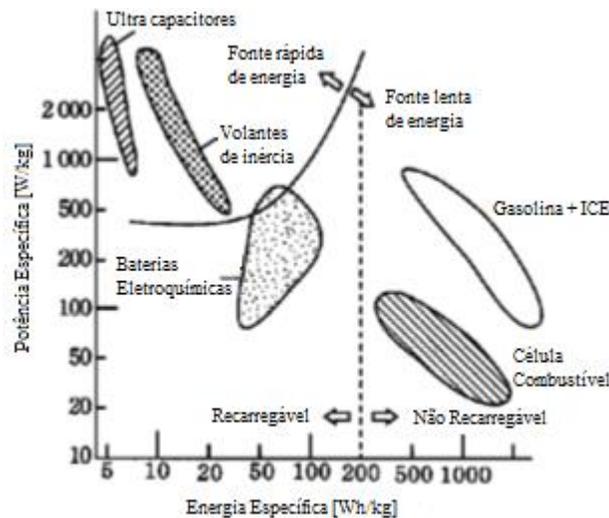


Figura 2.8: Energia específica e potência específica para as fontes de energias dos VEHS - adaptado de Chan (2007) *apud* Gomes (2010)

Os ultracapacitores e os volantes de inércia são fontes de elevada potência específica mas baixa energia específica, assim, são capazes de fornecer grandes quantidades de energia em um curto período de tempo, alcançando o esgotamento rapidamente. Estas características os tornam excelentes em transientes rápidos. As baterias apresentam níveis intermediários de potência específica e energia específica, sendo comumente associadas a ultracapacitores de forma a obter ótimo desempenho em transientes e razoável autonomia. Ultracapacitores, volantes de inércia e baterias são as fontes de energia recarregáveis (ou seja, com operação reversível) mais comuns em VEHs (GOMES, 2010).

As fontes de energia não recarregáveis (sem operação revertida) são os combustíveis queimados pelos MCIs e as células de combustível. Estas últimas têm alta energia específica, mas baixa potência específica, sendo impraticável seu emprego em transientes, entretanto em regime permanente são ótimas fontes para manutenção do nível de energia das baterias. Como o nível de desenvolvimento das células de combustível ainda é insuficiente para viabilizar boa relação custo-benefício, VEHs com esta tecnologia são minoria. A propulsão por combustível e MCI tem valores de potência específica similares aos das baterias, mas os valores de energia específica são os maiores, o que justifica a elevada autonomia dos MCI (GOMES, 2010).

É importante que os VEHs tenham fontes de energia de diversas características para ter uma maior gama de possibilidades de gerenciamento de energia. Para automóveis o mais comum é a associação entre ultra capacitores, baterias e combustível. O uso trivial de volantes de inércia é mais comum em VEH ferroviários com maior disponibilidade de espaço para a montagem, mas a hibridização de veículos de competição tem estimulado a criação de volantes extremamente compactos.

2.4.1.1 Baterias

Uma célula eletroquímica converte diretamente energia química contida nos materiais ativos em energia elétrica por meio de reações de oxirredução. Uma associação de células origina uma bateria. Cada célula eletroquímica é composta por 3 elementos básicos:

- ânodo (eletrodo negativo): fornece elétron, sofrendo oxidação;

- cátodo (eletrodo positivo): recebe elétrons, sofrendo redução;
- eletrólito (condutor iônico): meio de transferência de carga entre ânodo e cátodo (REIS, 2008).

A combinação ótima de materiais de para uma bateria é aquela que possui os cátodos e ânodos de menor massa, mas com o maior potencial e a maior capacidade possíveis. O desafio é empregar/desenvolver materiais que apresentem o melhor compromisso entre estas características e o custo final da bateria, a confiabilidade e a durabilidade (SHAFIEI, et al, 2011).

2.4.1.1.1 Materiais

As baterias mais usadas atualmente são de Chumbo-Ácido, de Níquel e de Lítio. As baterias de Chumbo-Ácido contêm ânodos de chumbo, cátodos de dióxido de chumbo e eletrólito composto por uma solução de ácido sulfúrico e água destilada (CONTE, 2006). A equação química do sistema é a seguinte:



Como vantagens elas apresentam baixo custo e boa tolerância à recarga rápida. Já as desvantagens são pequena quantidade de ciclos de vida (200 ciclos com 80% de profundidade de descarga), baixa energia específica (20 a 40Wh/kg), potência específica baixa (300 W/kg), a sensibilidade à temperatura, a liberação de hidrogênio em reações de auto descarga e a toxicidade do chumbo (CONTE, 2006 e SOUZA, 2010).

As baterias de Níquel têm o eletrodo positivo composto por oxihidróxido de níquel, já o eletrodo negativo é um hidreto metálico. O eletrólito é uma solução de hidróxido de potássio (CONTE, 2006). A equação química da bateria NiMH é:



Dentre as vantagens desta bateria estão os bons índices de energia específica (40 a 60Wh/kg) e potência específica (500 a 1300W/kg), alta longevidade (mais de 2500 ciclos de 80% de profundidade de descarga), curva plana de descarga e capacidade de recarga rápida. Já as desvantagens são a baixa tensão das células (1,2V), grande auto descarga (20% ao mês), possível surgimento de efeito memória e o caráter exotérmico de descarga (CONTE, 2006 e SOUZA, 2010).

Por fim, as baterias de lítio possuem eletrodos positivos formados por cadeias de lítio-carbono e os eletrodos negativos formados por óxidos da combinação de lítio mais um metal de transição (SOUZA, 2010). A equação química da bateria Li-ion é:



As vantagens das baterias Li-ion são as altas energia específica (100 a 200Wh/kg) e potência específica (800 a 3000W/kg), alta tensão das células (3,6V), alto rendimento (93%). Entretanto apresentam elevado custo e nível de longevidade intermediária (menos de 2500 ciclos de 80% de profundidade de descarga) (CONTE, 2006). Um quadro comparativo entre as baterias pode ser visto na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dados comparativos dos tipos de baterias - adaptado de Conte (2006), Gerssen-Gondelach e Faaij (2012) e Leadbetter e Swan (2012)

	Temperatura [°C]	η [%]	Energia Específica [Wh/kg]	Potência Específica [W/kg]	Tensão [V]	Auto Descarga [%/Mês]	Vida em Ciclos @ 80% DoD	Custo Estimado	
								[\$/kWh]	[\$/kW]
Pb Ácido	-30 - 60	85	110 - 170	300	2,1	4 - 8	50 - 200	150	10
NiMh	-20 - 50	80	>200	500 - 1300	1,2	20	>2500	500	20
Li-ion	-20 - 55	93	150 - 250	400 - 3000	3,6	1 - 5	>3000	800	50 - 75

2.4.1.1.2 Dinâmica das Baterias

Durante a conversão de energia em uma célula, ocorrem perdas de origem ôhmica e de origem na polarização de partículas. As perdas de origem ôhmicas são lineares quanto a corrente

de descarga e referem-se à resistência interna da célula. Já as perdas na polarização se devem a dificuldades na ativação das reações químicas e por ruim gradiente de concentração de reagentes dada difusão. A ativação pode ser dificultada pelos fenômenos da dupla camada (surgimento de aglomerado iônico sobre os eletrodos) e da adsorção (adesão de moléculas do eletrólito sobre os eletrodos). Assim, a tensão nos terminais de uma célula carregada está expressa na Equação 2.4 e o comportamento da mesma em relação à corrente pode ser visto na Figura 2.9 (REIS, 2008).

$$E = E_0 - [(\eta_{ct})_a + (\eta_c)_a] - [(\eta_{ct})_c + (\eta_c)_c] - i \cdot Ri \quad (2.4)$$

onde:

- E_0 é a tensão em circuito aberto;
- i é a corrente de descarga;
- η_{ct} é a queda de tensão devida à ativação;
- η_c é a queda de tensão devida ao gradiente de concentração;
- Ri é a resistência interna da célula;
- índices “a” e “c” referem-se à ânodo e ao cátodo, respectivamente.

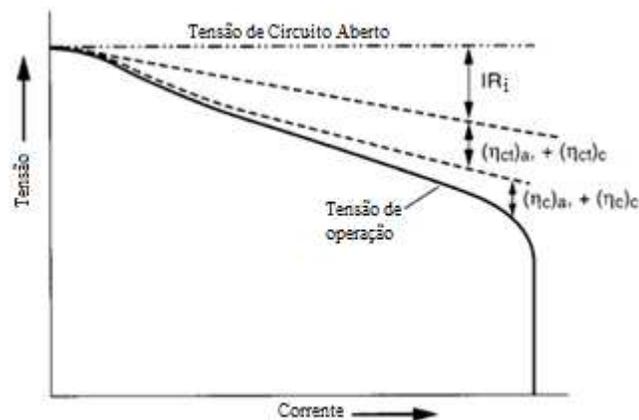


Figura 2.9: Comportamento da tensão nos terminais de uma célula com a variação da corrente, evidenciando as perdas ôhmicas e por polarização - adaptado de Reis (2008)

Os níveis de tensão na bateria variam de acordo com vários parâmetros que serão exibidos ao longo desta sessão. Dada esta variação, foram definidos alguns níveis usuais de tensão:

- tensão teórica: tensão esperada a partir da literatura de acordo com os materiais empregados;
- tensão em vazio: tensão medida nos terminais da bateria em vazio. Quando a bateria está carregada, esta tensão tende a se aproximar da tensão teórica;
- tensão nominal: tensão típica de operação;
- tensão de corte: tensão na qual se define que a bateria está descarregada.

Analisando-se apenas a tensão em relação ao tempo de descarga com todos os outros parâmetros constantes, a tensão varia de acordo com a Figura 2.10A. Na curva 1, predominantemente plana, observa-se uma bateria cujo efeito das mudanças de concentração permanece baixo praticamente até a descarga. Já na curva 2, observa-se uma bateria com duas fases geradas pela mudança nos mecanismos das reações. A curva 3 representa a descarga de uma bateria que possui uma queda mais acentuada na tensão pois a mudança de concentração de reagentes e produtos torna-se significativa rapidamente (REIS, 2008).

A temperatura de operação também gera efeitos importantes sobre tensão das baterias, como pode ser visto na Figura 2.10B. Quanto mais baixa a temperatura, menor a atividade química e maior a resistência interna das células e, assim, menor a tensão e mais rapidamente é atingida a tensão de corte (REIS, 2008).

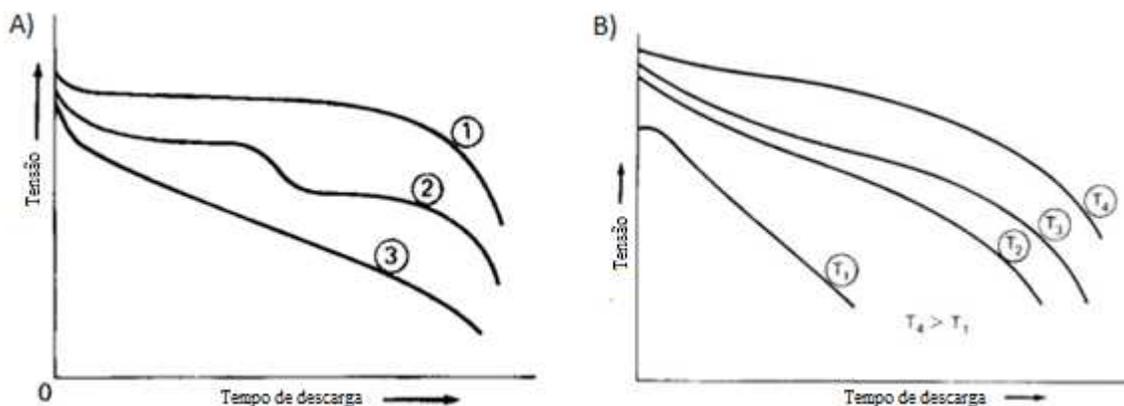


Figura 2.10: Em “A” tem-se a tensão em função do tempo em descarga constante para três tipos de bateria. Já em “B” tem-se a influência da temperatura na tensão da bateria ao longo de um processo de descarga - adaptado de Reis (2008).

Quanto maior a corrente de descarga, mais rápida é a queda da tensão de uma bateria, como exibido na Figura 2.11A. Caso a tensão de corte seja atingida a bateria pode continuar operando caso a corrente de descarga seja diminuída, o que provoca um aumento da tensão, como plotado na Figura 2.11B (REIS, 2008).

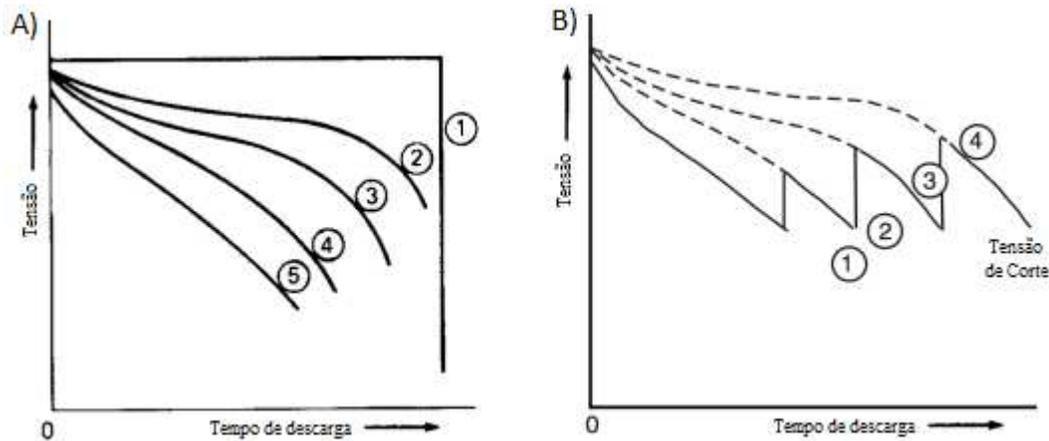


Figura 2.11 Em “A”, tem-se a variação da tensão de uma bateria no tempo para diferentes intensidades de corrente de descarga, crescente de 1 a 5. Já em “B”, tem-se a diminuição da corrente de descarga (crescente de 1 a 4) à medida que a tensão cai ao nível da tensão de corte - adaptado de Reis (2008).

A longevidade de uma bateria medida em número de ciclos depende da profundidade de descarga destes ciclos, conforme mostra o gráfico da Figura 2.12. Assim, para aplicações em VEHS é importante que a quantidade e frequência de recarga sejam administradas com cuidado. Para isso são usados métodos avançados de gerenciamento baseados em logica nebulosa ou métodos de aprendizagem (HAJIMIRI, 2006 e SAHA, 2009)

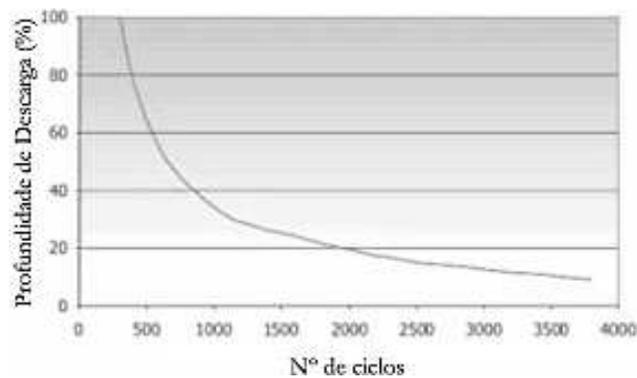


Figura 2.12. Longevidade de uma bateria (REIS, 2008).

Segundo Reis, 2008, a modelagem de baterias pode ser feita de vários modos. Existem os Modelos Físicos, que são precisos, complexos e demandam um grande esforço de configuração, usados principalmente por projetistas de baterias. Já os Modelos Empíricos são fáceis de configurar e rápidos, mas pouco precisos e sem visão analítica, como a Lei de Peukert's, por exemplo. Os Modelos Abstratos descrevem as baterias em circuitos elétricos equivalentes, mas são de difícil configuração, entretanto, têm grande facilidade para interação com outros sistemas. Este último será o modelo escolhido por parecer o que melhor corresponde às necessidades de uma simulação de VEH.

O Modelo Abstrato que melhor representa, ao mesmo tempo, transientes e estado de carga (SOC) foi proposto por CHEN, 2006 e está ilustrado na Figura 2.13. A tensão da bateria é obtida a partir de um sistema composto por dois circuitos. O circuito “Vida da Bateria” simula a carga contida na bateria por meio do capacitor “ $C_{Capacity}$ ”, a perda de carga ao longo do tempo é feita por meio do resistor “ $R_{Self-Discharge}$ ” e a corrente fornecida pela bateria é representada pela fonte de tensão “ I_{Batt} ”. A tensão entre o terra e o nó oposto deste circuito é “ V_{SOC} ”, e deve ser projetada de modo a variar entre zero e um, representando o SOC. Já o circuito “Características de Corrente e Tensão” modula a tensão de saída da bateria. Partindo de uma fonte de tensão “ V_{OC} ” que opera de acordo com uma função não linear de “ V_{SOC} ” determinada em laboratório, os parâmetros ôhmicos permanentes são representados por “ R_{Series} ”. Já os parâmetros transientes rápidos são representados por “ $R_{Transient_S}$ ” e “ $C_{Transient_S}$ ” e os transientes longos são representados por “ $R_{Transient_L}$ ” e “ $C_{Transient_L}$ ”. A tensão nos terminais deste circuito é a tensão dos terminais da bateria, “ V_{Batt} ”. A corrente “ I_{Batt} ” depende de “ V_{Batt} ” e da carga que está acoplada à bateria.

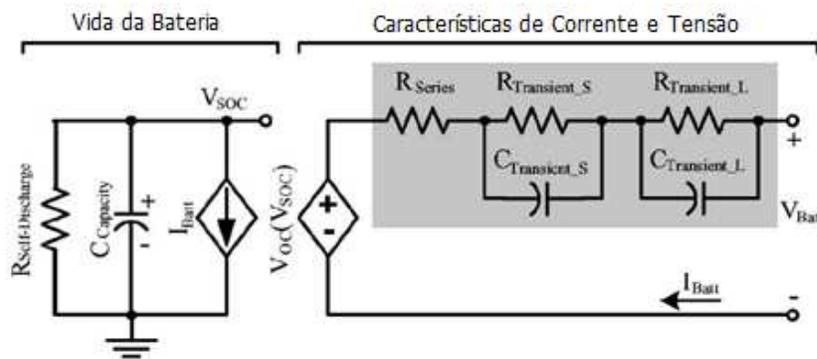


Figura 2.13: Modelo Abstrato de bateria - adaptado de Chen (2006)

2.4.1.2 Ultracapacitores

Ultracapacitores (UCs) possuem capacitância até 5000F e, ao contrário das baterias (que armazenam energia quimicamente), acumulam cargas opostas fisicamente entre placas. Meios dielétricos ou eletrolíticos são usados para intermediar as placas. UCs apresentam alta potência específica (entre 2000 e 6000W/kg) e baixa energia específica (0,5 a 30 Wh/kg), sendo empregados em transientes curtos e intensos. Outras características importantes são a elevada eficiência (em torno de 90%) e vida em ciclos virtualmente infinita (MIERLO, 2003 e ZHANG, 2011). O comportamento dinâmico dos UCs pode ser representado pelo seguinte circuito elétrico equivalente, segundo ZHANG, 2011:

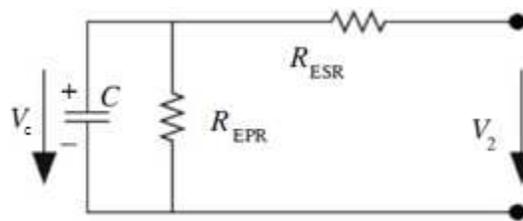


Figura 2.14: Circuito elétrico equivalente de um ultracapacitor (ZHANG, 2011)

“ R_{ESR} ” representa a resistência interna, enquanto “ R_{EPR} ” emula a auto descarga, relevante apenas para grande períodos de tempo. “ C ” é a capacitância do UC. Considerando o UC inicialmente carregado, a tensão V_C está definida na Equação 2.5 (onde V_i é $V_C(0)$ e τ é a constante de tempo do UC) e a carga Q do UC está definida na Equação 2.6 (onde Q_i é $Q(0)$ e i é a corrente de descarga).

$$V_C(t) = V_i * \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.5)$$

$$Q(t) = Q_i - \int_0^t i dt \quad (2.6)$$

A energia armazenada no UC é definida por:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{2} C * V(t)^2 \quad (2.7)$$

Assim, o SOC do UC é:

$$SOC = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(0)} \quad (2.8)$$

2.4.1.3 Volantes de inércia

Os volantes de Inércia (VIs) armazenam energia em forma de energia cinética rotacional. Eles podem ser divididos em VIs mecânicos e elétricos. VIs mecânicos são carregados e descarregados por meio de um eixo, dotado ou não de embreagem. VIs elétricos são carregados e descarregados por um motor/gerador elétrico. VIs em geral podem ter potências específicas entre 2000 e 8000W/kg e energias específicas entre 4 e 50Wh/kg (MIERLO, 2003). O fator mais importante no projeto dos VIs é o material para a construção do disco, submetido a altas tensões devido à centrifugação e uma falha pode liberar estilhaços com alta energia. O cálculo estrutural também limita um toque máximo que pode ser extraído do VI (HAN, 2012). A energia contida em um VI é definida por:

$$E_V = \frac{1}{2} J_V \omega_V^2 \quad (2.9)$$

onde:

- J_V é o momento de inércia do disco;
- ω_V é a velocidade angular do disco.

A equação de movimento do disco é:

$$T_V = J_V \dot{\omega}_V + B_V \omega_V \quad (2.10)$$

onde:

- T_V é torque na ponta do eixo;
- B_V é o amortecimento viscoso dos mancais.

2.4.2 Motor de combustão interna

Este tipo de motor tem como principal função a execução de trabalho a partir da expansão de gases em uma câmara fechada, sendo esta expansão provocada por uma combustão interna a esta câmara. O trabalho é executado por meio do grau de liberdade formado entre as paredes fixas da câmara e o pistão móvel. O movimento deste pistão torna-se periódico pelo seu acoplamento a um sistema biela manivela, como pode ser visto na Figura 2.15A.

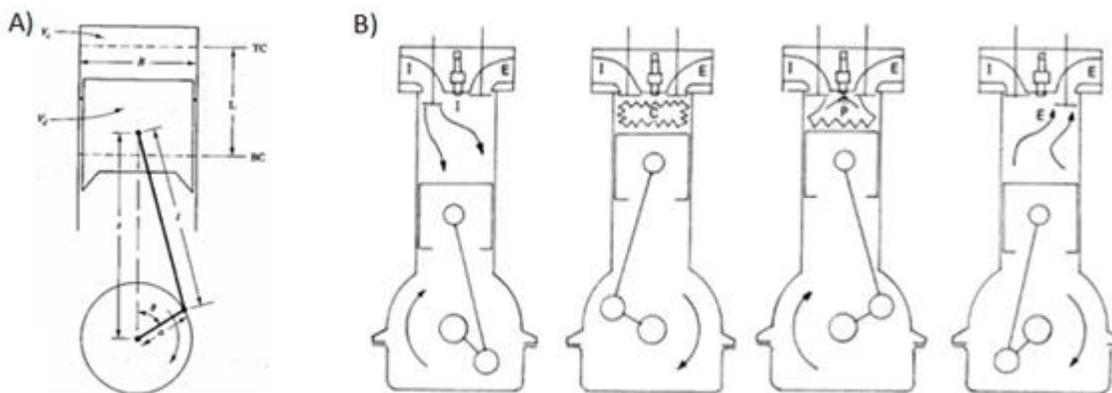


Figura 2.15: Em “A” (HEYWOOD, 1988) tem-se a geometria básica de um sistema composto de cilindro, pistão, biela e manivela. Em “B” (CROLLA, 2009) tem-se as fases de um motor de 4 tempos ICE: admissão, compressão, expansão e escape, respectivamente

Em um mesmo bloco de MCI é comum a associação de vários cilindros, cujas manivelas estão defasadas de forma conveniente com a ordem de detonação dos cilindros e acopladas a um mesmo eixo chamado virabrequim. Pelo virabrequim se dá a saída de potência para a transmissão. Os demais pontos importantes da arquitetura dos MCIs dependem do número de tempos de operação (2 ou 4 tempos) e da forma como o combustível sofre ignição (ignição por centelha, ICE, ou ignição por compressão, ICO).

Em um MCI de 4 tempos, a entrada de gases é feita por meio das válvulas de admissão e o produto de combustão é purgado por meio das válvulas de escape. O acionamento das válvulas é feito por meio de eixos com cames defasados de acordo com a ordem de ignição dos cilindros. Estes eixos são chamados comandos de válvula e giram com metade da velocidade angular do virabrequim. Para o caso ICE, o combustível é pulverizado sobre os gases de entrada e a ignição é iniciada pela centelha produzida por uma vela. Para o caso ICO, o combustível é injetado por um bico injetor momentos antes do fim da compressão. Os quatro tempos podem ser descritos brevemente da seguinte forma (GALLO, 1986):

- Admissão: o pistão suga a mistura ar-combustível, caso ICE, ou apenas ar, caso ICO, para dentro do cilindro. A válvula de escape permanece fechada, já a válvula de admissão está aberta.
- Compressão: o pistão comprime a mistura. Ambas as válvulas permanecem fechadas. Próximo do fim da compressão ocorre a centelha (ICE) ou o início da injeção (ICO).
- Expansão: os gases de combustão se expandem, realizando trabalho sobre o pistão. Válvulas permanecem fechadas. Este é o único tempo que entrega trabalho, os demais consomem.
- Escape: o pistão “empurra” os gases queimados para fora do cilindro por meio da válvula de escape, aberta. A válvula de admissão permanece fechada. Cada tempo pode ser visto na Figura 2.15B.

Motores de 2 tempos têm baixa relação peso/potência por possuírem um tempo de expansão seguido de e um tempo de compressão, gerando um tempo de potência positiva por volta por cilindro, enquanto o motor de 4 tempos gera um tempo de potência positiva a cada duas voltas por cilindro. Entretanto, apresentam uma série de desvantagens, como não possuir tempos exclusivos de admissão e escape, o que gera refluxo de gases queimados e perda de rendimento da combustão. Também apresentam elevada queima de óleo quando a admissão é feita pelo cárter, além de funcionamento ruidoso (CROLLA, 2009). Por esta razão estão em desuso para aplicações veiculares. Assim, este texto terá foco apenas no MCI de 4 tempos.

A seguir, são exibidas uma série de considerações sobre parâmetros de projeto de um MCI que foram extraídas de Heywood, 1988, Pulkrabek, 2004 e Gallo, 1986:

A potência que sai do virabrequim é chamada Potência de Eixo (\dot{W}_e). Ela é a diferença entre a Potência de Atrito (\dot{W}_f) e a Potência Indicada (\dot{W}_i), Equação 2.11. A Potência de Atrito

está relacionada com todas as perdas mecânicas no funcionamento do MCI (como atrito em mancais, atrito entre pistões e paredes, aspiração e exaustão de gases, entre outros) mais a potência desviada para o funcionamento dos sistemas auxiliares do veículo como arrefecimento, lubrificação, climatização, entre outros. Já a Potência Indicada é toda a potência mecânica que os gases de combustão conseguem entregar aos pistões.

$$\dot{W}_e = \dot{W}_i - \dot{W}_f \quad (2.11)$$

A Potência Indicada pode ser escrita por meio da vazão mássica (\dot{m}_c) de combustível, do poder calorífico inferior (PCI) do combustível e do rendimento indicado (η_i), Equação 2.12. O produto $\dot{m}_c * PCI$ expressa toda potência que poderia ser obtida se todo o combustível fosse queimado, o que não acontece realmente e as perdas na combustão são expressas pelo η_i .

$$\dot{W}_i = \eta_i \dot{m}_c PCI \quad (2.12)$$

A Potência de Eixo pode ser novamente escrita, Equação 2.13, a partir do produto entre a Potência Indicada e um rendimento mecânico (η_m) que “simboliza” as perdas com a Potência de Atrito.

$$\dot{W}_e = \eta_m \eta_i \dot{m}_c PCI \quad (2.13)$$

Pode ser interessante em algumas situações controlar a relação entre combustível e ar, um parâmetro (F) que pode ser expresso em função das vazões mássicas de ar (\dot{m}_a) e de combustível: $F = \dot{m}_c / \dot{m}_a$. Assim:

$$\dot{W}_e = \dot{m}_a \cdot F \cdot PCI \cdot \eta_i \cdot \eta_m \quad (2.14)$$

Outro parâmetro de controle interessante é o rendimento volumétrico (η_v), que é a relação entre a vazão de mássica de ar e a vazão mássica de ar teórica (\dot{m}_{ae}) se não houvesse perda de carga no sistema de admissão:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{ae}} \quad (2.15)$$

Como $\dot{m}_{ae} = \rho \frac{\pi D^2 L_p i}{4} \frac{n}{60x}$, pode-se escrever \dot{m}_a da seguinte forma:

$$\dot{m}_a = \eta_v \rho \frac{\pi D^2 L_p i n}{240x} \quad (2.16)$$

onde:

- ρ é a densidade do ar ambiente;
- D é o diâmetro de um cilindro;
- L_p é o comprimento do curso de um pistão;
- i é o número de cilindros;
- n é a rotação do motor em rpm;
- x é uma constante equivalente a 1 para motores 2 tempos e 2 para motores 4 tempos

Agora, a Potência de Eixo pode ser escrita na forma final:

$$\dot{W}_e = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L_p \cdot i \cdot n \cdot F \cdot PCI}{240 \cdot x} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_v \quad (2.17)$$

Como a relação entre potência e torque é $\dot{W} = T \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$, o Torque de Eixo (T_e) será:

$$T_e = \rho \cdot \frac{D^2 \cdot L_p \cdot i \cdot F \cdot PCI}{8 \cdot x} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_v \quad (2.18)$$

Torque e Potência de Eixo em motores ICE são controlados pelo usuário por meio do ângulo de abertura da borboleta do acelerador, que implica diretamente no rendimento volumétrico. Já em motores ICO, não há borboleta de acelerador e o controle do usuário é feito por meio da quantidade de combustível injetado para a queima, que implica diretamente em F .

Como os rendimentos mecânico e indicado são de difícil determinação e extremamente não lineares com a rotação, é comum que sejam gerados mapas de operação para cada motor por meio de ensaios dinamométricos. Considerando-se os transientes suficientemente rápidos, estes mapas

podem ser adotados como comportamento dinâmico dos MCIs em simulações de dinâmica longitudinal de veículos híbridos (LOPES,2008). Um mapa de um MCI genérico está na Figura 2.16. Nela, pode-se observar a existência de região ótima em eficiência energética.

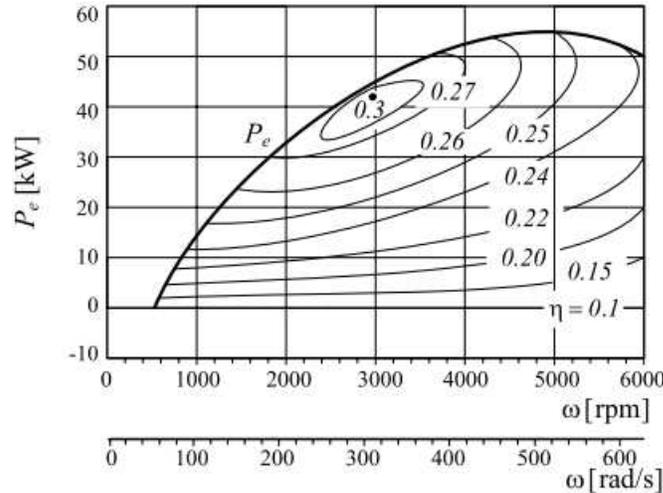


Figura 2.16: Mapa de potência e eficiência energética em função da rotação (JAZAR, 2008).

2.4.3 Motores elétricos

Os motores elétricos são dispositivos responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica nos VEHS. Portanto, o conhecimento de suas características de trabalho como torque e potência em função da velocidade é fundamental para o ótimo ajuste do sistema híbrido.

Os envelopes de torque e potência de um ME bem controlado são divididos em duas regiões separadas pela velocidade base, como observado na Figura 2.17. Na primeira região, entre o repouso e a velocidade base, o torque máximo é constante e a potência máxima aumenta de acordo com o produto entre torque máximo e rotação. Na segunda região, entre a velocidade base e a velocidade limite de operação, a potência máxima torna-se constante e o torque decresce hiperbolicamente. Estes comportamentos são dados pelo fato que, antes da velocidade base, a tensão fornecida ao motor pelo conversor eletrônico aumenta proporcionalmente com o aumento da velocidade e, após a velocidade base, a tensão no motor está limitada pela tensão da fonte (EHSANI, GAO, et al, 2007).

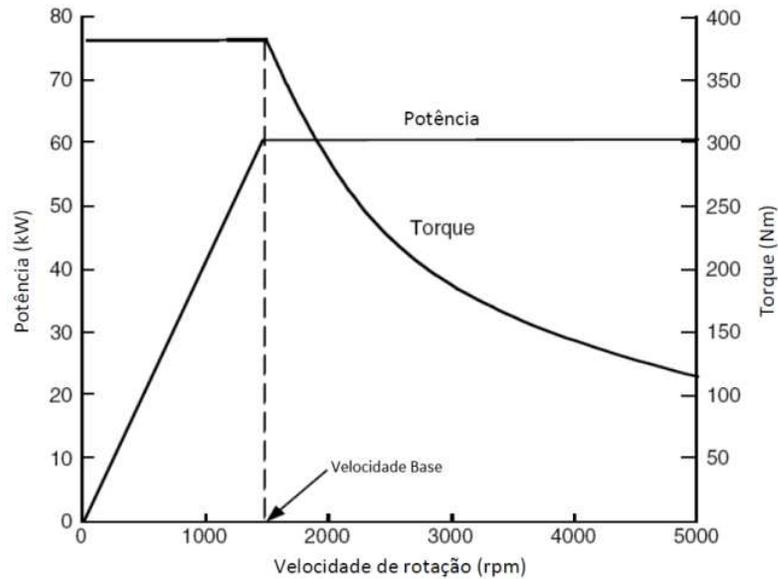


Figura 2.17: Envelopes de torque e potência, delimitadores da operação de um motor elétrico típico (SOUZA, 2010).

Os ME mais usados em VEHs são os Motores de Corrente Contínua (DC - *Direct Current*), Indução (IM - *Induction Machine*), Síncronos de Ímã Permanente (PMSM - *Permanent Magnet Synchronous Machine*) e de Relutância Comutado (SRM - *Switched Reluctance Machine*) (FINKEN, et al, 2008). Cada um destes tipos de máquina apresentam vantagens e desvantagens que são apresentadas nas sessões seguintes. Vistas em corte das seções transversais típicas dos motores em questão estão na Figura 2.18.

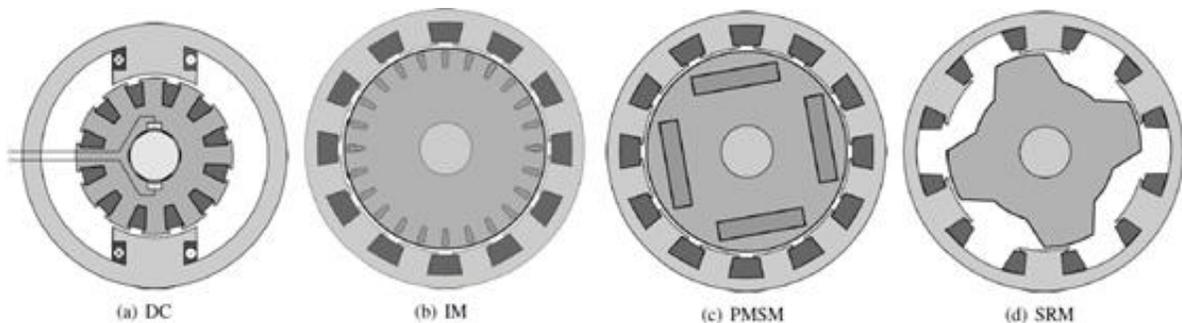


Figura 2.18: Seções transversais dos motores, (FINKEN, et al. 2008)

2.4.3.1 Motor de Corrente Contínua (DC)

Motores DC possuem rotor com núcleo de material magneticamente mole, normalmente ferroso, sobre o qual são depositados enrolamentos, também conhecidos como armadura, cujos comprimentos acompanham o sentido axial, como visto na Figura 2.19B. Corrente elétrica é levada ao rotor pelas escovas associadas a um comutador. O estator pode ser formado por ímãs permanentes (Motor de Corrente Contínua e Ímãs Permanentes - PM DC), ou por enrolamentos, de forma a gerar um campo magnético transversal ao rotor, como mostrado na Figura 2.19A. Como o núcleo é magneticamente mole, o campo magnético no *gap* de ar (espaço mínimo entre rotor e estator) tende a ser perpendicular à superfície. Dado este fato e a forma do estator, pode-se assumir que este campo é radial (denominando-se motor de campo radial) com magnitude constante e com sentido invertido a cada 180° (CHIASSON, 2005):

$$\mathbf{B} = \begin{cases} +B\mathbf{r} & \text{para } 0 < \theta < \pi \\ -B\mathbf{r} & \text{para } \pi < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (2.19)$$

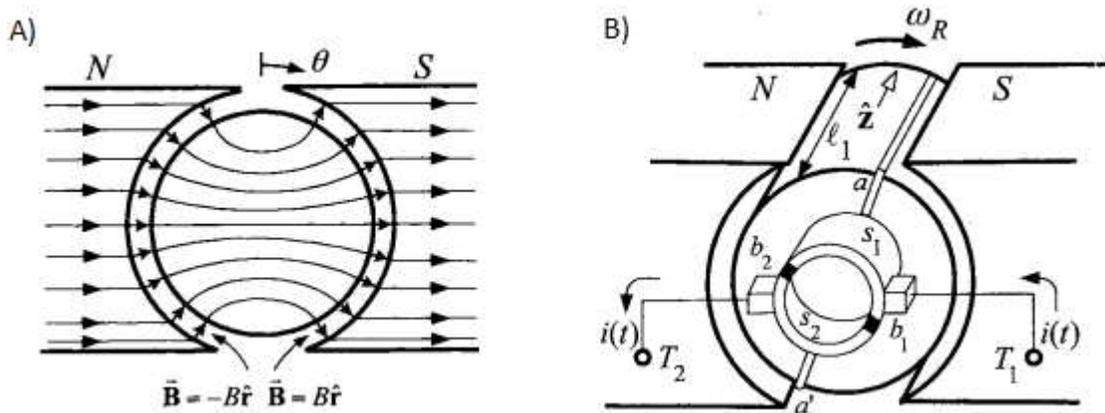


Figura 2.19: Estrutura simplificada de motor DC (CHIASSON, 2005).

Para que o torque no rotor se mantenha na mesma direção com o avanço da posição angular é necessário que haja uma inversão no sentido da corrente nas espiras do rotor a cada meia volta. Naturalmente, as escovas que levam corrente ao rotor sofrem impactos com o comutador solidário ao rotor. Isto gera elevado desgaste a estas peças, o que faz com que os motores DC

necessitem de manutenção periódica e tenham confiabilidade reduzida (ZERAOULIA, et al, 2006). O equacionamento do torque é mostrado adiante no texto.

Uma variação ao Motor DC de campo radial é o Motor DC de campo axial. Neste caso, tanto o estator, dotado de ímãs permanentes, quanto a armadura possuem forma de disco, como observado na Figura 2.20. Por sua vez, a armadura passa a dispensar o núcleo ferromagnético, minimizando perdas histeréticas e por correntes parasitas, tendo sua resistência mecânica atribuída por um encapsulamento em resina epóxica. Este ganho em eficiência, associado ao formato compacto, fazem com que o Motor DC de campo axial seja indicado para hélices de refrigeração e para tração veicular. Comutadores são associados aos terminais da armadura, assim esta configuração alternativa compartilha os mesmos princípios de funcionamento do modelo original (CAMPBELL, 1974).

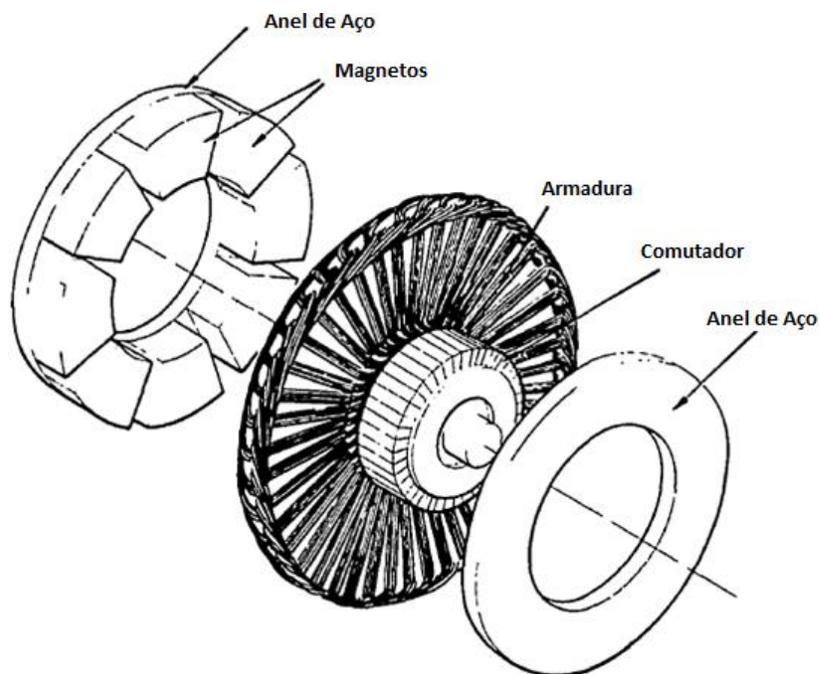


Figura 2.20: Vista explodida de um Motor DC de campo axial - adaptado de Campbell (1974).

Outras características típicas de motores DC, em comparação com os outros MEs, são: fácil controlabilidade, baixa densidade de potência, baixa eficiência e baixo custo (FINKEN, et al, 2008).

2.4.3.2 Motor de Indução (IM)

Motores de indução não possuem escovas no rotor. A corrente no rotor é induzida pelo campo magnético gerado pelos estatores. A interação entre este campo e esta corrente dá origem ao torque. O rotor é composto por enrolamentos ou por uma estrutura chamada gaiola de esquilo, dada a similaridade construtiva a uma gaiola de esquilo propriamente dita. Existe escorregamento entre a velocidade do campo girante do estator e a velocidade do rotor (RAMOS, 2011).

Os IMs apresentam boa densidade de potência e boa eficiência em altas velocidades. Outras vantagens são a baixa manutenção (devido à ausência de escovas e comutador), confiabilidade e robustez. Já o arrefecimento é dificultado uma vez que o *gap* deve ser reduzido para melhorar a indução, dificultando a construção mecânica (ZERAOULIA, et al, 2006 e FINKEN, et al, 2008).

2.4.3.3 Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM)

Os PMSMs têm rotores constituídos de ímãs permanentes inteiriços ou associados a um núcleo ferromagnético, sem enrolamentos ou escovas. Os estatores são compostos por enrolamentos com distribuição senoidal, com densidade de espiras $dn = (Ns/2)sen(\theta)$, onde Ns é o número máximo de espiras empilhadas. A ordem e o sinal de acionamento dos enrolamentos produz sobre o rotor um campo magnético girante ao qual os ímãs do rotor tendem a seguir em velocidade síncrona (CHIASSON, 2005).

Dentre as qualidades dos PMSM estão alta potência específica, alta eficiência e boa dissipação de calor. As desvantagens são o elevado custo das terras raras que compõem os ímãs permanentes, a perda de eficiência em altas velocidades devido ao enfraquecimento de campo e, finalmente, a desmagnetização irreversível dos magnetos agravada pelo aumento da temperatura e das correntes do estator (ZERAOULIA, et al, 2006 e FINKEN et, al, 2008).

2.4.3.4 Motor de Relutância Comutado (SRM)

Ao contrário dos demais, este tipo de motor possui estator e rotor com polos salientes, sendo o número de polos do estator maior que do rotor, que não possui enrolamentos ou ímãs permanentes. Excitando-se sequencialmente os pares de polos do estator, o par de polos do rotor que estiver mais próximo tende a ser alinhado de modo que o circuito magnético reduza a relutância e maximize o fluxo magnético. As velocidades serão síncronas (RAMOS, 2011).

A eficiência e a potência específica são comparáveis às dos IMs. Sua construção facilita a dissipação térmica. Além disto, possuem baixa manutenção devido à ausência de escovas. As desvantagens são: alto ruído sonoro; comportamento altamente não linear e, conseqüente, controle dificultoso; além dos SRM serem grandes fontes de ruído eletromagnético (ZERAOULIA, et al, 2006 e FINKEN, et al, 2008).

2.4.3.5 Comparações entre os Motores

Tabela 2.3: Comparação qualitativa entre tipologias - adaptado de Finken et al. (2008)

	DC	IM	PMSM	SRM		
densidade de potência	⊖⊖	⊙	⊕⊕	⊙	⊕⊕	muito bom
eficiência	⊖	⊕	⊕⊕	⊕	⊕	bom
custos	⊕	⊕⊕	⊖	⊕	⊙	neutro
confiabilidade	⊖	⊕⊕	⊙	⊕	⊖	ruim
maturidade tecnológica	⊕	⊕	⊙	⊙	⊖⊖	muito ruim
controlabilidade	⊕⊕	⊙	⊕	⊙		

Em FINKEN, et al, 2008, encontrar-se uma tabela comparativa entre os tipos de motores (Tabela 2.3), bem como um gráfico comparativo em termos de eficiência (Figura 2.21). Pode-se perceber por meio destes comparativos que os PMSMs têm a maior potência específica e seu rendimento é maior em menores velocidades, o que é excelente para o trânsito urbano, o qual apresenta os transientes mais críticos e o maior consumo de energia. Os IMs têm custos e confiabilidade favoráveis, mas não tem um desempenho tão satisfatório quando os PMSMs. Os demais motores se mostram aquém, entretanto os motores DC ainda se destacam pela elevada

controlabilidade, em contraste com sua baixa densidade de potência. Para a sequência do texto, serão adotados os motores DC com ímãs permanentes no estator, devido à sua controlabilidade e didática. Os equacionamentos apresentados na próxima seção são baseados em Chiasson, 2005.

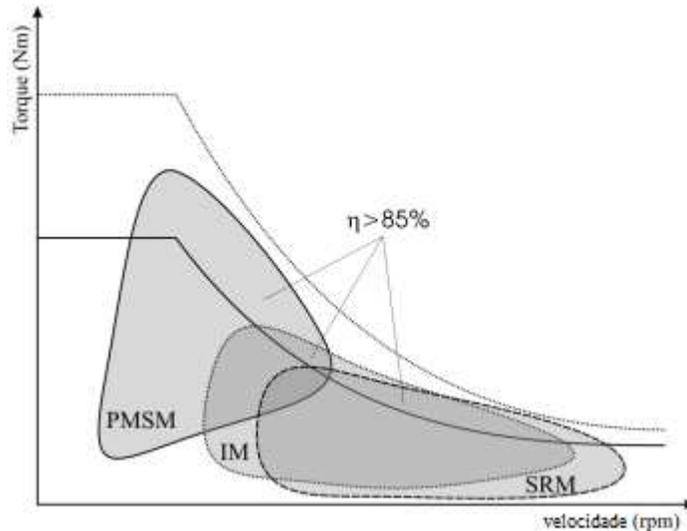


Figura 2.21: Regiões típicas de maior eficiência para motores PMSM, IM e SRM - adaptado de Finken et al. (2008)

2.4.3.6 Equacionamento PM DC

Em um motor PM DC de campo radial, o rotor tem liberdade apenas de rotação em torno de seu eixo, assim o torque de trabalho (T_b) é obtido pela interação entre o campo magnético no *gap* e a corrente nos trechos de espira que estão paralelos ao rotor. Portanto, com base na Figura 2.19:

$$T_b = r_r \mathbf{r} \times (i \mathbf{l} \mathbf{z} \times (B \mathbf{r})) \quad (2.20)$$

$$T_b = \left(\frac{l_2}{2}\right) \mathbf{r} \times (i(l_1 \mathbf{z}) \times (B \mathbf{r})) \quad (2.21)$$

$$T_b = l_1 l_2 B i \mathbf{z} \quad (2.22)$$

onde:

- r_r é o raio do rotor;
- l_1 é o comprimento de uma espira;
- l_2 é a largura de uma espira;
- B é o campo magnético no *gap*;
- i é a corrente;
- \mathbf{r} é o versor radial;
- \mathbf{z} é o versor axial.

Para n_r voltas do enrolamento, tem-se:

$$T_b = n_r l_1 l_2 B i z \quad (2.23)$$

$$T_b = K_T \cdot i \cdot z \quad (2.24)$$

Para que o rotor não entre em equilíbrio nas posições $\theta = k * \pi$, com $k = 0, 1, 2, \dots$, dada a inversão no sentido radial de \mathbf{B} nestas posições, é necessária a inversão do sentido da corrente no rotor, o que é feito pelo comutador.

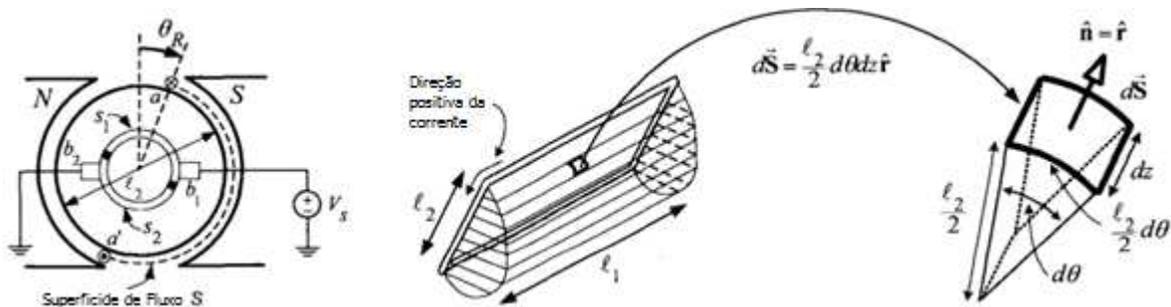


Figura 2.22: Superfície de integração para o cálculo do fluxo - adaptado de Chiasson (2005)

Seguindo a Lei de Faraday, a variação do fluxo magnético ao qual uma bobina está imersa gera, sobre a mesma, uma força contra eletromotriz ξ . O fluxo (ϕ) pode ser convenientemente calculado sobre a superfície de integração indicada na Figura 2.22. As superfícies laterais podem ser negligenciadas por conterem um fluxo pouco significativo (CHIASSON, 2005):

$$\phi(\theta_R) = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.25)$$

$$\phi(\theta_R) = \int_0^{l_1} \int_{\theta_R}^{\pi} Br \cdot \frac{l_2}{2} d\theta dz \mathbf{r} + \int_0^{l_1} \int_{\pi}^{\pi+\theta_R} (-Br) \cdot \frac{l_2}{2} d\theta dz \mathbf{r} \quad (2.26)$$

$$\phi(\theta_R) = -l_1 l_2 B \left(\theta_R - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.27)$$

O fluxo concatenado (λ) sobre n_r espiras é:

$$\lambda(\theta_R) = n_r \cdot \phi(\theta_R) = -n_r l_1 l_2 B \left(\theta_R - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.28)$$

Assim, pela Lei de Faraday, tem-se a força contra eletromotriz:

$$\xi = -\frac{d\lambda}{dt} = n_r l_1 l_2 B \frac{d\theta_R}{dt} = K_e \omega_R \quad (2.29)$$

Nota-se que K_e é numericamente igual a K_T . Uma vez conhecendo os caracteres indutivo e resistivo dos enrolamentos do rotor do PM DC, é possível montar seu circuito equivalente, visto na Figura 2.23.

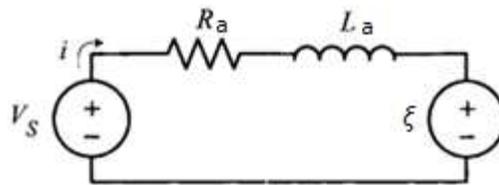


Figura 2.23: Circuito equivalente do PM DC - adaptado de Chiasson (2005)

O equacionamento deste circuito é:

$$V_S - R_a i - L_a \frac{di}{dt} - K_e \omega_R = 0 \quad (2.30)$$

Aplicando a segunda Lei de Newton sobre o rotor, tem-se:

$$T_b - T_L - B_R \omega_R = J_R \frac{d\omega_R}{dt} \quad (2.31)$$

onde:

- T_L é qualquer torque de resistência imposto sobre o eixo;
- B_R é o amortecimento viscoso dos mancais;
- J_R é o momento de inércia do rotor.

A Equação 2.30 e a Equação 2.31 rearranjadas e a igualdade entre a derivada da posição angular e a velocidade angular compõem o equacionamento dinâmico do PM DC:

$$\begin{cases} L_a \frac{di}{dt} = -R_a i - K_e \omega_R + V_S \\ J_R \frac{d\omega_R}{dt} = K_T \cdot i - T_L - B_R \omega_R \\ \frac{d\theta_R}{dt} = \omega_R \end{cases} \quad (2.32)$$

Os motores PM DC de campo axial tem o comportamento descrito pela mesma teoria dos motores PM DC de campo radial, compartilhando os mesmos circuitos equivalentes, equações dinâmicas e constantes (HILL; CORK, 1985).

2.4.4 Conversores - *Choppers*

O controle do fluxo de energia entre as fontes de energia e os motores elétricos é executado por meio dos conversores, que variam de acordo com os tipos de fontes e motores. Para o caso de fontes e MEs de corrente contínua, utilizam-se dispositivos denominados *choppers* (EHSANI, et al, 2010).

Os *choppers* estão para a corrente contínua assim como os transformadores estão para a corrente alternada, uma vez que eles convertem uma fonte de tensão CC fixa em uma fonte de tensão CC variável. Além dos automóveis dotados de motores DC, estes dispositivos são encontrados em outras aplicações, como trólebus e empilhadeiras, graças a sua rápida resposta dinâmica, a sua alta eficiência e a possibilidade de frenagem regenerativa (RASHID, 1999).

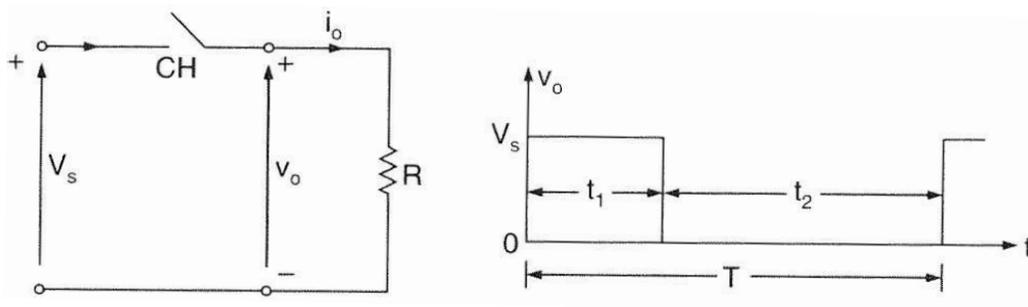


Figura 2.24: *Chopper* de operação abaixadora (RASHID, 1999).

Um *chopper* pode ter uma operação abaixadora ou uma operação elevadora. Como se pode observar na Figura 2.24, admitindo-se que o *chopper* tenha um período constante de chaveamento T , um tempo t_1 de condução da chave e tensão de fonte V_s , a tensão média V_o sobre a carga será:

$$V_o = \frac{t_1}{T} V_s = k V_s \quad (2.33)$$

assim, uma vez que t_1 é sempre menor ou igual a T , $0 \leq k \leq 1$, a tensão média sobre a carga estará sempre confinada entre a tensão da fonte e zero, configurando-se a operação abaixadora (RASHID, 1999).

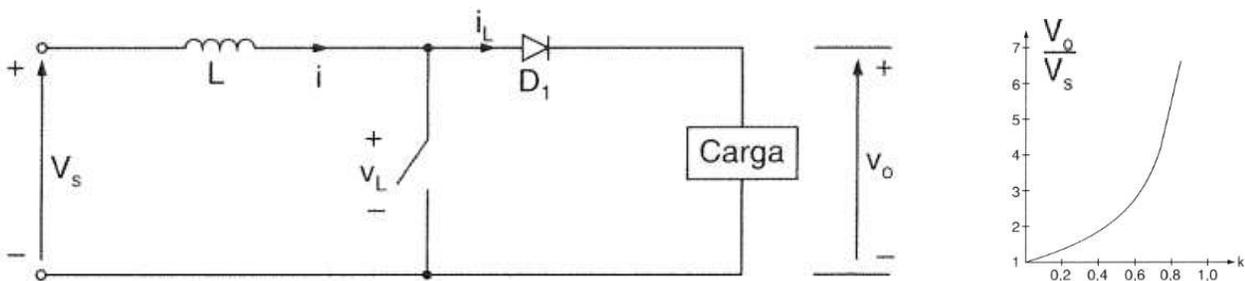


Figura 2.25: *Chopper* de operação elevadora (RASHID, 1999).

Um *chopper* simples de operação elevadora está na Figura 2.25. Durante o tempo de condução da chave, a corrente no indutor (com indutância L) crescerá de um valor mínimo I_1 para um valor máximo I_2 , gerando uma variação de corrente ΔI :

$$\Delta I = I_2 - I_1 = \frac{V_s}{L} t_1 \quad (2.34)$$

A partir do momento em que esta chave fechar, o indutor descarregará esta corrente sobre a carga até voltar ao nível mínimo de corrente. Assim, a tensão V_O sobre a carga durante a descarga será (RASHID, 1999):

$$V_O = V_S + L \frac{\Delta I}{t_2} = V_S \left(1 + \frac{I_1}{I_2} \right) = V_S \frac{1}{1-k} \quad (2.35)$$

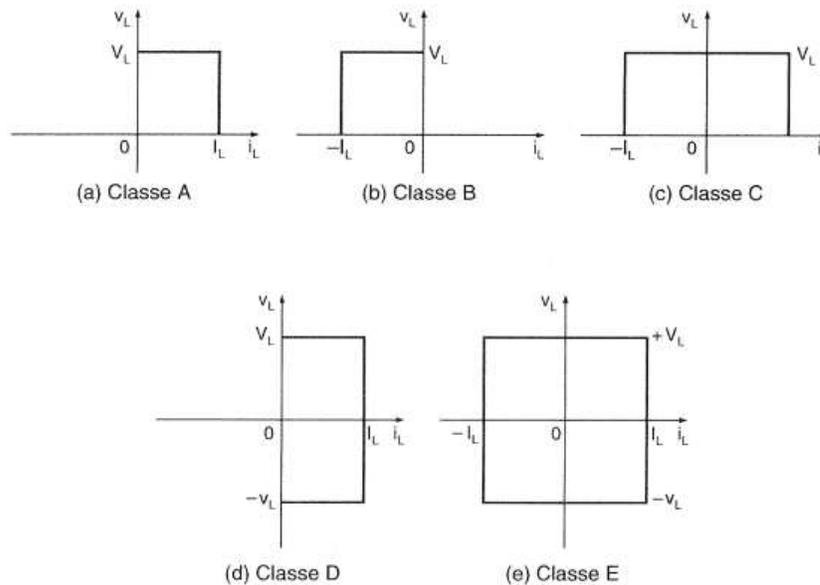


Figura 2.26: Classes dos *choppers* (RASHID, 1999)

Uma classificação pode ser feita para distinguir os *choppers* de acordo com o sentido da corrente e o sinal da tensão (RASHID, 1999):

- Classe A: Corrente flui da fonte para a carga e a tensão sobre o *chopper* é positiva (ver Figura 2.26A). Este é um modo exclusivamente de envio de potência para um motor DC.
- Classe B: Corrente flui da carga para a fonte e a tensão sobre o *chopper* é positiva (ver Figura 2.26B). Este é um modo exclusivo de geração de potência a partir de um motor DC.
- Classe C: Corrente pode fluir em ambos os sentidos e a tensão sobre o *chopper* é positiva (ver Figura 2.26C). Esta é a classe empregada para motores DC acionados em sentido único com a possibilidade de frenagem regenerativa.
- Classe D: Corrente sempre flui da fonte para a carga, mas a tensão pode ser positiva ou negativa (ver Figura 2.26D).

- Classe E: Corrente flui em ambos os sentidos e a tensão pode ser tanto positiva quanto negativa (ver Figura 2.26E). Ideal para motores que podem ser acionado em ambos os sentidos com a possibilidade de frenagem regenerativa.

Os *choppers* das Classes C e E são ideais para VEs e VEHs por possibilitarem a frenagem regenerativa. Um exemplo de *chopper* Classe C está na Figura 2.27. Em seu modo de funcionamento em potência, a chave S1 e o diodo D1 operam. Quando S1 fecha, a tensão da fonte é aplicada sobre os terminais do motor. Quando S1 abre, a corrente flui por D1 e decai. Em modo de frenagem regenerativa, a chave S2 e o diodo D2 operam. Quando S2 fecha, a máquina age como gerador e a corrente de armadura cresce em módulo, mas com sentido inverso. Quando S2 abre, a corrente flui do motor para a fonte (EHSANI, et al, 2010).

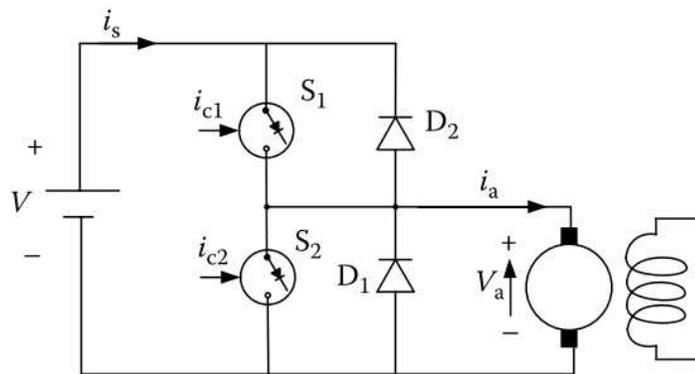


Figura 2.27: Exemplo de *chopper* Classe C (EHSANI, et al, 2010).

2.4.5 Associações entre Armazenadores Elétricos, *Choppers* e MEs

As cargas às quais os armazenadores de energia elétrica de um VEH com motores DC são submetidos possuem perfil com alta frequência de picos, dadas as condições de tráfego cíclicas e aleatórias. O acionamento dos MEs por meio de *choppers* adiciona um caráter pulsante a este perfil. As associações entre armazenadores elétricos, *choppers* e MEs, têm a função de harmonizar a alta potência específica dos ultracapacitores com a alta energia específica das baterias de modo que possam satisfazer à carga com eficiência e respeito aos seus limites de

trabalho. Os seis tipos mais comuns de associações estão descritos a seguir (KUPERMAN; AHARON, 2011 e CAO; EMADI, 2012).

2.4.5.1 Configuração Paralelo Semiativo

Esta é a associação mais simples entre baterias e ultracapacitores onde ambos encontram-se paralelos entre si. Um *chopper* associa este paralelo aos motores DC, como observado na Figura 2.28. As baterias e os ultracapacitores assumem o mesmo valor de tensão, pois não há controle entre ambos. Como sua tensão está limitada pela tensão das baterias, os ultracapacitores são impedidos de realizar descargas profundas, restringindo sua atuação em alta potência e o uso de sua energia armazenada, assim o ultracapacitor age como um filtro passa-baixa (KUPERMAN; AHARON, 2011).

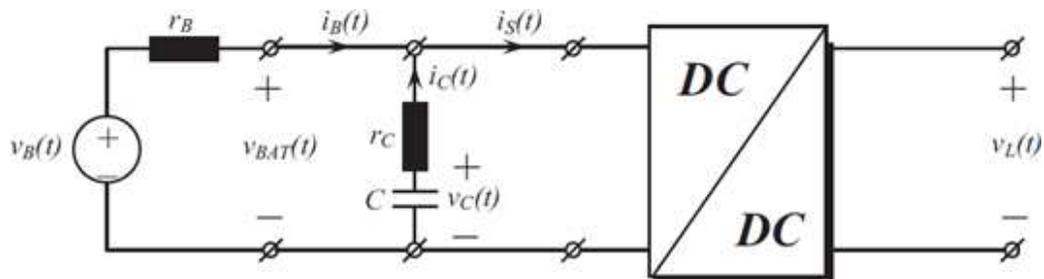


Figura 2.28: Configuração Paralelo Semiativo - adaptado de Kuperman e Aharon (2011)

2.4.5.2 Configuração Paralelo Ativo

Neste caso, tanto as baterias como os UCs possuem conversores DC/DC dedicados, possibilitando que cada um assumam tensões independentes. Os *choppers* são associados em paralelo aos MEs (Figura 2.29). Assim, é possível explorar as características de cada tipo de armazenador nos regimes de operação compatíveis (KUPERMAN; AHARON, 2011).

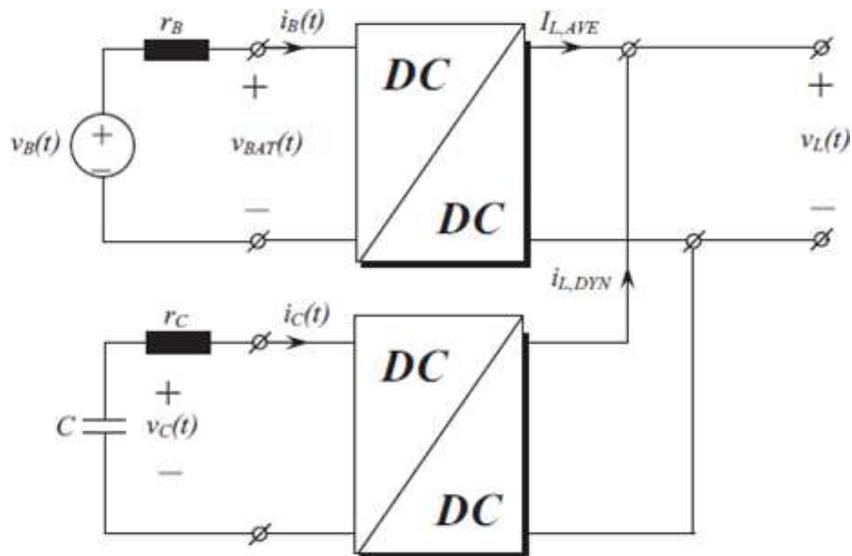


Figura 2.29: Configuração Paralelo Ativo - adaptado de Kuperman e Aharon (2011)

2.4.5.3 Configuração UCs/Baterias

Um conversor DC/DC bidirecional associa os ultracapacitores às baterias, por sua vez ligadas aos motores DC, como visto na Figura 2.30. A tensão dos UCs é independente das baterias, podendo-se explorar toda a energia armazenada e potência. Como as baterias são conectadas diretamente aos MEs, não é possível fazer o controle de tensão (CAO; EMADI, 2012).

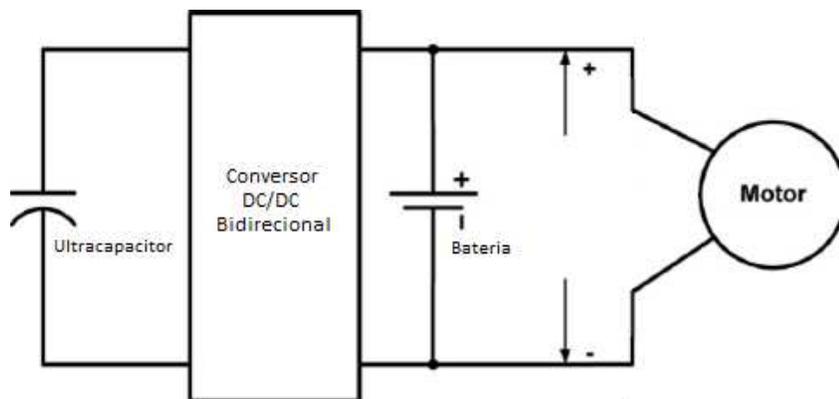


Figura 2.30: Esquema elétrico da configuração UCs/Baterias - adaptado de Cao e Emadi (2012)

2.4.5.4 Configuração Baterias/UCs

Esta é a configuração obtida da inversão da associação UCs/Baterias, com os motores elétricos ligados aos UCs (Figura 2.31). A tensão dos MEs é parcialmente controlada pelo *chopper* bidirecional uma vez que os UCs atuam como um filtro passa baixa, mas o sistema pode tornar-se instável pois a tensão dos UCs é livre para flutuar (KUPERMAN; AHARON, 2011).

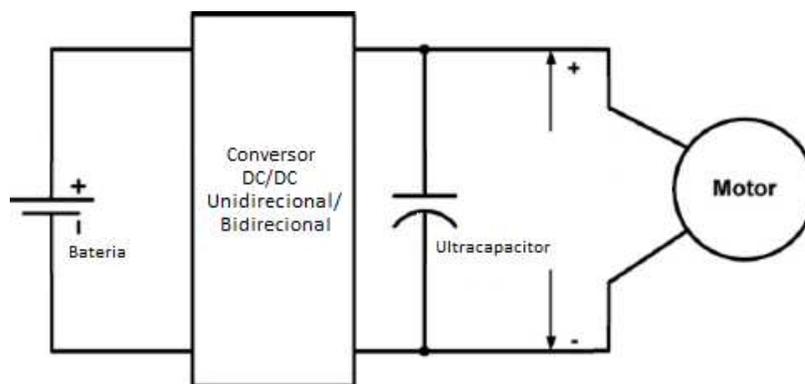


Figura 2.31: Esquema elétrico da configuração Baterias/UCs - adaptado de Cao e Emadi (2012)

2.4.5.5 Configuração Cascata

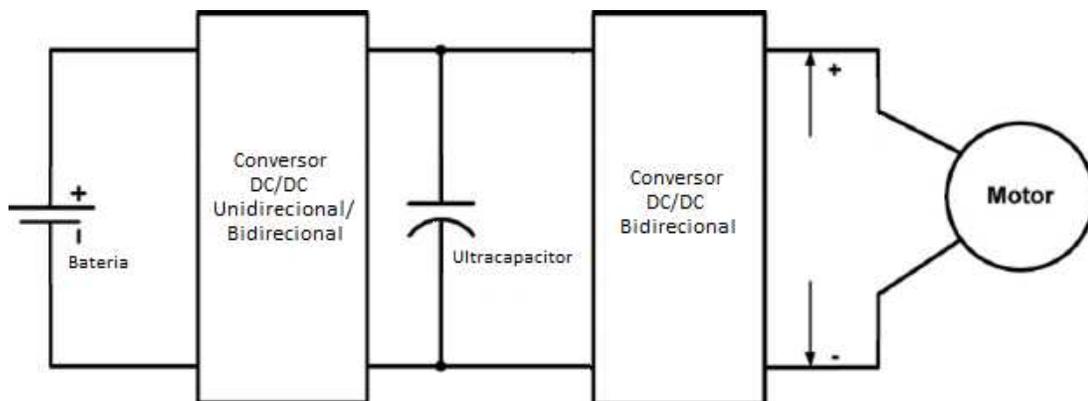


Figura 2.32: Esquema elétrico da configuração Cascata - adaptado de Cao e Emadi (2012)

A associação em cascata é similar à Baterias/UCs, mas introduz um *chopper* entre os UCs e os motores elétricos (Figura 2.32). Neste caso, as baterias carregam os UCs, que por sua vez atendem à carga dos MEs. As baterias são completamente isoladas da carga, sendo a energia obrigada a atravessar dois estágios de conversão (KUPERMAN; AHARON, 2011).

2.4.5.6 Configuração Múltiplas Entradas

Por fim, a configuração de múltiplas entradas possibilita a conexão independente das baterias e dos UCs por meio de um conversor multidirecional, que permite o fluxo de energia em todos os sentidos (Figura 2.33). As desvantagens deste sistema são a complexidade do conversor multidirecional, que encarece o sistema e introduz perdas de energia (CAO; EMADI, 2012).

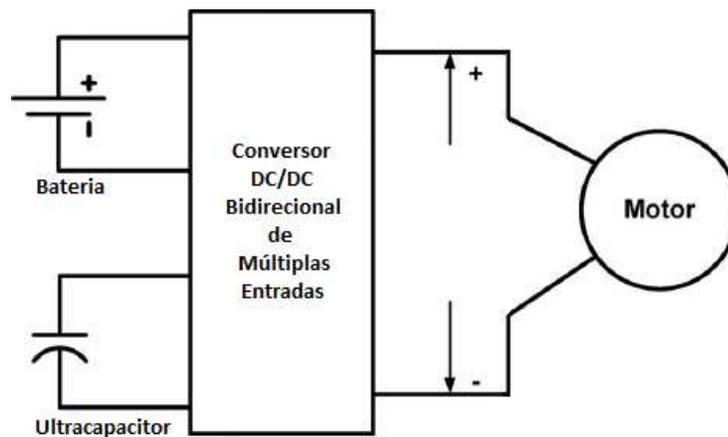


Figura 2.33: Esquema elétrico da configuração Múltiplas Entradas - adaptado de (Cao e Emadi, 2012)

2.5 Gerenciamento de Energia

Introduzir um gerenciamento de energia em um veículo reduz o consumo de combustível, as emissões, o custo de rodagem, e aumentam a performance e a facilidade de uso. Mas a implementação de estratégias de gerenciamento de energia não gera tantos benefícios em

veículos convencionais quanto gera em VEHs, que possuem componentes que propiciam a aplicação de estratégias com avançadas habilidades de observar o comportamento do motorista e as condições do ambiente e do veículo (KHAYYAM, et al, 2010).

Em VEHs, o gerenciamento de energia pode ser definido como um algoritmo usado pela central de controle para operar os trens de potência. Deve monitorar eventos próprios do uso e fornecer respostas ponderadas ao sistema em prol da melhor eficiência energética possível dentro de suas capacidades. Pode ser classificado em dois grupos principais, o Controle Baseado em Regras e o Controle Ótimo. O primeiro é baseado na heurística e nos conhecimentos prévios de especialistas em VEHs. Já o segundo é baseado na otimização de funções de custo do sistema (KHAYYAM, et al, 2010).

O Controle Baseado em Regras pode ser classificado entre dois métodos principais (WIRASINGHA, et al, 2011):

- **Lógica de Regras:** O conhecimento de um especialista é usado para designar as regras que conduzirão o comportamento do sistema. É comum o uso de gráficos e tabelas para compor essas regras. O baixo custo computacional destes algoritmos é um dos seus maiores méritos (WIRASINGHA, et al, 2011)

- **Lógica Fuzzy:** Possui uma estrutura lógica não linear, o que é compatível com as não linearidades dos sistemas de um VEH. Oferece mais robustez e flexibilidade que a Lógica de Regras. Os ônus da Lógica Fuzzy são a otimização e manipulação matemática do sistema de defuzzyficação, além do alto consumo de memória e do alto tempo de processamento, mesmo assim pode ser classificada como uma operação de tempo real (FERREIRA, et al, 2008)

O Controle Ótimo pode ser dividido em duas categorias (KHAYYAM, et al, 2010):

- **Otimização Global:** Os pontos ótimos globais de operação são obtidos por meio de métodos matemáticos. Entretanto este método não pode ser diretamente aplicado a problemas em tempo real graças à sua complexidade computacional (WIRASINGHA, et al, 2011).

- **Otimização em Tempo Real:** Baseada em otimizações locais com custo computacional menor que a Otimização Global, possibilitando a resolução de problemas em tempo real (Li, et al, 2012)

2.6 Dinâmica Veicular Longitudinal

Uma vez propulso longitudinalmente pelo torque de um motor, elétrico ou de combustão, um veículo terá algumas forças contrárias a este movimento. Estas forças são classificadas como Resistência à Rolagem, Arrasto Aerodinâmico e Resistência ao Aclive (GILLESPIE, 1992). Um diagrama das forças que envolvem a dinâmica longitudinal está na Figura 2.34 e as resistências ao movimento serão explicadas nas seções seguintes.

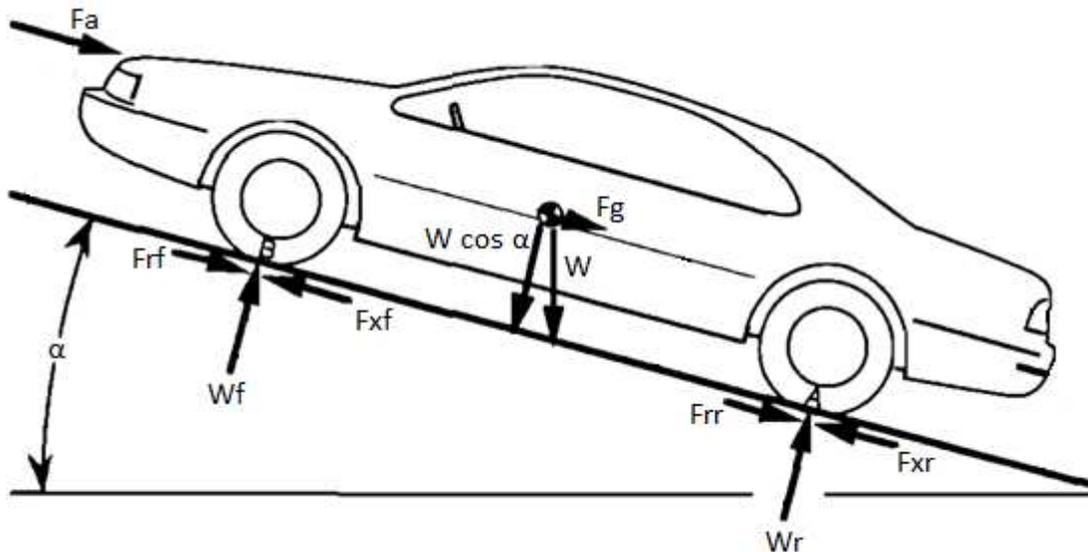


Figura 2.34: Esquemático das forças atuantes na dinâmica longitudinal veicular - adaptado de Gillespie (1992)

2.6.1 Resistência à Rolagem

Esta força de resistência ao movimento está relacionada às perdas de energia existentes no sistema que compreende pneus, rodas, rolamentos e freios. Os rolamentos e os freios participam do ônus de energia por meio do atrito e da frenagem residual, respectivamente, mas estes fenômenos não são tão significativos quanto as perdas devido a fenômenos relacionados à rolagem dos pneus (HEIßING, et al, 2011). A Resistência à Rolagem é a principal força de

resistência ao movimento em baixas velocidades, já que é comum que o Arrasto Aerodinâmico supere-a apenas a partir da faixa entre 80km/h e 95km/h (GILLESPIE, 1992). Os principais fatores que geram a Resistência à Rolagem são (GILLESPIE, 1992e HEIBING, et al, 2011):

- resistência à flexão estrutural dos pneus;
- resistência ao atrito no contato entre pneus e pista;
- escorregamento longitudinal e lateral dos pneus;
- deflexão da superfície da pista;
- arrasto aerodinâmico dos pneus, geralmente computado junto com a arrasto aerodinâmico total;
- perdas devido à irregularidades da pista.

O formato básico do cálculo da Resistência à Rolagem é um consenso na literatura, onde a componente normal do peso do veículo é multiplicada por um coeficiente de resistência à rolagem f (GILLESPIE, 1992; HEIBING, et al, 2011; BOSCH, 2005; JAZAR, 2008; GENTA, 1997), como visto na Equação 2.36:

$$F_r = f \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (2.36)$$

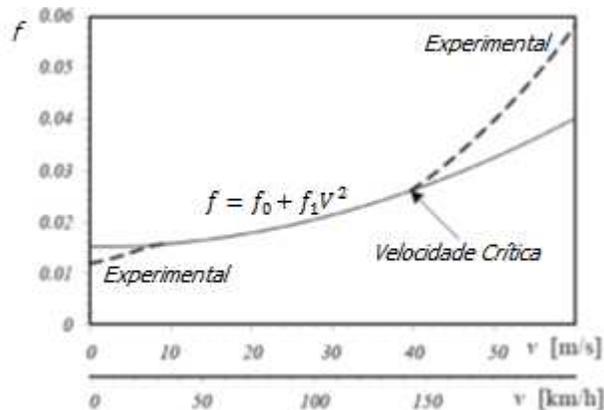


Figura 2.35: Coeficiente de resistência à rolagem em função da velocidade do veículo - adaptado de Jazar (2008)

O coeficiente de resistência à rolagem é de difícil determinação dado o fato de ser uma função da velocidade, da carga vertical sobre pneu, da temperatura, da pressão interna do ar, dos materiais e condições de pneu e pista. Considerando primeiramente apenas a velocidade, pode-se

notar pela Figura 2.35 que o coeficiente de resistência à rolagem tem três regiões com comportamentos distintos.

JAZAR, 2008 e GENTA, 1997 propõem o uso da relação quadrática exibida na Equação 2.37 válida para a operação de velocidades intermediárias. Para velocidades pequenas, não especificam uma relação, mas os valores de f deverão ser menores que os que seriam obtidos pela Equação 2.37. A partir da velocidade crítica, ondas estacionárias surgem ao longo da circunferência dos pneus com origem na região de contato, provocando um rápido aumento de f (GENTA, 1997). Para esta zona de operação, JAZAR, 2008 e HEIßING, et al, 2011 propõem uma relação de quarto grau com a velocidade, expressa na Equação 2.38.

$$f = f_0 + f_1 V^2 \quad (2.37)$$

$$f = f_0 + f_1 V + f_2 V^4 \quad (2.38)$$

GILLESPIE, 1992, por sua vez expressa o coeficiente de resistência à rolagem para baixas velocidades como uma função linear de V em mph, vista na Equação 2.39. Para as demais regiões de trabalho, indica uma função de grau 2,5 de V em mph, expressa na Equação 2.40.

$$f = 0,01 \left(1 + \frac{V}{100} \right) \quad (2.39)$$

$$f = f_0 + 3,24 f_1 \left(\frac{V}{100} \right)^{2,5} \quad (2.40)$$

De modo geral, a redução da carga vertical sobre os pneus e o aumento da pressão de inflação fazem com que a Resistência à Rolagem diminua. Uma fórmula empírica que foi proposta pela SAE para f em função da pressão de inflação p , de V e da carga vertical sobre os pneus está mostrada na Equação 2.41, onde K é 0,8 para pneus radiais e 1 para não radiais (GENTA, 1997):

$$f = \frac{K}{1000} \left(5,1 + \frac{5,5 \cdot 10^5 + 90 mg \cos(\alpha)}{p} + \frac{1100 + 0,0388 mg \cos(\alpha)}{p} V^2 \right) \quad \text{Equação (2.41)}$$

Pode-se observar pela Figura 2.36 que ao longo de um trajeto, a pressão de inflação e a temperatura dos pneus aumenta, ocasionando a diminuição do coeficiente de resistência à rolagem (HEIßING, et al, 2011). Os aumentos das rigidezes de solo e pneus também diminuem f , conforme exibido na Figura 2.37 (GILLESPIE, 1992).

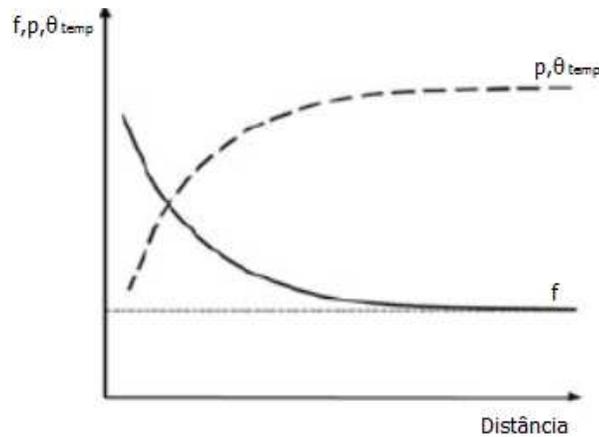


Figura 2.36: Variação do coeficiente de resistência à rolagem dado o aumento de pressão e temperatura durante um trajeto - adaptado de Gillespie (1992).

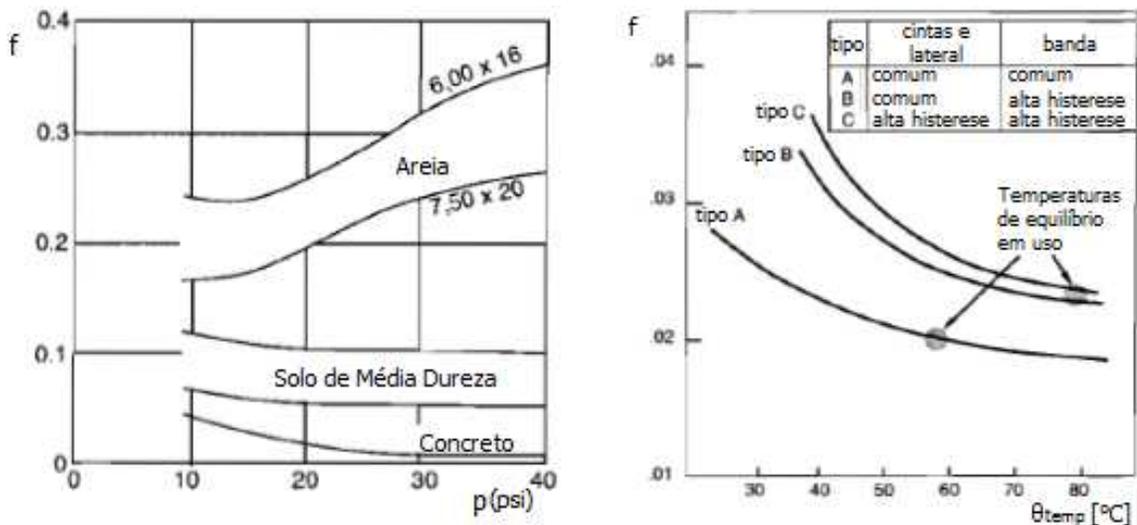


Figura 2.37: À esquerda tem-se o comportamento de f em função da pressão de inflação dos pneus e da dureza da pista. À direita tem-se a variação de f em função do material dos pneus e da temperatura - adaptado de Gillespie (1992).

Verifica-se que o coeficiente de resistência à rolagem depende de múltiplos fatores correlacionados o que torna virtualmente impossível a definição de uma fórmula totalmente

abrangente (GILLESPIE, 1992). Para o domínio das variáveis consideradas neste trabalho, os modelos apresentados se mostram potencialmente suficientes. Para trabalhos específicos onde a modelagem dos pneus deve ser altamente acurada, pode ser necessária a coleta de dados experimentais que considerem cada fator de variação deste coeficiente, gerando tabelas multidimensionais.

A título de comparação, foram plotados os coeficientes de resistência à rolagem das duas formulações empíricas das Equações 2.39 e 2.41, que são generalizadas e independentes de parâmetros particulares de cada veículo experimentalmente. Assumiu-se um veículo de 1000kg com uma pressão de inflação de pneus de 30psi, equivalente a $2,07 \cdot 10^5 \text{Pa}$. O resultado pode ser visto na Figura 2.38. Pode-se dizer que as curvas são relativamente próximas entre si, o que indica uma convergência de valores na literatura. A fórmula da SAE (Sociedade de Engenharia Automotiva) indicada por GENTA, 1997 e JAZAR, 2008 é mais conservadora por apresentar maiores valores de f , além de acompanhar melhor a tendência natural de comportamento do coeficiente de resistência à rolagem com o crescimento da velocidade.

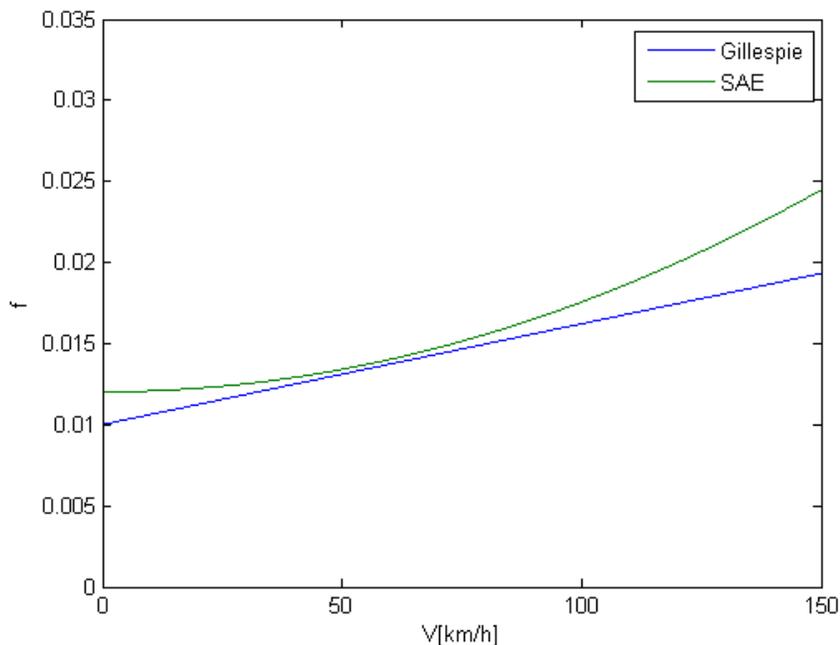


Figura 2.38: Comparação entre equações de coeficiente de resistência à rolagem

2.6.2 Arrasto Aerodinâmico

Todo corpo imerso na atmosfera, ao atravessá-la, sofrerá arrasto aerodinâmico. Não é diferente com os veículos. Dada suas formas complexas, há um consenso na literatura pelo uso da formulação exibida na Equação 2.42, pela qual o coeficiente de arrasto aerodinâmico C_d pode ser levantado experimentalmente uma vez que os outros demais parâmetros podem ser controlados ou medidos (GILLESPIE, 1992; HEIßING, et al, 2011; BOSCH, 2005; JAZAR, 2008; GENTA, 1997).

$$F_a = \frac{1}{2} \rho C_d A (V + V_{vento})^2 \quad (2.42)$$

Para a engenharia em dinâmica veicular, o ar pode ser assumido como um gás ideal. Assim sua densidade ρ dependerá da temperatura ambiente T_{amb} , da pressão atmosférica p_{atm} e da constante universal dos gases R , conforme mostrado na Equação 2.43 (HEIßING, et al, 2011):

$$\rho = \frac{p_{atm}}{RT_{amb}} \quad (2.43)$$

2.6.3 Resistência ao Aclive

Quando um veículo está submetido a uma pista inclinada em relação à horizontal, a força peso poderá ser dividida em uma componente normal e uma componente paralela à pista. A componente paralela à pista recebe o nome de Resistência ao Aclive e será contra o avanço do veículo em subidas, mas a favor em descidas (GILLESPIE, 1992). A Equação 2.44 calcula a Resistência ao Aclive:

$$F_g = m \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (2.44)$$

2.7 Métodos de Otimização

Os métodos de otimização mais utilizados podem ser divididos em dois grupos: determinísticos e estocásticos. Métodos determinísticos são aplicados a funções contínuas e diferenciáveis, englobam algoritmos baseados em álgebra linear e computação do gradiente da função objetivo. Já os métodos estocásticos são baseados na avaliação de um grupo de pontos de uma função por meio de algoritmos com parâmetros probabilísticos, independentemente do caráter linear ou diferenciável desta função (CAVAZZUTI, 2013).

Para funções contínuas e diferenciáveis, os métodos determinísticos convergem a um ponto ótimo com maior rapidez que os estocásticos, ou seja, requerem um número menor de avaliações da função. Por outro lado, de forma geral, a otimização determinística realiza a procura por pontos estacionários, podendo ter como resultado apenas um ponto ótimo local, assim é fortemente dependente do ponto inicial do processo. Já a aleatoriedade dos métodos estocásticos permite uma vasta verificação da função dentro do domínio definido, aumentando a robustez na procura por ótimos globais (CAVAZZUTI, 2013).

Os métodos estocásticos mostram grande potencial para otimização de veículos híbridos, uma vez que estes são máquinas não-lineares e apresentam descontinuidades, sendo o Algoritmo Genético (AG) e suas variações amplamente utilizados para esta tarefa. Apesar de sua grande robustez em localizar o ótimo global, o AG sofre com a lentidão ao convergir (HUI, 2010).

O AG e a maioria dos outros métodos estocásticos são baseados na modelagem simplificada e livre de fenômenos da natureza, limitados a alguns aspectos da realidade. Especificamente, o AG é inspirado na evolução de uma população por sucessivas gerações promovida pelos fenômenos de reprodução, mutação e seleção (CAVAZZUTI, 2013).

Inicialmente, é escolhido um grupo de pontos para compor a população inicial. A cada indivíduo desta população é atribuído um cromossomo, sendo cada gene destes cromossomos uma variável de controle utilizada para a otimização do sistema. Assim, é possível executar o seguinte laço lógico (GEN; CHENG, 2000):

- 1) *Fitness*: a avaliação quantitativa do desempenho de cada ponto da população frente à função a ser otimizada;

- 2) Classificação para reprodução: os indivíduos são selecionados para reprodução; quanto maior o *Fitness*, maiores as chances de um indivíduo ser escolhido;

- 3) Combinação: os cromossomos dos progenitores são combinados;
- 4) Mutação: quando uma probabilidade eventual prevalece, um ou mais genes do(s) descendente(s) é mutado;
- 5) Aceitação e Seleção: os descendentes são integrados à população e os indivíduos com pior *Fitness* são eliminados.

Este processo é reiterado até que um critério de parada seja atingido.

2.8 Novo Regime Automotivo

No dia 04 de outubro de 2012 o governo anunciou o Novo Regime Automotivo, que visa por meios fiscais incentivar a industrialização brasileira, a economia de combustíveis e a inovação. Os objetivos serão atingidos por meio de um conjunto de metas que entram em vigor entre 2013 com prazo final em 2017 (CORREIO POPULAR, 2012).

Primeiramente, o novo regime trata da percentagem de peças nacionais que compõem os novos veículos. Atualmente, 65% das peças dos automóveis devem ser produzidas no Brasil ou no MERCOSUL (Mercado Comum do Sul), caso contrário o veículo estará sujeito a um incremento de 30 pontos percentuais na alíquota básica do IPI (Imposto de Produtos Industrializados). Até 2017, a proporção mínima de peças nacionais aumentará para 70% (FOLHA DE S. PAULO, 2012a).

Quanto ao consumo de combustível, com relação ao ano-base de 2011, os automóveis deverão consumir 12,08% menos até outubro de 2016 para terem um abatimento de 1% na alíquota básica do IPI. Para 2017, a mesma redução fiscal será possível apenas para os automóveis 15,46% mais econômicos em relação ao ano-base. Caso esta economia seja maior que 18,84%, o abatimento de IPI será de 2% (FOLHA DE S. PAULO, 2012a). O consumo médio esperado dos veículos a etanol e a gasolina para cada ano em questão está exibido na Figura 2.39.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Autonomia km/litro que será exigida, em média, dos carros produzidos por montadora no país

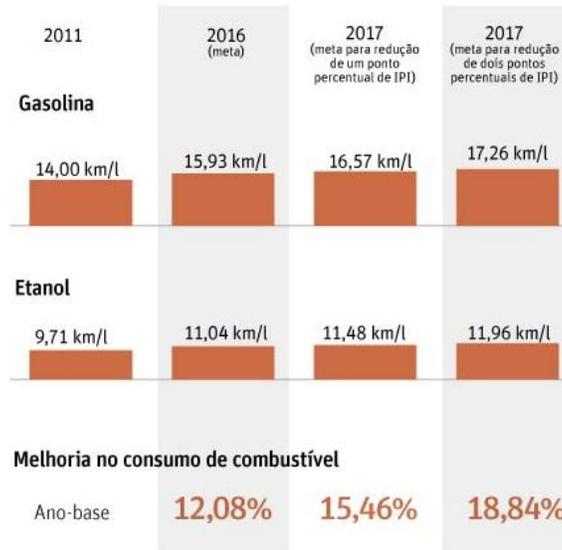


Figura 2.39: Consumo médio dos automóveis a gasolina e a etanol produzidos no ano de 2011 e o esperado para 2016 e 2017 segundo o novo regime automotivo - adaptado de Folha de S. Paulo (2012a)

Por fim, o novo regime automotivo prevê o abatimento de 1% na alíquota do IPI dos veículos de montadoras que investirem 1% do seu faturamento em pesquisa e desenvolvimento (FOLHA DE S. PAULO, 2012a).

Outro ponto favorável à redução do consumo de combustíveis é o fato que 19 montadoras e importadoras de automóveis aderiram voluntariamente ao programa de selos de eficiência do INMETRO. Estes selos classificam os veículos em cinco categorias, de “A” (mais eficientes) até “E” menos eficientes (FOLHA DE S. PAULO, 2012b).

Assim, existem condições reunidas para criar um cenário favorável ao desenvolvimento de tecnologias que aumentem a eficiência energética dos automóveis no Brasil. Veículos híbridos com baixo grau de hibridização são uma alternativa interessante por serem o primeiro passo que consumidores e montadoras dão em direção a esta proposta mais eficiente. Entende-se que um veículo de baixo grau de hibridização é aquele que tem pequena relação entre a potência devido ao ME (P_{ME}) e a potência total ($P_{ME} + P_{ICE}$), como pode ser observado na Equação 45 (VARESI, K.; A. RADAN, 2011).

$$DOH = \frac{P_{ME}}{P_{ME} + P_{ICE}} \quad (2.55)$$

Neste trabalho são utilizados modelos de um veículo convencional com motor de combustão e alternativas de baixo grau de hibridização. As topologias serão detalhadas nas próximas seções.

3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

As análises promovidas neste trabalho são baseadas nas simulações computacionais de um veículo convencional de combustão e suas versões hibridizadas. Trata-se por versão hibridizada a simples adição de um trem de potência elétrico ao automóvel, sem alterações sobre o trem de potência original de combustão. Quanto a estas versões, são implementadas três diferentes associações de armazenados elétricos, *choppers* e MEs: associação paralelo semiativo, associação paralelo ativo e associação cascata.

Os modelos dinâmicos dos subsistemas descritos na revisão bibliográfica são utilizados para a modelagem dos sistemas globais dos veículos propostos. Em seguida é descrita a implementação destas simulações em álgebra de blocos, considerando-se parâmetros típicos encontrados na literatura. Por fim, cada modelo é submetido ao ciclo brasileiro de condução urbana da norma NBR6601:2012.

Uma versão alternativa híbrida ideal é estudada, omitindo-se a dinâmica dos armazenadores e dos motores elétricos, de modo a obterem-se parâmetros limites de desempenho das versões não ideais. Estes parâmetros são utilizados tanto como objetivos de simulação para a otimização dos sistemas não ideais, quanto para análise crítica do potencial que o desenvolvimento destas versões hibridizadas pode alcançar. O estudo da versão ideal compreende a análise do desempenho agregando-se de 1 a 20 motores elétricos ideais. Quando o número de motores elétricos tende ao seu limite superior não é possível afirmar que o comportamento resultante é relativo a um veículo elétrico ideal uma vez que toda a dinâmica do trem de potência de combustão ainda está considerada no modelo.

Por fim são executadas otimizações baseadas em algoritmos genéticos sobre as três versões não ideais de veículo híbrido. Variando-se o número de motores elétricos, a capacidade dos

armazenadores e os parâmetros dos *choppers* convergem de modo que o sistema obedeça as especificações de trabalho dos componentes empregados e os objetivos de ganho em economia de combustível e redução de custo de rodagem.

3.1 Modelo de Veículo Convencional

O trem de potência de combustão tradicional é suprido de potência de propulsão pelo MCI, como discutido anteriormente. O MCI é acoplado à transmissão por meio da embreagem. A transmissão mais comum é a escalonada manual. O escalonamento viabiliza maior torque nas rodas para tração em baixas velocidades, e maiores velocidades para regimes de cruzeiro. Este escalonamento, por meio de pares de engrenagens com diferentes relações de transmissão, faz com que o momento de inércia resultante da transmissão seja uma função da marcha selecionada. A embreagem é acionada para desacoplar (de modo parcial ou total) o MCI quando a velocidade na transmissão for menor que a rotação de marcha lenta, o que provocaria o desligamento do motor. O desacoplamento também é necessário em momentos de trocas de marcha, uma vez que a ausência de torque na transmissão propicia mudanças mais confortáveis e menor desgaste (GILLESPIE, 1992).

A transmissão é ligada às rodas por, em sequência, eixo, diferencial e semieixos. Para veículos com motor posicionado na extremidade oposta das rodas de tração é empregado um eixo cardan, caso contrário (com o MCI na mesma extremidade das rodas de tração) o eixo pode ser curto ou inexistente, com a ligação direta entre transmissão e diferencial. O diferencial permite a distribuição do torque de entrada para os dois semieixos e também dá liberdade para as rodas girarem em velocidades diferentes quando o veículo está em esterço. Por fim, os semieixos transmitem potência para as rodas de tração (GILLESPIE, 1992). A representação esquemática de um trem de potência tradicional está na Figura 3.1.

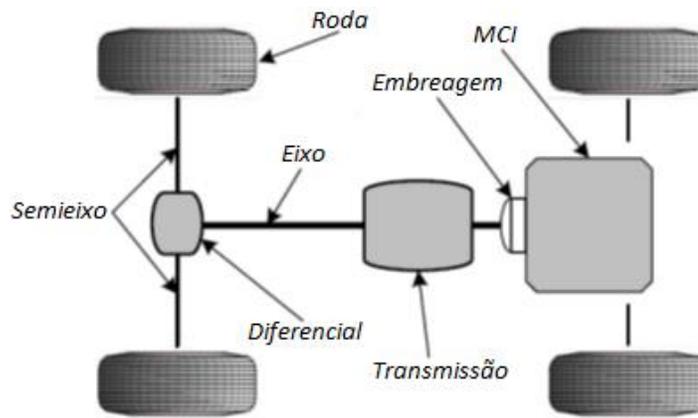


Figura 3.1: Trem de potência tradicional (JAZAR, 2008)

Para as análises seguintes, será adotada uma topologia de com motor de combustão e tração frontais, sendo as rodas traseiras passivas. Um esquemático minimalista desta topologia está na Figura 3.2.

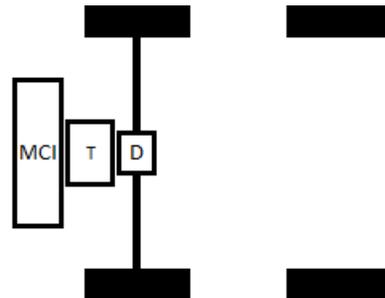


Figura 3.2: Topologia simplificada do modelo de veículo convencional de tração dianteira estudado.

Esta topologia pode ser representada dinamicamente por meio da interação de quatro corpos em um diagrama de corpo livre (ver Figura 3.3), equacionados por meio da Segunda Lei de Newton. O primeiro corpo é relativo ao MCI, recebe um toque positivo $T_m(n, \beta)$, obtido por meio do mapa dinamométrico do motor, e um torque negativo T_c originado no acoplamento com a embreagem. A inércia deste corpo (I_m) compreende a inércia do MCI somada às inércias do volante de inércia e do platô da embreagem.

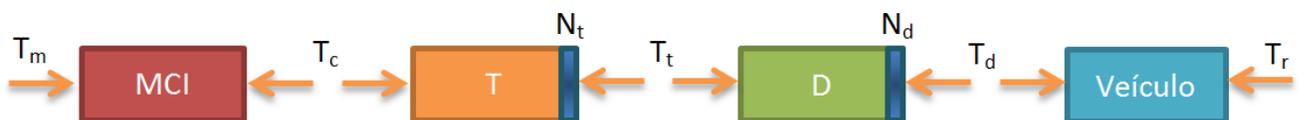


Figura 3.3: Diagrama corpo livre das inércias do veículo convencional

O segundo corpo é relativo à transmissão compreendido da inércia I_t (que é a soma das inércias da transmissão, em função da marcha selecionada, com a inércia do disco de embreagem) seguida da relação de transmissão da marcha selecionada N_t . Este corpo recebe a reação de T_d e um torque negativo T_t originado do diferencial.

O terceiro corpo é relativo ao diferencial de inércia I_d seguida da relação de transmissão N_d . Ele recebe a reação de T_t e um torque negativo T_d originado dos semieixos.

O quarto e último corpo é relativo aos semieixos, rolamentos, rodas, pneus e demais partes rotativas existentes a partir do diferencial. Ele recebe a reação de T_d e os torques de resistência ao movimento T_r .

A equação completa do veículo é obtida por meio do quarto corpo. Para isto, a massa total do veículo deve ser transformada em um momento de inércia rotacional equivalente J (em função da massa do veículo - m - e do raio dos pneus - r) e este deve ser somado à inércia dos semieixos, rolamentos, rodas, pneus e demais partes rotativas existentes a partir do diferencial. Assim tem-se a inércia resultante I e todas as inércias estão incluídas no modelo. Como resultado, tem-se o modelo completo da dinâmica longitudinal do veículo.

O momento de inércia rotacional equivalente à massa do veículo é obtido por meio de uma análise energética (DEDINI, 2011). A energia cinética linear do veículo E_{cl} deve ser igual à energia cinética rotacional do novo corpo virtual E_{cr} . Assim:

$$E_{cr} = E_{cl} \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}mV^2 \quad (3.2)$$

$$J\left(\frac{V}{r}\right)^2 = mV^2 \quad (3.3)$$

$$J = mr^2 \quad (3.4)$$

Seguindo a metodologia empregada por GILLESPIE, 1992 para equacionar cada corpo, tem-se que, para o primeiro corpo:

$$T_m - T_c = I_m \ddot{\theta}_m \quad (3.5)$$

Para o segundo corpo, tem-se:

$$T_c - \frac{T_t}{N_t} = I_t \ddot{\theta}_t \quad (3.6)$$

Para o terceiro corpo, tem-se:

$$T_t - \frac{T_d}{N_d} = I_d \ddot{\theta}_d \quad (3.7)$$

Para o quarto corpo, tem-se:

$$T_d - T_r = I \ddot{\theta} \quad (3.8)$$

Uma vez que $\ddot{\theta}_d = N_d * \ddot{\theta}$, $\ddot{\theta}_t = N_t * \ddot{\theta}_d$ e $N_{td} = N_t * N_d$, pode-se rearranjar as Equações 3.6, 3.7 e 3.8 da seguinte forma:

$$T_c N_{td} - T_r - (I_t N_{td}^2 + I_d N_d^2 + I) \ddot{\theta} = 0 \quad (3.9)$$

Gillespie, 1992 indica que o rendimento total do trem de potência η varia entre 80% a 90% pode ser inserido neste ponto sem prejuízo significativo na análise final, assim a Equação 3.9 pode ser reescrita da forma:

$$T_c N_{td} \eta - T_r - (I_t N_{td}^2 + I_d N_d^2 + I) \ddot{\theta} = 0 \quad (3.10)$$

A Equação 3.10 e a Equação 3.5 formam o sistema de dois graus de liberdade da dinâmica longitudinal em estudo, onde desconsidera-se o escorregamento dos pneus e os corpos são idealmente rígidos. Para resolvê-lo basta conhecer o equacionamento da embreagem, responsável pelo T_c .

3.2 Modelo de VEH Paralelo

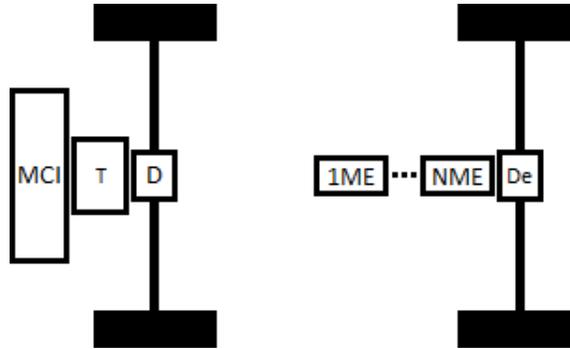


Figura 3.4: Topologia simplificada do modelo de veículo híbrido paralelo estudado.

O modelo híbrido paralelo escolhido tem o trem de potência dianteiro idêntico ao modelo convencional adotado, mas na traseira há um trem de potência elétrico composto por um número N de motores elétricos acoplados ao diferencial seguido de semieixos, como pode ser observado na Figura 3.4. Esta configuração é selecionada por não promover alterações mecânicas no trem de potência de combustão.

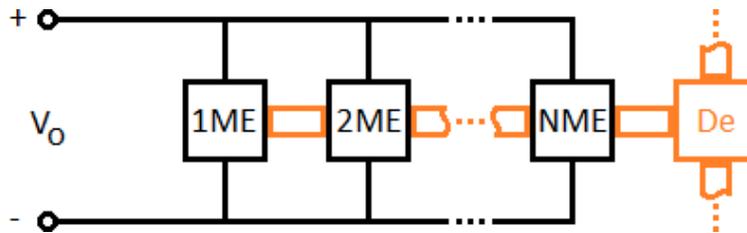


Figura 3.5: Associação elétrica e mecânica dos N motores elétricos

Os N motores elétricos são associados mecanicamente por um eixo comum e eletricamente em paralelo, como observado na Figura 3.5. Esta associação foi empregada pois permite incrementos discretos na potência elétrica com a adição de cada nova unidade de potência, alterando proporcionalmente a dinâmica da propulsão elétrica total e evidenciando comparações.

O diagrama de corpo livre do VEH é semelhante ao da topologia convencional, mas agregam-se novas inércias referentes ao ME e ao novo diferencial, bem como o torque do ME,

como é exibido na Figura 3.6. A massa adicional devido à hibridização (massas do ME, baterias e capacitores), é agregada ao momento de inércia equivalente da massa do veículo.

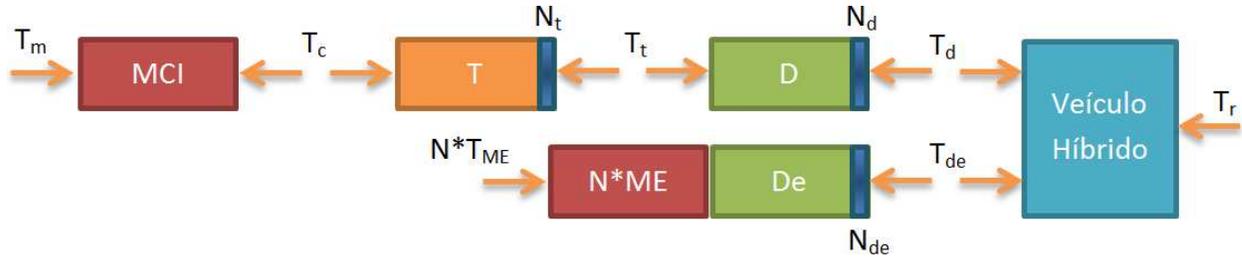


Figura 3.6: Diagrama corpo livre das inércias do veículo híbrido

De forma análoga ao equacionamento do modelo convencional, o sistema de equações do modelo híbrido será composto pela Equação 3.5 associada à Equação 3.11:

$$T_{ME}N_{de}N + T_cN_{td}\eta - T_r - (I_tN_{td}^2 + I_dN_d^2 + (I_{ME}N + I_{de})N_{de}^2 + I)\ddot{\theta} = 0 \quad (3.11)$$

onde T_{ME} é o torque entregue pelo ME, I_{ME} é a inércia do ME, I_{de} é a inércia do diferencial do trem de potência elétrico e N_{de} é a relação de transmissão deste diferencial. A Inércia Resultante (I) é recalculada considerando-se a massa das baterias (m_{bat}), dos ultracapacitores (m_{cpTot}) e dos motores elétricos (m_{MET}) adicionados com a hibridização.

3.2.1 Modelo de VEH Paralelo com Associação Paralelo Semiativo

A primeira configuração de armazenadores, *choppers* e motores elétricos estudada é o Paralelo Ativo, dada sua simplicidade de implementação. Como revisado anteriormente, neste caso, as baterias encontram-se em paralelo com o ultracapacitor e, em sequência, ambos são ligados aos *choppers* que acionam os MEs, como mostrado na Figura 3.7.

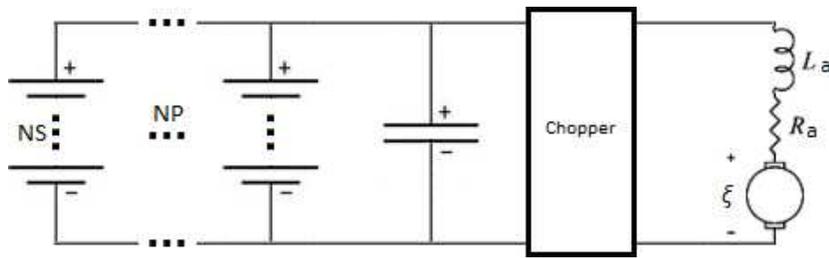


Figura 3.7: Configuração Paralelo Semiativo adotada

As baterias são constituídas por uma matriz com NS células em série, em paralelo com NP outras séries de mesmo tamanho. Apenas um ultracapacitor é utilizado em paralelo às baterias. Os *choppers* empregados (Figura 3.8) possuem duas configurações comutáveis conforme o modo de operação.

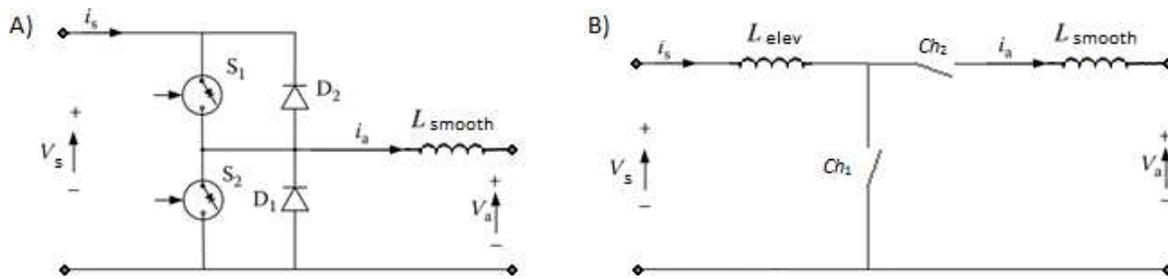


Figura 3.8: Em “A”, esquema elétrico do *chopper* abaixador. Em “B”, tem-se um *chopper* elevador no sentido direto e abaixador no sentido inverso.

O “*Chopper A*” apresentado na Figura 3.8A e é um *chopper* abaixador que opera com tensão estritamente positiva, mas pode assumir correntes negativas em frenagem regenerativa e correntes positivas ao fornecer potência para o VEH. Assim, ele permanece ativo em velocidades baixas, onde a tensão da fonte (V_s) é maior que a força contra eletromotriz (ξ). A cada período de funcionamento T , reiniciando-se a contagem de tempo t , a chave S_1 é acionada no intervalo de tempo $0 \leq t \leq kT$ e a chave S_2 é acionada no intervalo de tempo $kT \leq t \leq T$. Durante o primeiro intervalo, quando a corrente de armadura for positiva, a condução ocorre por S_1 e, caso a corrente seja negativa, o diodo D_2 realiza esta condução. Já durante o segundo intervalo, quando a corrente de armadura for positiva, a condução ocorre pelo diodo D_1 e, caso a corrente seja negativa, S_2 realiza esta condução. Deste modo, a corrente no motor elétrico sempre será

contínua a tensão média de armadura V_a será proporcional à tensão da alimentação pelo valor da razão cíclica k , com $0 \leq k \leq 1$:

$$V_a = kV_s \quad (3.12)$$

Partindo do equacionamento do circuito equivalente do ME alimentado por V_a , tem-se:

$$V_a = iR_a + \xi \quad (3.13)$$

$$kV_s = \frac{T_{ME}}{K_T} R_a + K_e \omega_R \quad (3.14)$$

Assim, é possível inferir a razão cíclica frente um torque de objetivo para o ME (T_{ME_Obj}). Esta razão cíclica será usada para controlar o *chopper* neste modo de operação:

$$k = \frac{\frac{R_a T_{ME_Obj}}{K_T} + K_e \omega_R}{V_s} \quad (3.15)$$

Uma vez que k atinge o limite superior (razão de cíclica igual a 1) e a demanda por potência continua crescente, o VEH entra em altas velocidades e é necessário comutar para o “*Chopper B*” apresentado na Figura 3.8B. Em seu modo direto a chave Ch_2 permanece fechada e a chave Ch_1 forma com o indutor L_{elev} um *chopper* que eleva a tensão média sobre o motor DC:

$$V_a = V_s \frac{1}{1-k} \quad (3.16)$$

Novamente, pode-se inferir um valor para a razão cíclica em função de um de torque objetivo para ao ME:

$$V_s \frac{1}{1-k} = \frac{T_{ME}}{K_T} R_a + K_e \omega_R \quad (3.17)$$

$$k = 1 - \frac{V_s}{\frac{R_a T_{ME_Obj}}{K_T} + K_e \omega_R} \quad (3.18)$$

Por outro lado, quando a chave Ch₁ permanece aberta, Ch₂ forma a configuração de *chooper* mais simples que abaixa a tensão média de armadura, permitindo que em altas velocidades ($\xi > V_s$) a regeneração possa ser feita de modo controlado. Quando Ch₂ está fechada, a corrente é enviada do motor DC para os armazenadores, caso contrário, os armazenadores estão desconectas e o ME está girando livre, assim:

$$V_s = kV_a \quad (3.19)$$

$$k = \frac{V_s}{\frac{R_a T_{ME_Obj}}{K_T} + K_e \omega_R} \quad (3.20)$$

A massa de baterias (m_{bat}), e a massa total de hibridização (m_{hTot}) são dadas pelas equações:

$$m_{bat} = m_{cel} * NP * NS \quad (3.21)$$

$$m_{hTot} = m_{bat} + m_{cp} = m_{cel} * NP * NS + m_{cp} \quad (3.22)$$

onde m_{cel} é a massa de cada célula da bateria e m_{cp} é a massa do ultracapacitor em paralelo semiativo.

3.2.2 Modelo de VEH Paralelo com Associação Paralelo Ativo

A segunda configuração de VEH Paralelo testada é a associação Paralelo Ativo, com o objetivo de explorar melhor a potência específica de um ultracapacitor e verificar como as baterias podem ser poupadas priorizando o uso do UC paralelo ativo como armazenador único

durante as frenagens regenerativas e, havendo disponibilidade de carga, durante as acelerações. Mesmo adotando o Paralelo Ativo, um ultracapacitor é mantido em Paralelo Semiativo com as baterias como filtro passa baixa, como observado na Figura 3.9:

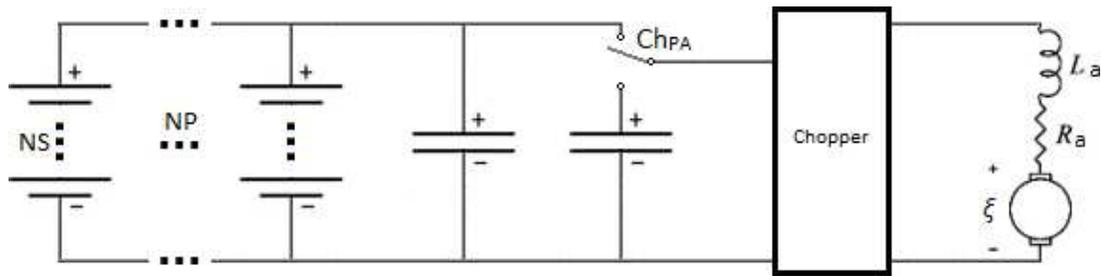


Figura 3.9: Configuração Paralelo Ativo adotada

Nesta configuração, os armazenadores são selecionados pela Ch_{PA} , comutando entre as baterias com UC Paralelo Semiativo ou exclusivamente o UC dedicado ao Paralelo Ativo. Os *choppers* são similares aos utilizados na configuração paralelo semiativo (Figura 3.10), mas as chaves Ch_{PA} comutam entre o indutor L_{elev} (dedicado às baterias) e o indutor L_{elevPA} (dedicado ao UC Paralelo Ativo). O indutor L_{smooth} é comum a todos os modos de operação.

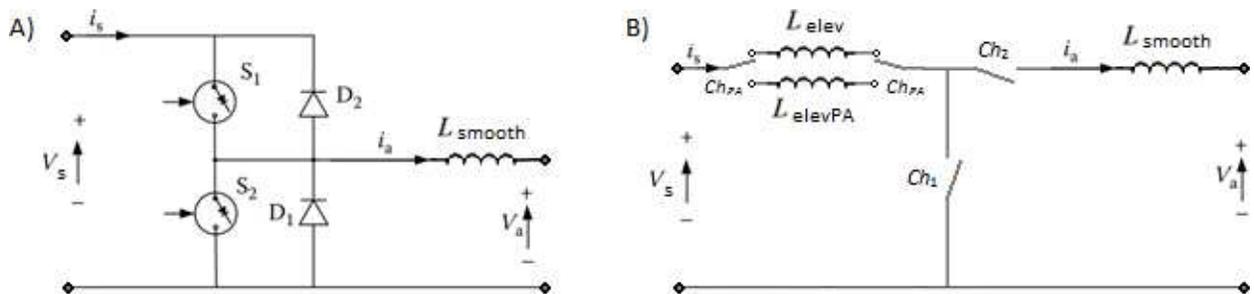


Figura 3.10: Em “A”, tem-se o esquema elétrico do *chopper* abaixador. Em “B”, tem-se um *chopper* elevador no sentido direto e abaixador no sentido inverso, configuração Paralelo Ativo

A massa total de ultracapacitores (m_{cpTot}) é dada por:

$$m_{cpTot} = m_{cp} + m_{cpPA} \quad (3.23)$$

E por fim, a massa total de hibridização é:

$$m_{hTot} = m_{bat} + m_{cp} + m_{cpPA} \quad (3.24)$$

onde m_{cpPA} é a massa do ultracapacitor em paralelo ativo.

3.2.3 Modelo de VEH Paralelo com Associação Cascata

Com o objetivo de isolar as baterias da carga e explorá-las apenas em descarga foi construída uma associação Cascata, observada na Figura 3.11. Nesta configuração, as baterias carregam um par de ultracapacitores responsáveis pela tração do veículo. Especificamente, estes UCs são alternados nas tarefas de carga e descarga por meio das caves Ch_C e \overline{Ch}_C , em função do estado de carga do UC em descarga. Para garantir que as baterias permaneçam em descarga exclusiva e que a haja condições de armazenamento da energia provinda da frenagem regenerativa em qualquer momento do ciclo, é mantido um terceiro UC em configuração Paralelo Ativo em relação à Cascata.

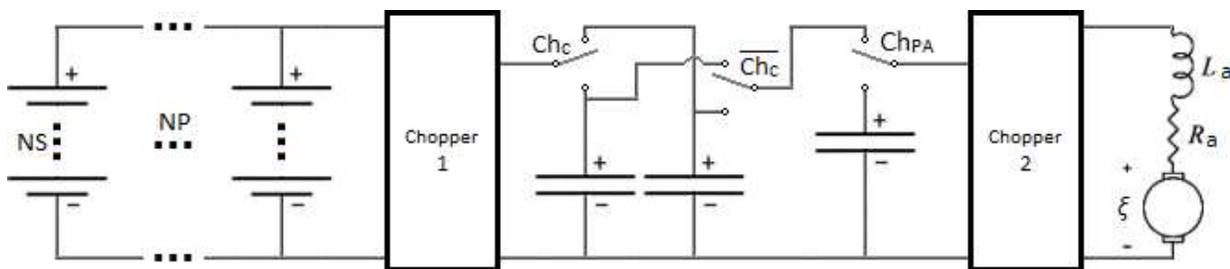


Figura 3.11: Configuração Cascata adotada

Nesta configuração, são necessários dois *choppers*. O *Chopper 1* é similar ao *chopper* mostrado na Figura 3.8, entretanto os indutores L_{smooth} e L_{elev} são trocados por $L_{smoothC}$ e L_{elevC} , respectivamente. Este *chopper* trabalha no modo de operação abaixador caso a tensão no capacitor em carga seja menor que a tensão das baterias, caso contrário, trabalha no modo elevador. Como não há recarga das baterias por meio dos UCs, o modo de operação em

regeneração não é utilizado. Já o *Chopper 2* trabalha é idêntico ao *chopper* apresentado na Figura 3.10.

A massa total de ultracapacitores (m_{cpTot}) é dada por:

$$m_{cpTot} = 2 * m_{cpC} + m_{cpPA} \quad (3.25)$$

E por fim, a massa total de hibridização é:

$$m_{hTot} = m_{bat} + 2 * m_{cpC} + m_{cpPA} \quad (3.26)$$

onde m_{cpC} é a massa de um dos ultracapacitores em cascata.

3.3 Simulação do Modelo Convencional

Primeiramente, as equações dinâmicas do modelo convencional, bem como as equações de resistência ao movimento, foram transcritas em álgebra de blocos em ambiente MATLAB/Simulink®, de modo a gerar a planta da simulação. A Figura 3.12 mostra o diagrama de blocos do MCI e a Figura 3.13 mostra o diagrama de blocos do restante do veículo.

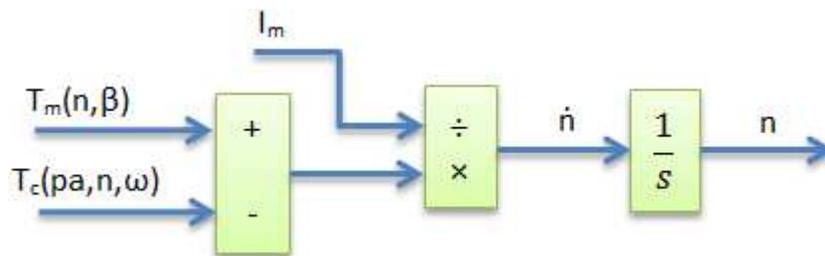


Figura 3.12: Diagrama de blocos do MCI

Para o equacionamento do torque da embreagem (T_c), atribuiu-se o contato entre disco e platô como atrito viscoso, sendo o coeficiente de amortecimento viscoso proporcional ao percentual de acoplamento (pa), além de uma rigidez, adicionada a partir de 98% de

acoplamento. Este modelo de torque na embreagem busca emular os fenômenos de escorregamento e enrijecimento da embreagem com verossimilhança compatível com a análise macroscópica da dinâmica longitudinal.

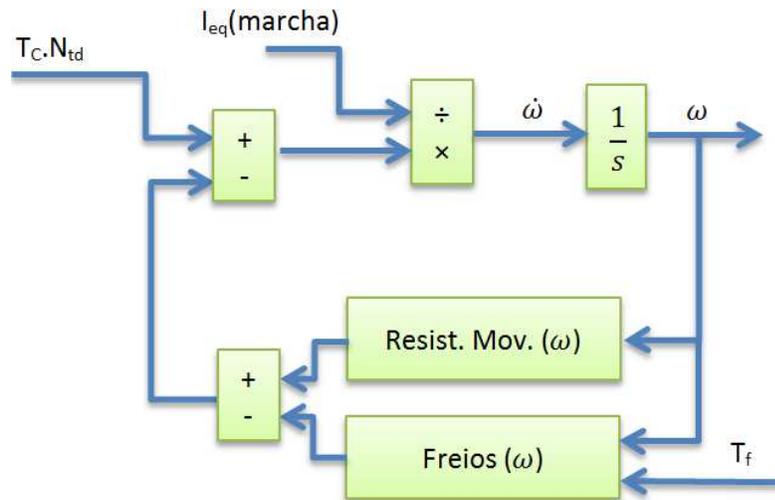


Figura 3.13: Diagrama de Blocos do Modelo Convencional.

Para gerar entradas de torque da planta do veículo convencional, um motorista foi emulado. Este motorista recebe a velocidade de objetivo do ciclo urbano da norma ABNT NBR 6601:2012 em função do tempo (V_{Obj}) e compara com a velocidade atual (V). Admitiu-se que o mesmo tem um ímpeto de anular a diferença entre estas velocidades em meio segundo, obtendo-se uma aceleração desejada. Resolvendo-se a dinâmica inversa, ou seja, multiplicando a aceleração desejada pela inércia equivalente atual do veículo e somando-se a este produto as resistências ao movimento atuais, obtém-se o torque instantâneo desejado pelo motorista (T_{Obj}), como exibido no diagrama de blocos da Figura 3.14.

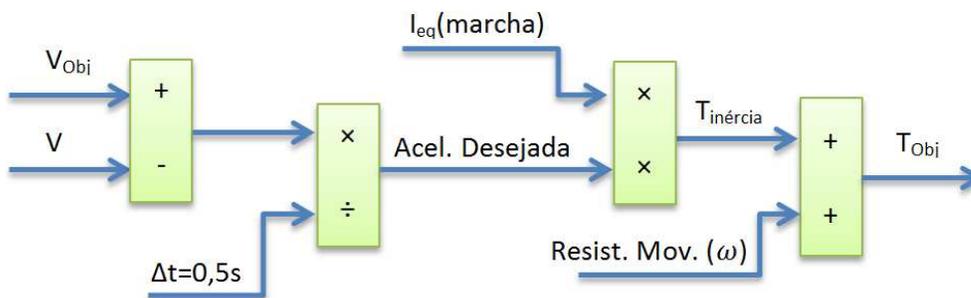


Figura 3.14: Diagrama de blocos para obtenção de T_{Obj}

Em seguida, T_{Obj} é distribuído entre o MCI e os freios ideais. Um mapa inverso do MCI (mapa direto exibido na Figura 3.15) recebe o torque desejado e retorna a porcentagem de abertura da borboleta (β) em função da rotação (n) e dos parâmetros máximos do MCI. Esta abertura de borboleta é então enviada a um mapa direto que retorna $T_m(\beta, n)$ à dinâmica do MCI exibida na Figura 3.12. Caso T_{Obj} seja negativo, o veículo deverá desempenhar uma frenagem com prioridade para o freio motor (T_m negativo), sendo que os valores que extrapolem os limites de frenagem do MCI são atribuídos a um freio ideal (T_f).

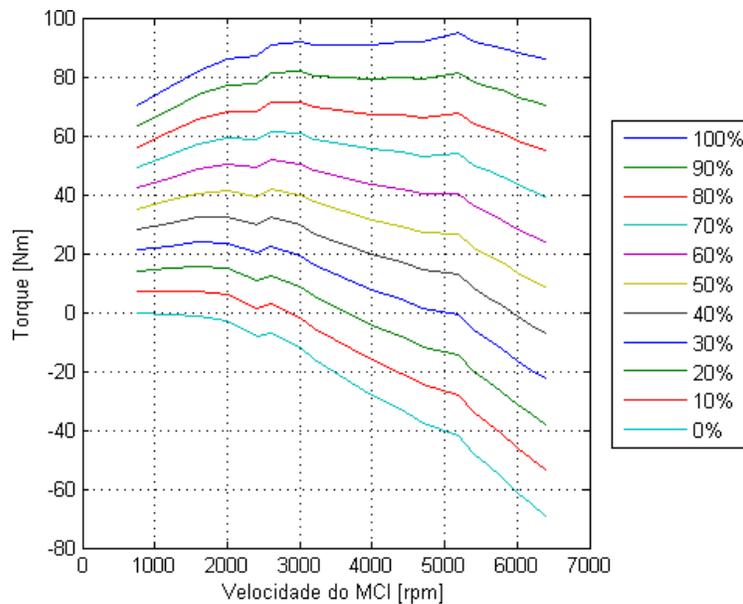


Figura 3.15: Mapa MCI para aberturas de borboleta de zero a 100% - adaptado de Eckert (2013)

A marcha escolhida, e conseqüente inércia equivalente do veículo, também dependem das velocidades de troca estipuladas pelo fabricante do motor. Para evitar mudanças indevidas de marcha devido à perda de velocidade durante o processo de troca, a diminuição das marchas é feita com o veículo 5[km/h] mais lento que as velocidades recomendadas de aumento de marcha, como pode ser visto na Figura 3.16. As mudanças de marcha, engate e desengate são feitas por uma lógica automatizada paralela à lógica que emula o motorista.

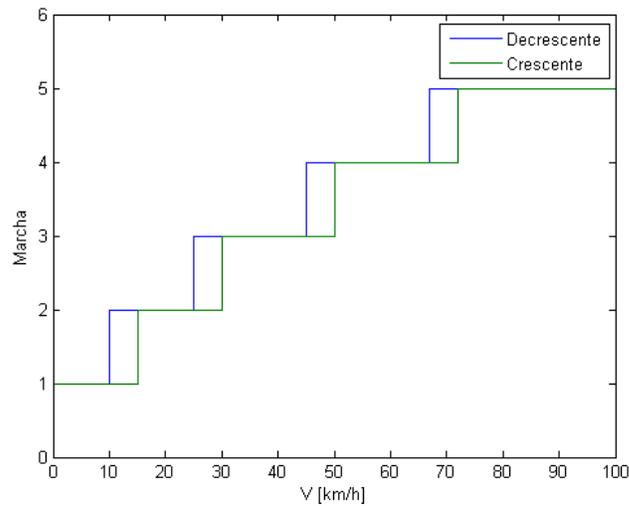


Figura 3.16: Perfil de Marchas recomendadas

O motorista conta com mais dois modos de operação auxiliares. Um modo de estacionamento, onde a abertura de borboleta segue para o mínimo, o câmbio assume a posição neutra e os freios de estacionamento são ativados. O outro é um modo de arranque, com abertura de borboleta constante e desligamento dos freios até que o veículo atinja velocidade suficiente para manutenção do funcionamento do motor totalmente acoplado com a transmissão.

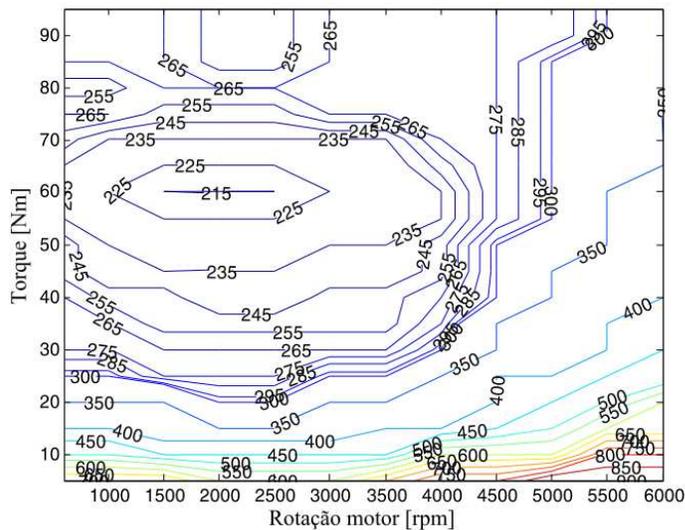


Figura 3.17: Mapa de consumo em g/kWh (CORREA, 2013)

O mapa de torque MCI previamente citado (Figura 3.15) é compatível com um motor 1.0l nacional comum. Já o mapa de consumo compatível com esta categoria de motor e está exibido

na Figura 3.17. O preço da gasolina considerado neste trabalho é o valor praticado nos postos de Campinas-SP em janeiro de 2014, indicado por Preço Do Combustível (2014), equivalente a R\$2,799 por litro.

A transmissão empregada pertence a um Palio Weekend analisado por HAIM, 2011, e os dados podem ser encontrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados da transmissão C510 (HAIM, 2011)

Elemento	Relação de Transmissão	Momento de Inércia [kgm ²]
1ª Marcha	4,273	1,791e-3
2ª Marcha	2,238	2,415e-3
3ª Marcha	1,520	3,421e-3
4ª Marcha	1,156	4,782e-3
5ª Marcha	0,919	6,661e-3
Diferencial	4,067	1,07E-03
Semieixos, rodas, pneus, cubos e freios	-----	1,724

Os pneus são 205/70 R15 e o raio teórico é (HAIM, 2011):

$$r = \frac{(15 \cdot \frac{25,4}{2} + 205 \cdot 0,70)}{1000} = 0,334[m] \quad (3.27)$$

Tabela 3.2: Demais parâmetros do Veículo Convencional

Parâmetro	Magnitude
Massa do Veículo m_v (carregado)	1206 [kg]
Geometria dos Pneus	205/70R15
Raio dos Pneus r_w	0,334 [m]
Pressão de Inflação dos Pneus p	30 [psi]
Constante dos Pneus K	0,8 (radial)
Área Frontal A	1,8 [m ²]
Coefficiente de Arrasto C_d	0.33
Massa Específica do Ar ρ	1,226 [kg/m ³]
Gravidade g	9,81 [m/s ²]
Inclinação da Pista α	0 [rad]
Velocidade do Vento V_w	0 [m/s]
Inércia do Motor a Combustão	1,58e-1 [kgm ²]

A massa do veículo carregado possui uma massa de 1206[kg]. A pressão de inflação dos pneus é 30psi, ou seja, 206843Pa. O modelo de Resistência à Rolagem é o proposto pela SAE apresentado por GENTA, 1997, revisado anteriormente. Quanto à Resistência Aerodinâmica, a área frontal do veículo é 1,8[m²] e seu coeficiente de arrasto é 0,33. Não são considerados aclives. A Tabela 3.2 reúne dados complementares utilizados nesta simulação.

3.4 Simulação dos Modelos Híbridos

Assim como no Modelo Convencional, as equações dinâmicas dos Modelos Híbridos e as equações de resistência ao movimento foram transcritas em álgebra de blocos em ambiente MATLAB/Simulink®, de modo a gerar a planta da simulação. Figura 3.18 mostra o diagrama de blocos do Modelo Híbrido.

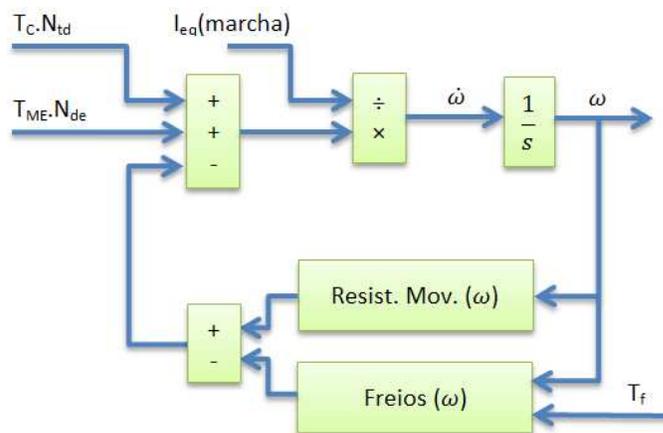


Figura 3.18: Diagrama de Blocos do Modelo Híbrido.

O trem de potência de combustão foi modelado de forma idêntica ao Modelo Convencional (ver Figura 3.12), sendo acrescentado o trem de potência elétrico em paralelo, cujo diagrama de blocos pode ser visto na Figura 3.19. O conteúdo dos blocos “Eq. Elétrica” e “Armazenadores” variam em função das associações adotadas, e estão descritos em suas respectivas seções.

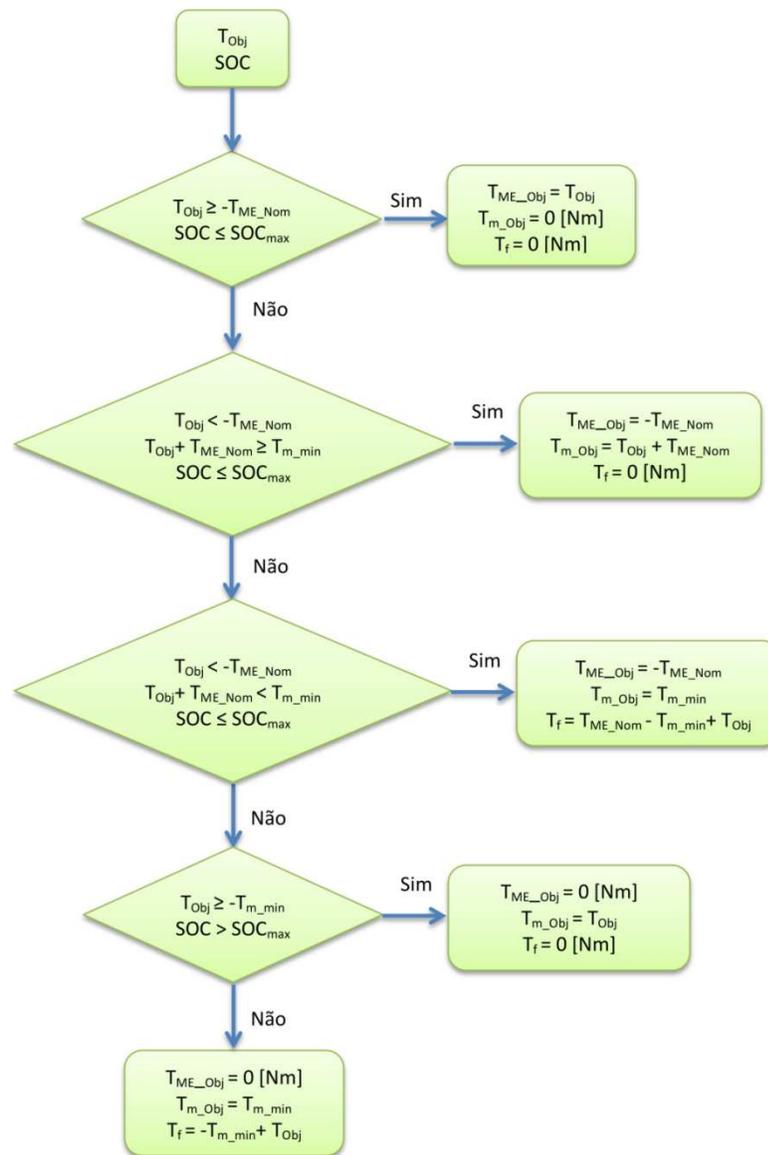


Figura 3.21. Distribuição de torque em frenagem

A tipologia de motor elétrico escolhida é de corrente contínua, ímãs permanentes (PM DC) e campo axial. Três modelos compatíveis foram encontrados com dados na Tabela 3.3, mas o LMC 200 127 é o selecionado por conter a melhor relação entre torque e velocidade nominal. Para definir a relação de transmissão para o diferencial para este motor elétrico assumiu-se que o carro está limitado a 120km/h. Dividiu-se o valor da rotação nas rodas referente a esta velocidade pela rotação nominal do motor e encontrou-se a relação de transmissão desejada. Assim, caso o veículo atinja sua velocidade limite, o ME estará em sua velocidade nominal. Obteve-se 2,72. Este valor é menor que a relação de transmissão do diferencial do trem de potência de combustão

e os torques transmitidos também são menores, mas optou-se por adotar a mesma inércia para ambos os diferenciais. Esta medida torna os resultados mais conservadores.

Tabela 3.3: Dados dos motores PM DC de campo axial (LMC, 2013; RMP, 2013; HEINZMANN, 2013 e MOTENERGY, 2013)

	Kt [Nm/A]	Ke [Vs/rad]	La [μH]	Ra [mΩ]	Inércia Eixo [kgm ²]	Massa [kg]	Potência de Pico [kW]	Corrente de Pico [A]	Potência Nominal [kW]	Velocidade Nominal [rpm]	Tensão Nominal [V]	Corrente Nominal [A]	Torque Nominal [Nm]
LMC 200 127	0,15	0,15	23	22,5	0,0236	11	16,08	400	8,55	2592	48	215	32,25
PMG 132	0,19	0,19	19	25	0,025	11,2	10	210	4,8	2300	48	110	20
ME0708	0,13	0,13	60	10	0,018	12,7	15	300	4,8	5000	48	100	13

Quanto aos armazenadores, foram escolhidas as células de Li-íon PL-383562 (dados na Tabela 3.4) da AA Portable Power Corp e ultracapacitores NESSCAP de 48V (dados na Tabela 3.5). Quanto aos equacionamentos, foram desprezadas as perdas por auto descarregamento por serem pouco significantes para o comportamento que se deseja observar, no qual não considera-se tempo de estocagem.

Tabela 3.4: Dados da célula PL-383562 (BATTERYSPACE, 2003)

Capacidade [mAh]	Tensão 100% SOC [V]	Tensão de Corte [V]	Corrente de Carga Máxima [mA]	Corrente de descarga Máxima [mA]	Peso [kg]
880	4,2	3,0	1275	1700	0,018

Tabela 3.5: Dados dos ultracapacitores (NESSCAP, 2010)

Capacitância [F]	Resistência Interna [mΩ]	Corrente Máxima [A]	Energia Específica [Wh/kg]	Peso Nominal [kg]
36	13	580	1,38	8,5
66	10,4	920	2,17	10
88	8,9	1160	2,51	11,5
111	7,1	1460	2,91	12,5
166	5,6	2030	3,63	15

O circuito equivalente a uma célula de bateria concebido por CHEN, 2006, foi equacionado por KNAUFF, 2007, da seguinte forma:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{V}_{SOC} \\ \dot{V}_{TS} \\ \dot{V}_{TL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(R_{TS}C_{TS})^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & -(R_{TL}C_{TL})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{SOC} \\ V_{TS} \\ V_{TL} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -C_{CAP}^{-1} \\ -C_{TS}^{-1} \\ -C_{TL}^{-1} \end{bmatrix} I_{BATT} \\ V_{BATT} = V_{OC}(V_{SOC}) + V_{TS} + V_{TL} + R_S I_{BATT} \end{cases} \quad (3.28)$$

onde: V_{SOC} é a tensão no capacitor “ $C_{Capacity}$ ”, V_{TS} é a tensão no capacitor “ $C_{Transient_S}$ ”, V_{TL} é a tensão no capacitor “ $C_{Transient_L}$ ”, I_{BATT} é a corrente que atravessa a célula, R_{TS} é a resistência do resistor “ $R_{Transient_S}$ ”, R_{TL} é a resistência do resistor “ $R_{Transient_L}$ ”, C_{CAP} é a capacitância do capacitor “ $C_{Capacity}$ ”, C_{TS} é a capacitância do capacitor “ $C_{Transient_S}$ ”, C_{TL} é a capacitância do capacitor “ $C_{Transient_L}$ ”, V_{OC} é a tensão na fonte de tensão do circuito equivalente e V_{BATT} é a tensão nos terminais da célula.

Os ultracapacitores são equacionados como capacitores ideais em série com suas respectivas resistências internas (EHSANI, et al, 2010):

$$V_C = -iR_C - \int \frac{i}{C} \quad (3.29)$$

onde: i é a corrente no ultra capacitor, R_C é a resistência interna do ultra capacitor, C é a capacitância do capacitor ideal e V_C é a tensão no capacitor ideal.

Quanto ao custo da energia elétrica, tem-se que conta de energia elétrica é composta pela Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e pela Tarifa de Energia Elétrica (TE), além de impostos estaduais (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços - ICMS) e federais (Programa de Integração Social - PIS - e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social - COFINS), por fim, o município pode arbitrar dobre a cobrança da Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública (CIP) (CPFL, 2014 a).

Tanto a TUSD quanto a TE são cobradas em função do tipo do cliente. Para residências, é feita a distinção entre consumidos Normal, consumidor de Baixa Renda e consumidor Rural (CPFL, 2014 b), como observado na Tabela 3.6. Este estudo aplica os valores para o consumidor Normal.

Tabela 3.6: Valores de TUSD e TE para consumidores residenciais (CPFL, 2014 b)

Grupo Residencial	TUSD (R\$/MWh)	TE (R\$/MWh)
Normal	104,77	167,35
Baixa Renda de 0 a 30kWh	34,31	58,57
Baixa Renda de 31 a 100kWh	58,82	100,41
Baixa Renda de 101 a 220kWh	88,24	150,62
Baixa Renda > 220kWh	98,04	167,35
Rural	59,72	95,39

Os impostos são cobrados sobre a soma da TUSD e TE. Na data da consulta (janeiro de 2014), o PIS estava fixado em 0,86% e o COFINS, em 3,97%. Já o ICMS aplicado é uma função do grupo de consumidor e da faixa de consumo, como é o demonstrado na Tabela 3.7:

Tabela 3.7: Valores de ICMS para o Grupo Residencial (CPFL, 2014a)

Faixa de consumo mensal (kWh)	ICMS
0 a 90	Isento
91 a 200	12%
Acima de 200	25%

Neste trabalho, é assumido um consumo mensal superior a 200kWh e a CIP é ignorada por não ser uma taxa obrigatória em todos os municípios e por não ser uma função do consumo total do cliente. Assim, o valor final adotado para cada MWh consumido (TVE) é:

$$TVE = (TUSD + TE) * (1 + PIS + COFINS + ICMS) \quad (3.30)$$

$$TVE = (104,77 + 167,35) * \left(1 + \frac{0,86+3,97+25}{100}\right) = 353,29 \left[\frac{R\$}{MWh} \right] \quad (3.31)$$

Por fim, quanto à otimização por meio de Algoritmo Genético, a função de *Fitness*, exibida pela Equação 3.32, é composta pelo produto de sete subfunções de modo a avaliar sete parâmetros de desempenho, como mostrado na Figura 3.22.

$$Fitness = f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6 * f_7 \quad (3.32)$$

A primeira subfunção é f_1 , que avalia o torque exigido do ME. A magnitude dos torques mínimos e máximos não deve ultrapassar o valor do torque nominal para manter a longevidade e a segurança do ME e/ou não onerar o sistema de refrigeração do veículo. Para cada quantidade de MEs empregada nas simulações, esta curva é atualizada, com o pico positivo localizado em $NME * T_{ME_Nom}$ e como pico negativo localizado em $-NME * T_{ME_Nom}$. O valor final desta função é o valor mínimo entre as curvas do gráfico de f_1 . A subfunção f_2 trabalha de forma similar. As correntes aplicadas em uma célula não podem ser maiores que a corrente máxima de descarga ou maiores (em magnitude) que a corrente mínima de recarga, sendo que valores dentro do intervalo permitido atribuem à f_2 valor unitário, fora do intervalo, valor nulo.

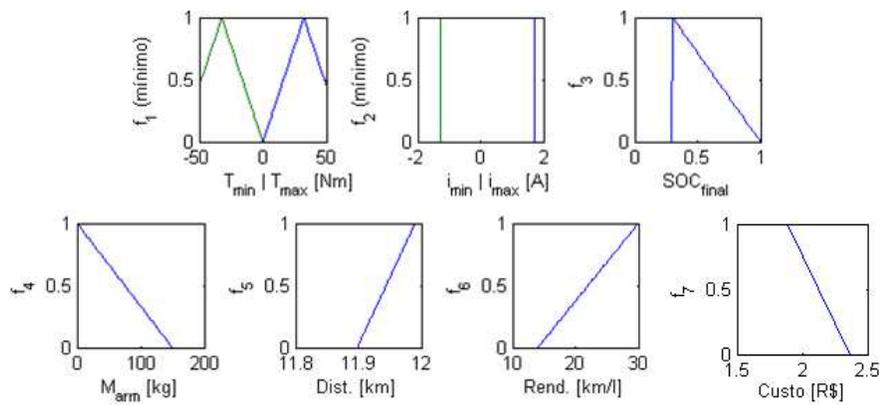


Figura 3.22: Subfunções de *Fitness*

A subfunção f_3 é referente ao estado de carga final das baterias em cada simulação. A intenção é que ao fim da simulação, as células tenham se descarregado até um limite mínimo de estado de carga de 30%. Assim, para valores menores que 30% de SOC, f_3 será anulada, para valores iguais a 30% f_3 receberá valor máximo unitário, que decai linearmente até 0, caso o estado de carga final seja de 100%.

A massa de armazenadores de energia elétrica deve poder variar entre 8,5 (com o uso de pelo menos um UC de 36F) a 150kg, sendo f_4 uma função linear com valor unitário para uma massa nula, mas valor nulo para uma massa de 150kg. A distância total percorrida pelo veículo é avaliada pela subfunção linear f_5 , que recebe valor nulo para uma distância igual à distância percorrida pelo veículo convencional (11898m, como é descrito na sequência do texto) e unitário para uma distância igual à distância total do ciclo normatizado (11990m). Admite-se um

sobredesempenho que faça com que o veículo percorra até 12020m, sendo que valores superiores anulam f_5 .

As duas últimas subfunções, f_6 e f_7 , são funções do resultado de simulações baseadas em armazenadores e motores ideais, que serão apresentadas a diante no texto. A subfunção, f_6 , avalia o rendimento do veículo híbrido, recebendo valor nulo para um rendimento mínimo admitido de 14km/l, crescendo linearmente assumindo um valor unitário para um rendimento máximo almejado obtido em simulações ideais, em função do número de motores. Já a subfunção f_7 avalia o custo total da energia (combustível e eletricidade) utilizada para o veículo percorrer o ciclo. Recebe valor nulo para gastos maiores que o desempenhado pela simulação do veículo convencional e cresce até atingir o valor unitário a medida que o custo se aproxima do valor obtido nas simulações ideais, em função do número de motores elétricos empregados.

Os cromossomos utilizados em cada otimização têm seus genes variados em função dos parâmetros particulares a serem otimizados. Neste trabalho, todos os processos contam com uma população de 10 membros. A população inicial é arbitrada e pode variar dependendo do escopo de cada simulação. Esta população é avaliada frente à função de *Fitness* e é gerado o primeiro ranking. O membro com melhor *Fitness* recebe 10 pontos, seguindo-se sucessivamente até o ultimo, que recebe 1 ponto. Um sorteio baseado em números gerados aleatoriamente seleciona dois membros da população para reprodução, sendo as chances de um membro ser escolhido proporcional ao número de pontos.

Cada gene de cada progenitor tem 50% de chances de ser herdado pelo descendente. Uma vez herdado, cada gene tem 30% de chances de sofrer uma mutação que pode alterar seu valor em até $\pm 30\%$. Ao fim desta primeira etapa de combinação e mutação, para promover uma maior variabilidade caso os 3 primeiros genes do descendente coincidam com os 3 primeiros genes de um dos progenitores, todos os genes do descendentes podem ser mudados para um valor $\pm 30\%$ do original.

Em seguida, o descendente tem seu desempenho avaliado frente à função de *Fitness* e é agregado à população, enquanto o indivíduo de pior *Fitness* é excluído, mantendo a população com 10 membros. Um novo ranking é feito e o algoritmo reinicia-se a partir da classificação para reprodução. O algoritmo é finalizado quando a razão entre o desvio padrão do *Fitness* da população final e o *Fitness* do indivíduo melhor colocado no ranking final for menor ou igual a 0,001.

3.4.1 Simulação do Modelo de VEH Paralelo Semiativo

Para o modelo Paralelo Semiativo, os parâmetros de otimização adotados são o número de células em série (NS) e o número de células em paralelo (NP) das baterias, além da capacitância do capacitor empregado (C) e das indutâncias do indutor de suavização (L_{smooth}) e do indutor de elevação (L_{elev}). Estes parâmetros são os genes do cromossomo utilizado pelo algoritmo genético.

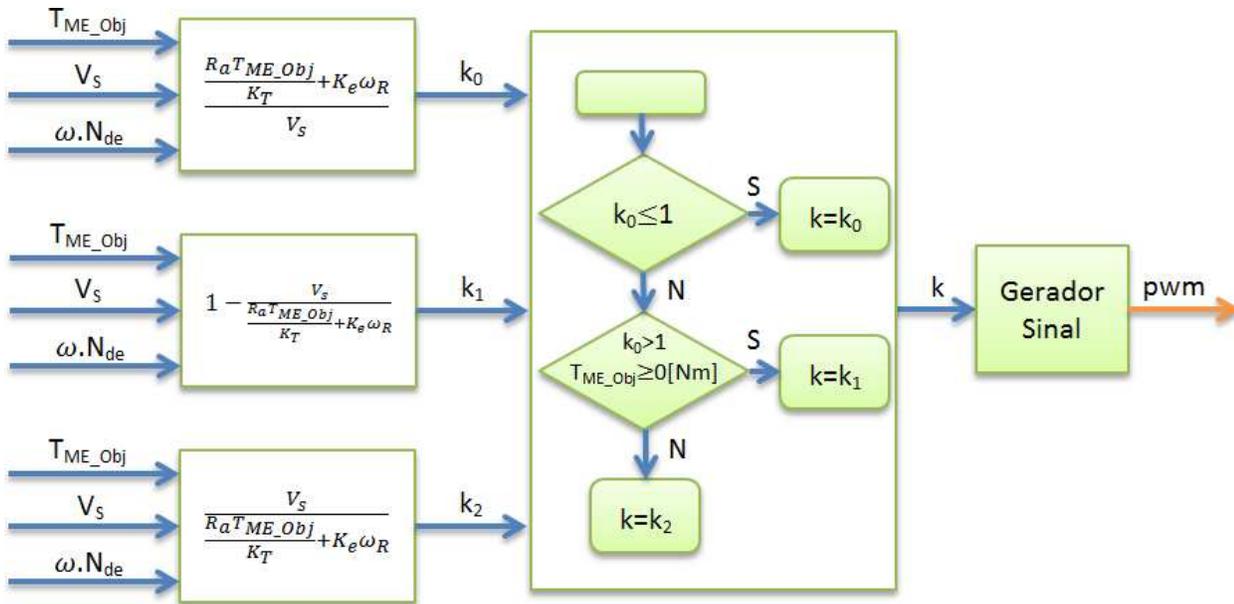


Figura 3.23: Composição lógica dos *choppers* de tração

Nesta simulação, como visto anteriormente, o *chopper* pode ter 3 modos de operação, um abaixador, um elevador e um abaixador para regeneração em altas velocidades. Primeiramente é calculada a razão cíclica para o modo de operação abaixador (k_0). Caso $k_0 \leq 1$, o gerador de sinal PWM adota a razão cíclica $k = k_0$. Caso $k_0 > 1$, o torque de objetivo do motor elétrico é observado: se $T_{ME_Obj} \geq 0[Nm]$, tem-se modo de operação elevador com razão cíclica k_1 e o gerador PWM adota a razão cíclica $k = k_1$, caso contrário tem-se modo de operação em regeneração para altas velocidades com razão cíclica k_2 e o gerador PWM adota a razão cíclica $k = k_2$. Estas lógicas estão ilustradas na Figura 3.23.

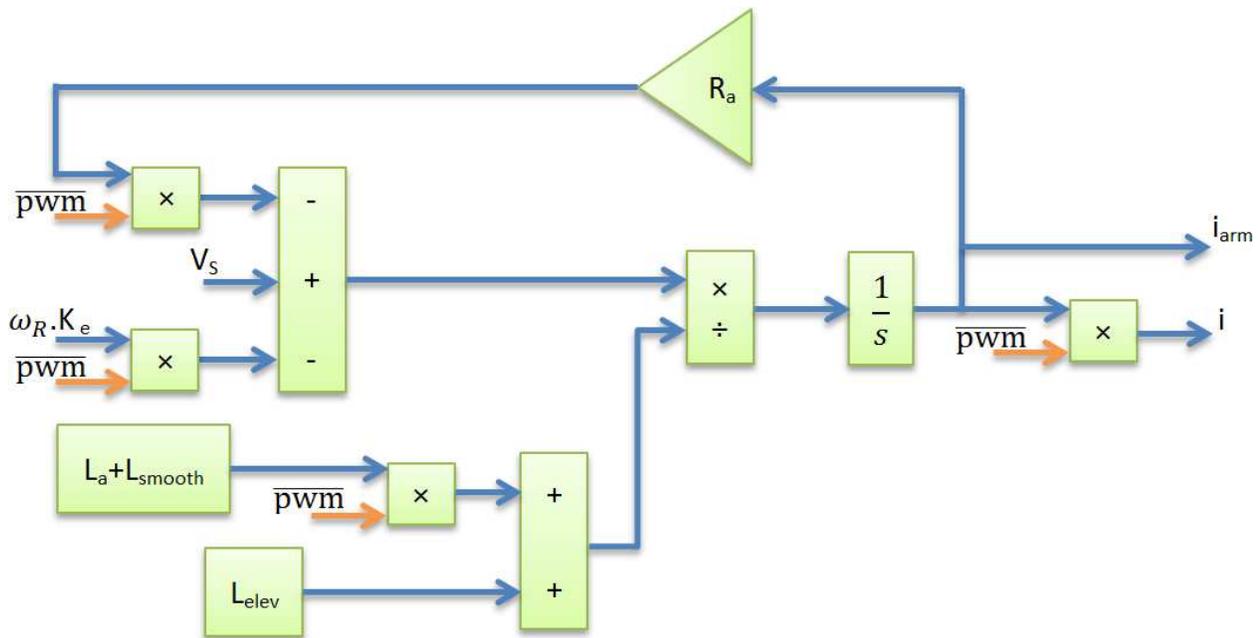


Figura 3.25: Equacionamento elétrico no modo de operação elevador

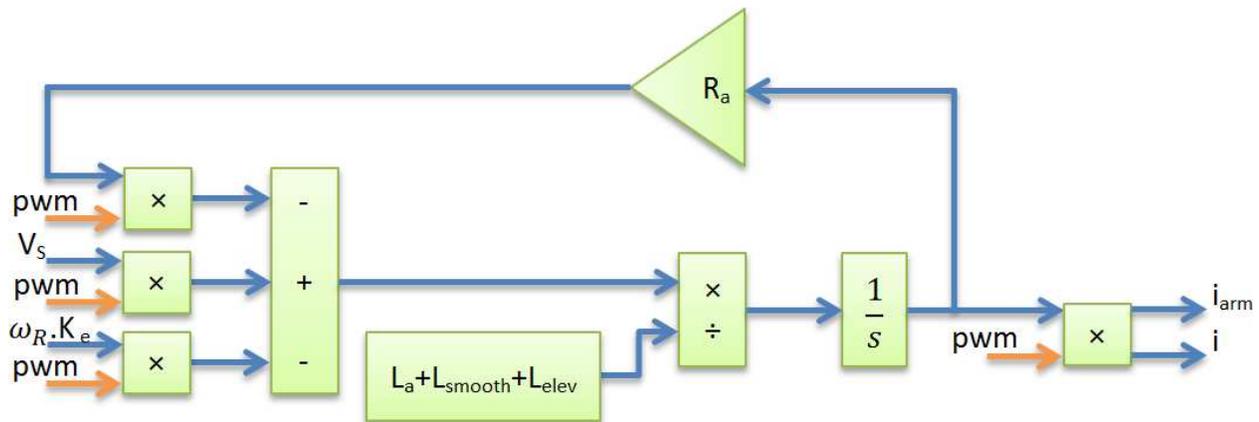


Figura 3.26: Equacionamento elétrico no modo de regeneração em altas velocidades

Estando a corrente dos armazenadores definida pelas equações elétricas, deve-se calcular a tensão na bateria (V_{bat}) e a corrente do UC. Para a associação Paralelo Semiativo, a corrente na bateria (i_{bat}) será a diferença entre a corrente total dos armazenadores e a corrente de descarga do UC (i_{UC}). A corrente da bateria é então dividida pelo número de células em paralelo e a equação dinâmica de uma célula é aplicada como revisto anteriormente, obtendo-se a tensão de cada célula que, multiplicada pelo número de células sem série resulta na tensão da bateria (V_{bat}). Nesta configuração, a tensão da bateria é a mesma do ultracapacitor, cuja equação dinâmica

retorna sua corrente de descarga (i_{UC}), e o laço dinâmico é realimentado. A Figura 3.27 mostra esta interação.

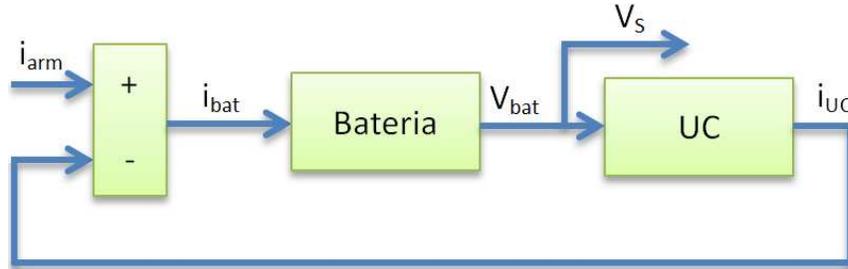


Figura 3.27: Armazenadores na configuração Paralelo Semiativo

3.4.2 Simulação do Modelo de VEH Paralelo Ativo

Para o modelo Paralelo Ativo, os parâmetros de otimização adotados são o número de células em série (NS), o número de células em paralelo (NP) das baterias, a capacitância do capacitor em Paralelo Semiativo (C), a capacitância do capacitor em Paralelo Ativo (C_{PA}) e das indutâncias do indutor de suavização (L_{smooth}), do indutor de elevação da configuração Paralelo Semiativo (L_{elev}) e do indutor de elevação da configuração Paralelo Ativo (L_{elevPA}). Estes parâmetros são os genes do cromossomo utilizado pelo algoritmo genético.

Os modos de operação do *chopper* desta simulação são idênticos aos apresentados na Simulação Paralelo Semiativo sendo a lógica apresentada na Figura 3.23 válida para a Simulação Paralelo Ativo. As equações elétricas representadas nas Figuras 3.24, 3.25 e 3.26, também são válidas, com a ressalva que o indutor L_{elev} é comutado para o indutor L_{elevPA} caso as condições de operação do mesmo estejam satisfeitas.

Tais condições se referem ao torque aplicado sobre os MEs e o estado de carga do capacitor Paralelo Ativo. Se $T_{ME_Obj} < 0[Nm]$ e a tensão no capacitor Paralelo Ativo for menor que 48V (estado de carga menor que 100%), o capacitor Paralelo Ativo estará conectado à carga em regeneração e L_{elevPA} entra em operação, caso contrário, os armazenadores Paralelo Semiativo e L_{elev} permanecem em operação. Por outro lado, se $T_{ME_Obj} \geq 0[Nm]$ e a tensão no capacitor Paralelo Ativo for maior que 24V (estado de carga maior que 25%) o capacitor Paralelo

Ativo estará conectado à carga em potência e L_{elevPA} entra em operação, caso contrário, novamente os armazenadores Paralelo Semiativo e L_{elev} permanecem em operação. A dinâmica do UC em Paralelo Ativo deve ser adicionada aos armazenadores, representados na Figura 3.28.

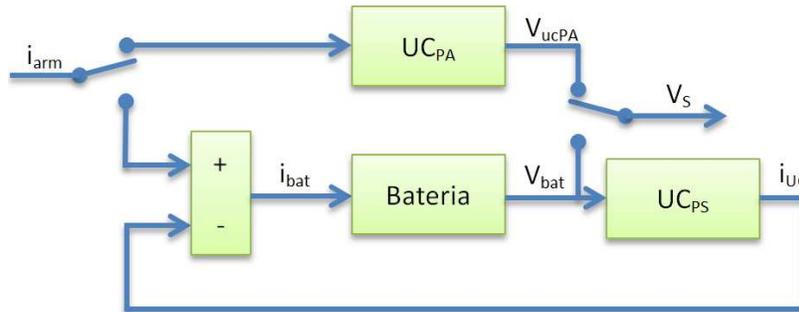


Figura 3.28: Armazenadores na configuração Paralelo Ativo

3.4.3 Simulação do Modelo de VEH Cascata

Para o modelo Cascata, os parâmetros de otimização adotados são o número de células em série (NS), o número de células em paralelo (NP) das baterias, a capacitância dos capacitores em Cascata (C_C), a capacitância do capacitor em Paralelo Ativo (C_{PA}) e das indutâncias do indutor de suavização (L_{smooth}), do indutor de elevação da configuração Cascata (L_{elev}), do indutor de elevação da configuração Paralelo Ativo (L_{elevPA}), do indutor de suavização do armazenador cascata ($L_{smoothC}$) e do indutor de elevador no armazenador cascata (L_{elevC}). Estes parâmetros são os genes do cromossomo utilizado pelo algoritmo genético.

Os dois capacitores em cascata alternam-se nas tarefas de descarga (tração) e carga (junto à bateria). Caso o capacitor de descarga assuma uma tensão (V_{UC_D}) menor que 24V (estado de carga menor que 25%) ocorre a permutação deste com o capacitor de carga, independentemente da tensão do mesmo (V_{UC_C}). O terceiro capacitor empregado é associado em Paralelo Ativo e possui as mesmas condições de operação apresentadas na Simulação Paralelo Ativo, permutando com o capacitor de descarga da cascata na função de fornecer de energia para tração, como visto na Figura 3.29.

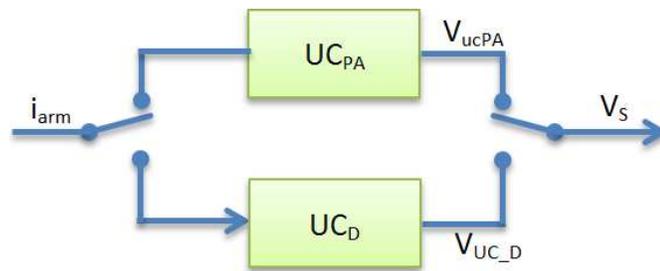


Figura 3.29: Ultracapacitores de tração.

A lógica de operação do *chopper* de tração (nesta configuração, *Chopper 2*), bem como a dinâmica elétrica de tração são os mesmos empregados na Simulação Paralelo Ativo. Entretanto os armazenadores são substancialmente diferentes.

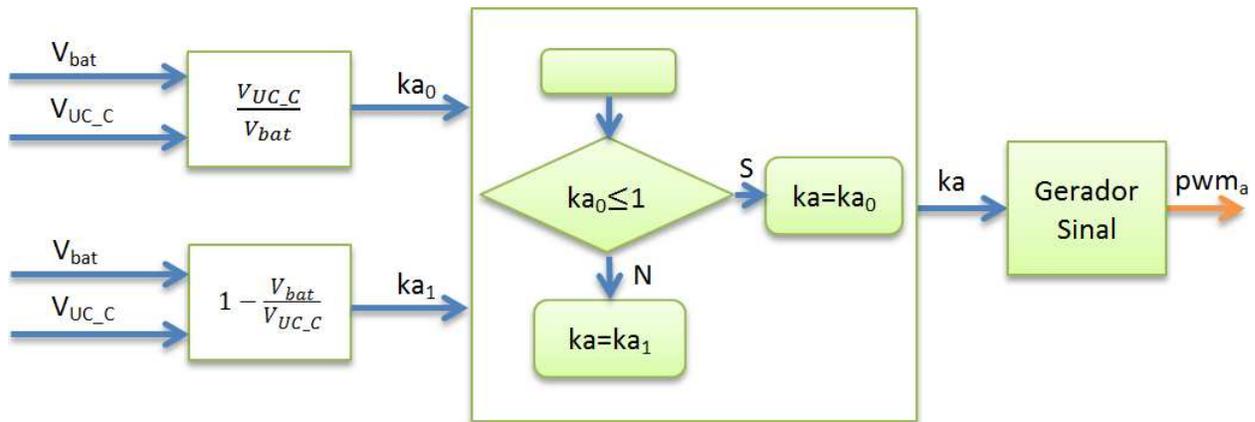


Figura 3.30: Composição lógica dos *choppers* dos armazenadores cascata

Entre os armazenadores, está instalado um novo *chopper* (*Chopper 1*), responsável por abaixar ou elevar a tensão entre a bateria e o UC em Cascata em modo de carga. Inicialmente, é calculada a razão cíclica deste *chopper* para o modo de operação abaixador (ka_0). Caso $ka_0 \leq 1$, o gerador de sinal PWM adota a razão cíclica $ka = ka_0$. Caso contrário, é necessário que o *Chopper 1* entre em modo de trabalho elevador (ka_1), onde a tensão do UC em Cascata em modo de carga (V_{uc_c}) é maior que a tensão da bateria, e o gerador de sinal PWM adota a razão cíclica $ka = ka_1$. Estas lógicas estão ilustradas na Figura 3.30.

Em modo de operação abaixador ($ka = ka_0$), a tensão sobre o indutor de suavização é pulsada pelo chaveamento do *Chopper 1*, emulando a interrupção do circuito, como ocorre em um *chopper* abaixador simples. O diagrama de blocos resultante é exibido na Figura 3.31.

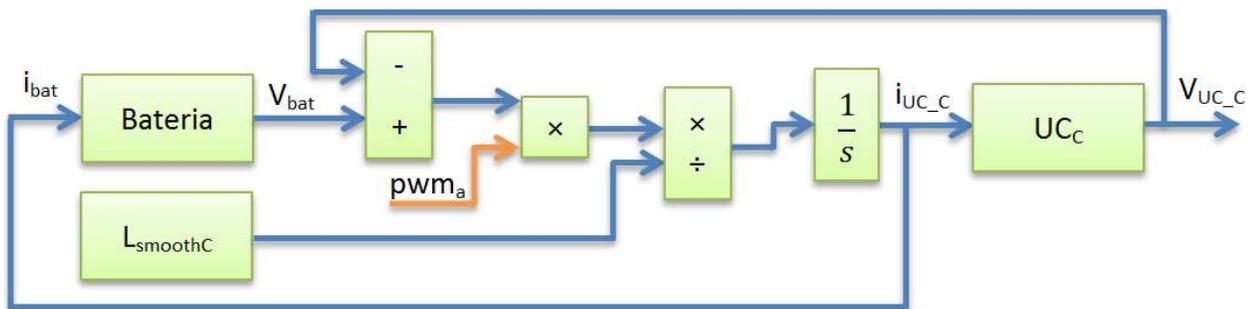


Figura 3.31: Equacionamento dos armazenadores cascata no modo de operação abaixador

Já no modo de operação elevador, a corrente na bateria permanece contínua. Enquanto o sinal do PWM dos armazenadores (PWM_a) é logicamente verdadeiro (valor 1), Ch_1 fechada e Ch_2 aberta, tem-se apenas o indutor de elevação no equacionamento elétrico, excluindo-se o ultracapacitor de carga do equacionamento. Já quando o PWM_a é logicamente verdadeiro (valor 0), Ch_1 aberta e Ch_2 fechada, inclui-se todo o sistema na descarga da corrente. Para obter este efeito, é empregado o valor lógico inverso do PWM_a , como observado na Figura 3.32.

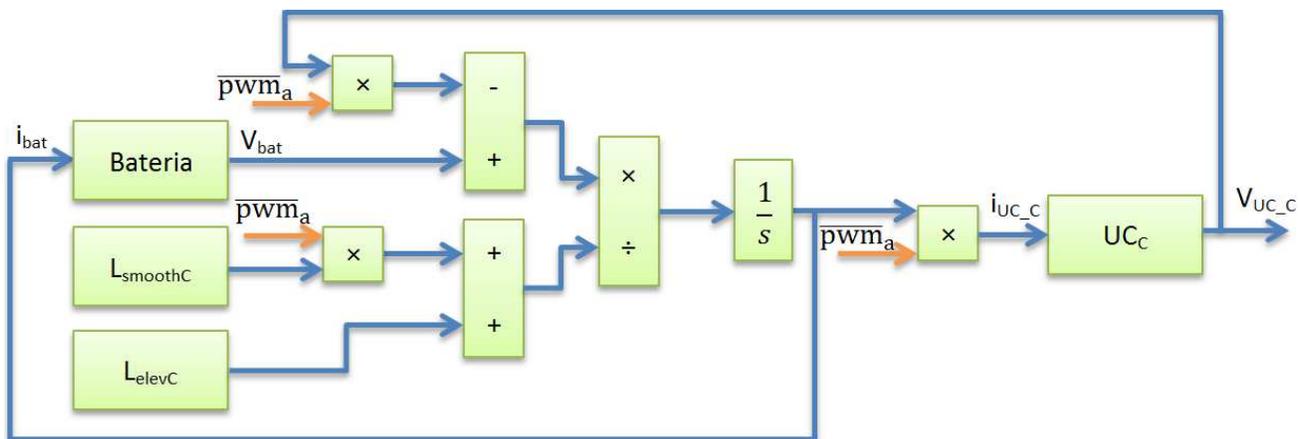


Figura 3.32: Equacionamento dos armazenadores cascata no modo de operação elevador

4 RESULTADOS

4.1 Resultados do Modelo Convencional

O desempenho obtido pela simulação com configuração convencional (apenas com o trem de potência de combustão) atende satisfatoriamente ao perfil de velocidades da norma, como pode ser observado na Figura 4.1. É possível notar na região de pico de velocidades do ciclo (entre 200 e 300 segundos) a maior dificuldade do veículo simulado seguir as velocidades de objetivo da norma. Isso é devido à falta de potência do veículo para seguir o ciclo e, com a inserção de motores elétricos esta deficiência é abrandada, como é mostrado na sequência do texto.

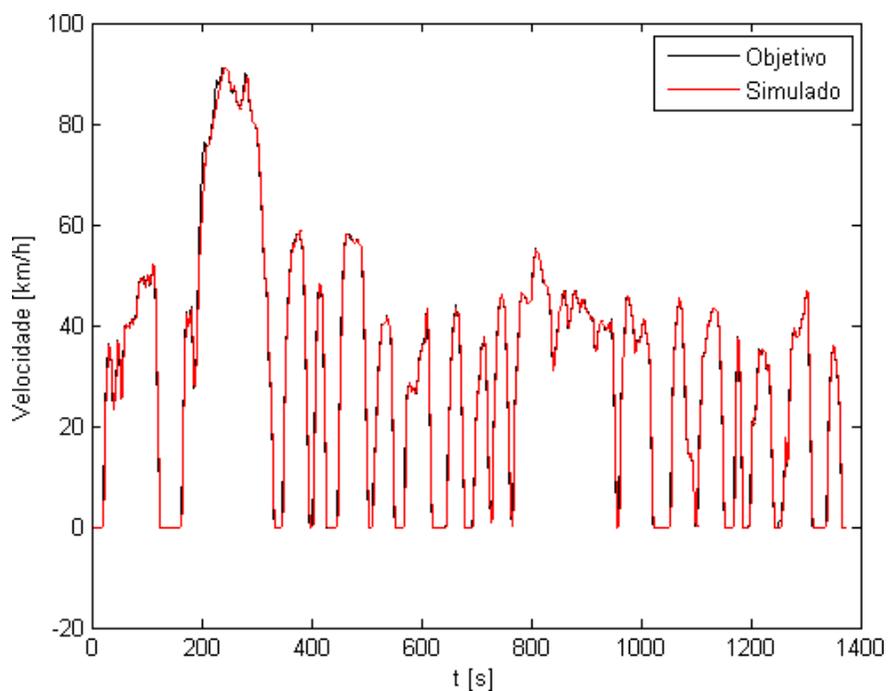


Figura 4.1: Perfil de velocidades da norma e perfil obtido pela simulação convencional

Com relação à distância total percorrida, o veículo convencional, segundo a simulação, percorreria 11898 metros, 92 metros a menos o que o previsto pela norma (11990 m), um déficit

de 0,7%. Isto está fortemente correlacionado com a deficiência de potência do veículo. O gráfico com a distância percorrida por este veículo está apresentado na Figura 4.2.

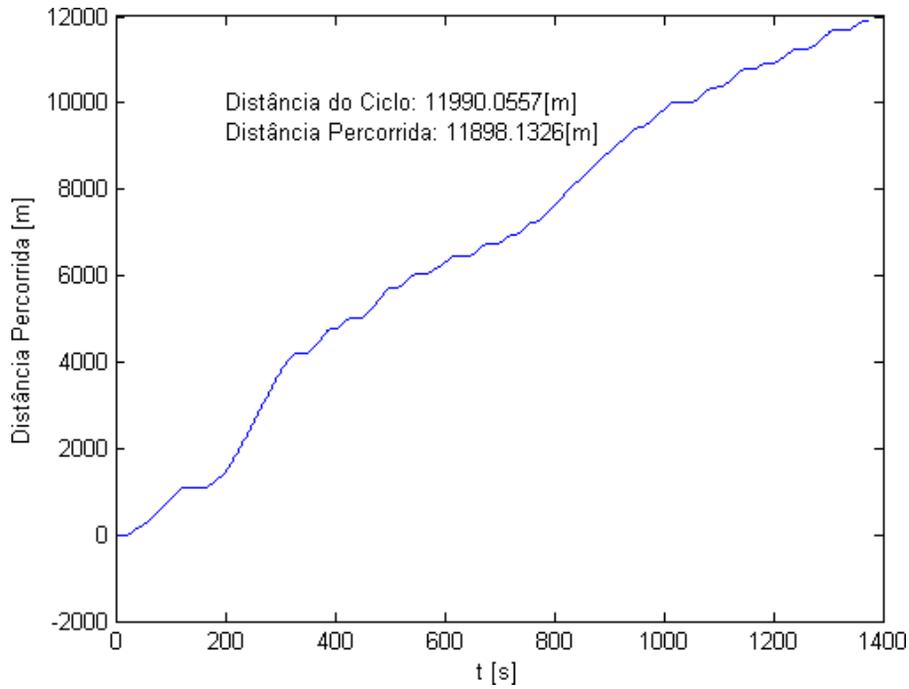


Figura 4.2: Distância percorrida pelo veículo convencional simulado

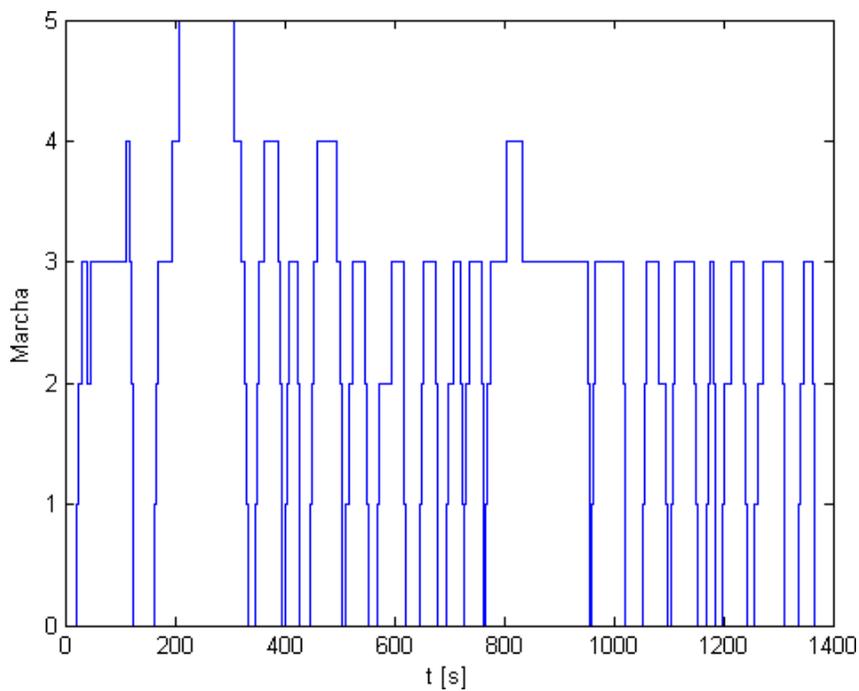


Figura 4.3: Perfil das marchas utilizadas durante a simulação convencional

Ao longo do trajeto simulado foram executadas diversas trocas de marcha, cujo perfil em função do tempo está na Figura 4.3. Tal perfil tem um formato sequencial e gradativo, facilmente correlacionável com o perfil de velocidades presente na Figura 4.1, indicando um bom funcionamento da lógica de automatização da troca de marchas.

Para percorrer o ciclo, a simulação indica um consumo de 0,8465 litro de gasolina tipo C (a um custo de R\$2,799 por litro), totalizando um gasto de R\$2,37. Considerando a distância total percorrida, o veículo apresenta um rendimento médio de 14,06 km/l. O consumo instantâneo ao longo do ciclo está representado na Figura 4.4.

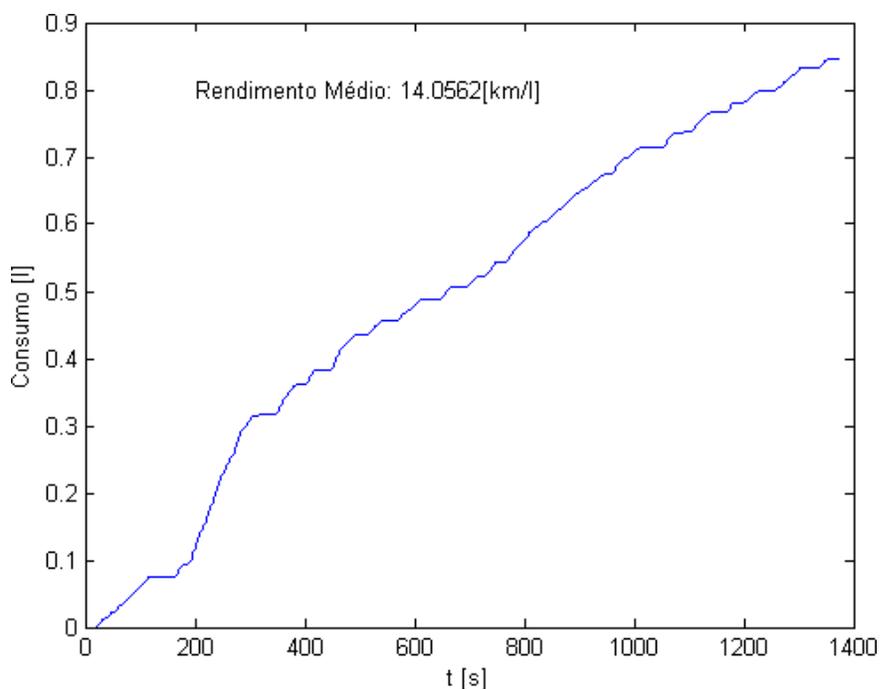


Figura 4.4: Consumo de combustível da simulação do veículo convencional

4.2 Resultados dos Modelos Híbridos Elétricos

Como forma de delimitar os desempenhos esperados das configurações híbridas estudadas neste trabalho, foram previamente executadas simulações com armazenadores e motores elétricos ideais, negligenciado suas equações dinâmicas, com a única restrição referente ao torque nominal

dos motores elétricos, mantido nos valores do ME adotado (LMC 200 127). A lógica empregada para distribuição de torque desta versão ideal é a mesma das outras versões híbridas, exibidas nas Figuras 3.20 e 3.21, considerando o estado de carga dos armazenadores sempre favorável.

Como resultado, tem-se a diminuição do consumo de combustível com o aumento do número de motores elétricos utilizados (Figura 4.5), logo, o rendimento de combustível aumenta (Figura 4.6), assim como o consumo elétrico (Figura 4.7).

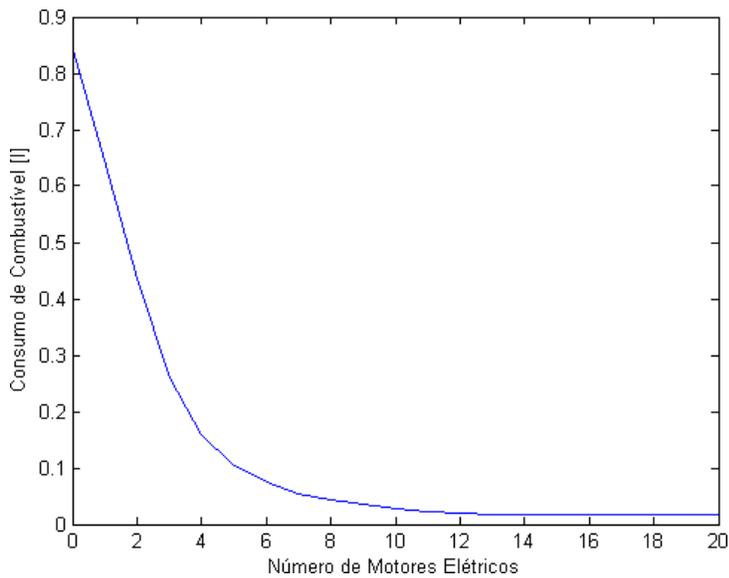


Figura 4.5: Consumo de combustível de um VEH ideal em função do número de MEs

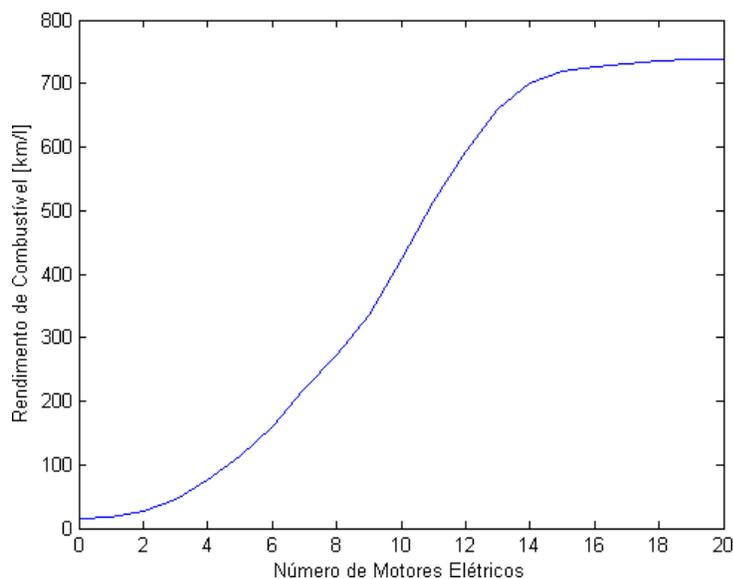


Figura 4.6: Rendimento de combustível de um VEH ideal em função do número de MEs

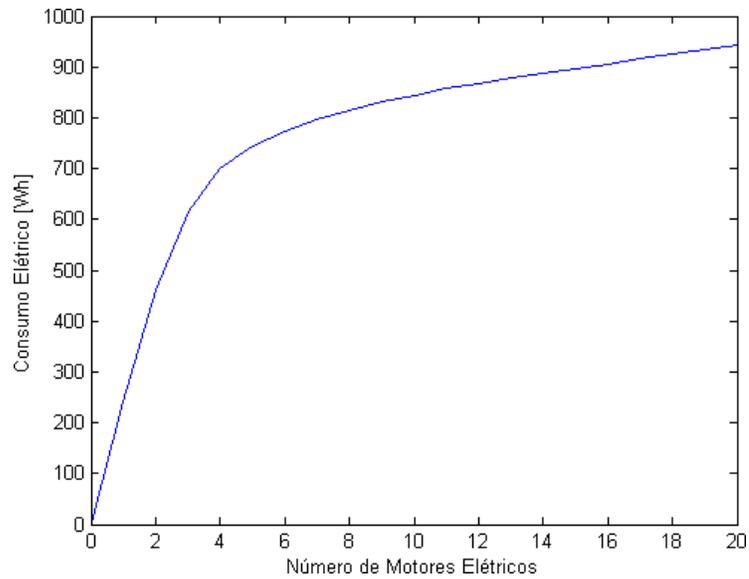


Figura 4.7: Consumo elétrico de um VEH ideal em função do número de MEs

A diminuição do consumo de combustível leva a diminuição do custo total para percorrer o ciclo, uma vez que a energia elétrica complementar possui um custo compensador. Os ganhos econômicos mais drásticos ocorrem com o uso de até 6 MEs, estabilizando-se com o emprego de mais de 10 MEs. Isto pode ser verificado por meio do gráfico de custo em função do número de motores elétricos da Figura 4.8.

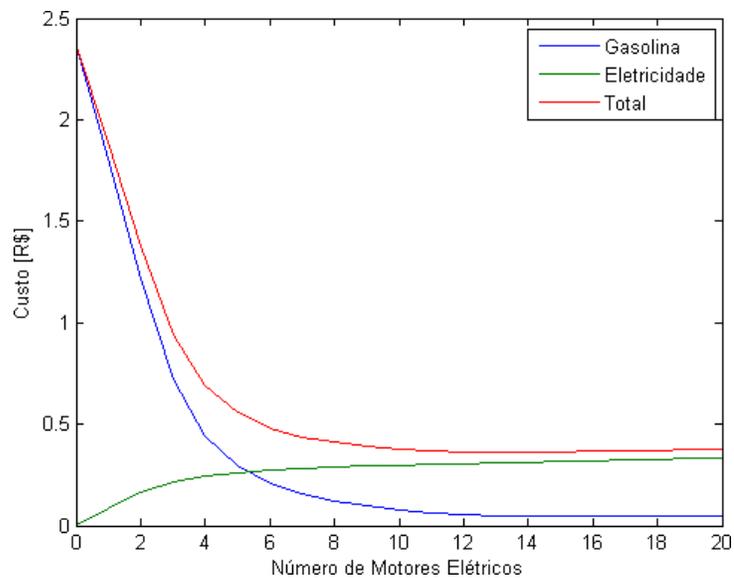


Figura 4.8: Custo demandado pelo VEH ideal para percorrer um ciclo em função do número de MEs

4.2.1 Resultados do Modelo VEH Paralelo Semiativo

Para o modelo híbrido com associação Paralelo Semiativo houve convergência do algoritmo genético com o uso de 1 a 4 motores elétricos. Os valores do *Fitness* médio de cada geração até a convergência para cada quantidade de motores elétricos instalados estão exibidos na Figura 4.9. A simulação com 2 MEs teve o maior número de iterações (949), enquanto a simulação com 4 MEs enfrentou, proporcionalmente, maior dificuldade para direcionar-se à região de convergência.

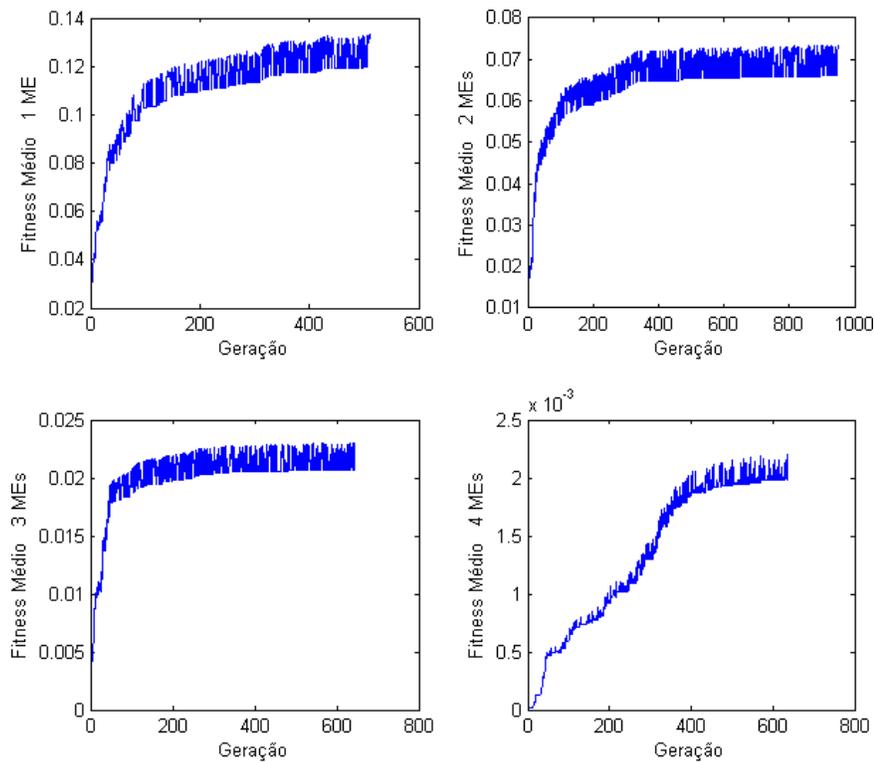


Figura 4.9: *Fitness* médio para cada geração do algoritmo de otimização da associação Paralelo Semiativo.

A Tabela 4.1 exhibe os principais resultados alcançados na otimização dos modelos Paralelo Semiativo implementados. Pode-se observar o número de células em série e em paralelo na bateria utilizada, a capacitância do capacitor associado de forma Semiativa, o valor dos indutores, as massas de armazenadores, motores elétricos e total de hibridização, o rendimento de

combustível e, por fim, o custo de cada fonte de energia e o custo total para o cumprimento do ciclo.

Tabela 4.1: Principais resultados da otimização do VEH com associação Paralelo Semiativo

nº MEs	NS	NP	C_{UC_PSA} [F]	L_{smooth} [H]	L_{elev} [H]	m_{arm} [kg]	m_{ME} [kg]	m_{hibrid} [kg]	SOC _{Bat} Final [%]	Rendimento Combustível [km/l]	Custo Eletricidade [R\$]	Custo Gasolina [R\$]	Custo Total [R\$]
1	6	172	36	0,00710	0,08704	27,1	11	38,1	66,6	18,33	0,334	1,829	2,16
2	7	307	66	0,00775	0,08986	48,7	22	70,7	63,0	25,07	0,780	1,339	2,12
3	8	452	36	0,01025	0,08404	73,6	33	106,6	65,1	35,43	1,229	0,948	2,18
4	9	579	88	0,00473	0,04451	105,3	44	149,3	68,0	49,40	1,636	0,680	2,32

Observa-se que, para esta configuração, quanto maior a potência elétrica de tração, maior a quantidade de armazenadores requerida, e assim, maior a massa de hibridização. O estado de carga final das baterias contornou a margem de 65%, indicando que, para esta associação, para que a corrente de descarga das células seja respeitada deve haver um número de células acima do necessário para percorrer um ciclo urbano brasileiro.

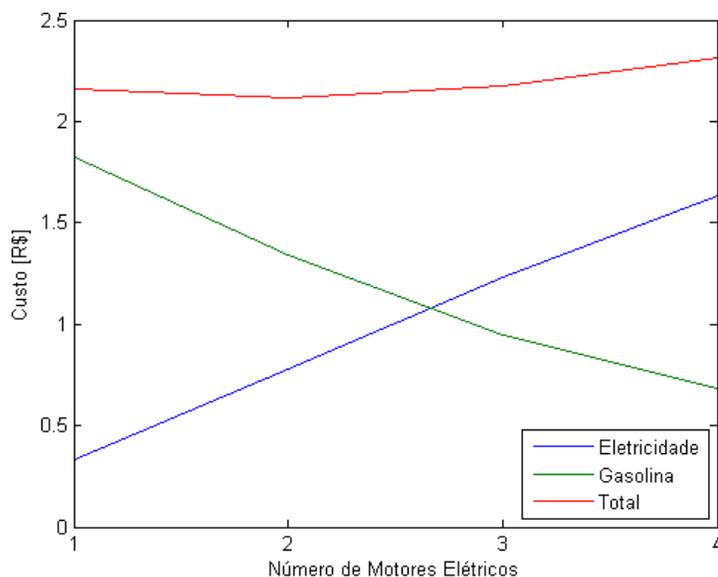


Figura 4.10: Custo para cumprimento de um ciclo para associação Paralelo Semiativo

Rendimento de combustível aumenta quanto maior é a potência elétrica disponível para tração, mostrando resultados positivos em relação ao rendimento do veículo convencional (14,06

km/l), atingindo até 49,40 km/l para a configuração com 4 MEs. Entretanto, o custo mais compensador para o cumprimento do ciclo (R\$2,12), alcançado na configuração com 2 MEs, não é menor que 89% do valor do modelo convencional (R\$2,37).

Pode-se notar pelo gráfico da Figura 4.10 que há uma inversão no valor pago em combustível e em eletricidade. Inicialmente há um maior gasto com gasolina, mas na configuração com 3 e 4 MEs a eletricidade passa a onerar com maior significância. A partir de 4MEs, esta configuração híbrida não se mostrou economicamente interessante.

Este movimento está associado à diminuição do consumo total de combustível e ao aumento do consumo total de eletricidade, evidenciados na Figura 4.11.

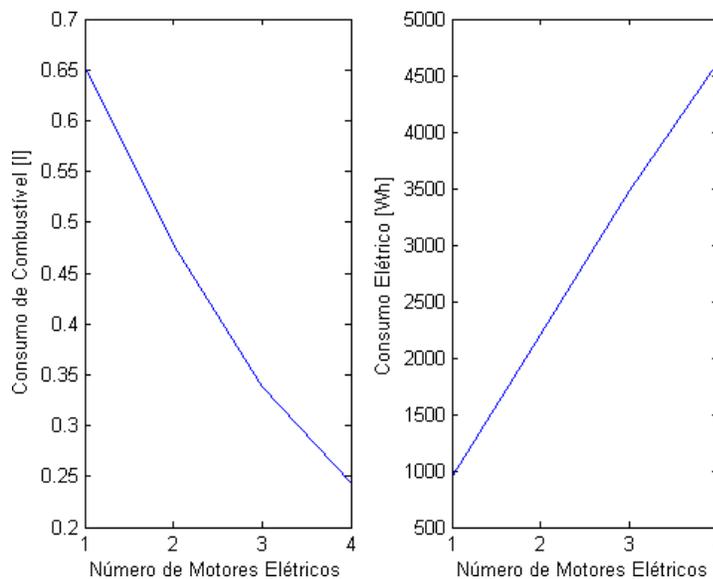


Figura 4.11: Consumo total de combustível e de eletricidade para o caso Paralelo Semiativo

A adição de motores elétricos dentro dos parâmetros utilizados neste trabalho resultou no aumento da capacidade dos veículos simulados a corresponder às altas velocidades do ciclo. Um exemplo disso é o perfil de velocidades alcançado pela configuração Paralelo Semiativo com 1 motor elétrico otimizada, exibido na Figura 4.12.

Desta forma, a distância percorrida em relação ao veículo convencional é incrementada. Como exemplo, tem-se a distância percorrida pelo Paralelo Semiativo com 1 ME (Figura 4.13), de 11976 m, a apenas 14 m do ciclo normatizado uma diferença de 0,1%. Este padrão de melhoria de desempenho se repete para os outros casos simulados.

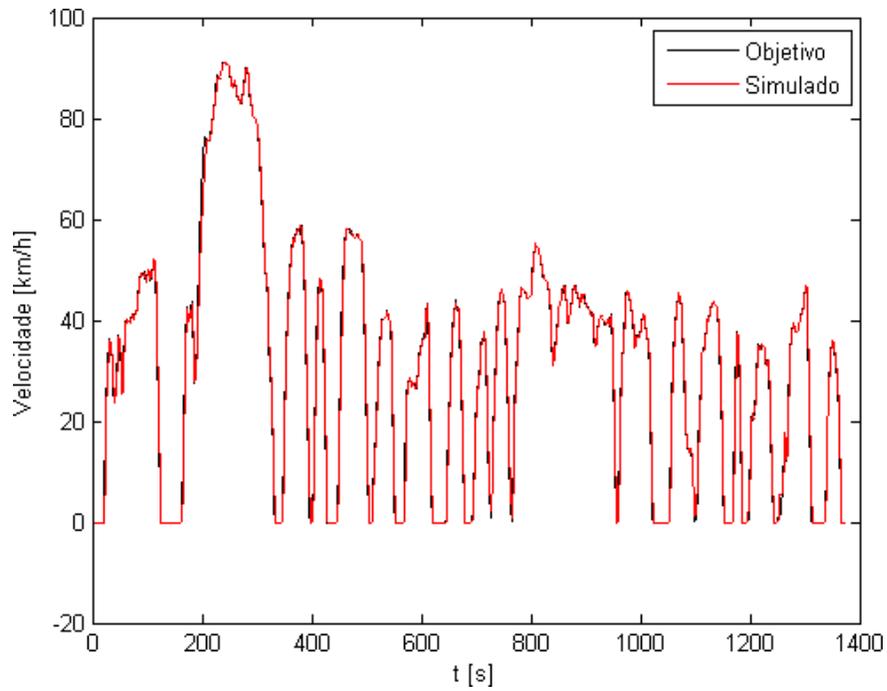


Figura 4.12: Perfil de velocidades da norma e perfil obtido pela simulação de VEH Paralelo Semiativo otimizado com 1ME.

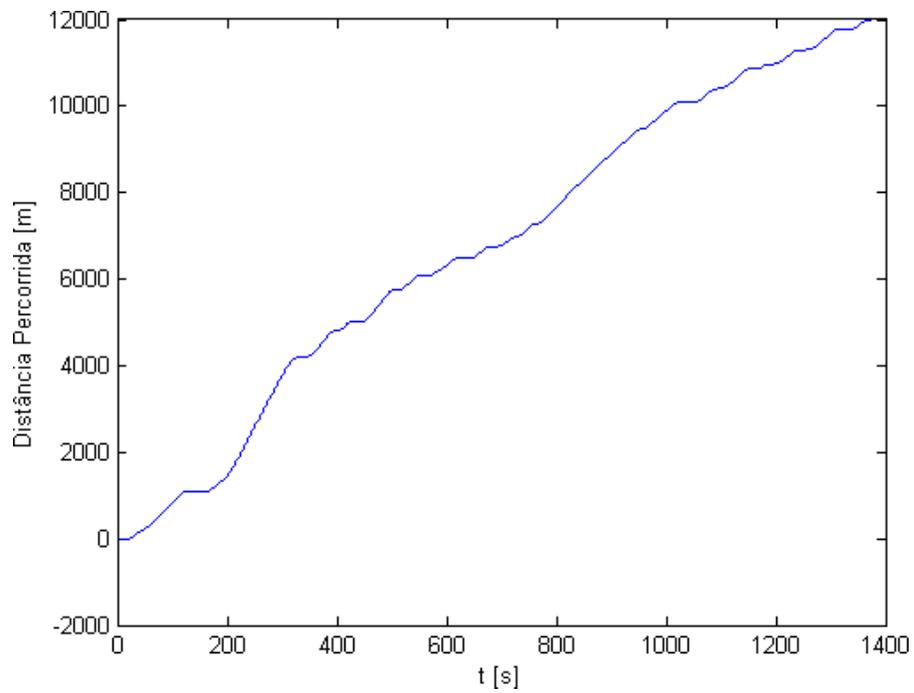


Figura 4.13: Distância percorrida pelo VEH Paralelo Semiativo otimizado com 1ME

Os torques de objetivo dos motores elétricos, assim como os toques instantâneos por eles desempenhados e os torques médios para cada período do sinal PWM estão exibidos na Figura 4.14. É possível perceber o caráter pulsante do torque instantâneo, efeito do acionamento por PWM. O torque médio durante cada período do sinal PWM segue satisfatoriamente os torques de objetivo, indicando que o método de calculo das razões cíclicas tem sucesso. Por fim, os gráficos indicam que quanto maior a proporção de tração elétrica (maior número de motores elétricos), maior a sensibilidade do perfil de torques de objetivo em relação às variações de velocidade do ciclo e, por conseguinte, o perfil de torques médios também se torna ruidoso.

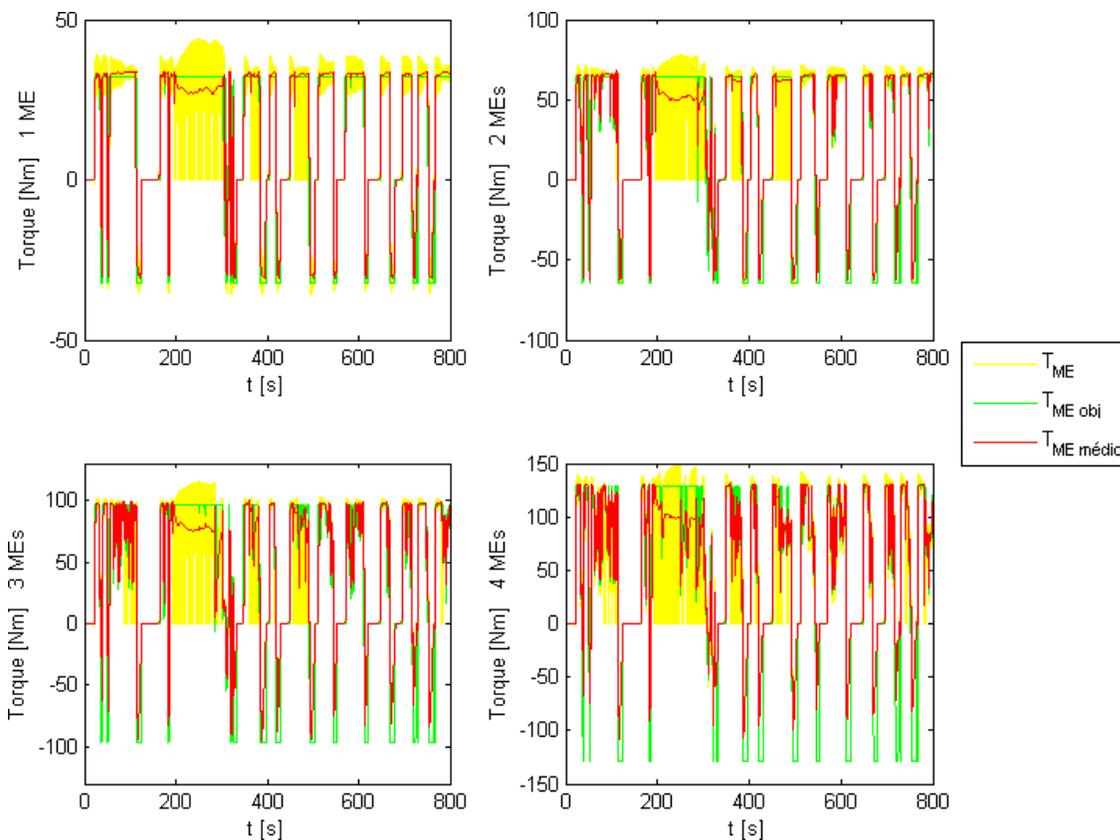


Figura 4.14: Torques dos Motores Elétricos para associação Paralelo Semiativo

As configurações otimizadas utilizam a faixa de trabalho das células em sua plenitude, com predominância de correntes de descarga (positivas) sobre as correntes de carga (negativas – relativas à regeneração). As correntes mais altas são relativas ao modo de trabalho com *chopper* elevador, nas maiores velocidades do ciclo. Os limites de corrente de carga e descarga são

obedecidos em todo o ciclo. A Figura 4.15 exibe os perfis de corrente obtidos para a associação Paralelo Semiativo até 800 segundos da simulação, para que possa ser melhor analisado.

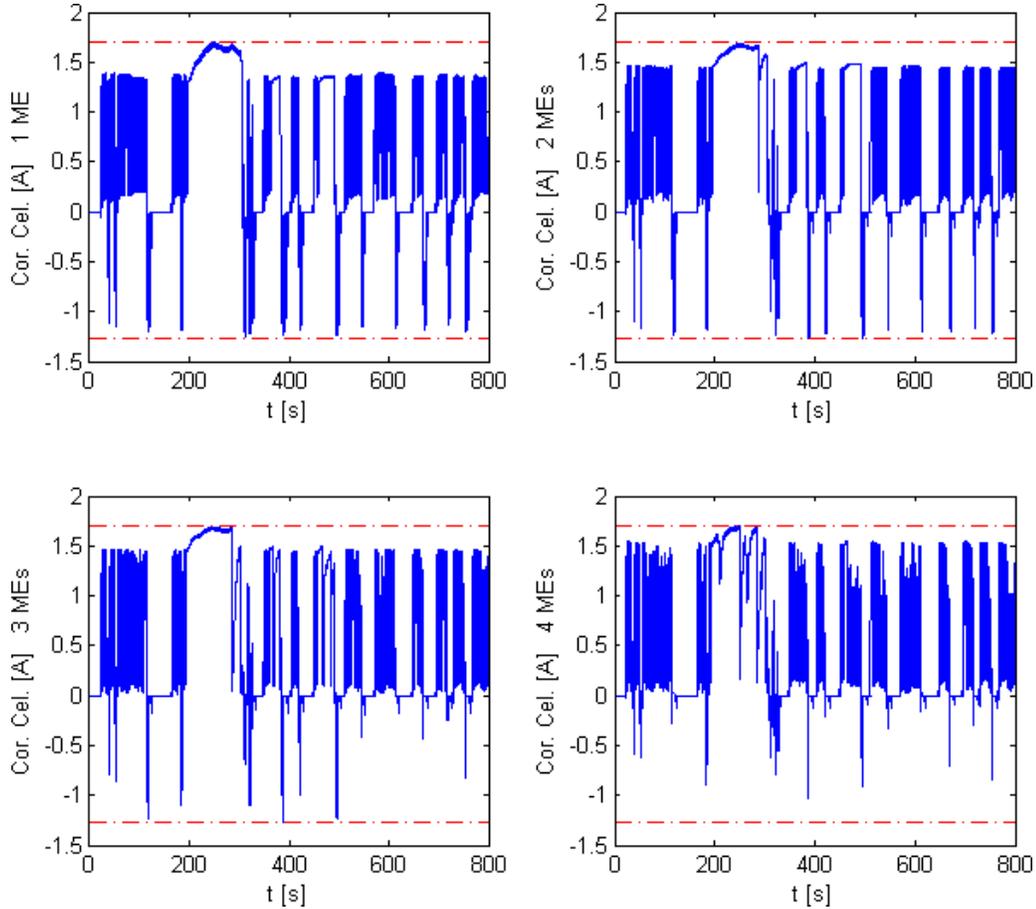


Figura 4.15: Corrente em cada célula para associação Paralelo Semiativo

A corrente dos ultracapacitores associados em Paralelo Semiativo estão mostradas na Figura 4.16. Pode-se verificar como este tipo de associação impede o uso pleno de sua capacidade total de carga/descarga, uma vez que sua tensão é atrelada à tensão da bateria, como previsto na literatura. A Figura 4.17 enfatiza este fenômeno mostrando a maior participação das baterias em termos de potência. Por fim, a Figura 4.18 evidencia a baixa exploração do estado de carga do ultracapacitor paralelo semiativo em relação ao estado de carga da bateria.

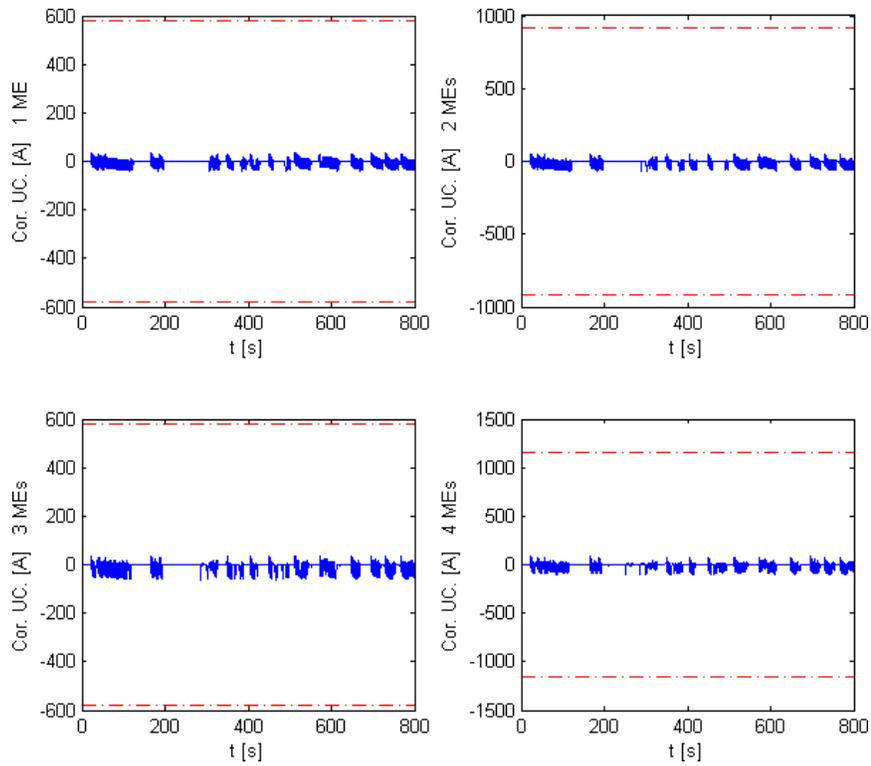


Figura 4.16: Corrente sobre ultracapacitor Paralelo Semiativo

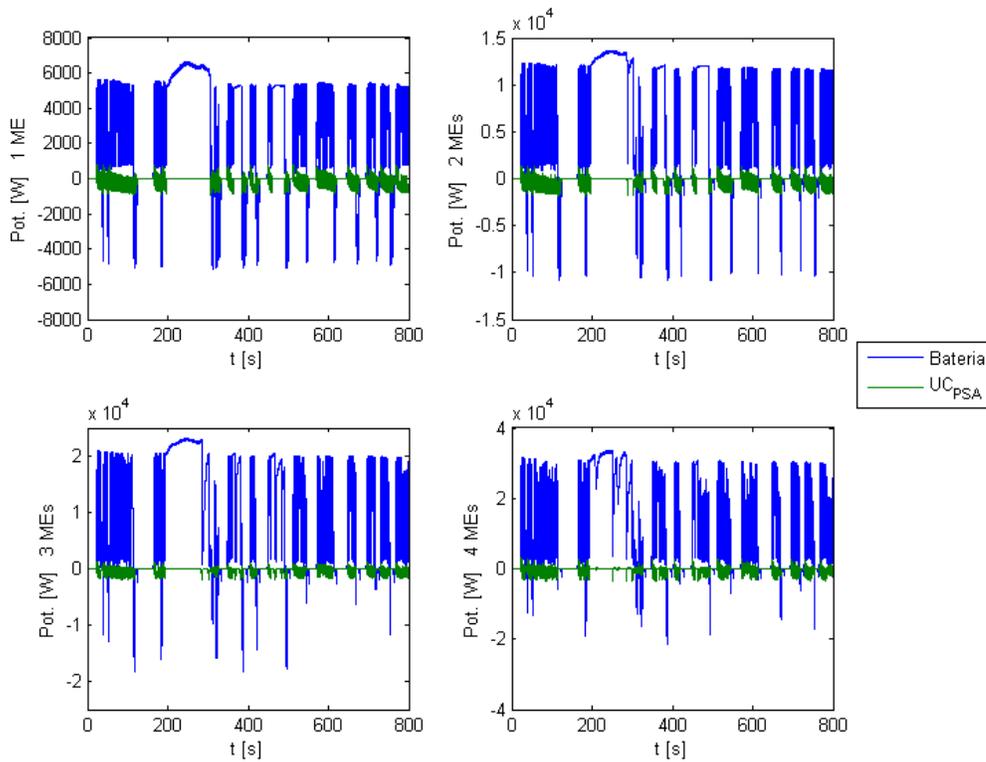


Figura 4.17: Potência nos armazenadores da associação Paralelo Semiativo

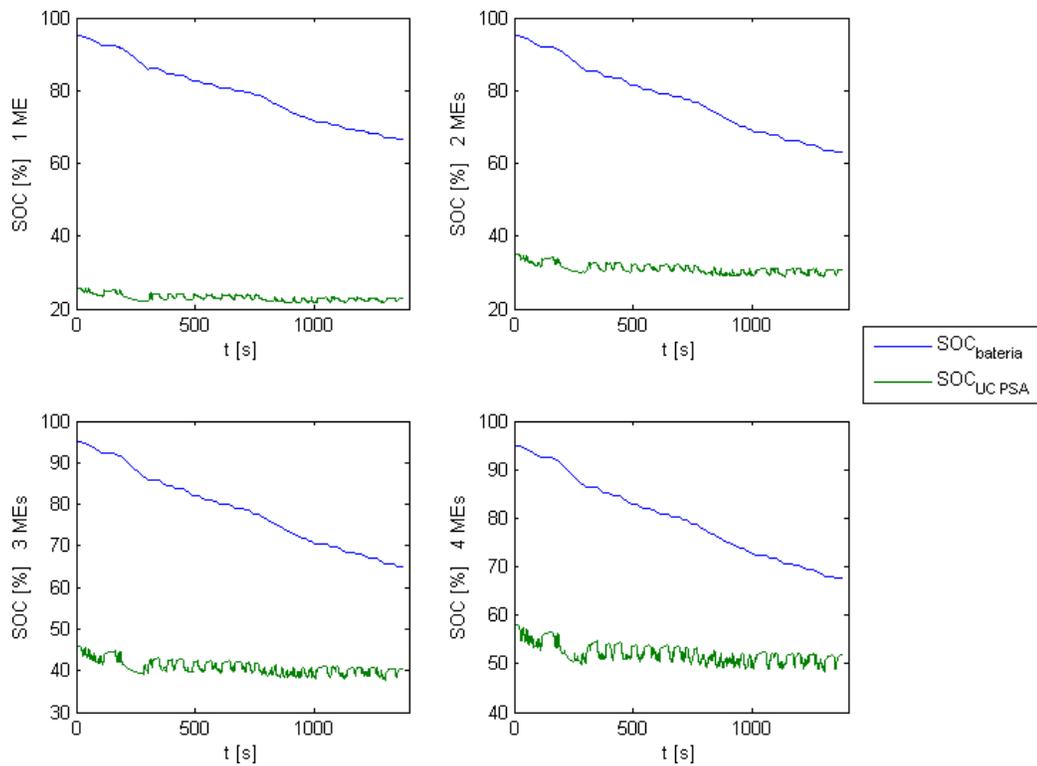


Figura 4.18: Estado de carga dos armazenadores em associação Paralelo Semiativo

4.2.2 Resultados do Modelo VEH Paralelo Ativo

Assim como no caso Paralelo Semiativo, houve convergência do algoritmo de otimização com o uso de 1 a 4 motores elétricos. Os gráficos do *Fitness* médio para cada geração e para cada opção de motorização estão exibidos na Figura 4.19. Assim como anteriormente, o caso com 2 MEs apresentou o maior número de iterações (2085) e o caso com 4 MEs enfrentou maiores sobressaltos até atingir valores de convergência.

Os principais resultados desta simulação estão descritos na Tabela 4.2. Verifica-se que a associação Paralelo Ativo atinge valores de massa superiores aos alcançados nos casos Paralelo Passivo, o estado de carga final das baterias acompanha os valores obtidos anteriormente e tanto o rendimento de combustível quanto o custo assumem ligeiras desvantagem.

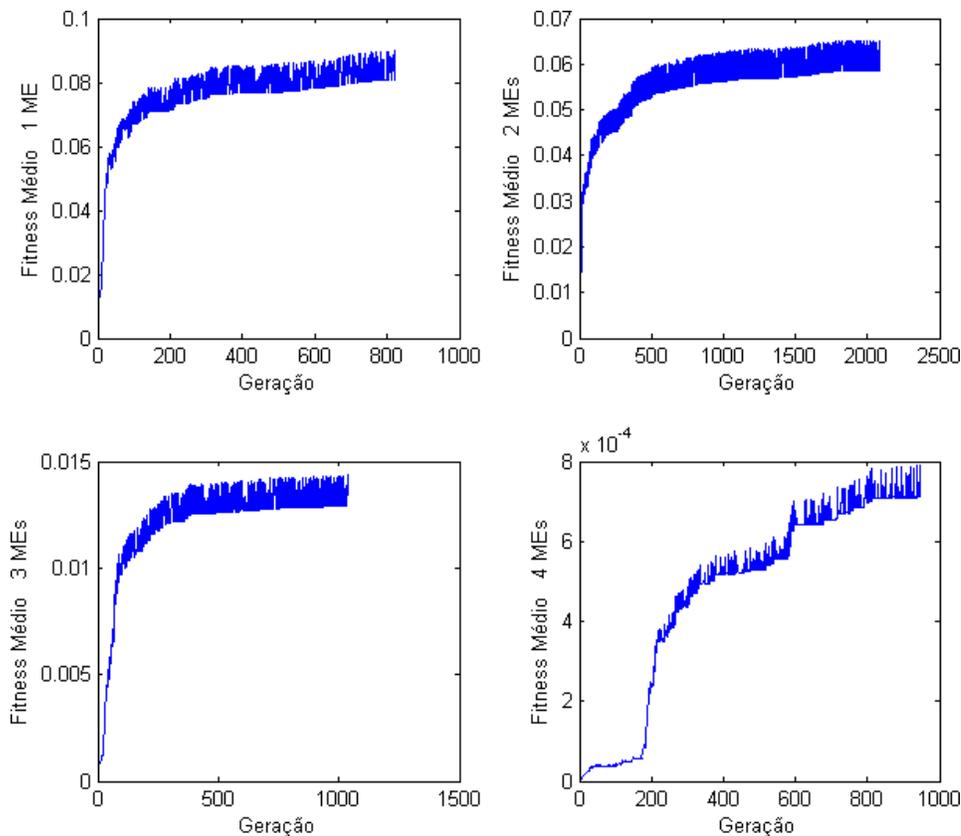


Figura 4.19: *Fitness* médio para cada geração do algoritmo de otimização da associação Paralelo Ativo.

Tabela 4.2: Principais resultados da otimização do VEH com associação Paralelo Ativo

nº MEs	NS	NP	C_{UC_PSA} [F]	C_{UC_PA} [F]	L_{smooth} [H]	L_{elev} [H]	L_{elevPA} [H]	m_{arm} [kg]	m_{ME} [kg]	m_{hibrid} [kg]	SOC _{Bat} Final [%]	Rendimento Combustível [km/l]	Custo Eletricidade [R\$]	Custo Gasolina [R\$]	Custo Total [R\$]
1	6	179	88	36	0,00489	0,05364	0,08085	39,3	11	50,3	67,9	18,06	0,333	1,855	2,19
2	7	289	36	36	0,00919	0,18167	0,05157	53,4	22	75,4	61,5	24,48	0,765	1,371	2,14
3	8	476	36	111	0,00733	0,04212	0,03301	89,5	33	122,5	66,2	35,29	1,252	0,952	2,20
4	9	593	66	88	0,00666	0,04818	0,07427	117,6	44	161,6	68,1	48,01	1,642	0,700	2,34

Quanto ao rendimento do combustível, a opção de hibridização com 4 MEs continua como a mais vantajosa (48,01 km/l, contra 14,06 km/l do veículo convencional). Já a configuração economicamente mais expressiva conta com 2 MEs, executando o ciclo com um gasto de R\$2,14, 90% do custo desempenhado pelo veículo convencional. Assim como na configuração Paralelo Semiativo, há uma inversão de posição entre as matrizes energéticas com respeito a maior relevância sobre o gasto total para tração do veículo, entre as motorizações com 2 e 3 MEs, como

mostrado na Figura 4.20. A queda do consumo total de combustível e o aumento do consumo total de eletricidade atrelados a esta inversão estão exibidos na Figura 4.21.

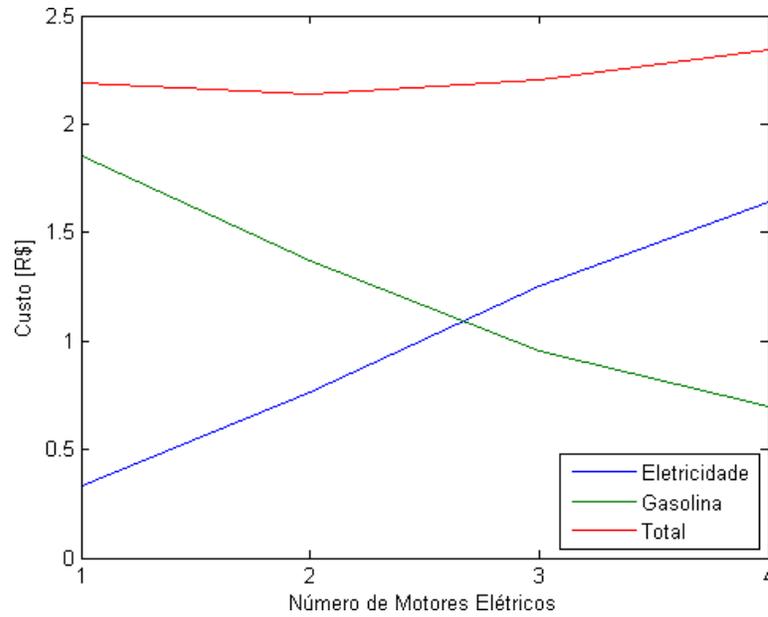


Figura 4.20: Custo para cumprimento de um ciclo para associação Paralelo Ativo

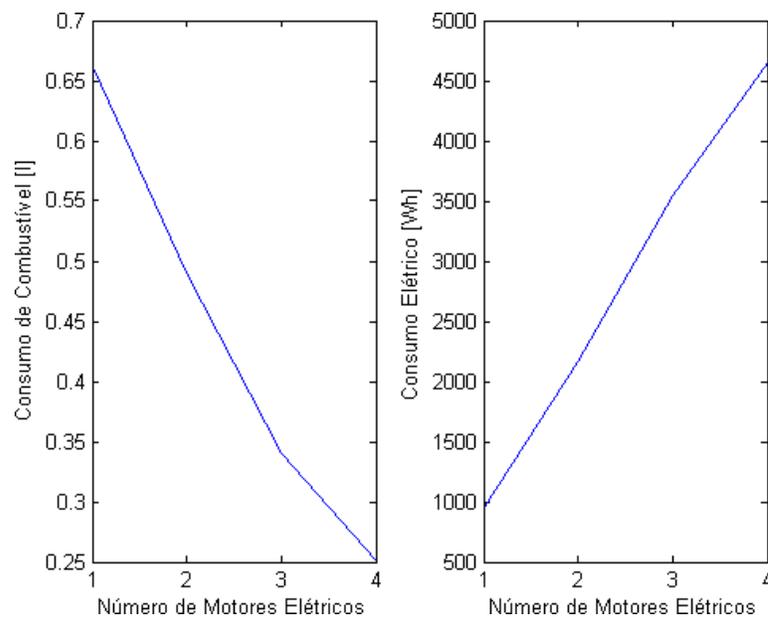


Figura 4.21: Consumo total de combustível e de eletricidade para o caso Paralelo Ativo

Os perfis de torque obtidos para o caso Paralelo Ativo (Figura 4.22) são semelhantes aos encontrados no caso Paralelo Semiativo, o que indica que o desempenho em tração pode ser mantido mesmo havendo esta modificação na associação dos armazenadores.

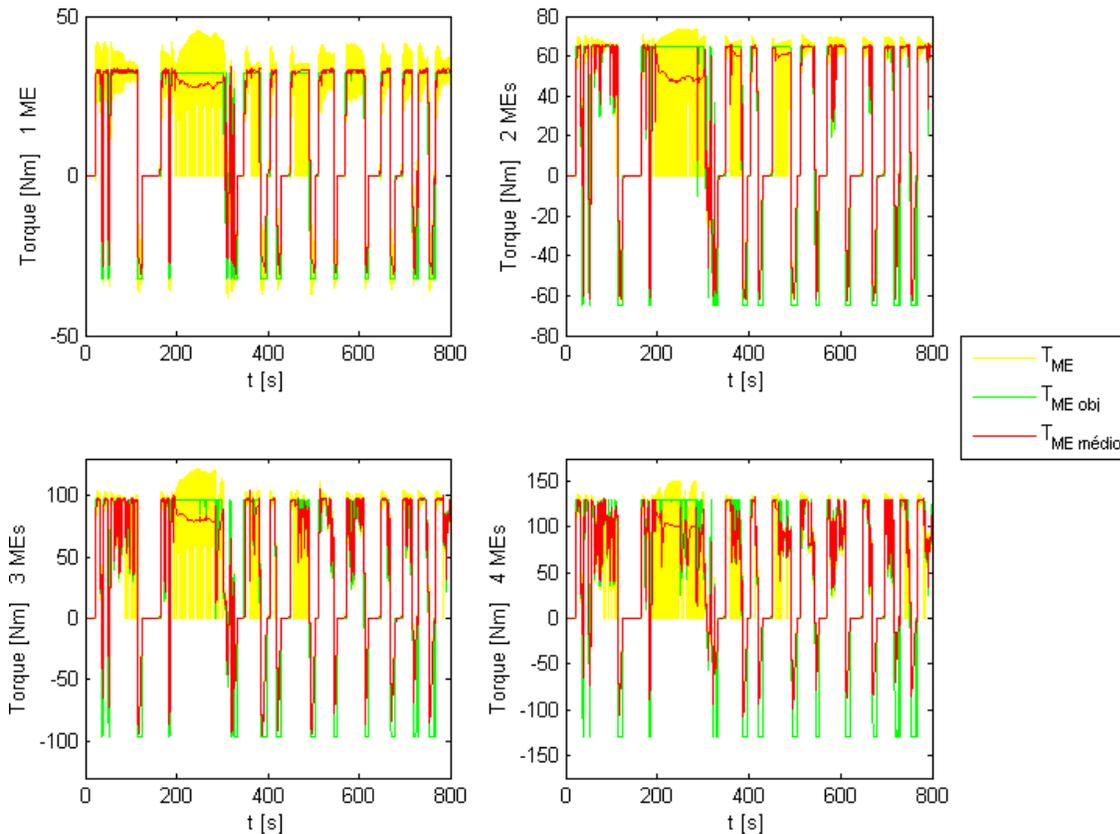


Figura 4.22: Torques dos Motores Elétricos para associação Paralelo Ativo

Os valores de corrente sobre cada célula também são bem distribuídos ao longo de sua faixa de trabalho em descarga, entretanto esta associação inibe a participação das células na regeneração, concentrada sobre o ultracapacitor Paralelo Ativo. Deste modo, apenas algumas cargas eventuais são efetuadas sobre as células, como observado na Figura 4.23.

Assim como obtido nas Simulações Paralelo Semiativo, a corrente sobre o capacitor Paralelo Semiativo pouco exigem de sua faixa de trabalho, agindo apenas como um passa baixa para a bateria (Figura 4.24). Por outro lado, o capacitor associado em Paralelo Ativo é capaz de fornecer/receber correntes em uma faixa mais ampla, podendo ter esta característica melhor explorada, como indicado na Figura 4.25.

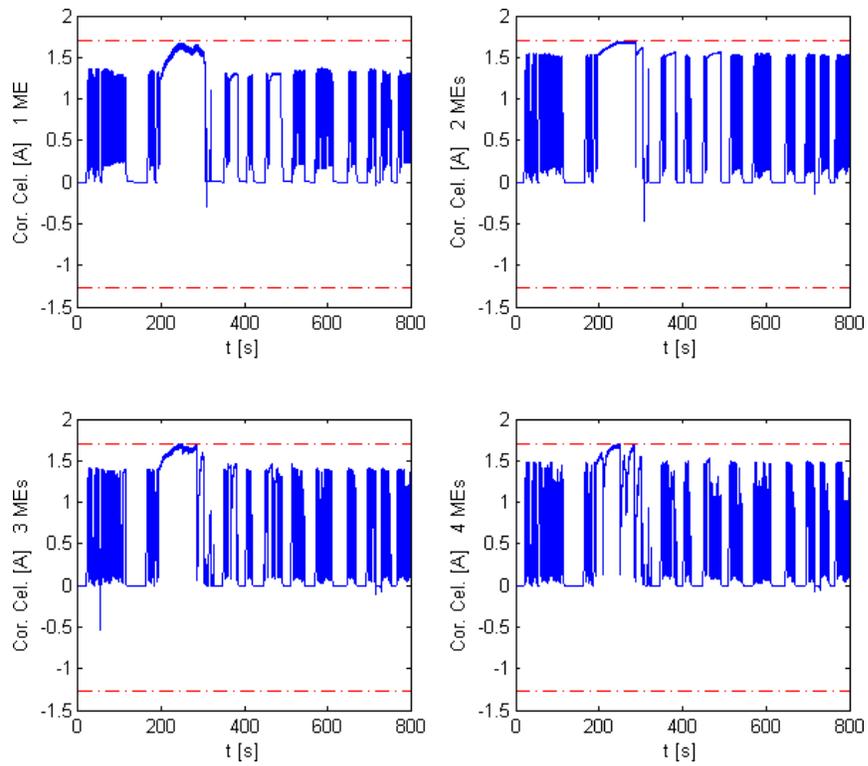


Figura 4.23: Corrente em cada célula para associação Paralelo Ativo

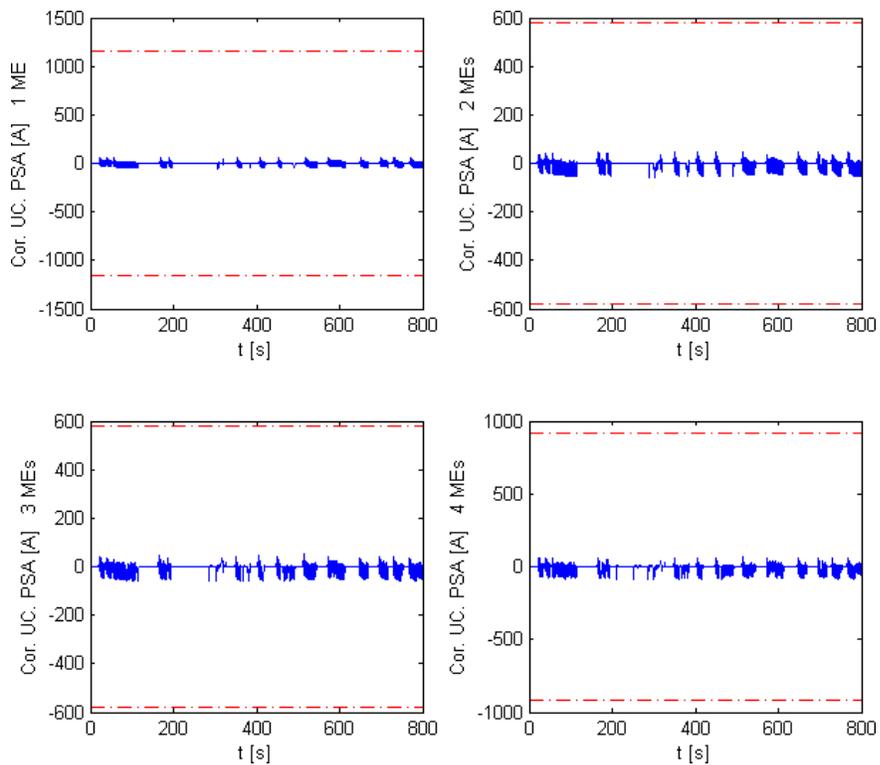


Figura 4.24: Corrente sobre o ultracapacitor Paralelo Semiativo

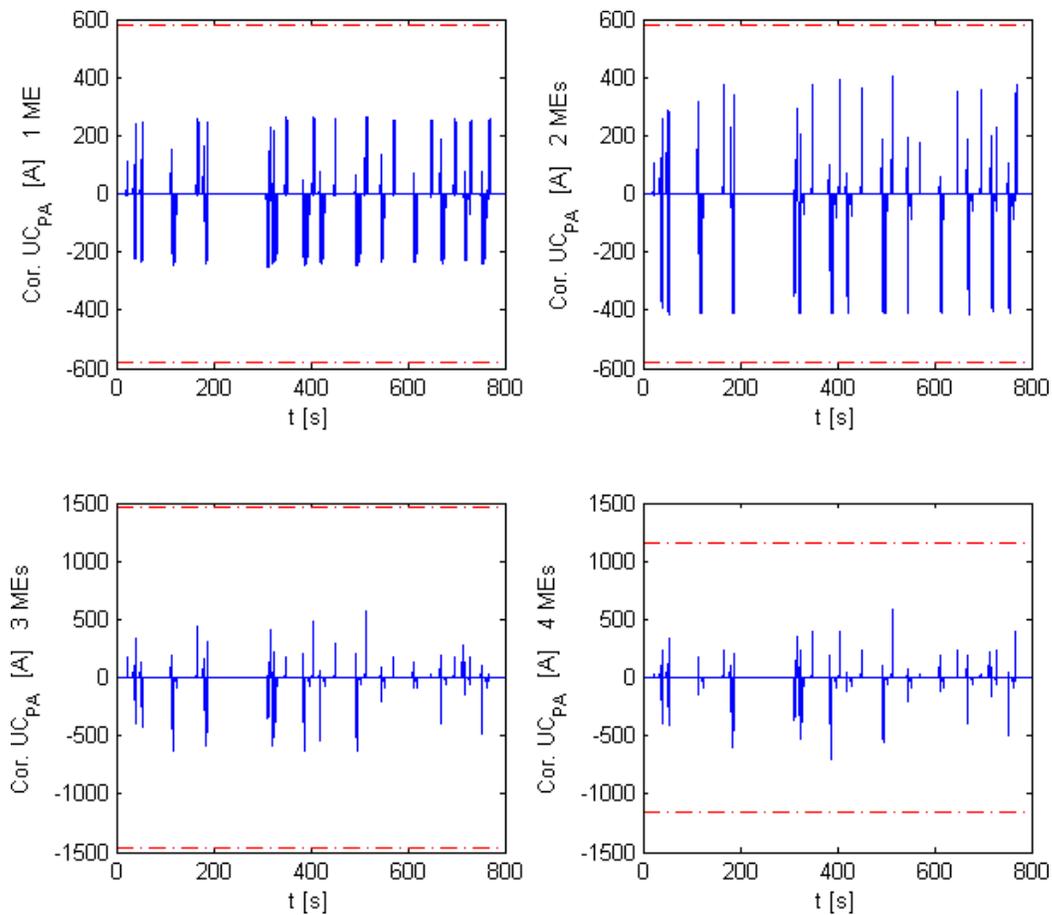


Figura 4.25: Corrente sobre o ultracapacitor Paralelo Ativo

A Figura 4.26 exibe a participação de cada armazenador na potência elétrica. É possível analisar principalmente nos casos com 1 e 2 MEs a presença do ultracapacitor Paralelo Ativo em picos de potência de arrancada e frenagem, como previsto na literatura. Esta atuação poupa as baterias destas situações desgastantes.

Por fim, a Figura 4.27 mostra o perfil do estado de carga de cada armazenador durante o ciclo. Para as simulações com 1 e 2 MEs percebe-se um aproveitamento amplo da carga do ultracapacitor Paralelo Ativo em relação ao ultracapacitor em Paralelo Semiativo. Este resultado não é repetido com a mesma eficácia para os casos com 3 e 4 MEs, o que indica que os algoritmos não convergem para valores favoráveis nestas condições.

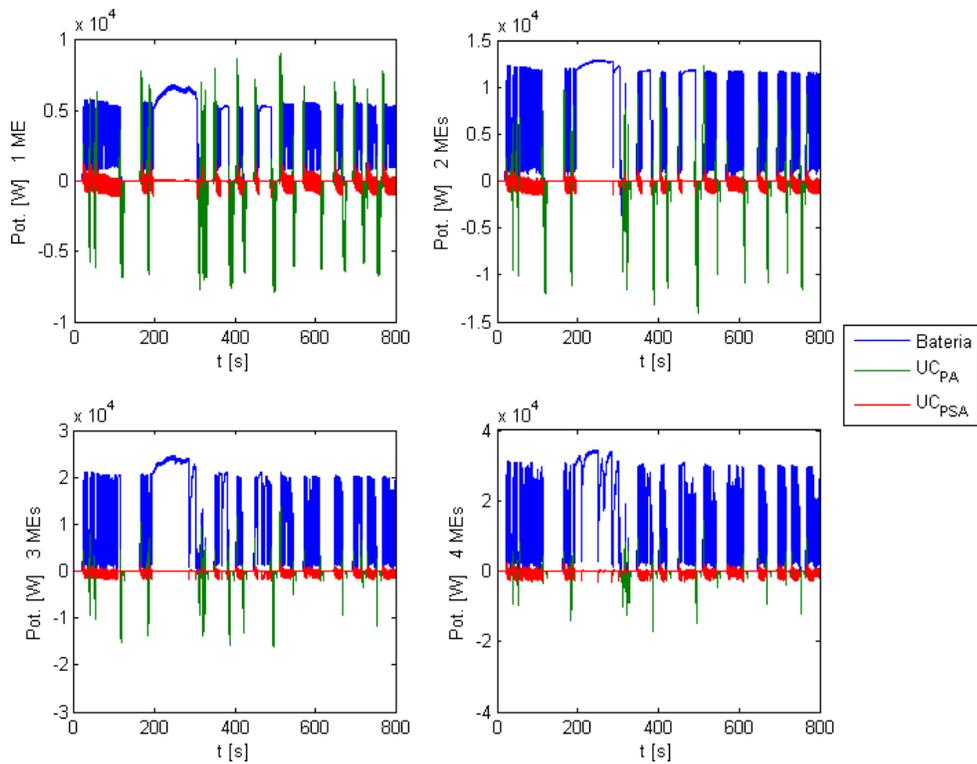


Figura 4.26: Potência nos armazenadores da associação Paralelo Ativo

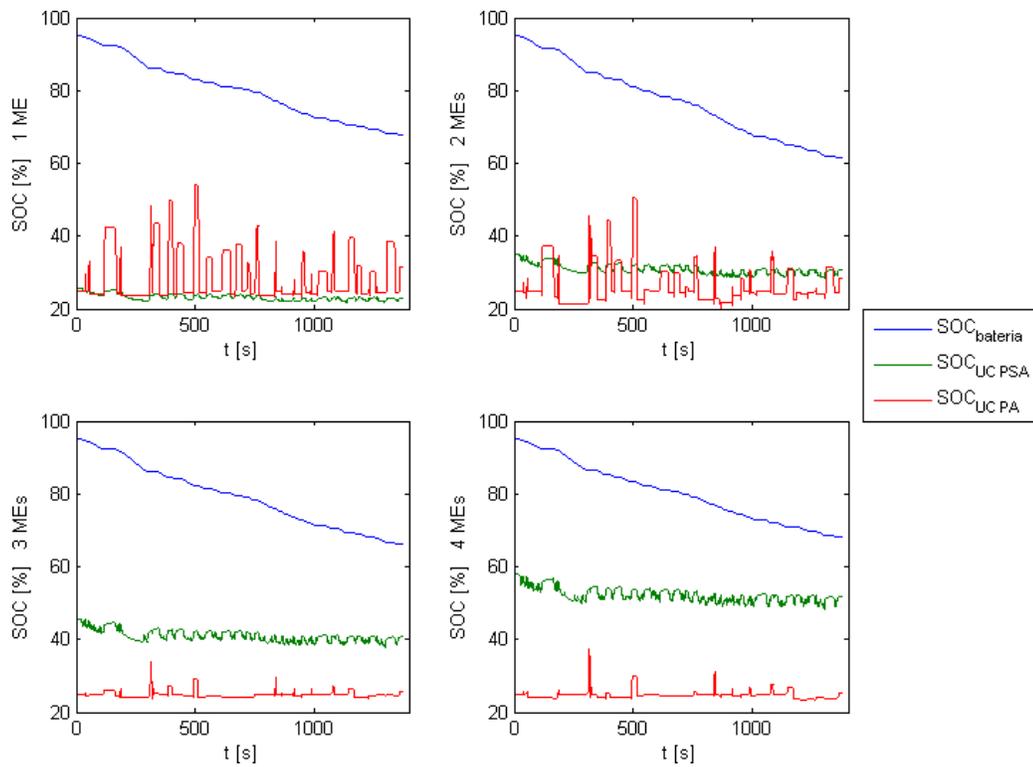


Figura 4.27: Estado de carga dos armazenadores em associação Paralelo Semiativo

4.2.3 Resultados do Modelo VEH Cascata

Ao contrário dos modelos anteriores, o caso Cascata simulado convergiu apenas para a configuração com 1 ME. Esta é a otimização com maior número de interações alcançado neste trabalho (3021), resultante do aumento de parâmetros otimizados. A Figura 4.28 mostra a trajetória de convergência do *Fitness* médio para este caso.

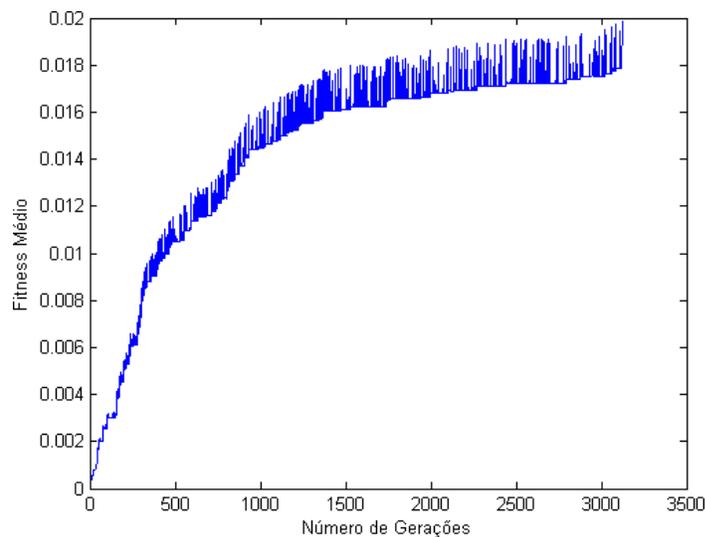


Figura 4.28 - *Fitness* médio para cada geração do algoritmo de otimização da associação Cascata.

Os principais resultados desta simulação estão descritos na Tabela 4.3. Verifica-se que a associação Cascata atinge os maiores valores de massa de hibridização de todos os casos estudados com 1ME e que o estado de carga final das baterias também é o maior, o que indica que a conversão da energia das baterias, carregando um ultracapacitor para posteriormente alimentar o ME pode gerar entaves que dificultam a descarga desta bateria. O custo final de rodagem também é o mais caro entre as simulações com 1ME, indicando falta de participação do trem de potência elétrico.

Tabela 4.3: Principais resultados da otimização do VEH com associação Cascata

nº MEs	NS	NP	C_{UC_casc} [F]	C_{UC_PA} [F]	L_{smooth} [H]	L_{elev} [H]	L_{elevPA} [H]	$L_{smoothC}$ [H]	L_{elevC} [H]	m_{arm} [kg]	m_{ME} [kg]	m_{hibrid} [kg]	SOC _{Bat} Final [%]	Rendimento Combustível [km/l]	Custo Eletricidade [R\$]	Custo Gasolina [R\$]	Custo Total [R\$]
1	8	154	36	36	0,01153	0,06237	0,09102	0,07280	0,87829	47,7	11	58,7	71,5	17,16	0,323	1,950	2,27

A comutação entre os capacitores de carga e descarga em cascata causam interrupção da disponibilidade de tração elétrica, conferindo um perfil ruidoso aos torques desempenhados pelo ME, como pode ser observado na Figura 4.29.

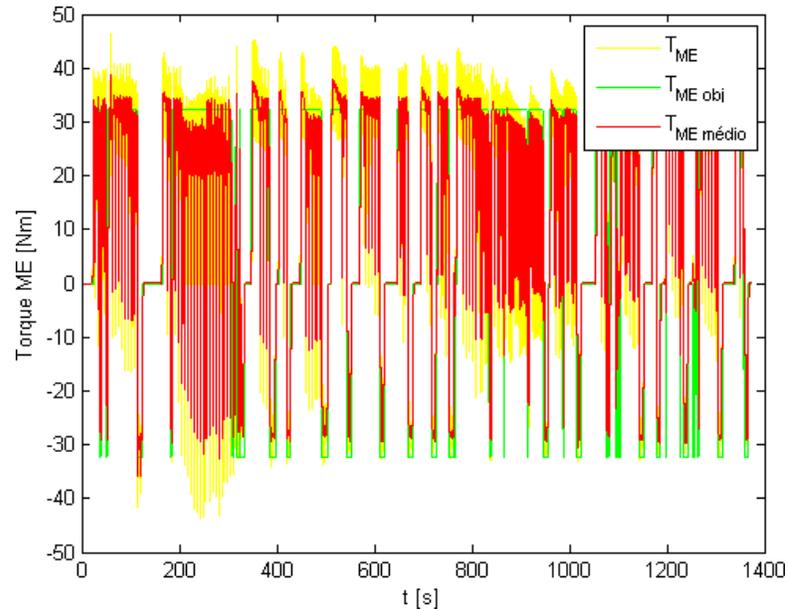


Figura 4.29: Torques do Motor Elétrico para associação Cascata

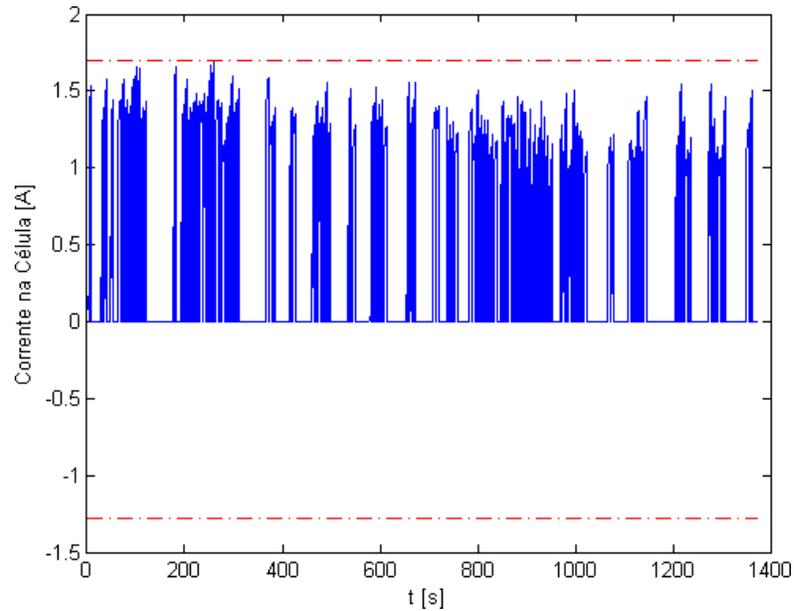


Figura 4.30: Corrente em cada célula para associação Cascata

A corrente sobre as células também explora bem a região de trabalho em descarga destes componentes e a isolamento em relação ao perfil da carga é parcial. Com o aumento da demanda de energia, a recarga dos ultracapacitores é mais frequente, e o intervalo entre os ciclos de descarga das células é reduzido e em alguns momentos extinto. Entretanto cada ciclo é razoavelmente similar ao outro, indicando a possibilidade futura de otimização das baterias para estes tipos de descarga. Tais correntes podem ser verificadas na Figura 4.30.

As correntes verificadas no UC em Paralelo Ativo da associação Cascata apresentam perfil similar ao desempenhado em sua associação original (Figura 4.31), mostrando que este manteve sua função nesta nova configuração. Já o perfil de correntes dos ultracapacitores em carga e em descarga da configuração Cascata (Figura 4.32) mostram a complementariedade de ambos, enquanto um é carregado, o outro fornece energia para o ME. As magnitudes destas correntes também aproveitam melhor as propriedades destes UCs que o caso Paralelo Semiativo.

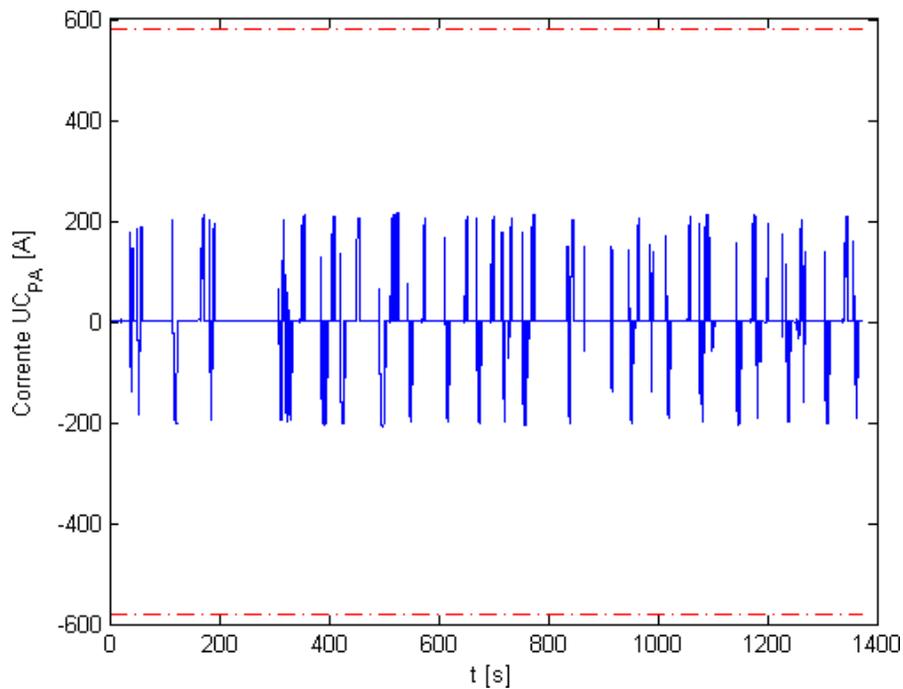


Figura 4.31: Corrente sobre o ultracapacitor Paralelo Ativo na associação Cascata

A Figura 4.33 exibe a participação de cada armazenador na potência elétrica. É possível perceber que nesta configuração, cada armazenador é submetido aproximadamente às mesmas magnitudes de potência.

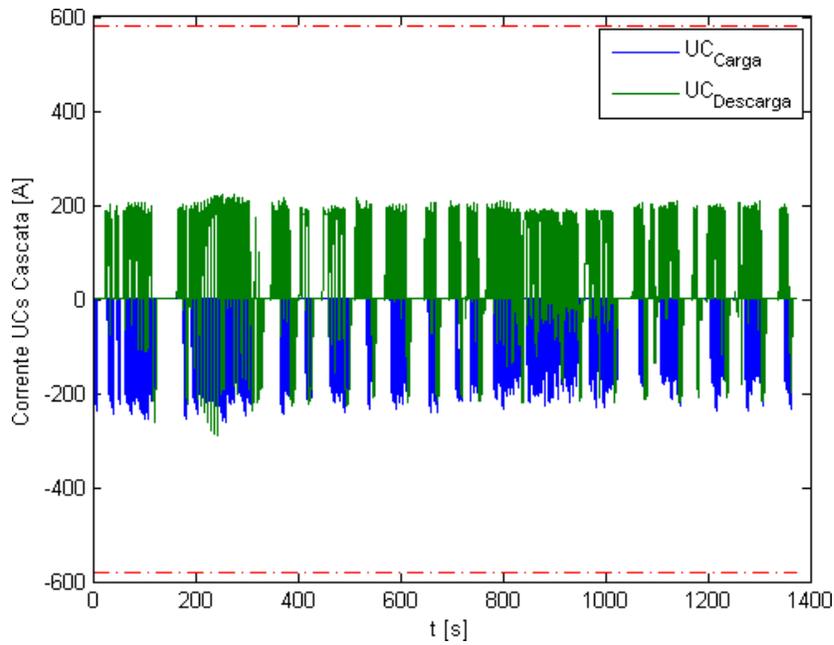


Figura 4.32: Corrente sobre os ultracapacitores associados em Cascata

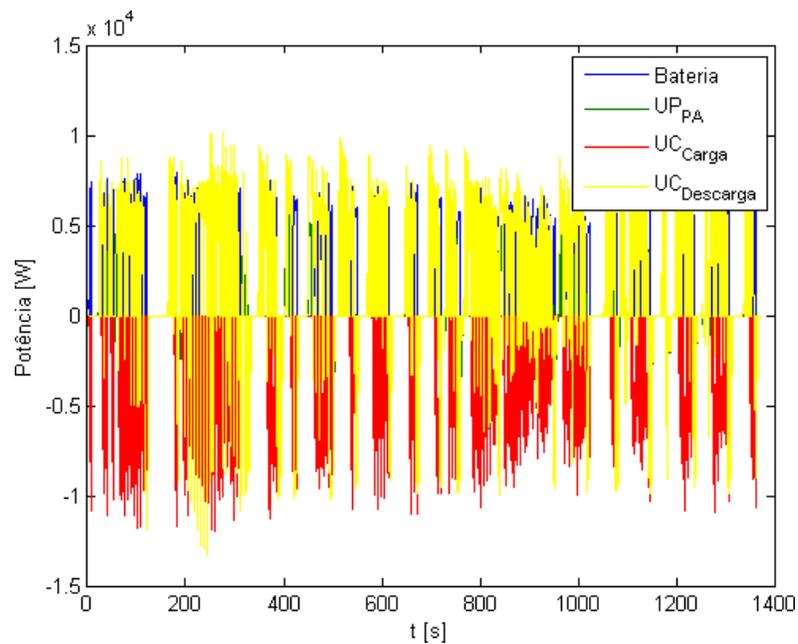


Figura 4.33: Potência nos armazenadores da associação Cascata

Encerrando as análises desta associação, tem-se o gráfico do estado de carga dos armazenadores (Figura 4.34). A bateria e o UC em paralelo ativo se comportam como anteriormente, o primeiro descarrega-se ao longo do ciclo, enquanto o segundo é parcialmente preenchido e esvaziado de acordo com a energia obtida em regeneração. Já os UCs em cascata

são ciclados em aproximadamente toda sua capacidade de armazenamento, assim como planejado no escopo da simulação.

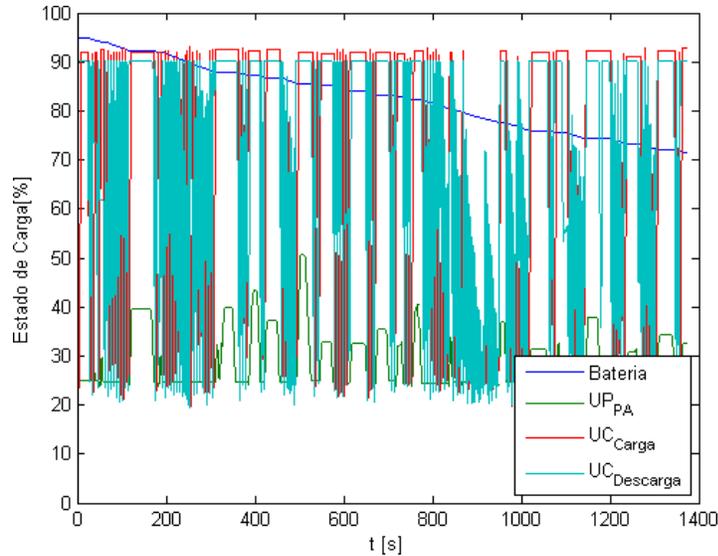


Figura 4.34: Estado de carga dos armazenadores em associação Cascata

Por fim, têm-se os principais resultados deste trabalho compilados na Tabela 4.4, a título de comparação:

Tabela 4.4 Principais resultados do trabalho, abrangendo número de MEs, massa de hibridização, rendimento do combustível e custos de rodagem.

	nº MEs	m _{hibrid} [kg]	Rendimento Combustível [km/l]	Custo Eletricidade [R\$]	Custo Gasolina [R\$]	Custo Total [R\$]
Combustão	-	-	14,06	-	2,369	2,37
Paralelo Semiativo	1	38,1	18,33	0,334	1,829	2,16
	2	70,7	25,07	0,780	1,339	2,12
	3	106,6	35,43	1,229	0,948	2,18
	4	149,3	49,40	1,636	0,680	2,32
Paralelo Ativo	1	50,3	18,06	0,333	1,855	2,19
	2	75,4	24,48	0,765	1,371	2,14
	3	122,5	35,29	1,252	0,952	2,20
	4	161,6	48,01	1,642	0,700	2,34
Cascata	1	58,7	17,16	0,323	1,950	2,27

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho, foi executada uma revisão sobre alguns dos principais subsistemas de um veículo híbrido, assim como as formas de associá-los de modo a compor o sistema veicular completo do ponto de vista da dinâmica longitudinal. Verificou-se, ainda, que cada subsistema pode ser descrito por equações dinâmicas e lógicas de operação, e, conseqüentemente, a integração destes modelos matemáticos gera um modelo computacional completo do veículo.

Especificamente, os modelos computacionais foram implementados por meio de álgebra de blocos, compondo as funções de transferência do sistema veicular completo. Uma vez concebidos os diagramas de blocos, um software matemático de suporte (neste trabalho, o MATLAB/Simulink®) é capaz de compilar e processar os modelos. Não se faz necessário o uso de extensões deste software dedicadas à dinâmica mecânica ou elétrica, uma vez que todos os modelos são advindos da revisão e implementados em álgebra de blocos.

Os parâmetros utilizados para compor os modelos dinâmicos correspondem às especificações de cada subsistema com aplicação automobilística, gerando resultados finais, como desempenho e custo de rodagem, compatíveis com os encontrados no cotidiano. Isto indica que a abordagem utilizada constitui uma promissora ferramenta para a simulação em dinâmica longitudinal de veículos convencionais e híbridos, com potencial para auxiliar projetistas. Um futuro trabalho baseado na calibração de cada um dos subsistemas deve fornecer resultados com maior verossimilhança.

Três propostas de associação de armazenadores, conversores e motores elétricos são revisadas e implementadas. Posteriormente, cada uma é submetida a processos de otimização por algoritmo genético, em função do ciclo normatizado brasileiro de condução urbana e da potência disponível para tração elétrica. Cada proposta obteve convergência dentro do processo de otimização, demonstrando que os veículos híbridos podem ser projetados em função do padrão de uso e do compromisso entre economia de combustível e custo de rodagem. Propõe-se que, em um trabalho futuro, o custo para a produção de cada veículo simulado seja calculado, de modo a verificar a partir de que momento a economia promovida pela diminuição do custo de rodagem

torna o investimento inicial em um veículo híbrido (mais complexo e provavelmente mais caro) vantajoso ao consumidor.

A primeira proposta de associação testada é a Paralelo Passivo. Por meio desta, alcançou-se os melhores resultados em termos de consumo de combustível e custo de rodagem. Trata-se de uma configuração simples que impõe as cargas do ciclo de condução diretamente às baterias, auxiliada apenas por um ultracapacitor em paralelo agindo como um filtro passa baixa. Verificase neste trabalho para esta associação a predominância da bateria como fornecedora de potência elétrica e o pouco aproveitamento da carga e da potência específica do UC em Paralelo Passivo.

Por vez, a associação Paralelo Ativo mostra resultados ligeiramente inferiores aos obtidos com a associação Paralelo Passivo. Entretanto, o UC em Paralelo Ativo, como previsto, é capaz de poupar a bateria durante as frenagens regenerativas e as partidas, aproveitando-se melhor a carga e a potência específica deste componente. Mais especificamente, as baterias podem trabalhar apenas em descarga, podendo em trabalhos futuros ser otimizadas para esta condição.

Já a associação Cascata é a de maior complexidade, exigindo a participação de um maior número de componentes. Nesta configuração, não há contato direto entre baterias e motor elétrico, sendo este alimentado exclusivamente por meio de ultracapacitores. Quando um UC em cascata é esgotado, este é comutado por um UC pleno e encaminhado para recarga junto à bateria. Isto faz com que a energia seja submetida a dois conversores, causando entraves à descarga e interrupções de disponibilidade de tração elétrica, o que pode diminuir o desempenho do trem de potência elétrica. Por outro lado, os ciclos aos quais a bateria é submetida têm formato previsível o que pode, propiciar em trabalhos futuros, a otimização das baterias para esta tarefa.

As comparações entre as associações são válidas apenas no contexto deste trabalho, uma vez que se trata de um estudo computacional, não experimental, baseados em parâmetros encontrados na literatura compatíveis com as aplicações. Entretanto, algumas questões pertinentes foram verificadas com sucesso, consolidando conceitos para futuros trabalhos mais específicos e experimentais.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6601**: veículos rodoviários automotores leves: determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento. Rio de Janeiro, 2012

ANDERSON, C. D.; ANDERSON, J. **Electric and hybrid cars : a history**. Jefferson, North Carolina: McFarland & Company, 2010. 269 p.

BATTERYSPACE, 2003. Polymer Lithium Ion Battery Specifications, Model: PL-383562. Disponível em: <<http://www.batteryspace.com/prod-specs/PL383562.pdf>> Acesso em: 01 de maio de 2013

BOSCH, Robert, Manual de tecnologia automotiva, 25ª edição, Editora Edgard Blücher LTDA, 2005, 1232p.

CAMPBELL, P. Principles of a permanent-magnet axial-field DC machine. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v.121, n. 12, pp 1489 - 1494, 1974

CAO, Jian; EMADI, Ali. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, v. 27, n. 1, pp 122-132, 2012

CAVAZZUTI, M. **Optimization Methods: From Theory to Scientific Design and Technological Aspects in Mechanics**. Berlin, Alemanha, Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. KG, 2013. 255 p.

CHEN, M.; RINCÓN-MORA, G. A. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 21, n. 2, pp 504 – 511, 2006

CHIASSON, J. **Modeling and Control of Electric Machines High-Performance**. New Jersey, EUA., John Wiley & Sons, Inc. 2005, 709p.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ, 2014a. Tributos Municipais, Estaduais e Federais. Disponível em: < <http://servicosonline.cpfl.com.br/tributos.aspx> > Acesso em: 07 janeiro de 2014

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ, 2014b. Preços de Tarifas de Energia Elétrica Praticadas na CPFL - Paulista. Disponível em: < <http://servicosonline.cpfl.com.br/servicosonline/taxasetarifas/localizardistribuidora.aspx> > Acesso em: 07 janeiro de 2014

CONTE, F. V. Battery and battery management for hybrid electric vehicles: a review, **Elektrotechnik und Informationstechnik**, v. 123, n. 10, pp 424 – 431, 2006

CORREA, Fernanda Cristina. **Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela**. 2013. 138p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CORREIO POPULAR Quanto mais econômico, menor o IPI. Campinas, 05 out. 2012. Economia, Caderno B, p. B11

CROLLA, D. A. **Automotive Engineering - Powertrain, Chassis System and Vehicle Body**, Burlington, EUA, Elsevier Inc., 2009, 827 p.

DEDINI, F.G. Introdução a dinâmica longitudinal. Notas de aula, Dinâmica Veicular Unicamp, 2011.

EA, 2013_honda insight rear Disponível em: <<http://efficientautomobile.com/fuel-efficient-hondas-for-2013/2013-honda-insight-rear/>> Acesso em: 20 de junho de 2012

ECKERT, Jony Javorski. **Análise comparativa entre os métodos de cálculo da dinâmica longitudinal em veículos**. 2013. 168p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles - fundamentals, theory and design**. Boca Raton, EUA., Taylor and Francis Group. 2012, 534p.

EHSANI, M.; GAO, Y.; MILLER, J. M., Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 4, pp 719 – 728, 2007

FERREIRA, A.A.; POMILIO, J.A.; SPIAZZI, G.; DE ARAUJO SILVA, L. Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 23, n. 1, pp. 107-115, 2008

FINKEN, T.; FELDEN, M.; HAMEYER, K. Comparison and Design of Different Electrical Machine Types Regarding Their Applicability in Hybrid Electrical Vehicles, **Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines**, paper ID 988, pp. 1 - 5, 2008

FOLHA DE S. PAULO, 2012a Governo anuncia amanhã novo regime automotivo. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/1163505-governo-anuncia-amanha-novo-regime-automotivo.shtml>> Acesso em: 03 de outubro de 2012

FOLHA DE S. PAULO, 2012b Carro persegue selo para pagar menos IPI Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/mercado/72993-carro-persegue-selo-para-pagar-menos-ipi.shtml>> Acesso em: 20 de outubro de 2012

GALLO, W. L. R. **Apostila Motores de Combustão**, Universidade Estadual de Campinas, 1986

GEN, M.; CHENG, R., **Genetic algorithm and engineering optimization**, John Wily and Sons, New York, 2000, 495 p.

GENTA, Giancarlo. Motor Vehicle Dynamics, vol. 43, 1st ed. World Scientific, 1997, 532p.

GERSSSEN-GONDELACH, S. J.; FAAIJ, A. P. C. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. **Journal of power sources**, v. 212, p. 111-129, 2012.

GILLESPIE, Thomas D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. 6th ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc., 1992. 495p.

GLINTON, S. Automakers Set To Steer Customers To Hybrids. Disponível em: <<http://kunc.org/post/automakers-set-steer-customers-hybrids>>. Acesso em: 20 de junho de 2012

GOMES, Luís Manuel Martins. **O Veículo Eléctrico e a sua Integração no Sistema Eléctrico**. 2010. 114p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade de Porto, Porto.

HAIM, Diego. **Redução da Inércia Rotacional no Projeto do Trem de Força**. 2011. 107p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

HAJIMIRI, M. H.; SALMASI, F. R. A Fuzzy Energy Management Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle with Predictive Control and Durability Extension of the Battery, **IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles**, pp 1 – 5, 2006.

HAN, Y.; REN, Z.; TONG, Y. General Design Method of Flywheel Rotor for Energy Storage System, **Energy Procedia**, v. 16, pp 359 - 364, 2012

HEINZMANN, 2013. PMG Series – Disc Motors with Brushes. Disponível em: < http://www.heinzmann.com/jdownloads/electric-and-hybrid-drives/catalog-parts/CAT_ED_part_DC-Motors.pdf>. Acesso em: 16 de novembro de 2013

HEIBING, Bernd; ERSOY, Metin, Chassis Handbook. Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives, 2nd ed. Vieweg Teubner, 2011, 591p.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**, Nova Iorque, EUA, McGraw-Hill, 1988, 930 p.

HILL, R. J.; CORK, P. Chopper control of DC disc-armature motor using power MOSFETs. **IEEE Proceedings B (Electric Power Applications)**, v.132, n. 2, pp 93 – 100, 1985

HUI, S. Multi-objective optimization for hydraulic hybrid vehicle based on adaptive simulated annealing genetic algorithm. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 23, n. 1, p. 27-33, 2010

JAZAR, R. N. **Vehicle Dynamics Theory and Application**. Riverdale: Springer, 2008.

JSC, 2013_Toyota Prius c. Disponível em: <<http://www.japanesesportcars.com/photos/desktop-wallpapers/toyota/2013-toyota-prius-c>>. Acesso em: 20 de junho de 2012

KCSTUDIO. Prologue - Preparing the way for the Columbia cars, and the formation of the Electric Vehicle Company. Disponível em: <<http://www.kcstudio.com/electrobat.html>>. Acesso em: 20 de junho de 2012

KHAYYAM, H.; KOUZANI, A.; NAHAVANDI, S.; MARANO, V.; RIZZONI, G. Intelligent energy management in hybrid electric vehicles, **Energy Management INTECH**, pp.147-175, 2010

KNAUFF, M.C.; DAFIS, C.J.; NIEBUR, D.; KWATNY, H.G.; NWANKPA, C.O. Simulink Model for Hybrid Power System Test-bed, **IEEE Electric Ship Technologies Symposium**, pp. 421-427, 2007

KUPERMAN, A; AHARON, I. Battery–ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 2, pp 981-992, 2011

LEADBETTER, J.; SWAN, L. G. Selection of battery technology to support grid-integrated renewable electricity. **Journal of Power Sources**, v. 216, p. 376-386, 2012.

Li, C. Y.; Zheng, G.; Liu, G. P. A real-time optimization control strategy for power management in fuel cell/battery hybrid power sources, **UKACC International Conference on Control**, pp. 845-850, 2012

LMC, 2013. LMC Motor Specification Table. Disponível em: <<http://www.lmcltd.net/uploads/files/data%20sheet%20for%20LMC%20Motors.pdf>> Acesso em: 01 de maio de 2013

LOPES, Juliana. **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.

MIERLO, J. V.; BOSSCHE, P.; MAGGETTO, G. Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators, **Journal of Power Sources**, v. 128, n. 1, pp 76 – 89, 2003

MOTENERGY, 2013. ME0708 Brush-Type DC Motor. Disponível em: < <http://www.motenergy.com/me0708.html>> Acesso em: 16 de novembro de 2013

NESSCAP, 2010. NESSCAP® Ultracapacitor Products 48V Modules. Disponível em: <http://www.nesscap.com/common/download.jsp?dir=product&sfm=NAYBTWVPHWQZASX.pdf&ofn=Spec_EMHSR-0000C0-048R0_REV2_20110223.pdf> Acesso: em 01 de maio de 2013

PREÇO DOS COMBUSTÍVEIS, 2014. Tabela de Preço dos Postos de Combustíveis em Campinas - São Paulo. Disponível em: <<http://www.precodoscombustiveis.com.br/postos/cidade/3374/sp/campinas>> Acesso em: 07 janeiro de 2014

PULKRABEK, W. **Engineering Fundamentals Of The Internal Combustion Engine**, Upper Saddle River, EUA, Pearson Education Inc., 2004, 504 p.

RAMOS, Tiago Manuel Silva. **Sistema de tração de um Veículo Elétrico de Competição**. 2011. 195 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Universidade de Porto, Porto.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo, Brasil, Makron Books. 1999, 819p.

REIS, Nuno Alexandre Oliveira. **O automóvel híbrido como elemento fornecedor-consumidor de electricidade**. 2008. 108p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

RMP, 2013. PMG 132 Perm Motor. Disponível em: <<http://www.robotmarketplace.com/products/EMS-PMG132.html>>. Acesso em: 16 de novembro de 2013.

SAHA, B.; GOEBEL, K.; POLL, S.; CHRISTOPHERSEN, J. Prognostics Methods for Battery Health Monitoring Using a Bayesian Framework. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 58, n. 2, pp 291 – 296, 2009

SHAFIEI, A.; MOMENI, A.; WILLIAMSON, S.S. Battery modeling approaches and management techniques for Plug-in Hybrid Electric Vehicles, **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, Conference Publication, pp. 1-5, 2011

SOUZA, Reynaldo Barros de; **Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos**. 2010. 107 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas.

VARESI, K.; A. RADAN. A Novel Methodology Proposed for Optimizing the Degree of Hybridization in Parallel HEVs using Genetic Algorithm, **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 56, pp 988 - 993, 2011

WAKEFIELD, E. H. **History of the Electric Automobile**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1998. 332 p.

WIRASINGHA, S.G.; EMADI, A. Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 60, n. 1, pp 111-122, 2011

XING, Y.; MA, E. W. M.; TSUI, K. L.; PECHT, M. Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles, **Energies**, v. 4, pp 1840 – 1857, 2011

ZERAOULIA, M.; BENBOUZID, M. E. H. B.; DIALLO, D. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study, **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v.55, n.6, pp 1756 – 1764, 2006

ZETRA, 2013_Honda Insight features and specification. Disponível em:
<<http://zetranews.com/2012/05/2013-honda-insight-features-and-specification/>>. Acesso em: 20 de junho de 2012

ZHANG, X.; MI, C. **Vehicle Power Management - Modeling, Control and Optimization**. London, England, Springer London, 2011, 346 p.