

MODELAGEM E GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA DE UM VEÍCULO  
ELÉTRICO HÍBRIDO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Téo Cerqueira Revoredo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Liu Hsu, Docteur d'Etat

---

Prof. Silvio Carlos Aníbal de Almeida, D.Sc.

---

Prof. Fernando Cesar Lizarralde, D.Sc.

---

Prof. Paulo Lúcio Silva de Aquino, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2007

REVOREDO, TÉO CERQUEIRA

Modelagem e gerenciamento de potência  
de um veículo elétrico híbrido de célula a  
combustível [Rio de Janeiro] 2007

XVI, 133 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,  
M.Sc., Engenharia Elétrica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, COPPE

1. Veículos Híbridos
2. Células a Combustível
3. Gerenciamento de Potência

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais, *Maria Luiza Cerqueira Revoredo* e *Sam Tavares Revoredo*, por proverem os alicerces sobre os quais construo minha vida. Gratidão é pouco a oferecer àqueles que me ensinaram os verdadeiros valores de um ser humano e que fazem de tudo para que eu me torne sempre melhor.

”Que força é esta, eu não sei, tudo o que sei é que existe, e está disponível apenas quando alguém está num estado em que sabe exatamente o que quer, e está totalmente determinado a não desistir até conseguir.”

*(Alexander Graham Bell)*

# Agradecimentos

Ao professor *Liu Hsu*, por sua orientação e pelo tema de Dissertação que propôs.

Ao professor *Silvio Carlos Aníbal de Almeida*, por ter abraçado a co-orientação de maneira incondicional.

Ao professor *Jules Ghislain Slama*, por sua amizade, crença em meu trabalho e pelo exemplo de acadêmico e pessoa que é.

À minha noiva, *Michelle Almeida Sclebin*, por tudo que ela é por mim.

Aos meus irmãos, *Kate Cerqueira Revoredo* e *Ted Cerqueira Revoredo*, por seu apoio e companheirismo, pelo crescimento conjunto, e pela convivência engrandecedora.

Aos amigos e professores do Laboratório de Controle pelo intercâmbio de idéias e convivência agradável.

À todos aqueles que um dia perguntaram sobre minha Dissertação e tinham real interesse em saber a resposta. "A glória da amizade não é a mão estendida, nem o sorriso carinhoso, nem mesmo a delícia da companhia. É a inspiração espiritual que vem quando você descobre que alguém acredita e confia em você" (*Ralph Emerson*).

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## MODELAGEM E GERENCIAMENTO DE POTÊNCIA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Téo Cerqueira Revoredo

Março/2007

Orientadores: Liu Hsu

Silvio Carlos Aníbal de Almeida

Programa: Engenharia Elétrica

Ao longo da última década, fatores políticos e ambientais têm aumentado o interesse em veículos propelidos por fontes alternativas de energia, e o desenvolvimento de novas tecnologias tornam os veículos de célula a combustível cada vez mais atraentes.

Esta Dissertação apresenta a modelagem de um veículo de célula a combustível e analisa diferentes estratégias para o gerenciamento de potência no mesmo, além de comparar seu consumo com os de veículos a bateria e veículos convencionais.

Um modelo foi desenvolvido, contendo a dinâmica do veículo, uma pilha de células a combustível, um banco de baterias e um motor elétrico de indução. As reações do motorista são emuladas através de um controlador proporcional e integral (PI), o motor elétrico é controlado por modos deslizantes e o gerenciamento de potência realizado por algoritmos sujeitos à restrições tais como eficiência da pilha de células a combustível e estado de carga do banco de baterias.

O menor consumo de combustível é alcançado através da implementação de um algoritmo baseado em otimização instantânea denominado *estratégia de minimização por consumo equivalente* (ECMS). É mostrado que o método possui melhor desempenho que os demais, e sua implementação em veículos de célula a combustível pode ser realizada de maneira simplificada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODELING AND POWER MANAGEMENT OF A FUEL CELL HYBRID  
ELECTRIC VEHICLE

Téo Cerqueira Revoredo

March/2007

Advisors: Liu Hsu

Silvio Carlos Aníbal de Almeida

Department: Electrical Engineering

Over the last decade, political and environmental aspects have been increasing the interest on vehicles propelled through alternative energy sources, and the development of new technologies makes fuel cell vehicles continuously more attractive.

This dissertation presents the modeling of a fuel cell vehicle and the analysis of different power management strategies for it, as well as a comparison of its fuel consumption with battery electric vehicles and conventional vehicles.

A *Simulink* model was developed which encompasses the vehicle dynamics, a fuel cell stack, a battery and an induction motor. The driver's reactions are modeled by a PI controller, the induction motor is assumed to be controlled by sliding mode control and the power management strategies takes into account relevant physical restrictions such as fuel cell stack efficiency and battery state of charge.

The lowest fuel consumption is obtained through the use of an algorithm based on instantaneous optimization named *equivalent consumption minimization strategy* (ECMS). It is shown that this method implies better performance than the others and that its implementation can be realized in a simplified way.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Veículos elétricos . . . . .	1
1.2 Veículos elétricos híbridos . . . . .	2
1.2.1 Motivação para o estudo de VEHs . . . . .	2
1.2.2 Definição de VEHs . . . . .	4
1.2.3 Tipos de VEHs . . . . .	4
1.2.4 Gerenciamento de potência em VEHs . . . . .	7
1.2.4.1 Controle baseado em regras . . . . .	8
1.2.4.2 Métodos estáticos de otimização . . . . .	9
1.2.4.3 Métodos dinâmicos de otimização . . . . .	12
1.2.5 Veículos de célula a combustível . . . . .	17
1.3 Conclusão . . . . .	18
1.4 Escopo da Dissertação . . . . .	19
<b>2 Modelagem de uma bateria</b>	<b>21</b>
2.1 Principais parâmetros de uma bateria . . . . .	22
2.1.1 Voltagem . . . . .	22
2.1.2 Capacidade de carga . . . . .	22
2.1.3 Densidade de energia . . . . .	23
2.1.4 Eficiência energética . . . . .	24
2.1.5 Outros fatores . . . . .	24
2.2 Modelo da bateria . . . . .	25
2.2.1 Capacidade de Peukert . . . . .	25
2.2.2 Estado de carga . . . . .	27
2.2.3 Dimensionamento da Bateria . . . . .	29
2.3 Conclusão . . . . .	30
<b>3 Modelagem de uma célula a combustível</b>	<b>32</b>
3.1 Modelo da CaC . . . . .	33
3.1.1 Voltagem de circuito aberto . . . . .	33

3.1.2	Perdas devido a ativação do anodo e do catodo . . . . .	35
3.1.3	Perda ôhmica . . . . .	36
3.1.4	Perda devido ao transporte de massa . . . . .	37
3.1.5	Dinâmica da CaC . . . . .	38
3.1.6	Consumo . . . . .	41
3.1.7	Eficiência . . . . .	42
3.2	Controle de células a combustível . . . . .	45
3.3	Conclusão . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Modelagem e controle de um motor elétrico de indução</b>	<b>48</b>
4.1	Sistemas a estrutura variável . . . . .	49
4.2	Sistema de controle descontínuo . . . . .	50
4.3	Noções básicas de controladores por modos deslizantes . . . . .	51
4.4	Modelo dinâmico do motor elétrico . . . . .	56
4.4.1	Controle por modos deslizantes . . . . .	60
4.5	Conclusão . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo de célula a combustível</b>	<b>66</b>
5.1	Modelo dinâmico do veículo . . . . .	69
5.1.1	Representação do motorista do veículo . . . . .	71
5.1.2	Subsistemas do veículo . . . . .	72
5.2	Controle do veículo e gerenciamento de potência . . . . .	73
5.2.1	Ciclos de condução . . . . .	73
5.3	Estratégias de controle . . . . .	76
5.3.1	Veículo de célula a combustível não-híbrido . . . . .	76
5.3.2	Veículo de célula a combustível híbrido sem regeneração . . . . .	78
5.3.3	Veículo de célula a combustível híbrido regenerativo . . . . .	84
5.3.3.1	Banco de baterias como fonte principal de potência . . . . .	84
5.3.3.2	Pilha de células a combustível como fonte principal de potência . . . . .	87
5.3.3.3	Estratégia com modo de recarga rápido e controle da eficiência da pilha de CaCs e do <i>SOC</i> do banco de baterias	89
5.4	Comparação com veículos convencionais . . . . .	96
5.5	Veículos elétricos a bateria . . . . .	98
5.6	Conclusão . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Gerenciamento de potência pelo método ECMS</b>	<b>103</b>
6.1	Formulação do problema . . . . .	104
6.2	Procedimento de otimização . . . . .	107
6.3	Função de penalização . . . . .	109
6.4	Simulação e resultados obtidos . . . . .	112
6.5	Conclusão . . . . .	114
<b>7</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>116</b>
7.1	Trabalhos futuros . . . . .	117
	<b>Apêndices</b>	<b>119</b>

<b>A</b>	<b>Cadeias de Markov</b>	<b>119</b>
A.1	Cadeias de Markov finitas . . . . .	119
A.2	Matrizes estocásticas e vetores de probabilidade . . . . .	121
A.3	Processo com transições sucessivas . . . . .	122
<b>B</b>	<b>Principais equações do modelo realizado em <i>Simulink</i></b>	<b>124</b>
B.1	Banco de baterias . . . . .	124
B.2	Pilha de CaCs . . . . .	125
B.3	Motor elétrico de indução . . . . .	127
B.4	Motorista do veículo . . . . .	128
B.5	Dinâmica do veículo . . . . .	129
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>130</b>

# Lista de Figuras

1.1	Veículo híbrido em configuração série. . . . .	5
1.2	Veículo híbrido em configuração em paralelo. . . . .	5
1.3	Lexus RX400h. . . . .	7
1.4	Honda Accord Hybrid. . . . .	7
1.5	Diagrama de blocos representativo da técnica A-ECMS. . . . .	12
1.6	Diagrama de blocos do veículo com gerenciamento de potência através de programação dinâmica estocástica. . . . .	15
1.7	DaimlerCrysler Natrium. . . . .	18
1.8	BMW Clean Mini. . . . .	18
2.1	Circuito elétrico simplificado equivalente a uma bateria. . . . .	22
2.2	Voltagem de circuito aberto em função do estado de carga para uma célula típica de bateria chumbo ácido. . . . .	29
3.1	Mecanismo de uma célula a combustível típica. . . . .	33
3.2	Circuito elétrico equivalente de uma célula a combustível. . . . .	39
3.3	Variação da tensão e da potência da célula a combustível em função da inserção e retirada de carga. . . . .	40
3.4	Variação da tensão da pilha de células a combustível em função da corrente imposta com a capacitância da CaC aumentada em 05 vezes. . . . .	41
3.5	Vazão e quantidade de $H_2$ consumido em função da inserção e retirada de carga da pilha de CaCs. . . . .	43
3.6	Eficiência da pilha de CaCs em função da inserção e da retirada de carga. . . . .	44
4.1	Plano de fase para o sistema (4.5). . . . .	52
4.2	Plano de fase para o sistema (4.6). . . . .	53
4.3	Plano de fase para o sistema (4.4). . . . .	54
4.4	Trajetórias do sistema (4.4) para diferentes condições de atraso: (a) atraso igual a 0.1s; (b) atraso igual a 0.05s; (c) atraso igual a 0.01s. Sinal de controle do sistema (4.4) para diferentes condições de atraso: (d) atraso igual a 0.1s; (e) atraso igual a 0.05s; (f) atraso igual a 0.01s. . . . .	55
4.5	Plano de fase para o sistema (4.7). . . . .	56
4.6	Estrutura de um motor elétrico de indução. . . . .	57
4.7	Estator de um motor elétrico de indução. . . . .	57
4.8	Rotor de um motor elétrico de indução. . . . .	57
4.9	Modelo de um motor elétrico de indução. . . . .	58

4.10	Torque solicitado, erro associado ao torque, erro associado ao fluxo magnético e corrente elétrica do ME. . . . .	63
4.11	Sinais de controle do motor elétrico . . . . .	63
5.1	Configurações de veículos de células a combustível: (a) VECaC não híbrido; (b) VECaC híbrido sem regeneração; (c) VECaC híbrido regenerativo. . . . .	67
5.2	Diagrama de blocos da dinâmica do veículo com a adição de um controlador PI. . . . .	72
5.3	Diagrama de blocos do veículo híbrido de célula a combustível. . . . .	72
5.4	Velocidade do veículo e potência necessária para realização do ciclo FUDS. . . . .	75
5.5	Velocidade do veículo e potência necessária para realização do ciclo HFET. . . . .	75
5.6	Velocidade do veículo e potência necessária para realização do ciclo SFTP. . . . .	76
5.7	Estratégia de controle para VECaCs não-híbridos. . . . .	77
5.8	Simulação de VECaC não-híbrido com ciclo de condução FUDS. . . . .	77
5.9	Estratégia de controle para VECaCs híbridos sem regeneração. . . . .	79
5.10	Distribuição de potência obtida em simulação para o VECaC híbrido sem regeneração com ciclo de condução FUDS. . . . .	80
5.11	<i>SOC</i> do banco de baterias para a simulação do VECaC híbrido sem regeneração com ciclo de condução FUDS. . . . .	81
5.12	Velocidade do veículo e estado de carga do banco de baterias para simulação de VECaC híbrido sem regeneração com 10 repetições do ciclo de condução SFTP. . . . .	82
5.13	Potências da pilha de CaCs e do banco de baterias, e variação do <i>SOC</i> para simulação de VECaC híbrido sem regeneração com ciclo de condução FUDS e <i>SOC<sub>inicial</sub></i> igual a zero. . . . .	83
5.14	Estratégia de controle para VECaCs híbridos regenerativos com banco de baterias como fonte principal de potência. . . . .	86
5.15	Simulação de VECaC híbrido com banco de baterias como fonte principal de potência e ciclo de condução FUDS. . . . .	87
5.16	Estratégia de controle para VECaCs híbridos regenerativos com a pilha de CaCs como fonte de energia principal. . . . .	88
5.17	Simulação de VECaC híbrido regenerativo com pilha de CaCs como fonte de energia principal. . . . .	89
5.18	Lógica de controle para veículos híbridos com penalidade para <i>SOC</i> e operação da pilha de CaCs fora de regiões de baixa eficiência. . . . .	92
5.19	Simulação de VECaC híbrido regenerativo com estratégia de controle que evita operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência e penaliza o <i>SOC</i> do banco de baterias para o ciclo de condução FUDS. . . . .	93
5.20	Potência solicitada/fornecida ao banco de baterias e <i>SOC</i> para simulação de veículo híbrido regenerativo com a estratégia de controle que opera a pilha de CaCs fora de regiões de baixa eficiência e penaliza o <i>SOC</i> do banco de baterias para o ciclo de condução FUDS. . . . .	93
5.21	<i>SOC</i> do banco de baterias para a realização do ciclo de condução FUDS utilizando as três estratégias para gerenciamento de potência em VECaCs híbridos regenerativos. . . . .	94

5.22	Consumo de hidrogênio para um veículo híbrido com $GH = 0,5$ para as três estratégias de controle descritas. . . . .	96
5.23	Estratégia de controle para VEBs sem regeneração. . . . .	99
5.24	Estratégia de controle para VEBs com regeneração. . . . .	99
5.25	Consumo equivalente em km/l de gasolina para cada ciclo de condução. . . . .	100
6.1	Consumo de hidrogênio (g/s) de uma célula a combustível de 200 células em função da potência solicitada (kW). . . . .	107
6.2	Funções de custo para diferentes valores de $\alpha > \beta$ e restrições do tipo $x_1 + x_2 = K$ . . . . .	108
6.3	Funções de custo para diferentes valores de $\alpha < \beta$ e restrições do tipo $x_1 + x_2 = K$ . . . . .	108
6.4	Função de penalização para diferentes valores do termo polinomial. . . . .	111
6.5	Velocidade do veículo e $SOC$ do banco de baterias para simulações com $n=1$ e $n=21$ em $f(SOC) = 1 - x_{SOC}^n(t)$ . . . . .	112
6.6	Potência necessária ao motor elétrico, potência requisitada ao banco de baterias, potência requisitada a pilha de CaCs e $SOC$ do banco de baterias para realização do ciclo de condução FUDS. . . . .	113
6.7	Consumo equivalente em km/l de gasolina obtidos em simulação para a lógica de controle da Seção 5.3.3.3 e para o emprego da técnica ECMS e ganho associado. . . . .	114
A.1	Diagrama representativo do modelo de mudança climática. . . . .	121

# Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros nominais usuais de uma bateria chumbo ácido. . . . .	26
2.2	Tempo de descarga aproximado para uma bateria com capacidade nominal de 40Ah definida para 5h, em função da solicitação de diferentes correntes. . . . .	27
3.1	Tipos de células a combustível. . . . .	34
3.2	Parâmetros da pilha de células a combustível. . . . .	41
4.1	Parâmetros do motor elétrico de indução utilizados na simulação apresentada. . . . .	64
5.1	Vantagens e desvantagens das diferentes configurações de VECaCs. . .	68
5.2	Parâmetros do veículo. . . . .	70
5.3	Principais características dos ciclos de condução FUDS, HFET e SFTP.	74
5.4	Consumo de hidrogênio e eficiência média da pilha de CaCs para o VECaC não híbrido para três ciclos de condução diferentes. . . . .	78
5.5	Consumo de hidrogênio, eficiência média da pilha de CaCs e <i>SOC</i> médio do BB para o veículo híbrido sem regeneração para três ciclos de condução diferentes. . . . .	81
5.6	Consumo de hidrogênio, eficiência média da pilha de CaCs e <i>SOC</i> médio do banco de baterias do VECaC híbrido com regeneração e BB como fonte de potência principal para três ciclos de condução diferentes. . . .	87
5.7	Consumo de hidrogênio, eficiência média da pilha de CaCs e <i>SOC</i> médio do BB para o VECaC híbrido regenerativo com pilha de CaCs como principal fonte de energia para três ciclos de condução. . . . .	89
5.8	Energia da pilha de CaCs utilizada para carga do BB e energia aproveitada durante frenagem regenerativa para as estratégias de gerenciamento de potência para VECaCs com $GH = 0,5$ , $SOC_{inicial} = 50\%$ e ciclo de condução FUDS. . . . .	95
5.9	Consumo de hidrogênio, eficiência média da pilha de CaCs e <i>SOC</i> médio do banco de baterias do VECaC híbrido regenerativo com aplicação da estratégia de controle com modos de recarga para três ciclos de condução diferentes. . . . .	95
5.10	Consumo equivalente em km/l de gasolina para os VECaCs não híbrido, híbrido com regeneração e híbrido sem regeneração. . . . .	97

5.11	Consumo equivalente em km/l de gasolina para VEBs com regeneração e não regenerativo. . . . .	98
5.12	Consumo equivalente em km/l de gasolina para cada ciclo de condução. . . . .	100
6.1	Consumo equivalente em km/l de gasolina obtidos em simulação para a lógica de controle da Seção 5.3.3.3 e para o emprego da técnica ECMS e ganho associado. . . . .	114
A.1	Probabilidades de mudança da condição climática de um dia para outro. . . . .	120

# Abreviaturas

**ABVE** — associação brasileira do veículo elétrico

**ADVISOR** — simulador de veículos avançado (*advanced vehicle simulator*)

**A-ECMS** — estratégia de minimização por consumo equivalente adaptativa (*adaptive equivalent consumption minimization strategy*)

**BB** — banco de baterias

**CaC** — célula a combustível

**DOE** — departamento de energia (*department of energy*)

**ECMS** — estratégia de minimização por consumo equivalente (*equivalent consumption minimization strategy*)

**HFET** — ciclo de economia de combustível em estradas (*highway fuel economy driving schedule*)

**FUDS** — ciclo federal de condução urbana (*federal urban driving schedule*)

**MCI** — motor de combustão interna

**ME** — motor elétrico

**PEM** — membrana polimérica (*proton exchange membrane*)

**PI** — proporcional e integral

**SFTP** — procedimento de teste federal suplementar (*supplemental federal test procedure*)

**SOC** — estado de carga (*state of charge*)

**SOE** — estado de energia (*state of energy*)

**VE** — veículo elétrico

**VEB** — veículo elétrico a bateria

**VECaC** — veículo elétrico de célula a combustível

**VEH** — veículo elétrico híbrido

**VMCI** — veículo de motor de combustão interna

**VSCS** — sistemas de controle a estrutura variável (*variable structure control systems*)

**VSS** — sistemas a estrutura variável (*variable structure systems*)

# Capítulo 1

## Introdução

Uma das características mais importantes do transporte sustentável é o uso eficaz da energia. Veículos mais leves e motores mais eficientes contribuem para a preservação dos recursos naturais e diminuição das emissões lançadas na atmosfera. O setor de transporte é o principal responsável pelas emissões nos grandes centros urbanos. Estima-se que mais de 900 milhões de toneladas de gás carbônico ( $CO_2$ ) são despejadas na atmosfera anualmente.

Vários estudos indicam que a incidência de problemas respiratórios e cardiovasculares e até de mortes aumenta quando os índices de poluição chegam a patamares elevados, embora não se tenha pleno conhecimento dos mecanismos pelos quais as substâncias tóxicas presentes no ar afetam o organismo. Um levantamento feito pelo Departamento de Medicina Preventiva da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo revelou que, nos dias mais poluídos, o número de internações por doenças respiratórias cresce cerca de 8%, e a mortalidade aumenta de 4% a 6%.

Uma alternativa para diminuir esses efeitos e melhorar a qualidade do ar nas metrópoles é a utilização de veículos elétricos.

### 1.1 Veículos elétricos

Veículos elétricos tais como os tratados nesta Dissertação são veículos automotores que utilizam pelo menos um motor elétrico para sua tração. Incluem-se, dentre outros, os veículos elétricos a bateria (VEBs), híbridos (VEHs), de célula a combustível (VECaCs) e trólebus (ABVE 2006).

Os primeiros veículos elétricos foram desenvolvidos em torno de 1830, mas veículos comerciais só começaram a surgir no final do século XIX. O histórico de seu desenvolvimento e informações relacionadas podem ser encontradas em Larminie & Lowry (2003) e Chan (2002). Hoje em dia já existem vários modelos de VEs à disposição no mercado e, apesar desta tecnologia ter se sobressaído com relação a outras que já surgiram, os VEs ainda não se estabeleceram de maneira semelhante aos veículos convencionais propelidos por motores de combustão interna. Isso se deve, principalmente, à sua baixa autonomia e dificuldade de abastecimento (recarga). Entretanto, aos poucos, as preocupações com o meio ambiente, principalmente quanto a emissão de poluentes e ruído, além da diminuição das reservas de petróleo, aliadas aos recentes avanços no projeto e construção de baterias e células a combustível (CaCs) e ao desenvolvimento de novas tecnologias, vêm fazendo crescer o interesse nos veículos elétricos e híbridos. As pesquisas na área vêm tornando-os cada vez mais viáveis tecnológica e comercialmente, e com isso afirmando esta tecnologia como a provável sucessora da atual.

A principal motivação para o desenvolvimento de veículos elétricos está relacionada a busca por fontes de energia que sejam menos poluentes e dependentes de petróleo do que os atuais motores de combustão interna (MCI). Veículos elétricos podem fornecer transporte urbano com emissão zero, além de oferecer uma forma de energia mais eficiente alcançável através de diferentes fontes. Os veículos elétricos têm potencial para impactar fortemente o mercado automotivo, a infraestrutura de transportes terrestres e o meio ambiente em um futuro não muito distante.

## **1.2 Veículos elétricos híbridos**

### **1.2.1 Motivação para o estudo de VEHs**

Veículos elétricos possuem como principais vantagens a emissão zero, o baixo ruído e a não dependência direta de derivados de petróleo. Entretanto, veículos elétricos com uma única fonte de energia apresentam limitações que dificultam seu estabelecimento como verdadeira alternativa aos veículos atuais, a saber: Os veículos elétricos a bateria (VEBs), além de baixa autonomia, precisam de muito tempo para ser recarregados; os veículos movidos através de energia solar possuem baixa eficiência em lugares com

pouca incidência de luz do Sol; os veículos que utilizam supercapacitores possuem baixa capacidade de armazenamento de energia e os trólebus esbarram na dificuldade de implantação da infraestrutura necessária para sua utilização. Além disso, todos esses veículos possuem desempenho aquém do objetivado para veículos leves (Guenter 2001), ônibus e quaisquer outros veículos automotores utilizados nos dias de hoje. Por esse motivo, sua utilização é restrita. VEBs, por exemplo, são muito encontrados como scooters e carros de golfe e raramente como veículos leves de passeio.

Devido às limitações dos veículos elétricos puros (que possuem uma única fonte de energia), a utilização de veículos elétricos híbridos tornou-se a alternativa mais interessante para o projeto de veículos leves de passeio. Isso é devido, basicamente, a dois conjuntos de fatores: ambientais e políticos.

Do ponto de vista ambiental, os MCI, ainda hoje largamente utilizados na indústria automotiva, sempre foram grandes responsáveis pela degradação do ar em áreas urbanas devido as emissões resultantes de seu funcionamento. Isso vêm preocupando legisladores de países centrais há décadas, o que têm resultado no estabelecimento de limites mais rígidos para emissões de veículos leves (Musardo & Staccia 2003). Em decorrência, avanços significativos têm sido alcançados pelas principais montadoras neste sentido. Entretanto, enquanto as emissões industriais vêm diminuindo ao longo dos anos, as emissões de veículos automotores continuam aumentando (US Environmental Protection Agency 2006).

Do ponto de vista político, a preocupação é relativa à escassez do petróleo. A medida que este recurso, hoje essencial para manutenção dos sistemas produtivos e do estilo de vida que a humanidade conhece, for tornando-se limitado, o mundo ficará à mercê das poucas instituições que o controlarão. Em muitos países, existe a preocupação quanto ao controle deste recurso por parte de apenas algumas nações do mundo. Como exemplo, basta observar a situação dos Estados Unidos da América (EUA): o país importa 53% do petróleo que consome e projeta um aumento para 70% no ano de 2025 (US Department of Energy 2006). Em função disso, os EUA lideram a tendência de renovação nos sistemas de energia, de maneira a evitar que tensões políticas em áreas de produção de petróleo, e a provável escassez deste recurso ao longo dos anos, influam no seu sistema produtivo e na sociedade de consumo que o mantém. Uma vez que a quantidade de petróleo utilizado na produção de combustíveis para

veículos leves e pesados nos EUA diz respeito a 40% do total do consumo do país, fica evidente o porquê da economia de combustível ter se tornado de grande relevância.

### 1.2.2 Definição de VEHs

Veículos elétricos híbridos são veículos nos quais duas ou mais fontes diferentes de energia são utilizadas no sistema de propulsão. A combinação mais comum é a utilização de motor de combustão interna em conjunto com um banco de baterias (BB).

Entretanto, a utilização de células a combustível em veículos, híbridos ou não, com o objetivo de geração de energia para propulsão está cada vez mais presente, e os avanços tecnológicos vêm acontecendo de maneira a transformar esta alternativa em realidade.

### 1.2.3 Tipos de VEHs

Os veículos elétricos híbridos podem ser classificados em três categorias diferentes, de acordo com sua construção (arquitetura) e maneira pela qual a energia gerada pelas diferentes fontes é transmitida para as rodas. São elas: série, paralelo ou split (Larminie & Lowry 2003, Friedman 2003, Jalil, Kheir & Salman 1997).

Na configuração série, a força de tração que chega as rodas é obtida através de um ou mais motores elétricos, alimentados pelas fontes de energia do veículo. Caso um motor de combustão interna seja uma das fontes do sistema, um gerador irá converter a energia do MCI em energia elétrica que será somada à energia proveniente da(s) outra(s) fonte(s) e fornecida as rodas através do(s) motor(es) elétrico(s). A Figura 1.1 ilustra um VEH em configuração série.

Na configuração em paralelo (Figura 1.2), o veículo pode ser propelido diretamente pelo motor de combustão interna, através de um sistema de engrenagens que transmite a potência gerada pelo mesmo as rodas e/ou através de motores elétricos alimentados por outra(s) fonte(s) de energia, normalmente um banco de baterias.

A configuração split é uma variante da configuração em paralelo na qual cada um dos eixos do veículo é alimentado através de uma fonte de energia diferente. Por exemplo, um motor a combustão pode alimentar o eixo dianteiro enquanto um banco

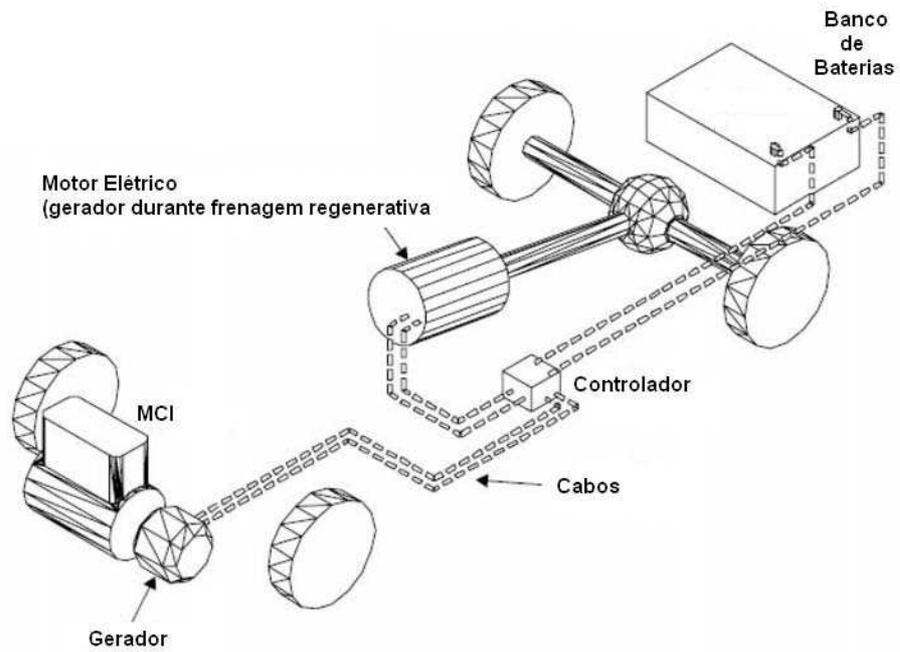


FIGURA 1.1: Veículo híbrido em configuração série.

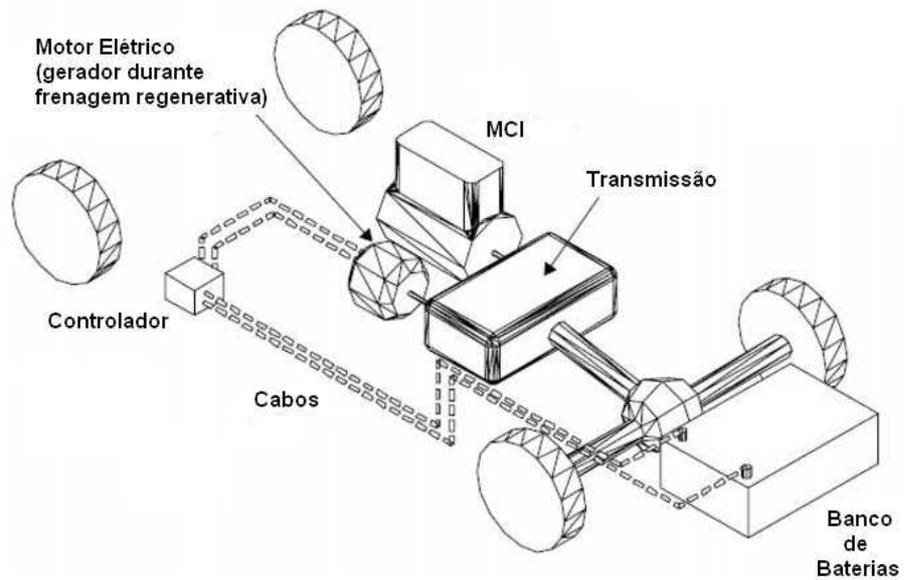


FIGURA 1.2: Veículo híbrido em configuração em paralelo.

de baterias o eixo traseiro, através de um ou mais motores elétricos.

Outra classificação de VEHs difundida na literatura, os divide entre os que são capazes de manter a carga da bateria entre limites determinados em qualquer situação de condução, e os que não possuem essa capacidade. Os VEHs do primeiro tipo são chamados de mantenedores de carga (do inglês, *charge sustaining*). Os veículos deste tipo não necessitam ser conectados a rede elétrica para que a bateria seja recarregada. Os VEHs do segundo tipo são conhecidos como esgotadores de carga (do inglês, *charge depleting*) e necessitam ser conectados a rede elétrica periodicamente para recarregar a bateria. A maioria dos veículos elétricos híbridos produzidos pelas montadoras são do tipo mantenedores de carga, devido a evidente vantagem de serem veículos sempre prontos para operar, não necessitando de períodos de recarga.

O primeiro critério avaliado ao se projetar um VEH diz respeito ao seu sistema de propulsão. Nesta etapa, a escolha entre as configurações série, paralelo ou split é realizada. Em seguida, o dimensionamento das fontes de energia é realizado de acordo com os objetivos delineados para o veículo, tal como ser ou não mantenedor de carga. Entretanto, deve-se ter em mente que outros parâmetros são importantes para que um VEH tenha sucesso no mercado. Os critérios que um VEH deve atender podem ser resumidos da seguinte maneira:

- Desempenho: autonomia, aceleração, velocidade máxima e capacidade de carga;
- Emissões: deve atender à regulamentação vigente;
- Segurança: condução e frenagem adequadas, proteção contra materiais perigosos e boa resistência no caso de acidentes;
- Custo: custos de aquisição, operação e reparo moderados;
- Conveniência no abastecimento;
- Durabilidade e resistência;
- Conforto: baixo ruído, capacidade de acomodar passageiros, volume para armazenamento de carga, etc.

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

Dois exemplos de veículos híbridos movidos por MCI e banco de baterias são o *Lexus RX400h* e o *Honda Accord Hybrid*, mostrados nas Figuras 1.3 e 1.4.



FIGURA 1.3: Lexus RX400h.



FIGURA 1.4: Honda Accord Hybrid.

#### 1.2.4 Gerenciamento de potência em VEHs

A utilização de fontes diferentes de energia em um mesmo veículo demanda uma estratégia de controle que gerencie o funcionamento desses sistemas objetivando melhor desempenho. Isso implica em satisfazer a solicitação de potência imposta ao veículo sujeito às restrições tais como: possuir uma determinada autonomia e baixa emissão de poluentes. Em outras palavras, o gerenciamento do fluxo de energia torna-se fator fundamental em veículos híbridos. O projeto de um algoritmo de controle que determine a quantidade de potência necessária à uma solicitação do motorista, bem como a divisão adequada dessa potência entre as fontes de energia do sistema é denominado Estratégia de Gerenciamento de Potência (do inglês, *Power Management*) e é realizado através de diferentes abordagens na literatura, que podem ser agrupadas em 03 (três) categorias descritas a seguir.

A primeira forma de abordagem diz respeito à utilização de técnicas heurísticas, tais como lógica fuzzy e controle baseado em regras, para o desenvolvimento do algoritmo de controle (Baumann, Washington, Glenn & Rizzoni 2000, Schouten, Salman

& Kheir 2002). Estes tipos de abordagem não exploram de maneira completa veículos complexos tais como os híbridos, entretanto têm a seu favor a facilidade e o baixo custo de implementação.

A segunda forma de abordagem consiste na utilização de métodos estáticos de otimização. Normalmente, a potência elétrica é traduzida em uma quantidade equivalente de estados estacionários de consumo de combustível de maneira a calcular o custo total. A estratégia de controle ótimo determina, então, a divisão apropriada da solicitação de potência entre cada uma das fontes de energia utilizando mapas de eficiência de estados estacionários.

O terceiro método considera a dinâmica do sistema ao realizar a otimização. Além disso, a otimização passa a ser considerada de acordo com um horizonte de tempo, ao invés de instantes específicos. Alguns exemplos são dados a seguir.

#### **1.2.4.1 Controle baseado em regras**

Controladores fundamentados em regras para gerenciamento de potência em veículos híbridos são explorados com frequência na literatura, basicamente em função de sua fácil implementação e ao fato de que é razoavelmente fácil desenvolver controladores com desempenho aceitável em um curto espaço de tempo (Schell, Peng, Tran, Stamos, Lin & Kim 2005).

Alguns trabalhos exploram exclusivamente controladores baseados em regras para implementação do gerenciamento de potência em veículos híbridos (Jalil et al. 1997), porém outros utilizam esse tipo de controlador como ponto de partida para a implementação de estratégias de otimização conforme será visto nas próximas seções.

Em Cho (2004), por exemplo, é desenvolvida uma estratégia de controle para veículos que utilizam uma pilha de células a combustível como sistema de energia principal e um banco de baterias como fonte de potência auxiliar. A estratégia de controle é comparada entre o veículo híbrido e um outro que utiliza apenas uma pilha de CaCs como fonte geradora de energia, bem como entre um veículo híbrido sem regeneração, no qual o sistema não possui a capacidade de regeneração de energia e a bateria pode ser carregada apenas através da pilha de células a combustível. A avaliação do desempenho do controlador é feita através de simulações realizadas para diferentes ciclos de condução e os fluxos de energia correspondentes são apresentados. Os resultados

mostram que a estratégia proposta, que consiste em operar a pilha de CaCs em regiões de alta eficiência, melhora o consumo de combustível do VEH se comparado ao não híbrido e ao híbrido sem regeneração. Além disso, o controle do nível de carga da bateria entre limites apropriados melhora o aproveitamento na regeneração de energia e contribuiu para a melhoria na economia de combustível.

Em (Lee & Sul 1998) o gerenciamento de potência para um ônibus movido a um motor diesel e um banco de baterias é realizado através de um controlador fuzzy. A implementação da lógica do controlador é feita com o auxílio de ensaios em dinamômetro. As entradas para o controlador são a posição do pedal do acelerador e a velocidade de rotação do motor elétrico, e a saída um sinal normalizado que representa a razão entre o torque solicitado e o torque efetivo do motor elétrico. As características de condução no percurso desejado são obtidas através das características de diversos motoristas e de diferentes condições de carga e utilização da bateria.

Os resultados obtidos em Lee & Sul (1998) demonstram a robustez do controlador com relação a diversas perturbações, tais como condições de carga e perfil de condução do motorista. O desempenho do controlador é comparado com o de controladores determinísticos fundamentados em tabelas de desempenho/eficiência dos sistemas do ônibus. É mostrado que o controlador fuzzy melhorou o nível de emissões de  $NO_x$  e o gerenciamento do estado de carga (*SOC*, do inglês, *State of Charge*) da bateria.

Outras abordagens de gerenciamento de potência em veículos híbridos através da aplicação de lógica fuzzy podem ser encontradas em Salmanx, Schouten & Kheir (2000) e Schouten et al. (2002).

#### **1.2.4.2 Métodos estáticos de otimização**

O gerenciamento de potência em veículos híbridos gira em torno da capacidade do veículo de satisfazer a solicitação de potência do motorista, consumindo a menor quantidade possível de combustível. Além disso, o controlador deve ser capaz de manter a carga do sistema armazenador de energia entre limites pré-estabelecidos enquanto em operação. Quando um veículo leve híbrido é certificado, por exemplo, ele deve ser capaz de satisfazer determinadas exigências de desempenho, ou seja, realizar um ciclo de condução determinado (normatizado), e possuir, ao final do ciclo de teste, o mesmo nível de carga na bateria que possuía quando o iniciou.

Com isso em mente, e tendo em vista que os controladores baseados em regras, apesar de simples de implementar, geralmente possuem desempenho aquém do desejado, é natural que a aplicação de métodos de otimização seja estudada para o desenvolvimento de controladores para gerenciamento de potência em VEHs.

Sob esta ótica, pode-se dizer que existem dois tipos de métodos de otimização aplicáveis, os que consideram a dinâmica do sistema e geralmente realizam a otimização uma vez conhecido o ciclo de condução a ser desenvolvido pelo veículo, e os que realizam otimização instantânea de acordo com as variáveis do sistema em cada instante de tempo.

Dos métodos de otimização instantânea, certamente o mais difundido na literatura para veículos elétricos híbridos é o chamado *Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS) que consiste na "conversão" da potência do sistema elétrico em um consumo de combustível equivalente. Este método é genérico por natureza e pode ser aplicado a VEHs com duas ou mais fontes de energia de qualquer tipo (MCI, CaC etc), ou mesmo a VEHs com diferentes configurações (série, paralelo ou split).

Em Paganelli, Ercole, Brahma, Guezennec & Rizzoni (2001), o método ECMS é aplicado a um veículo híbrido movido através da energia gerada por um MCI em conjunto com um banco de baterias. A estratégia consiste em determinar um consumo de combustível equivalente para o sistema elétrico e realizar a minimização do consumo total do veículo em cada instante de tempo. Isso significa que não é necessário o conhecimento prévio do ciclo de condução a ser realizado e permite a implementação do algoritmo em aplicações de tempo real.

A solicitação de potência do motorista deve ser distribuída entre as fontes de energia do veículo objetivando minimizar o consumo instantâneo de combustível, tal como apresentado na Equação (1.1).

$$\min_{\{P_{me}(t), P_{mci}(t), t \in \{1 \dots N\}\}} \sum_{t=1}^N \dot{m}_{eq}(t) \quad (1.1)$$

Com as seguintes restrições:

$$\begin{aligned} P_{req}(t) &= P_{mci}(t) + P_{el}(t) \\ 0 &< SOE_{min} \leq SOE \leq SOE_{max} \end{aligned}$$

$$0 \leq P_{mci} \leq P_{mci_{max}}$$

$$P_{el_{min}} \leq P_{el} \leq P_{el_{max}}$$

Na qual  $\dot{m}_{eq}(t)$  representa o consumo total de combustível do veículo, ou seja, o consumo do motor de combustão interna somado ao consumo equivalente do motor elétrico,  $SOE$  é o estado de energia da bateria,  $P_{mci}$  é a potência fornecida pelo MCI e  $P_{el}$  é a potência fornecida pelo sistema elétrico (bateria).

O consumo equivalente para o sistema elétrico é determinado considerando que a eletricidade utilizada durante uma descarga da bateria deverá ser reposta no futuro através da utilização do motor de combustão interna, ou seja, através do consumo do combustível que alimenta o MCI. Em outras palavras, a utilização da bateria é convertida em termos de um custo futuro de utilização de combustível. Para tal, a eficiência média das trajetórias de fluxo de energia é considerada.

Um exemplo de aplicação da estratégia ECMS ao gerenciamento de potência em veículos com mais de duas fontes geradoras de energia pode ser encontrado em Pisu & Rizzoni (2005). Os autores aplicam a estratégia em um ônibus urbano equipado com o conjunto motor de combustão interna, banco de baterias e banco de supercapacitores. Algumas vantagens da aplicação da estratégia ECMS são citadas pelos autores, dentre elas o fato dela exigir apenas o conhecimento dos mapas de eficiência dos vários subsistemas do veículo, além de seus torques e limites de potência, e a facilidade de sua aplicação em tempo real devido à fácil e rápida determinação da distribuição ótima de potência em cada instante de tempo.

Apesar de suas vantagens, a técnica ECMS possui a desvantagem de ser dependente dos fatores de conversão que determinam o consumo equivalente de combustível, e esses fatores podem variar em função das condições em que o veículo está sendo conduzido. Em Musardo, Rizzoni & Staccia (2005) é mostrado que fatores de conversão adequados a um determinado perfil de velocidades podem não o ser para outros, implicando em fraco desempenho ou mesmo na não manutenção do estado de carga do banco de baterias. Em função disso, os autores propõem uma adaptação da técnica ECMS denominada *Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy* (A-ECMS) que consiste na realização de um algoritmo de estimação que atualiza os fatores de conversão constantemente em função da potência solicitada ao VEH. O diagrama de blocos dessa

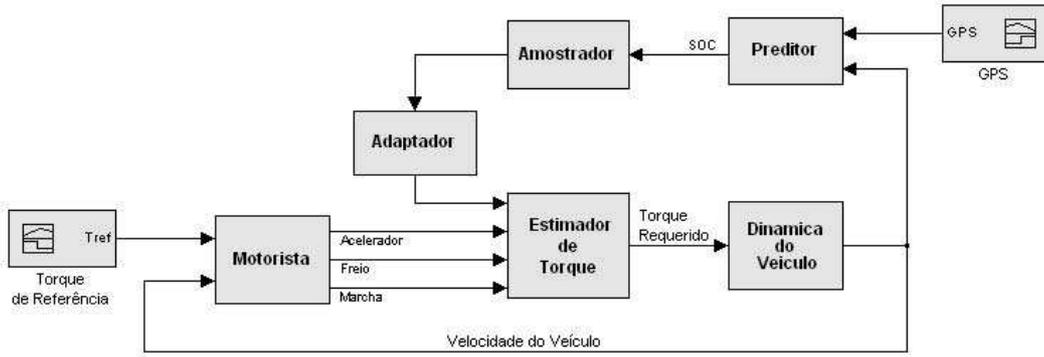


FIGURA 1.5: Diagrama de blocos representativo da técnica A-ECMS.

abordagem é mostrado na Figura 1.5.

No Capítulo 6 dessa Dissertação, a técnica ECMS será abordada para um veículo de célula a combustível com fator de conversão simplificado, porém com ações de controle que garantem a manutenção do *SOC* do banco de baterias entre os limites desejados.

### 1.2.4.3 Métodos dinâmicos de otimização

Em Lin, Kang, Grizzle & Peng (2001) e Lin, Peng & Grizzle (2003), o gerenciamento de energia para um caminhão híbrido com configuração em paralelo, cujas fontes de energia são um motor a combustão interna e um banco de baterias é abordado com enfoque de otimização utilizando programação dinâmica. Para tal, uma função de custo é primeiramente determinada, com o objetivo de minimizar o consumo de combustível e as emissões de determinados gases em função de um ciclo de condução desejado, tal como apresentado na Equação (1.2). A função de custo restringe, também, o estado de carga terminal da bateria a um valor pré-determinado objetivando maior vida útil da mesma.

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k)) + G(x(N)) \quad (1.2)$$

Na qual:

$$L(x(k), u(k)) = Comb(k) + \mu NO_x(k) + v Part(k) \quad (1.3)$$

$$G(x(N)) = \alpha (SOC(N) - SOC_f)^2 \quad (1.4)$$

representam o consumo de combustível ( $Comb(k)$ ), as emissões de  $NO_x$  ( $NO_x(k)$ )

e particulados ( $Part(k)$ ) pelo veículo e a restrição imposta ao estado de carga da bateria, sendo  $\mu$ ,  $v$  e  $\alpha$  constantes que conferem peso a cada parâmetro no processo de otimização.

Em seguida a técnica de programação dinâmica é utilizada de maneira a determinar uma política ótima de controle. A grande vantagem da utilização de programação dinâmica é que essa técnica pode facilmente lidar com as restrições e as não-linearidades do problema enquanto obtendo uma solução ótima global (Luenberger 1979). A contrapartida fica por conta da necessidade de conhecimento antecipado do ciclo de condução a ser realizado pelo veículo.

A técnica se baseia no princípio da otimalidade de Bellman e decompõe o problema de otimização em uma sequência de minimizações mais simples tal como apresentado a seguir.

$$J_k^* = \min_{u(N-1)} [L(x(N-1), u(N-1)) + G(x(N))] \quad (1.5)$$

O método de otimização utilizando programação dinâmica resulta em melhorias no consumo de combustível e na emissão de poluentes porém não pode ser diretamente implementado, uma vez que necessita de informações futuras sobre os estados. Dessa maneira, o método é utilizado como base para a melhoria de um algoritmo de controle baseado em regras, implementável, e que torna-se próximo de ótimo tal como mostrado em Lin et al. (2003). Alguns dos trabalhos mostram, também, resultados de um algoritmo de otimização que leva em conta restrições impostas à troca de marchas no veículo, somada as restrições já citadas.

Além de não ser diretamente implementável, o método de programação dinâmica determinístico realizado em Lin et al. (2001) e Lin et al. (2003), é desenvolvido para um ciclo de condução específico e o algoritmo resultante pode não ser ótimo ou mesmo mantenedor da carga do banco de baterias quando aplicado a ciclos de condução diferentes. Para contornar essas dificuldades, uma estratégia de programação dinâmica estocástica pode ser aplicada, tal como exposto em Lin, Peng & Grizzle (2004).

Nessa abordagem, a potência demandada ao veículo,  $P_{dem}$ , é tratada como um processo dinâmico discreto e estocástico, obtido através da combinação de vários ciclos de condução diferenciados. Isso é feito através da utilização do conceito de *cadeia de Markov* (no Apêndice A desta Dissertação são apresentados conceitos introdutórios ao

assunto), tal como exposto a seguir.

É assumido que a potência demandada ao veículo é composta por um conjunto finito de valores discretos, tal como apresentado na Equação (1.6).

$$P_{dem} \in \{P_{dem}^1, P_{dem}^2, \dots, P_{dem}^{N_P}\} \quad (1.6)$$

A velocidade de rotação das rodas,  $w_{wh}$ , é também discretizada, sendo tratada como um conjunto finito de valores, tal como apresentada na Equação (1.7).

$$w_{wh} \in \{w_{wh}^1, w_{wh}^2, \dots, w_{wh}^{N_w}\} \quad (1.7)$$

A dinâmica de  $P_{dem}$  é obtida através da Equação (1.8).

$$\begin{aligned} Pr\{P_{dem,k+1} = P_{dem}^j | P_{dem} = P_{dem}^i, \omega_{roda} = \omega_{roda}^l\} &= p_{il,j} \\ i, j &= 1, 2, \dots, N_P \\ l &= 1, 2, \dots, N_w \end{aligned} \quad (1.8)$$

Onde  $\sum_{j=1}^{N_P} p_{il,j} = 1$  e  $p_{il,j}$  representa a probabilidade de o sistema estar em  $P_{dem}^j$  no instante  $k + 1$  uma vez que encontre-se em  $P_{dem}^i$  e  $w_{wh}^l$  no instante  $k$ .

Dessa maneira, especificar as probabilidades de transição de estados  $p_{il,j}$  é equivalente a definir as características do ciclo de condução desejado. Isso pode ser realizado através da combinação de informações conhecidas, tais como ciclos de condução normalizados. Em Lin et al. (2004), as probabilidades de transição de estados são calculadas através do seguinte estimador:

$$\hat{p}_{il,j} = \frac{m_{il,j}}{m_{il}} \quad se \quad m_{il} \neq 0 \quad (1.9)$$

Onde  $m_{il,j}$  é o número de ocorrências da transição de  $P_{dem}^i$  para  $P_{dem}^j$  quando a velocidade das rodas é  $w_{wh}^l$ , e  $m_{il} = \sum_{j=1}^n m_{il,j}$ . O par  $(P_{dem}^i, w_{wh}^l)$  é obtido através da quantização de  $(P_{dem}, w_{dem})$ , os quais são determinados através da dinâmica do veículo com base em ciclos de condução normalizados.

O modelo do veículo é composto por três variáveis de estado, a saber: *SOC*, velocidade das rodas ( $w_{wh}$ ) e potência demandada pelo motorista ( $P_{dem}$ ), e pode ser

representado em diagramas de blocos tal como apresentado na Figura 1.6.

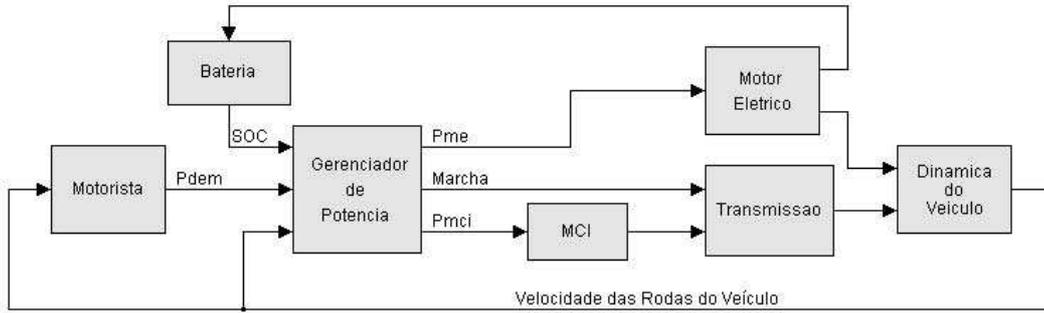


FIGURA 1.6: Diagrama de blocos do veículo com gerenciamento de potência através de programação dinâmica estocástica.

O modelo do motorista baseado em *cadeia de Markov* é usado para determinar a distribuição de probabilidades da potência demandada no futuro. Em outras palavras, o modelo do motorista gera a potência demandada para um ciclo de condução randômico.

O objetivo do controlador é encontrar uma política ótima de controle,  $u = \pi_x$ , que mapeie estados observados em decisões de controle de maneira a minimizar uma função de custo em um horizonte infinito. A função de custo representa o consumo de combustível e a emissão de poluentes, e restringe o estado de carga da bateria a valores desejados.

$$J_\pi(x_0) = \lim_{N \rightarrow \infty} E_{P_{dem,k+1}} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \gamma^k g(x_k, \pi(x_k)) \right\} \quad (1.10)$$

Na Equação (1.10),  $g$  é o custo instantâneo,  $0 < \gamma < 1$  é o fator de desconto e  $J_\pi(x_0)$  indica o custo resultante esperado quando o sistema inicia no estado  $x_0$  e segue a política  $\pi$  de controle.

Portanto, o controlador do veículo determina as solicitações de potência que devem ser feitas ao motor de combustão interna,  $P_{mci}$ , e ao motor elétrico,  $P_{me}$ , de maneira a satisfazer a solicitação do motorista e alcançar o menor custo possível. Além disso, é o controlador do veículo que determina a marcha em que o sistemas de engrenagens deve funcionar.

Abordagem semelhante é realizada em Schell et al. (2005) para um veículo híbrido com configuração em série que utiliza o conjunto bateria e células a combustível como geradores de energia. O estudo é baseado nas características do automóvel *Natrium*, fabricado pela *DaimlerChrysler*.

Um modelo simplificado para o veículo, que inclui as características de eficiência dos sistemas, é obtido ignorando-se a complexidade do modelo real e mantendo o estado de carga da bateria e a velocidade do automóvel como únicas variáveis de estado do sistema. Um algoritmo de controle baseado em programação dinâmica estocástica é então realizado, tal como em Lin et al. (2003), objetivando otimizar a operação do veículo de acordo com a distribuição da probabilidade de solicitação de potência obtida através de quatro ciclos de conduções diferentes. O desempenho do algoritmo de controle baseado em programação dinâmica estocástica é avaliado através da comparação do mesmo com um algoritmo baseado em regras.

O sistema de controle é realizado em dois níveis. O primeiro toma as decisões de alto nível e distribui a solicitação de potência entre a bateria e a célula combustível. Para tal, a estratégia de controle é dividida em duas partes: aceleração e frenagem, e os sinais utilizados para tomada de decisão são a velocidade do veículo, a velocidade das rodas do veículo, o estado de carga da bateria, a voltagem da célula a combustível e o limite de potência da bateria. O segundo nível do sistema de controle diz respeito aos controladores locais dos subsistemas do automóvel.

O modelo do veículo é realizado em simulink. A célula a combustível não têm sua dinâmica modelada e curvas de polarização são utilizadas para representar seu comportamento. O motor elétrico utilizado no trabalho em questão é de indução, com potência de pico de 82kW e é modelado como um sistema de primeira ordem de acordo com a Equação (1.11) na qual o torque máximo que o motor elétrico pode gerar de acordo com a velocidade de rotação corrente ( $\tau_{m,max}$ ) é conhecido, e a eficiência é obtida através de tabelas em função do torque gerado pelo motor de indução ( $\tau_m$ ) e da velocidade de rotação de seu rotor.  $T_m$  é a constante de tempo que representa a dinâmica da parte elétrica e  $\tau_{m,req}$  o torque requerido ao motor elétrico.

$$\frac{d\tau_m}{dt} = \frac{1}{T_m}(-\tau_m + \min(\tau_{m,req}, \tau_{m,max})) \quad (1.11)$$

A bateria é modelada através de um circuito resistivo e o  $SOC$  é obtido através da Equação (1.12), na qual  $I_{bat}$  representa a corrente e  $q_m$  a máxima carga da bateria. A

dinâmica do veículo é obtida através da segunda lei de newton.

$$\frac{dSOC}{dt} = -\frac{I_{bat}}{q_m} \quad (1.12)$$

Os resultados obtidos mostram que a aplicação da técnica de programação dinâmica pode eventualmente melhorar o consumo de combustível em torno de 2 a 3%, algo em torno de 15km de distância a mais que o veículo seria capaz de alcançar com a mesma quantidade de combustível.

### 1.2.5 Veículos de célula a combustível

Dentre as tecnologias de veículos elétricos e híbridos existentes atualmente, uma das mais promissoras utiliza células a combustível como fonte de energia.

Células a combustível são elementos que transformam energia química em energia elétrica e operam com alta eficiência e baixo ruído, além de possuírem características que tornam atraente sua aplicação em veículos, a saber: baixo peso, baixo custo e possibilitam o desenvolvimento de veículos com boa autonomia.

Entretanto, CaCs não são capazes de armazenar energia, o que implica que a maneira mais adequada de aplicá-las em VEs é como uma das fontes de um veículo híbrido, sendo a outra um banco de baterias ou outra tecnologia que permita o armazenamento de energia.

Por suas vantagens, as CaCs vêm cada vez mais sendo empregadas no desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos. As principais montadoras de veículos leves já possuem veículos movidos por CaCs em sua gama de produtos. Como exemplo pode-se citar os veículos *Natrium* da *DaimlerChrysler* (Figura 1.7), *BMW Clean Mini* (Figura 1.8) e *Series 7*, *Fiat Seicento Elettra* e *Ford P2000*. Além disso, vários projetos governamentais surgiram no sentido de incentivar o desenvolvimento deste tipo de tecnologia em diversas nações do mundo (US Department of Energy 2004). Para que uma pilha de CaCs seja utilizada em um VEH é importante que ela seja operada de maneira eficiente. Para tal, faz-se necessário o emprego de uma estratégia de controle para gerenciar o fluxo de potência entre as diferentes fontes de energia com o objetivo de alcançar baixo consumo de combustível (hidrogênio), manutenção do *SOC* do banco de baterias entre limites pré-estabelecidos e satisfazer a solicitação de potência do motorista, tal como



FIGURA 1.7: DaimlerChrysler Natrium.



FIGURA 1.8: BMW Clean Mini.

em qualquer outro tipo de VEH.

Além disso, existem outros desafios a serem superados pelos fabricantes de veículos leves de célula a combustível, tais como: custo, desempenho, confiabilidade, operação em condições extremas e escolha do combustível (utilização de combustível reformado ou hidrogênio puro).

Pelo exposto, o estudo de CaCs e VEHs que as utilizam como fonte de energia vêm ganhando importância e ainda há muito a ser feito com relação a esta tecnologia. Por este motivo, este trabalho desenvolve um modelo computacional no qual é possível simular veículos elétricos híbridos de célula a combustível e diferentes estratégias de gerenciamento de potência para o mesmo. As células a combustível serão discutidas no Capítulo 3 e os VECaCs no Capítulo 5 desta Dissertação.

### 1.3 Conclusão

Veículos elétricos são uma opção para o provimento de transporte livre de emissões e baixo consumo. O interesse no desenvolvimento desse tipo de veículo têm aumentado em função da preocupação com o meio ambiente e a fatores políticos que fazem com que algumas nações incentivem o desenvolvimento de tecnologias alternativas que diminuam a dependência de seu setor produtivo com relação ao petróleo. Neste contexto, VEH despontam como a principal alternativa aos veículos convencionais de MCI uma vez que possuem vantagens com relação aos veículos elétricos puros (VEBs, veículos de energia solar etc).

Entretanto, a utilização de diferentes fontes de energia em um mesmo veículo demanda o desenvolvimento de um algoritmo de controle que gerencie esses sistemas de

maneira a satisfazer a solicitação de potência do motorista ao mesmo tempo que alcance baixo consumo de combustível e mantenha o estado de carga do banco de baterias entre limites determinados.

Uma das tecnologias mais promissoras de VEHS que vêm tendo seu desenvolvimento incentivado ao redor do mundo por diversos programas governamentais são os veículos elétricos de célula a combustível. A utilização deste tipo de tecnologia possui vantagens com relação aos VEHS de motor de combustão interna, a saber: emissão zero e baixo ruído, e vantagens com relação aos veículos elétricos puros, tais como: baixo peso, baixo custo e maior autonomia.

Neste contexto, esta Dissertação discursa sobre células a combustível e veículos de célula a combustível, e desenvolve um modelo computacional para simulação destes veículos. Além disso, são analisados diferentes algoritmos para o gerenciamento de potência neste tipo de veículo.

## 1.4 Escopo da Dissertação

Este trabalho é o primeiro desenvolvido no laboratório de controle da COPPE na área de veículos elétricos híbridos e células a combustível e busca estabelecer um ponto de partida para o desenvolvimentos de outros estudos na área.

Além do levantamento do estado da arte do controle de veículos híbridos, este trabalho foi norteado pelo desenvolvimento e pela implementação de um modelo dinâmico que levasse em consideração as principais características de um VEH movido através de uma pilha de células a combustível e um banco de baterias, e pela aplicabilidade de controladores baseados em regras que demonstrassem a utilidade do modelo desenvolvido no estudo de diferentes estratégias para o gerenciamento de potência do VEH. Por fim, a aplicação de um algoritmo de controle para otimização do consumo de combustível fundamentado na estratégia ECMS é realizada.

A Dissertação é estruturada da seguinte maneira: nos Capítulos 2, 3 e 4, são discutidos os modelos da bateria, da célula a combustível e do motor elétrico realizados, sendo que, para o último, um controlador baseado na técnica de modos deslizantes é aplicado. No Capítulo 5, são discutidas a dinâmica do veículo e a simulação do veículo completo, incluindo o comportamento do motorista implementado através de um con-

trolador PI, bem como apresentadas estratégias de controle baseado em regras para veículos movidos exclusivamente por células a combustível, veículos híbridos sem regeneração e híbridos regenerativos. Resultados alcançados em simulações são mostrados. Em seguida, no Capítulo 6, é apresentado um controlador desenvolvido para otimizar o consumo de combustível, baseado na técnica ECMS. Esta técnica é, na maioria das vezes, aplicada na literatura para VEHs com sistema de potência composto por motores a combustão interna e banco de baterias e, nesta Dissertação, é utilizada para um veículo movido pelo conjunto banco de baterias e pilha de células a combustível.

# Capítulo 2

## Modelagem de uma bateria

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

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

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

Dentre as características de uma bateria que devem ser consideradas em um projeto de veículo híbrido, pode-se ressaltar suas voltagem típica, capacidade de carga, densidade de energia e eficiência energética, além de outros fatores, tais como: taxa de descarga, temperatura de operação e quantidade de ciclos de trabalho. Os principais parâmetros serão discutidos a seguir.

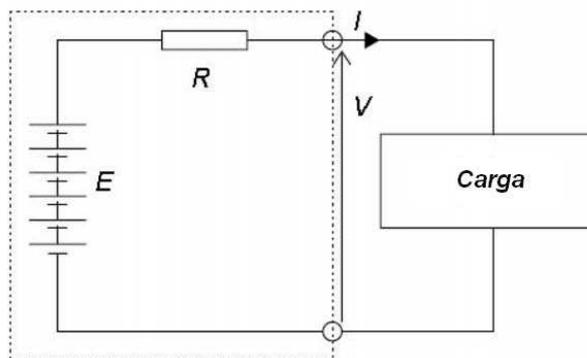


FIGURA 2.1: Circuito elétrico simplificado equivalente a uma bateria.

## 2.1 Principais parâmetros de uma bateria

### 2.1.1 Voltagem

Uma bateria pode ser representada de maneira simplificada pelo circuito elétrico mostrado na Figura 2.1, na qual  $E$  representa a voltagem de circuito aberto,  $R_{int}$  a resistência interna e  $V$  a voltagem entre os terminais da bateria.

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

### 2.1.2 Capacidade de carga

A capacidade de carga de uma bateria é geralmente definida em termos de Ampères-hora (Ah), uma vez que a unidade do sistema internacional de unidades (Coulomb) é muito pequena, representando o fluxo de apenas um Ampère em um segundo, o que é uma quantidade de energia muito baixa para aplicações tais como veículos híbridos. A quantidade de Ampères-hora denota o número de horas que uma bateria é capaz de fornecer 1 Ampère de corrente. Por exemplo, afirmar que uma bateria possui capacidade de 10Ah é equivalente a dizer que ela é capaz de gerar 1A de corrente durante 10 horas ininterruptas. É natural pensar, portanto, que ao solicitar 2A desta mesma bateria, seu tempo de descarga irá decair pela metade. Entretanto, na prática, isso não

acontece. Caso uma corrente de 2A seja solicitada a uma bateria de 10Ah ininterruptamente, o tempo de descarga não será exatamente a metade do originalmente previsto. Na realidade, a descarga acontecerá mais rapidamente (Larminie & Lowry 2003). Da mesma maneira, o tempo de descarga será diferente do esperado caso a corrente solicitada seja menor do que 1A. Por exemplo, uma solicitação contínua de 0.5A implica em mais de 20h de operação para uma bateria de 10Ah. Em outras palavras, o tempo de descarga de uma bateria varia com relação a sua especificação em função da quantidade de corrente que lhe é solicitada.

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

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

### 2.1.3 Densidade de energia

A densidade de energia de uma bateria é a quantidade de energia armazenada por unidade de volume e é normalmente denotada em termos de  $Whm^{-3}$ , na qual  $Wh$  significa Watts-hora e representa a quantidade de energia calculada de acordo com a Equação (2.1), na qual  $C$  representa a capacidade de carga da bateria, em Ah, e  $V$  sua voltagem (Volts).

$$Energia = V \times C \quad (2.1)$$

A densidade de energia de uma bateria é um parâmetro de projeto importante pois

através dela será possível calcular o tamanho (volume) necessário a uma bateria em função da capacidade energética desejada/necessária, bastando para tal a divisão do valor encontrado na Equação (2.1) pela densidade de energia.

#### **2.1.4 Eficiência energética**

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

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

#### **2.1.5 Outros fatores**

Outros fatores que influenciam na capacidade e eficiência energética de uma bateria são sua temperatura de operação, geometria, ciclos de trabalho e auto descarga.

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

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

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

## 2.2 Modelo da bateria

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

A maioria dos modelos para aplicações em VEHs são baseados em baterias do tipo chumbo ácido. Isso é devido à boa confiabilidade e a alta voltagem por célula deste tipo se comparado a outras baterias. Outra característica importante é sua baixa resistência interna e conseqüente baixa queda de tensão entre seus terminais quando um aumento na solicitação de potência ocorre. Os principais parâmetros desse tipo de bateria são apresentados na Tabela 2.1. Com relação ao custo, as baterias do tipo chumbo ácido utilizadas em VEHs são mais caras do que as baterias de chumbo ácido convencionais, pois precisam ser mais robustas de maneira a suportar ciclos de operação mais severos. Estas baterias utilizam gel no eletrólito ao invés de água. Maiores detalhes sobre este e outros tipos de baterias podem ser encontrados em Larminie & Lowry (2003).

O modelo utilizado neste trabalho é baseado no mostrado na Figura 2.1. Uma vez que o escopo desta Dissertação é determinar estratégias de controle para gerenciamento de potência em veículos híbridos de célula a combustível, e como a velocidade do veículo varia lentamente se comparado aos transientes da bateria, o modelo simplificado pode ser utilizado satisfatoriamente. Será apenas adicionado à modelagem, o cálculo do estado de carga da bateria e a variação da tensão de saída em função desta variável.

### 2.2.1 Capacidade de Peukert

Tendo como base um tempo de descarga ( $t$ ) e uma capacidade de carga de referência ( $C$ ) para os quais uma bateria foi especificada, pode-se calcular o tempo de descarga

TABELA 2.1: Parâmetros nominais usuais de uma bateria chumbo ácido.

Parâmetro	Valores nominais usuais
Quantidade de energia	20 – 35Wh.kg <sup>-1</sup>
Densidade de energia	54 – 95Wh.L <sup>-1</sup>
Potência	~ 250W.kg <sup>-1</sup>
Voltagem nominal das células	2V
Eficiência	~ 60% (varia com a taxa de descarga e com a temperatura)
Resistência interna	muito baixa (~ 0.022Ω por célula de 1Ah)
Disponibilidade	Disponível comercialmente por vários fabricantes
Temperatura de operação	ambiente (baixa performance em ambientes gelados)
Auto-descarga	~ 2% por dia
Número de ciclos de trabalho	até 800 para 80% da carga
Tempo de recarga	8h

real da bateria em função da corrente drenada pela carga (solicitação de potência a bateria) através do cálculo de uma capacidade de carga de referência, que é constante, denominada *Capacidade de Peukert*, dada pela Equação (2.2).

$$C_p = (I_{bat})^k \times t \quad (2.2)$$

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

Por exemplo, suponha que uma bateria possua capacidade nominal de 40Ah especificada para 5 horas de descarga. Isso quer dizer que a bateria é capaz de fornecer uma corrente constante de 8A ao longo de 5 horas, tal como apresentado na Equação (2.3).

$$I_{bat} = \frac{40}{5} = 8A \quad (2.3)$$

Seja  $k = 1, 2$ , a *Capacidade de Peukert* é dada pela Equação (2.4).

$$C_p = 8^{1,2} \times 5 = 60,6Ah \quad (2.4)$$

TABELA 2.2: Tempo de descarga aproximado para uma bateria com capacidade nominal de 40Ah definida para 5h, em função da solicitação de diferentes correntes.

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

Uma vez conhecida a *Capacidade de Peukert*, é possível calcular o tempo de descarga da bateria caso lhe seja solicitada uma corrente  $I$  qualquer, de amplitude constante ao longo do tempo, através da Equação (2.2), tal como apresentado na Equação (2.5).

$$t = \frac{C_p}{I^k} \quad (2.5)$$

Para o caso da bateria com capacidade nominal de 40Ah com tempo de descarga de 5 horas, a Tabela 2.2 mostra o tempo de descarga aproximado para diferentes solicitações de corrente.

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

### 2.2.2 Estado de carga

Seja um intervalo de tempo  $\delta t$ , no qual uma corrente constante,  $I_{bat}$ , é solicitada a bateria. A carga removida da bateria neste intervalo é dada pela Equação (2.6)

(Larminie & Lowry 2003).

$$Q_{\delta t} = \delta t \times [I_{bat}]^k \quad (2.6)$$

Seja  $\delta t$  em segundos, a carga total removida da bateria após  $n$  instantes de tempo,  $Q_n$ , em Ah, é dada pela Equação (2.7).

$$Q_n = Q_{n-1} + \frac{\delta t \times [I_{bat}]^k}{3600} \quad (2.7)$$

A Equação (2.7) pode ser entendida como um integrador discreto. Em tempo contínuo, com  $\delta t \rightarrow 0$ , pode-se reescrever esta equação tal como apresentado na Equação (2.8).

$$Q(t) = \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} [I_{bat}(t)]^k dt \quad (2.8)$$

Esta equação fornece a quantidade de carga (energia) que é retirada da bateria em um determinado intervalo de tempo. Seja a razão entre esta energia e a capacidade original (capacidade máxima) da bateria, o estado de carga é encontrado através da subtração deste valor do estado de carga inicial (100%), tal como apresentado na Equação (2.9), na qual  $C$  representa a capacidade original (máxima) da bateria.

$$SOC = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{[I_{bat}(t)]^k}{C_p} dt = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{I_{bat}(t)}{C} dt \quad (2.9)$$

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

A voltagem de circuito aberto ( $E$ ) é dependente do estado de carga da bateria e do número de células que a compõem, e é calculada através da Equação (2.10), tal como o exposto em Larminie & Lowry (2003). A Figura 2.2 mostra a variação de  $E$  para uma célula típica de bateria do tipo chumbo ácido de acordo com o estado de carga.

$$E = n \times [2 + 0.15(SOC)] \quad (2.10)$$

A tensão entre os terminais da bateria é determinada utilizando-se a lei de Ohm,

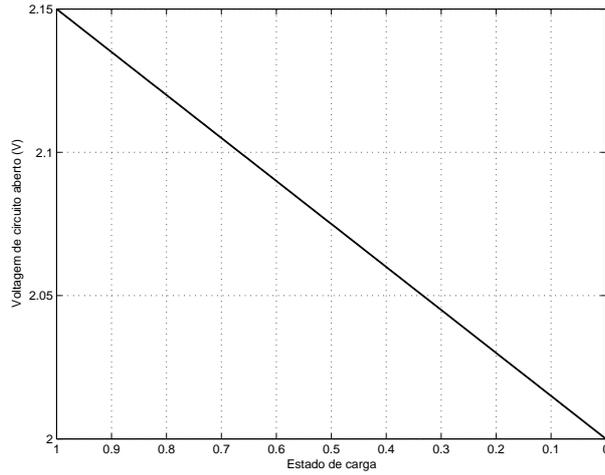


FIGURA 2.2: Voltagem de circuito aberto em função do estado de carga para uma célula típica de bateria chumbo ácido.

tal como apresentado na Equação (2.11), na qual  $R_{int}$  denota a resistência interna da bateria.  $R_{int}$  é considerada constante em função da capacidade da bateria e é calculada em função da corrente que descarregaria a bateria por completo no decorrer de 10 horas caso fosse aplicada de maneira constante ao longo do tempo ( $I_{10}$ ), tal como apresentado na Equação (2.12).

$$V = E - R_{int}I \quad (2.11)$$

$$R_{int} = n \times \frac{0.022}{I_{10}} \quad (2.12)$$

### 2.2.3 Dimensionamento da Bateria

Para a realização do modelo descrito anteriormente como parte de um modelo maior que represente o veículo híbrido como um todo, é importante que a bateria seja devidamente dimensionada para que os resultados obtidos sejam realistas e sirvam de parâmetro para avaliação do desempenho do veículo.

Todo veículo projetado, seja ele inovador ou apenas uma melhoria de um modelo já existente, pode ser comparado com um veículo similar para que o mesmo sirva de base para o projeto ou parâmetro para testes de desempenho. Algumas características, tais como autonomia, tamanho e peso, por exemplo, podem ser utilizadas como ponto de partida ou objetivos a serem alcançados pelo novo veículo projetado. O consumo de energia (combustível) desejado, por exemplo, pode ser comparado com veículos seme-

lhantes existentes no mercado de maneira a dimensionar adequadamente o tamanho da bateria do veículo elétrico de acordo com a necessidade de equiparar seu desempenho ao de um veículo leve convencional (movido unicamente por um motor de combustão interna). Nesse caso, a energia gasta por quilômetro pode ser multiplicada pelo alcance e dividida pela energia específica da bateria para que uma massa aproximada seja obtida.

Por exemplo, seja um veículo a baterias com características semelhantes a um veículo leve popular com motor de 1000 cilindradas movido à gasolina. O consumo médio de combustível nesse tipo de veículo é algo em torno de  $12\text{km/l}$ . Sendo a energia específica da gasolina aproximadamente  $12\text{kWh/kg}$  e, considerando uma eficiência de 10% para o conjunto motor a combustão e engrenagens, tem-se  $1,2\text{kWh}$  por quilograma de combustível armazenado disponibilizado às rodas do veículo. Seja a autonomia desejada de  $120\text{km}$ , seriam necessários 10 litros de gasolina para que o automóvel convencional alcançasse o objetivo, o que equivale à, aproximadamente,  $8,03\text{kg}$  do combustível em questão, considerando uma densidade de  $803\text{kg/m}^3$ . Essa quantidade de combustível transmite à rodas,  $9,636\text{kWh}$  que, no caso do VEB deve ser oriunda da bateria. A energia necessária à bateria pode ser calculada através da divisão do valor encontrado pela eficiência do motor elétrico. Considerando uma eficiência de 70%, a bateria precisaria fornecer, aproximadamente  $13,766\text{kWh}$ . Para uma bateria do tipo chumbo ácido, isso implica em algo em torno de  $393\text{kg}$ .

## 2.3 Conclusão

O banco de baterias é um componente importante em veículos híbridos uma vez que permite o armazenamento de energia durante frenagem. Por outro lado, baterias são componentes que aumentam significativamente o peso e volume ocupado em um veículo. Por esse motivo, o dimensionamento adequado de um banco de baterias em função dos critérios de desempenho desejados para o veículo é de grande importância. Um estudo dessa magnitude começa com a modelagem de uma bateria e a posterior inserção deste modelo em um modelo maior que represente o comportamento de um VEH.

Neste capítulo foi apresentado um modelo para uma bateria do tipo chumbo ácido,

que é o tipo mais utilizado em veículos híbridos atualmente. O modelo simula a variação na tensão e na potência da bateria em função da corrente que flui entre seus terminais e de seu estado de carga, uma vez que o *SOC* influi na tensão de circuito aberto. Além disso, a modelagem do *SOC* é de grande interesse pois seu controle, além da possibilidade de estender a vida útil da bateria, permite o desenvolvimento de veículos que não necessitem ter seu funcionamento interrompido para que sejam conectados a rede elétrica para recarga da bateria.

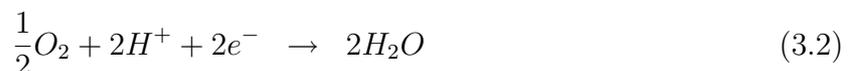
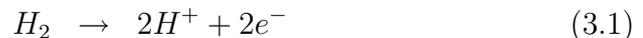
# Capítulo 3

## Modelagem de uma célula a combustível

Células a combustível (CaCs) são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em energia elétrica. CaCs produzem corrente contínua através da reação química entre um combustível gasoso e um oxidante (EGG Technical Services 2002, Larminie & Dicks 2003).

Em uma CaC, um combustível gasoso (geralmente hidrogênio) é constantemente fornecido ao anodo (eletrodo negativo) e um oxidante (oxigênio) ao catodo (eletrodo positivo). O hidrogênio é oxidado no catodo, resultando em um elétron que é conduzido pelo circuito externo, podendo alimentar uma carga, e um próton que é conduzido através do eletrólito. O processo produz, além de energia elétrica, água e calor. Diferentemente de uma bateria típica, onde a energia máxima disponível é determinada pela quantidade de reagentes armazenados na mesma, uma célula a combustível é uma fonte conversora de energia que pode, teoricamente, fornecer energia elétrica por tanto tempo quanto lhe seja fornecido combustível (Rayment & Sherwin 2003).

Considerando hidrogênio e oxigênio como combustível e oxidante, respectivamente, as reações químicas que acontecem no anodo e no catodo de uma célula a combustível são como segue (Vilas 2003).



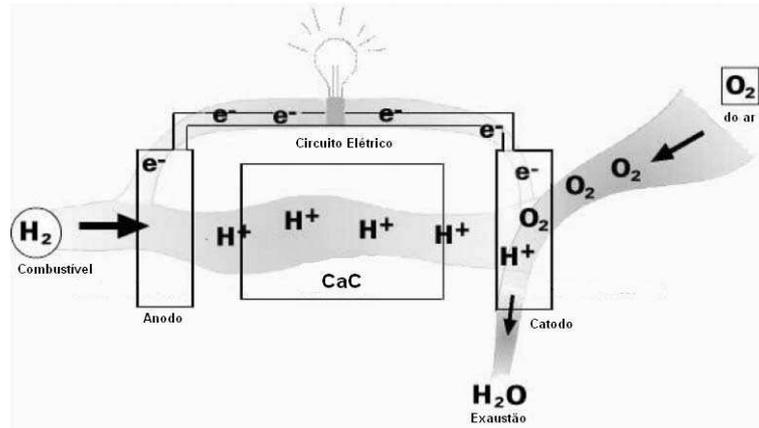


FIGURA 3.1: Mecanismo de uma célula a combustível típica.

Células a combustível podem ser classificadas em diversas categorias, dependendo da combinação do tipo de combustível e oxidante utilizados, do processamento de combustível externo (reforma externa) ou interno (reforma interna) à célula, o tipo de eletrólito, temperatura de operação etc (EGG Technical Services 2002). A classificação mais comum é segundo o tipo de eletrólito utilizado. A Tabela 3.1 resume os principais tipos de células a combustível e suas principais características (Wendt, Götz & Linardi 1999).

### 3.1 Modelo da CaC

A voltagem de saída de uma célula a combustível pode ser definida como (EGG Technical Services 2002, Maxoulis, Tsinoglou & Koltsakis 2004):

$$V_{FC} = E_{nerst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (3.3)$$

Na qual  $E_{nerst}$  é o potencial termodinâmico da célula (voltagem de circuito aberto),  $V_{act}$  é a perda devido a ativação do anodo e do catodo,  $V_{ohmic}$  é a perda ôhmica e  $V_{con}$  a perda devido ao transporte de massa.

#### 3.1.1 Voltagem de circuito aberto

A voltagem de circuito aberto de uma célula a combustível,  $E_{nerst}$ , é o potencial obtido entre seus terminais quando não há carga conectada. Esse potencial é função da

TABELA 3.1: Tipos de células a combustível.

Tipo	Faixa de temperatura ( $^{\circ}C$ )	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Alcalina	60 - 90	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensível a <math>CO_2</math></li> <li>• Gases ultra puros sem reforma do combustível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Espaçonaves</li> <li>• Aplicações militares</li> </ul>
Membrana	80 - 90	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altas densidades de corrente</li> <li>• Operação flexível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo da Membrana potência e eficiência</li> <li>• Contaminação do catalisador com CO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Veículos automotores</li> <li>• Espaçonaves</li> <li>• Equipamentos móveis</li> <li>• Unidades estacionárias</li> </ul>
Ácido fosfórico	160 - 200	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior desenvolvimento tecnológico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle da porosidade do eletrodo</li> <li>• Sensibilidade a CO</li> <li>• Eficiência limitada pela corrosão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades estacionárias</li> <li>• Cogeração de eletricidade e calor</li> </ul>
Carbonatos fundidos	650 - 700	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tolerância a CO e <math>CO_2</math> de Ni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas de materiais</li> <li>• Reciclagem de <math>CO_2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades estacionárias</li> <li>• Cogeração de eletricidade e calor</li> </ul>
Cerâmicas	800 - 900	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiência</li> <li>• A reforma do combustível pode ser feita na célula</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas de materiais</li> <li>• Expansão térmica</li> <li>• Necessidade de pré-reforma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades estacionárias</li> <li>• Cogeração de eletricidade e calor</li> </ul>

temperatura e das pressões parciais de oxigênio e hidrogênio nos canais de entrada da célula, valores estes que não devem variar entre as células de uma mesma pilha.  $E_{nerst}$  é definido pela equação a seguir (Corrêa, Farret, Canha & Simões 2004):

$$E_{nerst} = \frac{\Delta G}{2 \times F} + \frac{\Delta S}{2 \times F} \times (T - T_{ref}) + \frac{R \times T}{2 \times F} \times [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \times \ln(P_{O_2})] \quad (3.4)$$

A Equação (3.4) é, na verdade, uma equação modificada que leva em consideração mudanças de temperatura com relação à uma condição de referência (25°C). Nesta equação,  $\Delta G$  representa a mudança na energia livre de Gibbs, em J/mol,  $F$  é a constante de Faraday (96.487 C),  $\Delta S$  é a variação de entropia (J/mol),  $R$  é a constante universal dos gases (8.314 J/K×mol),  $P_{O_2}$  e  $P_{H_2}$  as pressões parciais de Oxigênio e Hidrogênio (atm), respectivamente,  $T$  a temperatura de operação da célula a combustível e  $T_{ref}$  a temperatura de referência.

### 3.1.2 Perdas devido a ativação do anodo e do catodo

Na Equação (3.3),  $V_{act}$  é a queda de potencial devido à ativação do anodo e do catodo.  $V_{act}$  é decorrente da lentidão das reações que ocorrem na superfície dos eletrodos. Uma parte da voltagem gerada é perdida de maneira a conduzir a reação química que transfere os elétrons entre os eletrodos. Portanto, a queda de potencial devido a ativação, pode ser entendida como uma medida da queda da voltagem de circuito aberto imposta pelos eletrodos. Esta perda ocorre apenas em células com baixas densidades de corrente e temperatura. A perda por ativação em uma célula a combustível é calculada através da Equação (3.5).

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln C_{O_2} + \xi_4 T \ln i_{FC}] \quad (3.5)$$

Na qual  $C_{O_2}$  é a concentração de oxigênio na interface catalítica do catodo (mol/cm<sup>3</sup>), determinado através da Equação (3.6),  $i_{FC}$  é a corrente elétrica que flui através da CaC, e  $\xi_i$  são coeficientes de parametrização cujos valores são definidos baseados em equações teóricas que levam em consideração fatores termodinâmicos, cinéticos e eletroquímicos

(Mann, Amphlett, Hooper, Jensen, Peppley & Pierre R 1999).

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \times 10^6 \times e^{\frac{-498}{T}}} \quad (3.6)$$

A perda por ativação pode ser minimizada através do aumento da temperatura de operação da CaC, da utilização de catalisadores mais eficientes, do aumento da concentração dos reagentes ou ainda através do aumento da pressão de operação (Larminie & Dicks 2003).

### 3.1.3 Perda ôhmica

A perda ôhmica,  $V_{ohmic}$ , é a perda mais comum de energia em qualquer circuito elétrico. No que diz respeito à células a combustível, esta perda é devida a resistência ao transporte (fluxo) de elétrons do catodo para o anodo.  $V_{ohmic}$  é diretamente proporcional a corrente elétrica e figura como uma das principais fontes de perda de energia em células a combustível. A perda ôhmica associada à CaC é calculada através da Equação (3.7), na qual  $R_M$  e  $R_C$  são as resistências equivalente da membrana e a resistência a transferência de prótons através da membrana, respectivamente.

$$V_{ohmic} = i_{FC} \times (R_M + R_C) \quad (3.7)$$

Na Equação (3.7),  $R_M$  é calculada através da Equação (3.8), na qual  $A_{fc}$  é a área da célula a combustível,  $\rho_M$  é a resistividade da membrana e  $L$  a espessura da mesma.

$$R_M = \frac{\rho_M \times L}{A_{fc}} \quad (3.8)$$

Enquanto  $A_{fc}$  e  $L$  são parâmetros dimensionais mensuráveis,  $\rho_M$  é função do tipo de membrana, da temperatura de operação e da umidificação da membrana da CaC, bem como da densidade de corrente. A resistividade da membrana utilizada neste trabalho é calculada através da Equação (3.9), tal como exposto em Mann et al. (1999) para uma membrana do tipo *Nafion*, largamente utilizada em células de membrana polimérica.

$$\rho_M = \frac{181.6[1 + 0.03(\frac{i_{FC}}{A_{FC}}) + 0.062(\frac{T}{303})^2(\frac{i_{FC}}{A_{FC}})^{2.5}]}{[\psi - 0.634 - 3(\frac{i_{FC}}{A_{FC}})] \exp(4.18[\frac{T-303}{T})]} \quad (3.9)$$

Na qual  $\frac{181.6}{\psi-0.634}$  é a resistividade específica da membrana ( $\Omega.cm$ ) a  $30^\circ C$  com  $i_{FC} = 0$ . O termo exponencial no denominador é a correção de temperatura para casos nos quais a temperatura da CaC não é de  $30^\circ C$ .  $T$  é a temperatura absoluta da célula (K). O termo entre colchetes no numerador, juntamente com o termo  $3(\frac{i_{FC}}{A_{FC}})$  no denominador são determinados empiricamente (Mann et al. 1999), e representam a correção para a resistividade específica da membrana em função da densidade de corrente elétrica e da temperatura da CaC. O parâmetro  $\psi$  é um parâmetro ajustável que é função da preparação da membrana e da umidificação da mesma, dentre outros fatores.

Pelo exposto, pode-se concluir que a perda ôhmica em uma CaC pode ser reduzida através do seguinte:

- Utilização de eletrodos com alta condutividade
- Fabricação do eletrólito para que o mesmo seja tão fino quanto possível.

Cabe ressaltar que a fabricação de um eletrólito mais fino nem sempre é possível, pois sua largura influencia a resistência mecânica e o eletrólito deve ser robusto o suficiente para suportar a montagem dos eletrodos.

No que se refere a uma pilha de CaCs, outro fator que reduz a perda ôhmica é a utilização de materiais adequados na fabricação das placas bipolares. Essas placas são utilizadas para conectar o catodo de uma célula ao anodo de outra e servem como meio de suprimento de oxigênio e hidrogênio a cada um, respectivamente.

### 3.1.4 Perda devido ao transporte de massa

Existe, ainda, outro tipo de perda associada ao processo de conversão de energia realizado em uma célula a combustível: a perda devido ao transporte de massa (concentração),  $V_{con}$ . Essa perda ocorre tanto nas células de baixa quanto nas de alta temperatura de operação mas só é significativa quando ocorrem altas densidades de corrente (Rayment & Sherwin 2003). A perda por transporte de massa é resultado da diminuição da concentração de oxigênio e/ou hidrogênio no catodo e no anodo, respectivamente, e é definida de acordo com a equação a seguir.

$$V_{con} = -B \times \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (3.10)$$

Na qual  $B$  (Volts) é um coeficiente de parametrização que depende da célula e de seu estado de operação, e  $J$  e  $J_{max}$  representam a densidade atual de corrente e a densidade limite de corrente, em mA/cm<sup>2</sup>. Valores típicos para  $J_{max}$  em uma célula a combustível de membrana polimérica variam entre 500 e 1500 mA/cm<sup>2</sup>. Basicamente, a perda por transporte de massa acontece quando a célula a combustível está utilizando mais combustível ou oxigênio do que o sistema consegue fornecer.

### 3.1.5 Dinâmica da CaC

A dinâmica de uma célula a combustível pode ser modelada quando observado um fenômeno denominado *Charge Double Layer*. Quando dois materiais diferentes estão em contato, uma transferência de carga de um para o outro acontece. Em uma célula a combustível, elétrons serão acumulados na superfície do eletrodo e íons de hidrogênio serão atraídos para a superfície do eletrólito. Dessa maneira, juntamente com o oxigênio que é fornecido ao catodo, a seguinte reação acontece:



A quantidade de reações que irão acontecer na interface eletrodo/eletrólito irá depender da densidade de elétrons e íons de hidrogênio nas superfícies de ambos, eletrodo e eletrólito. Quanto maior a concentração de carga, maior será a corrente gerada. Essa concentração de carga gera uma tensão elétrica na interface e se comporta de maneira semelhante a um capacitor elétrico. Quando a corrente muda de valor, algum tempo será necessário para que a quantidade de carga armazenada na interface eletrodo/eletrólito se dissipe ou aumente, ou seja, a voltagem de ativação não seguirá imediatamente a corrente tal como irá ocorrer com a voltagem ôhmica. Esse atraso é equivalente a um atraso de primeira ordem e pode ser equacionado como segue.

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{i_{FC}}{C} - \frac{V_d}{\tau} \quad (3.12)$$

Na qual  $V_d$  representa a voltagem dinâmica da célula a combustível, equivalente a voltagem sobre uma capacitância elétrica  $C$ , com uma constante de tempo  $\tau$ , definida

de acordo com (3.13).

$$\tau = C \times R_a = C \times (R_{act} + R_{con}) = C \times \left( \frac{V_{act} + V_{con}}{i_{FC}} \right) \quad (3.13)$$

Na Equação (3.13),  $R_a$  é a resistência equivalente e a soma  $V_{act} + V_{con}$  é igual a  $V_d$  na Equação (3.12). Dessa maneira, uma célula combustível pode ser modelada como um circuito elétrico tal como mostra a Figura 3.2. O comportamento dinâmico do

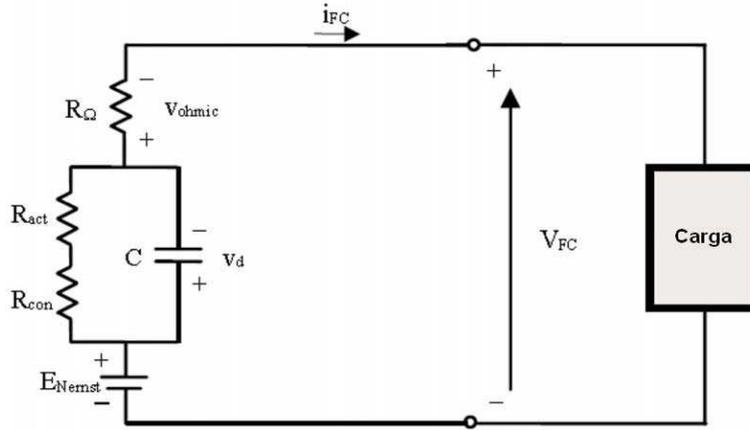


FIGURA 3.2: Circuito elétrico equivalente de uma célula a combustível.

circuito é representado pelo capacitor em paralelo com as resistências associadas às duas componentes de tensão que são atrasadas com dinâmica de primeira ordem com relação à tensão de saída da célula.

Um modelo computacional para representar o comportamento de uma pilha de células a combustível é facilmente construído utilizando as Equações (3.3) a (3.13), que permitem o cálculo, a partir de uma corrente demandada, da voltagem e potência de saída da pilha de células a combustível e das pressões parciais dos gases no anodo e catodo.

A tensão e a potência da pilha de CaCs,  $V_{pilha}$  e  $P_{pilha}$ , respectivamente, são encontradas através da multiplicação da tensão ( $V_{FC}$ ) e da potência ( $P_{CaC}$ ) de uma célula pelo número de células que compõem a pilha ( $n$ ), tal como exposto a seguir.

$$V_{Pilha} = n \times V_{FC} \quad (3.14)$$

$$P_{Pilha} = n \times V_{FC} \times i_{FC} \quad (3.15)$$

A Figura 3.3 apresenta a voltagem e a potência de uma pilha de células a combustível em função de uma solicitação de corrente que simula uma inserção e retirada de carga. A simulação foi realizada com os dados apresentados na Tabela 3.2, que remetem a uma pilha de CaCs do tipo membrana polimérica (PEM, do inglês *Proton Exchange Membrane*).

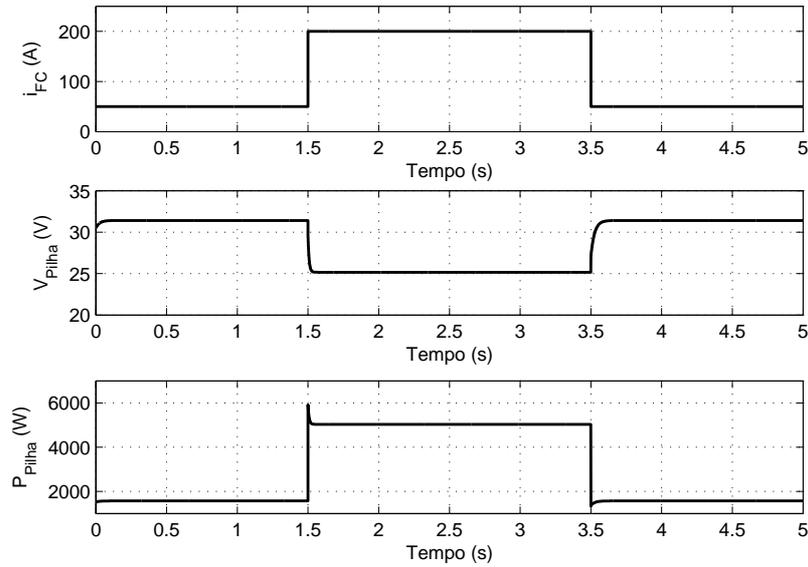


FIGURA 3.3: Variação da tensão e da potência da célula a combustível em função da inserção e retirada de carga.

Embora a constante de tempo associada a variação da tensão da pilha de células a combustível seja pequena, é possível perceber que a tensão varia de maneira mais suave se comparada a variação da corrente. Isso é devido ao fenômeno de *Charge Double Layer* discutido anteriormente, que faz com que a variação do nível de tensão associado às perdas por ativação e transporte de massa seja mais lenta do que a tensão associada a perda ôhmica. Esta última varia de maneira instantânea uma vez que é diretamente proporcional à corrente que flui no circuito. Para exemplificar este fato, a Figura 3.4 foi gerada em simulação utilizando os mesmos parâmetros da Tabela 3.2 à exceção da capacitância associada ao fenômeno de *Charge Double Layer*. A capacitância teve seu valor aumentado em 05 (cinco) vezes de maneira a tornar mais lenta a dinâmica da pilha de CaCs. Na Figura 3.4, pode-se observar com mais clareza a diferença entre a variação de tensão associada à perda ôhmica e às perdas por ativação e transporte de massa.

TABELA 3.2: Parâmetros da pilha de células a combustível.

Parâmetro	Valor
$A_{fc}$	$232\text{cm}^2$
$L$	$178\mu\text{m}$
$P_{H_2}$	1 atm
$P_{O_2}$	1 atm
$B$	0.016 Volts
$R_C$	$0.3\text{m}\Omega$
$\varepsilon_1$	-0.948
$\varepsilon_2$	$0.00286 + 0.0002 \ln A + (4.3 \times 10^{-5}) \ln c_{H_2}$
$\varepsilon_3$	$7.60 \times 10^{-5}$
$\varepsilon_4$	$1.93 \times 10^{-4}$
$T$	343 K
$\psi$	23
$J_{MAX}$	$960\text{ mA/cm}_2$
$C$	3 F
$n$	42

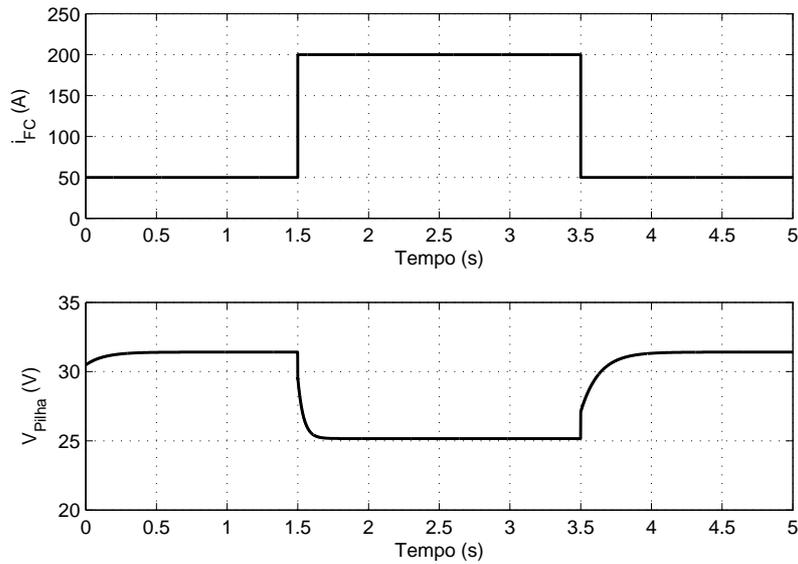


FIGURA 3.4: Variação da tensão da pilha de células a combustível em função da corrente imposta com a capacitância da CaC aumentada em 05 vezes.

### 3.1.6 Consumo

A vazão de hidrogênio consumido por uma CaC é calculada em função da massa molar ( $M_{H_2}$ , em g/mol) do hidrogênio e da corrente elétrica que flui através da célula

( $i_{FC}$ ), de acordo com a Equação (3.16) (Pukrushpan, Peng & Stefanopoulou 2002).

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = M_{H_2} \times \frac{i_{FC}}{2F} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (3.16)$$

Na qual  $F$  é a constante de Faraday. De maneira semelhante, a vazão de Oxigênio consumido e a vazão de água produzida pela CaC são calculadas de acordo com as Equações (3.17) e (3.18), respectivamente.

$$\frac{dm_{ar}}{dt} = 3.57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (3.17)$$

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (3.18)$$

Na Equação (3.17),  $\lambda$  é a razão estequiométrica (considerada igual a 2 nesta Dissertação).

Para encontrar o consumo de uma pilha de células a combustível, ao invés de uma única célula, basta multiplicar as Equações (3.16), (3.17) e (3.18) pelo número de células da pilha ( $n$ ), analogamente ao realizado para o cálculo da potência e da tensão da pilha de CaCs.

A Figura 3.5 ilustra a vazão e a consequente quantidade (massa) de hidrogênio consumido ao longo do tempo para a mesma situação apresentada na Figura 3.3, com os parâmetros descritos na Tabela 3.2.

### 3.1.7 Eficiência

Se toda a energia proveniente do combustível que alimenta uma célula a combustível (hidrogênio) for convertida em eletricidade, diz-se que a CaC é 100% eficiente. Nesse caso, a Equação (3.4) pode ser reescrita da seguinte maneira (Larminie & Dicks 2003):

$$E_{nerst} = \frac{-\Delta\bar{h}f}{2F} \quad (3.19)$$

Na qual  $\Delta\bar{h}f$  é a entalpia de formação do hidrogênio, também chamada de poder calorífico. Por convenção, o valor negativo de  $\Delta\bar{h}f$  indica que a energia está sendo liberada.

Caso o valor do poder calorífico superior do hidrogênio (PCS) seja utilizado na

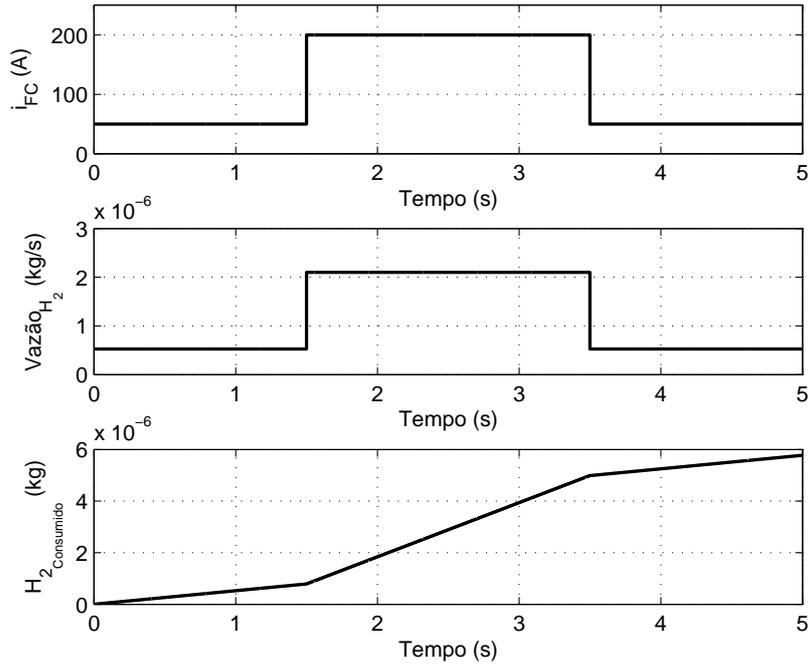


FIGURA 3.5: Vazão e quantidade de  $H_2$  consumido em função da inserção e retirada de carga da pilha de CaCs.

Equação (3.19), a tensão de circuito aberto da célula será de 1,48V e, caso o valor do poder calorífico inferior (PCI) seja utilizado,  $E_{nerst}$  será de 1,25V. Portanto, essas seriam as tensões de circuito aberto da célula caso esta operasse com 100% de eficiência. Entretanto, na realidade, isso não acontece, uma vez que existem perdas inerentes ao processo de conversão de energia, tal como foi visto nas seções anteriores desta Dissertação.

Em função disto, pode-se entender a eficiência de uma CaC ( $\eta$ ) como sendo a relação entre sua tensão de operação e a tensão que seria gerada caso a mesma estivesse operando sem perdas, tal como exposto na Equação (3.20).

$$\eta_{FC} = \frac{V_{FC}}{1.48} \times 100\% \quad (3.20)$$

Nesta equação, o poder calorífico superior do hidrogênio foi utilizado. Entretanto, esta equação ainda não é suficiente para definição da eficiência de uma CaC. Isso porque, nem todo o combustível que é alimentado a uma célula a combustível irá reagir gerando energia elétrica. A explicação para este fenômeno foge ao escopo desta

Dissertação e portanto não será descrita aqui. Tal explicação pode ser encontrada em Larminie & Dicks (2003).

Portanto, a Equação (3.20) deve ser complementada de maneira a levar em consideração a quantidade de hidrogênio que não reage dentro da célula e, por consequência, não contribui para o aumento da tensão de circuito aberto da mesma. Isso é feito através da multiplicação do segundo membro da Equação (3.20) por um fator denominado *coeficiente de utilização de combustível* ( $\mu_f$ ), definido através da Equação (3.21).

$$\mu_f = \frac{\text{massa de } H_2 \text{ reagente}}{\text{massa de } H_2 \text{ alimentada a CaC}} \quad (3.21)$$

Portanto, o cálculo da eficiência da CaC é feito de acordo com a Equação (3.22).

$$\eta_{FC} = \mu_f \times \frac{V_{FC}}{1.48} \times 100\% \quad (3.22)$$

A Figura 3.6 apresenta a eficiência da Pilha de CaCs descrita anteriormente em função da inserção e retirada de carga apresentada. Pode-se perceber que a eficiência da CaC, tal como sua tensão, diminui a medida que a solicitação de corrente aumenta.

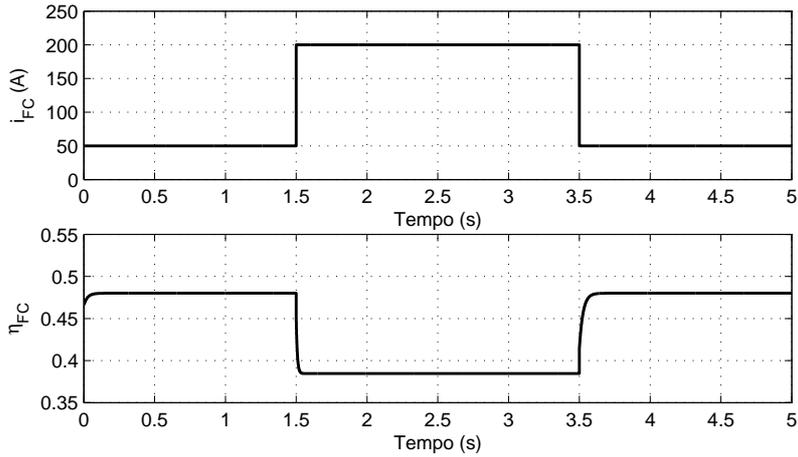


FIGURA 3.6: Eficiência da pilha de CaCs em função da inserção e da retirada de carga.

## 3.2 Controle de células a combustível

O modelo descrito neste capítulo é extremamente útil na avaliação do comportamento de uma pilha de CaCs quando sujeita a solicitações de potência, e é adequado para ser aplicado em estudos de estratégias para o gerenciamento de potência em veículos híbridos.

Na verdade, a modelagem dinâmica da pilha de CaCs não é tão significativa para este tipo de estudo, uma vez que a constante de tempo associada a dinâmica de uma pilha de CaCs quando submetida à solicitações de potência é bem menor do que as constantes de tempo de outros sistemas do veículo. Por esse motivo, a maioria dos trabalhos encontrados na literatura que abordam o gerenciamento de potência em VECaCs, sequer se preocupam com a constante de tempo da pilha de CaCs, simulando seu comportamento através de curvas de polarização. Exemplos podem ser encontrados em Schell et al. (2005) e Gökdere, Benlyazid, Dougal, Santi & Brice (2002).

Neste trabalho, fez-se opção pela utilização do modelo dinâmico da CaC, uma vez que representa de maneira mais adequada o comportamento da pilha de CaCs, além de satisfazer o objetivo de estabelecer um ponto de partida para estudos posteriores sobre o tema. O modelo poderá ser utilizado para avaliar estratégias de controle para a pilha de células a combustível, por exemplo.

Cabe ressaltar, entretanto, que ao utilizar o modelo proposto como parte integrante de um modelo maior que representa o comportamento do VECaC como um todo, este trabalho admite que a célula a combustível é adequadamente controlada. A temperatura de operação, por exemplo, é assumida constante tal como as pressões parciais dos gases nos canais de entrada.

Entretanto, é importante observar que o controle de células a combustível não é algo trivial. Para garantir o funcionamento de uma pilha de CaCs de maneira adequada sem que haja comprometimento de desempenho ou ocorram danos a mesma, deve-se garantir o controle de determinadas variáveis do sistema. Os principais parâmetros que devem ser controlados são (Larminie & Dicks 2003, Pukrushpan, Stefanopoulou & Peng 2004):

- Umidificação da membrana
- Temperatura de operação

- Vazão dos gases nos canais de entrada

A umidificação, ou hidratação, da membrana é importante pois a capacidade de condução de prótons através da mesma é diretamente proporcional à quantidade de água acumulada (Larminie & Dicks 2003). Dessa maneira, a medida que a hidratação da membrana diminui, sua condutividade também diminui, o que resulta em baixa eficiência da pilha de células a combustível. Este fato pode ser observado através da diminuição da tensão elétrica entre os terminais da CaC. A diminuição da eficiência da célula, por sua vez, implica no aumento da produção de calor, o que intensifica a evaporação de água diminuindo ainda mais a quantidade de água acumulada na membrana. E assim sucessivamente. Portanto, uma realimentação positiva é formada, e a continuação do processo irá resultar em danos a membrana. Por outro lado, água em excesso acumulada nos eletrodos da CaC implica na obstrução da passagem de combustível, o que faz com que a pilha de CaCs não opere de maneira adequada.

Pelo exposto, fica evidente que a hidratação da membrana deve ser controlada para que o funcionamento da Pilha de CaCs de maneira adequada (otimizada, se possível) seja garantido.

O controle da temperatura de operação de uma pilha de células a combustível é importante pois esse parâmetro influi nas reações químicas que geram eletricidade na célula, além de modificar características tais como a umidade dos gases que alimentam a Pilha de CaCs. Além disso, temperaturas inadequadas podem causar danos a membrana.

O controle da vazão dos gases nos canais de entrada está associado as pressões parciais no catodo e no anodo e é importante para garantir que a quantidade necessária de cada um dos reagentes esteja presente para que as reações sejam realizadas de maneira adequada. A queda das pressões parciais dos gases nos canais de entrada podem levar a degradação da membrana e a inutilização da pilha de CaCs.

Todos estes fenômenos devem ser devidamente monitorados e controlados, especialmente durante transientes de corrente elétrica. Em resumo, quando a solicitação de potência aumenta ou diminui, a mudança nas variáveis citadas pode ser de tal sorte que reduza muito a eficiência da célula, podendo, inclusive, danificar a mesma.

Como exemplo de trabalhos que abordam a modelagem e o controle de CaCs pode-

se citar Pukrushpan et al. (2002), Pukrushpan et al. (2004), Shan & Choe (2005) e Golbert & Lewin (2004).

### 3.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos e parâmetros associados a células a combustível. Além disso, foi apresentado um modelo dinâmico para a representação da variação na tensão de saída de uma pilha de CaCs em função da inserção e/ou retirada de carga.

A tensão de saída da célula é obtida através da subtração das perdas por ativação, por transporte de massa e perda ôhmica, do potencial termodinâmico da célula. Uma dinâmica de primeira ordem é considerada para o circuito representando o fenômeno de *Charge Double Layer*.

O modelo foi realizado em *Simulink* e os resultados obtidos validam a utilização do mesmo em simulações do comportamento da pilha de CaCs em função de solicitações de corrente. Em função desta variação de corrente, são calculadas as tensão e potência da pilha de CaCs, o consumo de hidrogênio e oxigênio e a quantidade de água produzida, além da eficiência da pilha ao longo do tempo.

De acordo com o encontrado na literatura, entende-se que o modelo aqui apresentado representa bem o comportamento de uma pilha de CaCs do tipo PEM e será aplicado nesta Dissertação como parte de um modelo mais completo que irá representar o comportamento de um veículo híbrido de célula a combustível. Para tal, a pilha de CaCs será assumida controlada, com suas temperatura de operação e pressões parciais nos canais de entrada constantes.

## Capítulo 4

# Modelagem e controle de um motor elétrico de indução

Em veículos híbridos que utilizam MCI e banco de baterias, a configuração paralelo é normalmente adotada. Isso porque, a energia gerada pelo MCI é mecânica, e sua transferência às rodas é feita de maneira mais eficiente através de engrenagens. Para utilização da configuração série, seria necessária a utilização de um gerador para converter a energia mecânica do MCI em energia elétrica, de maneira a conectar ambas as fontes do veículo em um barramento de potência para alimentar o motor elétrico. Este seria o responsável pela tração do veículo. Entretanto, a eficiência da conversão de energia realizada pelo gerador somada a eficiência do motor elétrico, é menor do que o conjunto de engrenagens utilizado para realização da mesma tarefa. Por este motivo, em VEHs de motor de combustão interna, o MCI é geralmente conectado diretamente ao eixo das rodas através de um sistema de engrenagens.

Em VECaCs híbridos, a pilha de células a combustível gera energia elétrica que pode ser diretamente combinada com a energia de um banco de baterias, seja para fornecimento conjunto de potência ao veículo, ou recarga do banco de baterias. Por esse motivo, a configuração série é normalmente empregada, e a energia é transferida às rodas através de um motor elétrico. Além disso, o motor elétrico assume também a função de gerador durante frenagem. Nessa condição, o fluxo de energia é invertido e a energia mecânica (cinética) do veículo é transformada em energia elétrica pelo motor/gerador e armazenada na bateria para que seja posteriormente reaproveitada.

O tipo de motor utilizado varia em função do tipo de sistema de potência e do tamanho do veículo. Geralmente, em veículos híbridos, os motores elétricos empregados são motores de indução. Isso se deve à sua simplicidade mecânica, baixa necessidade de manutenção, alta eficiência, alta densidade de potência e baixo custo se comparado à outros tipos de motores, tais como motores de corrente contínua (Larminie & Lowry 2003, Utkin 1993, Chan & Chau 1997), além de robustez e tamanho reduzido.

Entretanto, o controle convencional de motores de indução através do método VVVF (tensão-variável frequência-variável, do inglês *variable-voltage variable frequency*), não consegue fornecer o torque desejado pelos VEHs (Chan & Chau 1997). A principal razão para tal é a alta não-linearidade da dinâmica dos motores de indução. Dessa maneira, outras estratégias de controle devem ser estudadas devido à complexidade desses sistemas. Com o advento dos microcontroladores, por exemplo, o conceito de controle orientado ao campo (FOC, do inglês, *field-oriented control*) vêm sendo difundido e aceito na literatura (Chan, Leung & Ng 1990).

Neste capítulo será explorado o controle por *modos deslizantes* de um motor elétrico de indução. O conceito de *modos deslizantes* está inserido no contexto de sistemas a estrutura variável nos quais o controle é uma função descontínua dos estados. Para facilitar o entendimento da aplicação deste tipo de controle ao modelo do motor de indução que será descrito posteriormente, serão apresentados nas próximas seções os conceitos de sistemas a estrutura variável, sistemas de controle descontínuo e uma breve descrição de controle através de *modos deslizantes*.

## 4.1 Sistemas a estrutura variável

Sistemas a estrutura variável (VSS, do inglês *variable structure systems*) consistem em um conjunto de subsistemas contínuos com uma lógica de chaveamento adequada. Como resultado, as ações de controle são funções descontínuas dos estados, das perturbações (se forem mensuráveis) e das entradas do sistema.

O chaveamento entre sistemas com estruturas diferentes, gera um novo tipo de movimento, denominado *modo deslizante* (Emelyanov 1970, Itkis 1976). Durante este movimento, a trajetória do estado ( $x$ ) pode não ser nenhuma das trajetórias que descrevem os sistemas que estão sendo chaveados.

O controle por *modos deslizantes* pode ser interpretado como um tipo especial de técnica de controle não-linear robusto. A principal característica de controladores a estrutura variável é que, uma vez que o *modo deslizante* tenha sido alcançado, o desempenho do sistema torna-se insensível a incertezas paramétricas da planta e a algumas classes de perturbações externas. Esta característica é conhecida por *propriedade da invariância*, isto é, quando o regime deslizante é alcançado a dinâmica invariante é regida pela dinâmica correspondente a superfície de deslizamento, que é escolhida pelo projetista.

No *modo deslizante* convencional a trajetória do sistema fica restrita a uma superfície de deslizamento definida por  $s(x) = 0$ . Este conceito foi recentemente generalizado em Levant (1993) com a introdução dos *modos deslizantes* de ordem superior (HOSM, do inglês *higher order sliding modes*). Neste caso, a superfície de deslizamento passa a ser definida por  $s(x) = \dot{s}(x) = \dots = s^{(r-1)}(x) = 0$ , onde  $r$  é a ordem do deslizamento.

Do ponto de vista matemático, os sistemas de controle a estrutura variável (VSCS, do inglês *variable structure control systems*) são representados por equações diferenciais com lado direito descontínuo. O problema básico destas equações diferenciais é que as teorias convencionais de existência e unicidade de soluções não podem ser aplicadas nos pontos nos quais o lado direito da equação não for analítico.

A seguir será apresentado o conceito de sistemas de controle descontínuo.

## 4.2 Sistema de controle descontínuo

Seja a definição 1:

**Definição 1** *Uma função  $f : [a, b] \rightarrow \mathfrak{R}$  é Lipschitz em  $[a, b]$  se  $|f(x_1) - f(x_2)| \leq k|x_1 - x_2| \forall x_1, x_2 \in [a, b]$ , onde  $k \geq 0$  é uma constante definida como constante de Lipschitz.*

Considere sistemas de controle do seguinte tipo:

$$\dot{x} = a(x, t) + b(x, t)u, \tag{4.1}$$

onde  $x \in \mathbb{R}^n$  é o vetor de estado,  $a(\cdot)$  e  $b(\cdot)$  são funções suaves (contínuas no sentido de Lipschitz) e  $u \in \mathbb{R}$ , é uma lei de controle descontínua. Suponha que a dinâmica desejada para o sistema seja obtida com trajetórias restritas à superfície de deslizamento  $s(x) = 0$ . Considera-se que  $s(x)$  é continuamente diferenciável e que a superfície  $\mathcal{S}$  definida por  $\mathcal{S} = \{x : s(x) = 0\}$  é contínua em  $x$ , satisfazendo a seguinte condição de regularidade:

$$\nabla_x s(x) \neq 0, \forall x \in \mathcal{S}. \quad (4.2)$$

O sinal de controle é descontínuo e dado por:

$$u(x) = \begin{cases} u^+(x) & \text{se } s(x) > 0, \\ u^-(x) & \text{se } s(x) < 0, \end{cases} \quad (4.3)$$

Onde  $u^+(x)$  e  $u^-(x)$  são funções localmente Lipschitz. Note que  $u(x)$  não é definido em  $s(x) = 0$ .

Este é o tipo de controle empregado em controle por *modos deslizantes*. Serão apresentados a seguir os principais conceitos introdutórios ao estudo de controladores que utilizam esta técnica.

### 4.3 Noções básicas de controladores por modos deslizantes

Nesta seção serão apresentadas as principais características do controle por *modos deslizantes*. Para tornar o processo mais intuitivo, e visando facilitar o entendimento, os conceitos serão passados através de exemplos ilustrativos.

Considere o seguinte sistema de controle a estrutura variável:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_2 + u \\ u = -\text{sgn}(s) \\ s = x_1 + x_2 \end{cases} \quad (4.4)$$

Este sistema é analiticamente definido em duas regiões do plano de fase por dois

modelos matemáticos distintos:

- Na região I onde  $s(x) > 0$ , o modelo é dado por:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_2 - 1 \end{cases} \quad (4.5)$$

- Na região II onde  $s(x) < 0$ , o modelo é dado por:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_2 + 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

Os planos de fase para os sistemas representados pelas Equações (4.5) e (4.6) são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 respectivamente. Para facilitar a visualização da região de validade de cada modelo, a reta de chaveamento ( $s(x) = 0$ ) foi traçada nos dois planos de fase. Observando a Figura 4.1 pode ser visto que na região de validade do modelo matemático todas as trajetórias do sistema apontam na direção da reta de chaveamento. Este fenômeno também pode ser observado na Figura 4.2.

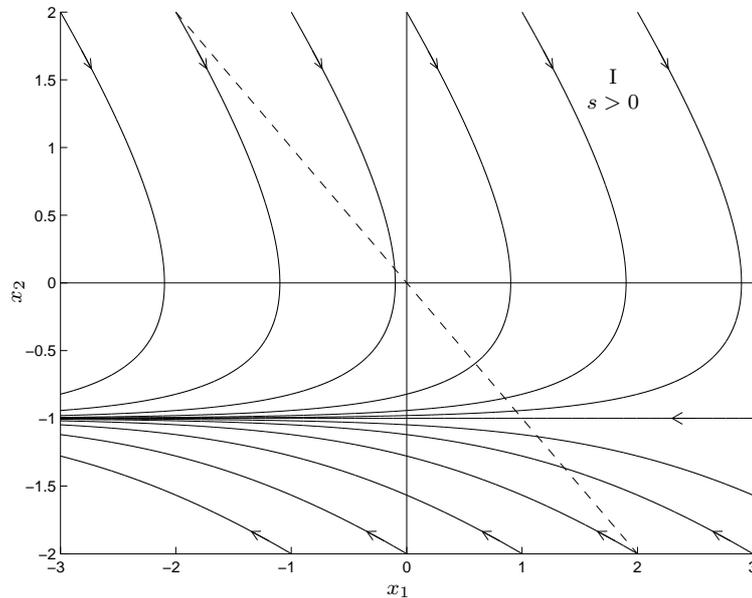


FIGURA 4.1: Plano de fase para o sistema (4.5).

O plano de fase para o sistema (4.4), apresentado na Figura 4.3, é formado através do desenho do plano de fase do sistema (4.5) na região I e do plano de fase do sistema

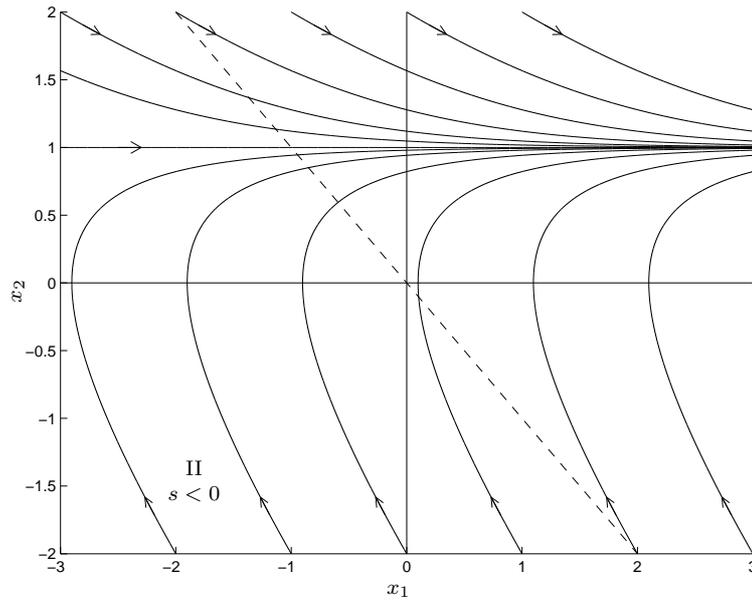


FIGURA 4.2: Plano de fase para o sistema (4.6).

(4.6) na região II. Para se obter o plano de fase completo é necessário descrever a trajetória do sistema no conjunto  $s(x) = 0$ .

Para esta finalidade, será utilizado um argumento intuitivo, ilustrado na Figura 4.4. Imagine que exista um atraso no chaveamento, ou seja, a mudança do sinal do controle ocorra um pouco depois da trajetória do sistema passar pela superfície de chaveamento. A Figura 4.4 apresenta a trajetória do sistema e o sinal de controle para diferentes condições de atraso. Na Figura 4.4 (a) pode ser visto que se o atraso for igual a  $0.1s$ , a trajetória do sistema irá oscilar em torno da superfície de chaveamento. Na Figura 4.4 (b) pode ser observado que à medida que o atraso diminui ( $0.05s$ ) a amplitude das oscilações é reduzida e a trajetória do sistema se aproxima cada vez mais da reta de chaveamento. Finalmente na Figura 4.4 (c) pode ser visto que para um atraso de  $0.01s$  a trajetória do sistema fica praticamente sobre a superfície de chaveamento. Deve-se destacar também que à medida que o sistema vai se aproximando do ideal (sistema sem atraso), a frequência de chaveamento vai crescendo indefinidamente, conforme pode ser visto nas Figuras 4.4 (d), (e) e (f).

Caso os atrasos do sistema tendam para zero, o deslizamento real tenderá para o deslizamento ideal e a frequência de chaveamento do sistema tenderá para o infinito, evitando assim o surgimento do fenômeno conhecido como *chattering*.

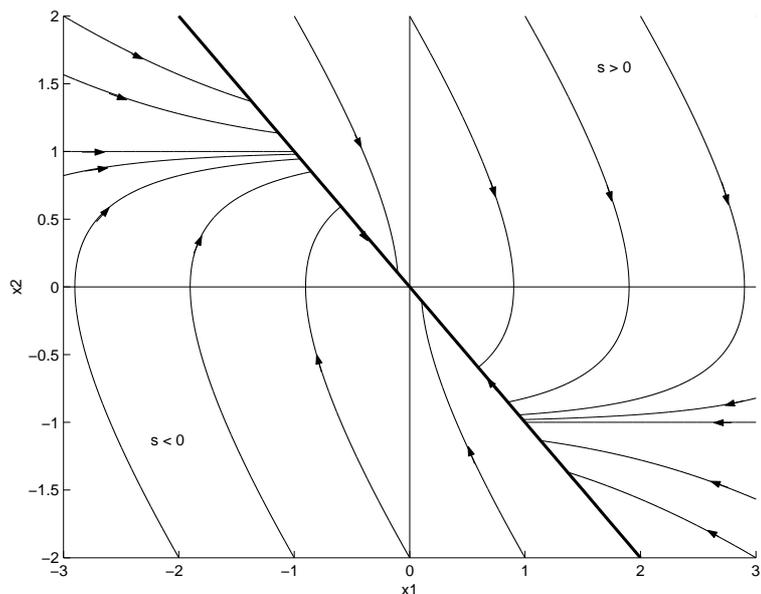


FIGURA 4.3: Plano de fase para o sistema (4.4).

Através deste raciocínio é possível concluir que, no deslizamento ideal, a trajetória do sistema fica confinada à superfície deslizante, gerando um novo tipo de movimento, já que esta trajetória não pertence a nenhum dos dois sistemas que estão sendo chaveados. Além disso, a frequência de chaveamento se torna infinita e o sinal de controle passa a não ser mais definido no tempo.

Neste movimento, denominado de *modo deslizante*, a trajetória do estado se desloca por uma superfície denominada de *superfície de deslizamento*, denotada por  $s(x) = 0$ . Por outro lado, no espaço de estado, o chaveamento ocorre em uma superfície denominada de *superfície de chaveamento*. Embora no caso analisado estas duas superfícies se confundam, este fato nem sempre é verdadeiro.

De modo geral, o movimento das trajetórias do sistema pode ser dividido em duas fases. Na fase de aproximação, a trajetória iniciada em qualquer lugar do plano de fase é conduzida em tempo finito para a superfície de deslizamento. Na segunda fase, o sistema entra em *modo deslizante*, ocorrendo uma redução na ordem da dinâmica do sistema, que passa a ser dada pela equação da superfície de deslizamento. Para o caso analisado, no deslizamento o sistema irá ser governado pela seguinte equação diferencial:

$$x_1 + x_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{x}_1 = -x_1$$

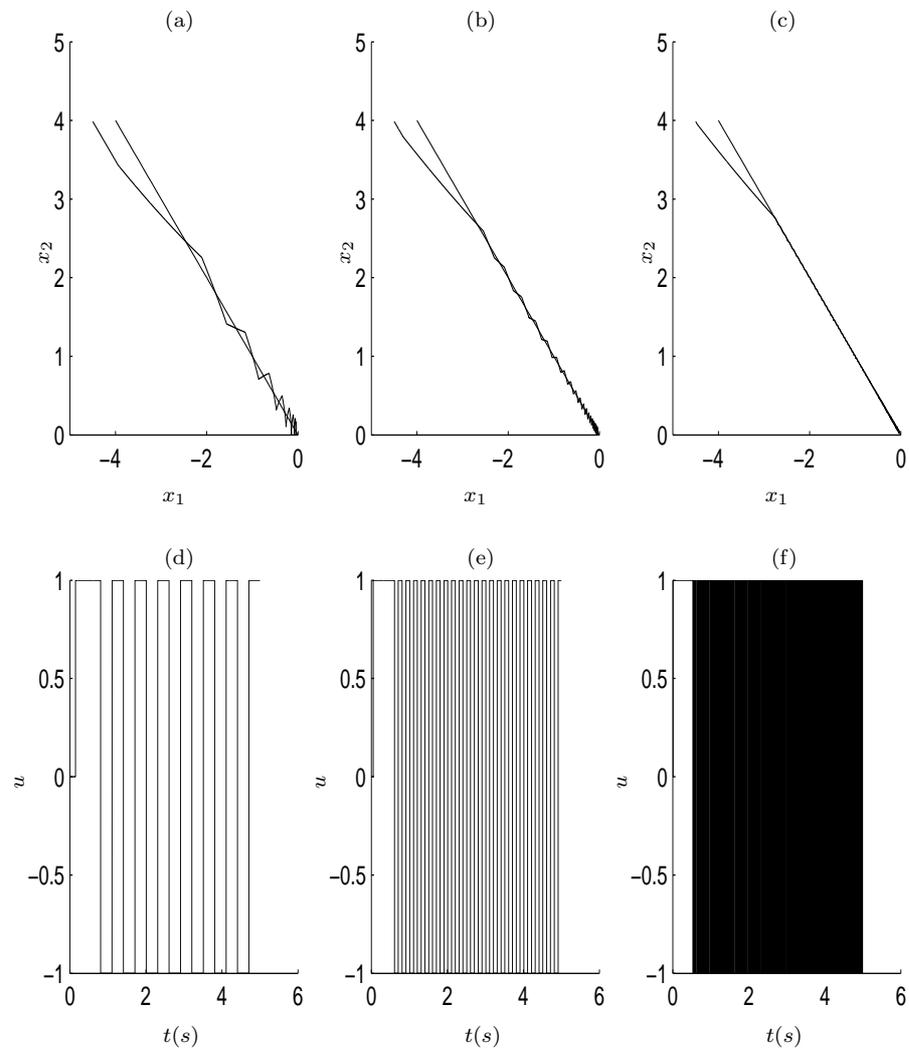


FIGURA 4.4: Trajetórias do sistema (4.4) para diferentes condições de atraso: (a) atraso igual a 0.1s; (b) atraso igual a 0.05s; (c) atraso igual a 0.01s. Sinal de controle do sistema (4.4) para diferentes condições de atraso: (d) atraso igual a 0.1s; (e) atraso igual a 0.05s; (f) atraso igual a 0.01s.

Neste momento o sistema apresentará um comportamento idêntico ao de um sistema de primeira ordem, apresentando, assim, uma convergência exponencial para a origem. Para ilustrar este fato considere o seguinte exemplo:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = 0.5 \sin(x_1) - x_2 + u \\ u = -\text{sgn}(s) \\ s = x_1 + x_2 \end{cases} \quad (4.7)$$

Observando o plano de fase do sistema (4.7), apresentado na Figura 4.5, pode ser visto que apesar da perturbação existente no sistema, as trajetórias continuam apontando na direção da superfície de deslizamento, garantindo, assim, que o sistema entre em *modo deslizante*. A partir deste momento, o sistema se torna insensível a perturbações.

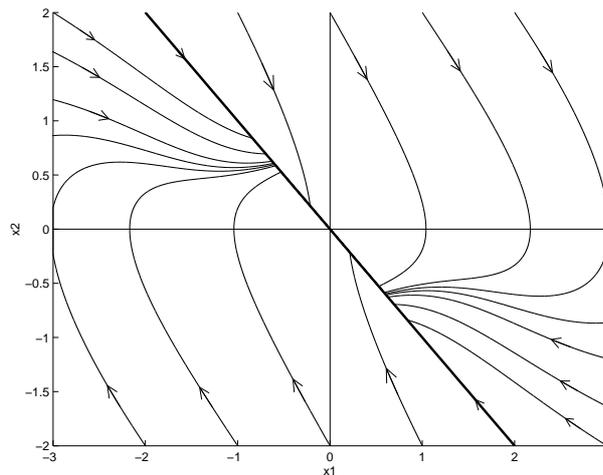


FIGURA 4.5: Plano de fase para o sistema (4.7).

## 4.4 Modelo dinâmico do motor elétrico

Um motor elétrico de indução é composto por três componentes principais, a saber: a carcaça, o estator e o rotor. A Figura 4.6 apresenta a estrutura física de um motor elétrico de indução.

O estator, tal como apresentado na Figura 4.7 é formado por chapas laminadas de

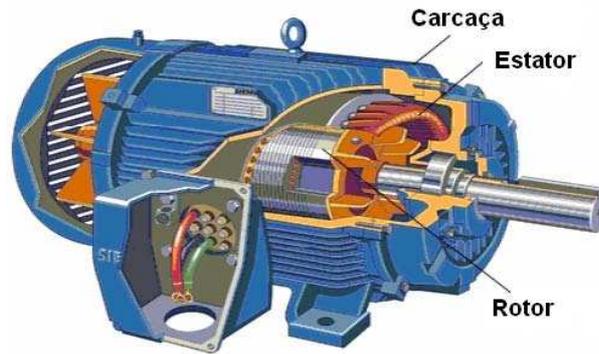


FIGURA 4.6: Estrutura de um motor elétrico de indução.

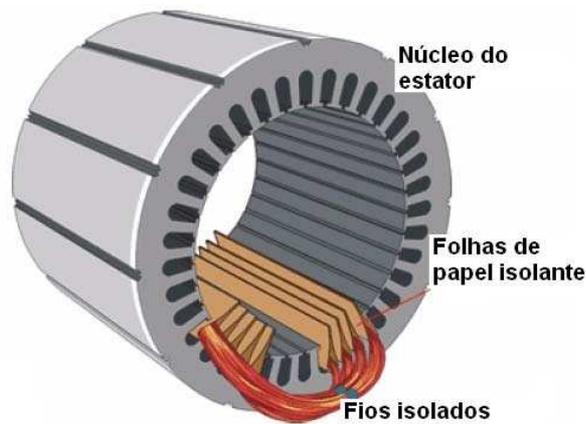


FIGURA 4.7: Estator de um motor elétrico de indução.

aço silício, extremamente delgadas e isoladas umas das outras. Nestas se encontram os sulcos onde são depositados os condutores que formam os pólos da máquina, e também as combinações de fase.

No interior do orifício do estator, é colocado o rotor (Figura 4.8). A ligação entre o rotor e o estator é realizada apenas através do campo magnético gerado. O rotor irá girar unicamente sob o efeito do campo girante criado pelo estator. O espaço existente entre ambos os componentes é denominado entreferro.



FIGURA 4.8: Rotor de um motor elétrico de indução.

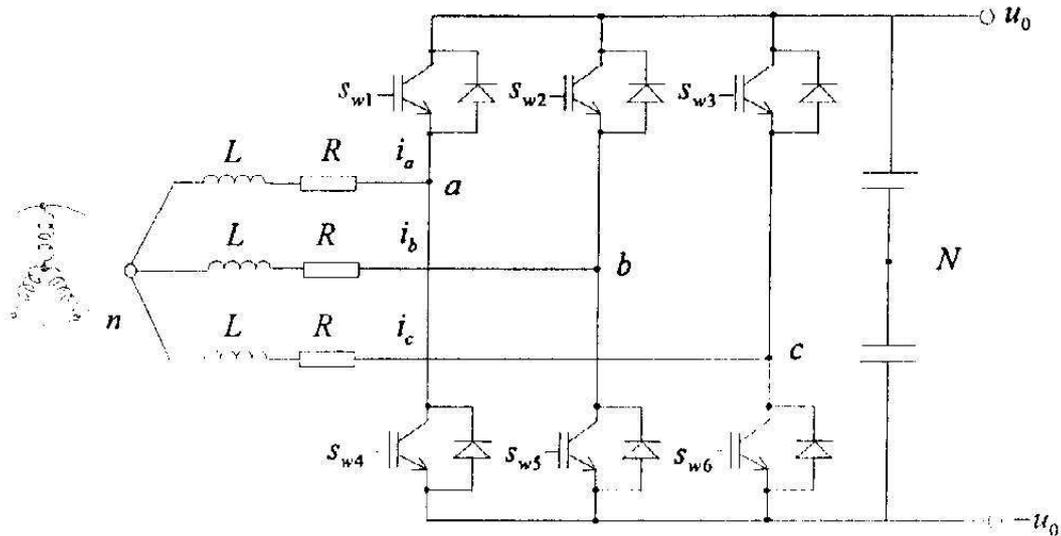


FIGURA 4.9: Modelo de um motor elétrico de indução.

Eletricamente, um motor elétrico de indução pode ser representado tal como apresentado na Figura 4.9. Nesta,  $N$  é o ponto neutro dos enrolamentos do estator,  $u_a$ ,  $u_b$  e  $u_c$  são os potenciais entre os pontos  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e o ponto neutro, respectivamente, e  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  são as correntes de fase.  $L$  e  $R$  representam as indutância e resistência da armadura e  $S_{w1}$ ,  $S_{w2}$ ,  $S_{w3}$ ,  $S_{w4}$ ,  $S_{w5}$ ,  $S_{w6}$  são os sinais de controle (Liga/Desliga) do motor.

Quatro sistemas de coordenadas de referência são normalmente utilizados na descrição do comportamento dinâmico de um motor elétrico de indução, a saber: O sistema de coordenadas  $(a, b, c)$  referenciado nas fases; o sistema de coordenadas  $(\alpha, \beta)$ , referenciado no estator, o sistema de coordenadas  $(x, y)$ , referenciado no rotor, e o sistema de coordenadas  $(d, q)$  orientado ao campo. Detalhes sobre as características de cada sistema e as relações entre eles, bem como a maneira de transformar variáveis de um sistema para outro podem ser encontradas em Utkin, Guldner & Shi (1999). Para o estudo de controle por modos deslizantes de um motor elétrico de indução é conveniente que os sinais de controle façam parte de um conjunto discreto  $\{-u_0, u_0\}$ , ao invés de sinais Liga/Desliga do conjunto discreto  $\{0, 1\}$  (Utkin et al. 1999), dessa maneira, um modelo dinâmico em coordenadas  $(\alpha, \beta)$  é conveniente.

Um modelo dinâmico para um motor elétrico de indução aplicável ao estudo de veículos híbridos é apresentado em Utkin et al. (1999) e Yan, Pisu, Utkin & Rizzoni (2004). As equações dinâmicas, dadas em coordenadas  $(\alpha, \beta)$ , são apresentadas a seguir

(Equação (4.8)):

$$\begin{aligned}
\frac{di_\alpha}{dt} &= \beta\eta\psi_\alpha + \beta\omega\psi_\beta - \gamma i_\alpha + \frac{1}{\sigma L_S} u_\alpha \\
\frac{di_\beta}{dt} &= \beta\eta\psi_\beta - \beta\omega\psi_\alpha - \gamma i_\beta + \frac{1}{\sigma L_S} u_\beta \\
\frac{d\psi_\alpha}{dt} &= -\eta\psi_\alpha - \omega\psi_\beta + \eta L_h i_\alpha \\
\frac{d\psi_\beta}{dt} &= -\eta\psi_\beta + \omega\psi_\alpha + \eta L_h i_\beta \\
T &= \frac{3N_r L_h}{2L_r} (i_\beta \psi_\alpha - i_\alpha \psi_\beta) \\
\frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} (T - T_l)
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Nas quais:

$$\begin{aligned}
\eta &= \frac{R_r}{L_r} \\
\beta &= \frac{L_r}{\sigma L_S L_r} \\
\sigma &= 1 - \frac{L_h^2}{L_S L_r} \\
\gamma &= \frac{R_S + \frac{L_h^2}{L_r} R_r}{\sigma L_S}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

E:

$i_\alpha, i_\beta$  = componentes da corrente no estator nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$

$\psi_\alpha, \psi_\beta$  = componentes do fluxo magnético no rotor nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$

$u_\alpha, u_\beta$  = componentes da tensão no estator nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$

$L_r, L_S, L_h$  = indutâncias do rotor, estator e mútua, respectivamente

$R_r, R_S$  = resistências do rotor e do estator

$\omega$  = velocidade angular do rotor

$J$  = Momento de inércia do rotor do motor

$T$  = torque do motor

$T_l$  = torque da carga

$N_r$  = quantidade de pares de pólos

Do ponto de vista de controle, o objetivo é fazer com que o motor siga um torque de referência. Em outras palavras, a potência demandada ao veículo pelo motorista é traduzida em uma demanda de torque ao motor elétrico que, para gerar o torque desejado, necessitará do fornecimento de potência (corrente elétrica) proveniente das fontes de energia do sistema. A corrente é obtida através da Equação (4.10) (Yan et al. 2004).

$$i = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (4.10)$$

Uma vez modelada a dinâmica e o controlador para o ME, o passo seguinte será distribuir a solicitação de potência entre a pilha de células a combustível e o banco de baterias. Essa tarefa é realizada pelo controlador do veículo e será discutida posteriormente. As potências elétrica e mecânica do motor elétrico são calculadas de acordo com as Equações (4.11) e (4.12), respectivamente, onde  $u$  é a tensão elétrica fornecida ao motor.

$$P_{el} = u \times i \quad (4.11)$$

$$P_{mec} = T \times \omega \quad (4.12)$$

O controle do motor elétrico é realizado através das tensões no estator,  $u_\alpha$  e  $u_\beta$ , de maneira a fazê-lo alcançar torque e fluxo magnético desejados. O fluxo é controlado pois, caso seja muito baixo, o motor pode não ser capaz de gerar o torque necessário, e caso seja muito alto (próximo ao valor de saturação), a grande corrente elétrica irá gerar grandes perdas por calor.

#### 4.4.1 Controle por modos deslizantes

Um controlador por modos deslizantes foi projetado para esta aplicação com base no trabalho desenvolvido por Yan et al. (2004). O controle é feito através da tensão no estator, sendo suas componentes nas coordenadas  $u_\alpha$  e  $u_\beta$  os dois sinais atuantes de maneira a fazer o motor seguir o torque de referência. O fluxo é controlado para que não atinja valores muito baixos ou próximos da região de saturação do motor. No projeto do controlador é assumido que as correntes e a velocidade de rotação do rotor são conhecidas e o fluxo magnético perfeitamente estimado.

Sejam as seguintes equações de erro:

$$S_T = T - T^* \quad (4.13)$$

$$S_\psi = c(\psi - \psi^*) + (\dot{\psi} - \dot{\psi}^*) \quad (4.14)$$

Nas quais  $T^*$  e  $\psi^*$  são os torque e fluxo desejados e  $\psi = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2}$ . Seja:

$$S = \begin{bmatrix} S_T \\ S_\psi \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$\dot{S}$  pode ser encontrada através da Equação (4.8), e pode ser escrita como:

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \dot{S}_T \\ \dot{S}_\psi \end{bmatrix} = f_1(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) + c_1 \begin{bmatrix} -\psi_\beta & \psi_\alpha \\ \frac{\psi_\alpha}{\sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2}} & \frac{\psi_\beta}{\sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Na qual  $c_1$  é constante e  $f_1$  é uma função contínua de variáveis de estado, ambas assumidas limitadas. Pode-se determinar *modos deslizantes* através da utilização da transformação não linear (Utkin 1993):

$$S^* = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = D^{-1}S \quad (4.17)$$

Onde:

$$D = \begin{bmatrix} -\psi_\beta & \psi_\alpha \\ \frac{\psi_\alpha}{\sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2}} & \frac{\psi_\beta}{\sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2}} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$D^{-1}$  existe para todo  $\psi \neq 0$ . Logo:

$$\dot{S}^* = \dot{D}^{-1}S + D^{-1}\dot{S} = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) + c_1 \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Na qual  $f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)$  é função contínua e limitada. Multiplicando-se os dois lados da Equação (4.19) por  $S^*$ , tem-se:

$$S^* \dot{S}^* = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)S^* + c_1 u S^* \quad (4.20)$$

Selecionando a lei de controle tal como exposto na Equação (4.21):

$$\begin{aligned} u_\alpha &= -u_0 \text{sign}(S_1) \\ u_\beta &= -u_0 \text{sign}(S_2) \end{aligned} \quad (4.21)$$

e substituindo  $u$  na Equação (4.20), tem-se:

$$S^* \dot{S}^* = f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta) S^* - c_1 u_0 |S^*| \quad (4.22)$$

ou ainda:

$$S^* \dot{S}^* \leq -c_1 u_0 |S^*| \quad (4.23)$$

uma vez que  $f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)$  é limitada, e é possível encontrar  $u_0 \geq |f_2(i_\alpha, i_\beta, \psi_\alpha, \psi_\beta)|$ .

Deste modo, a condição de alcançabilidade  $S^* \dot{S}^* \leq 0$  é satisfeita e um *modo deslizante* surge em  $S^* = S = 0$ .

Portanto, para um número finito  $u_0$ , *modo deslizante* é forçado e  $S^* = 0$  tal como  $S = 0$ , pois  $D$  é não-singular. Então  $T \rightarrow T^*$  e  $\psi \rightarrow \psi^*$  é solução da Equação  $S_\psi = 0$  e os torque e fluxo desejados são alcançados.

O modelo do motor de indução e o controlador por *modos deslizantes* foi implementado. A Figura 4.10 ilustra a resposta do sistema à uma solicitação de torque que varia entre 250 N.m e -250 N.m. A solicitação é iniciada com uma excitação em degrau com amplitude de 250 N.m aplicado no instante zero. A simulação foi realizada com os parâmetros apresentados na Tabela 4.1, parâmetros estes retirados do livro Utkin et al. (1999).

Os sinais de controle,  $u_\alpha$  e  $u_\beta$ , para a simulação apresentada na Figura 4.10 são mostrados na Figura 4.11. Verifica-se claramente o chaveamento característico do controle por modos deslizantes.

O sinais de controle apresentados representam chaveamento ideal e sua obtenção demanda muito tempo de simulação, o que inviabiliza sua aplicação em simulações que representam a utilização do motor elétrico ao longo de alguns minutos. Em sendo assim, para que a aplicação do controlador aqui descrito no modelo de veículo elétrico de célula a combustível desenvolvido nesta Dissertação, uma zona linear é adicionada

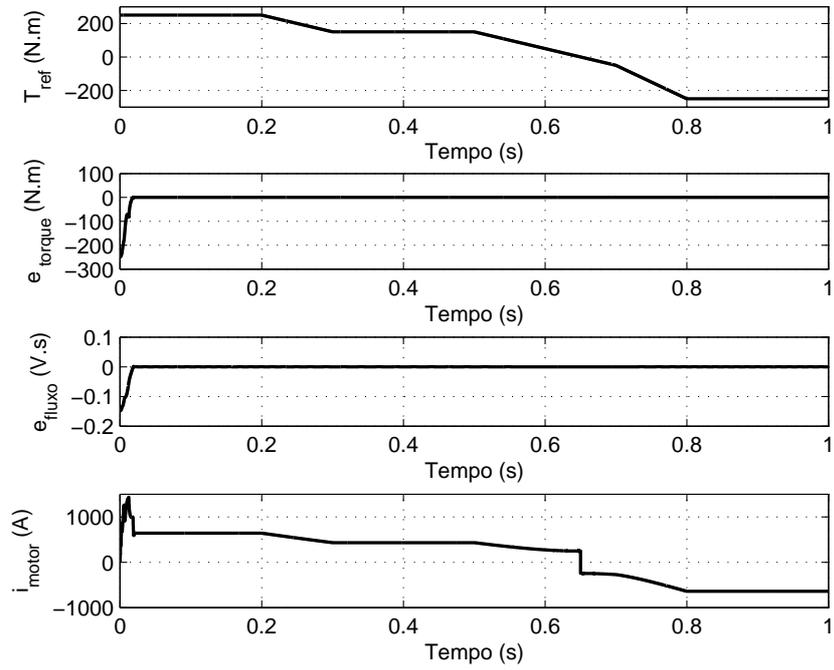


FIGURA 4.10: Torque solicitado, erro associado ao torque, erro associado ao fluxo magnético e corrente elétrica do ME.

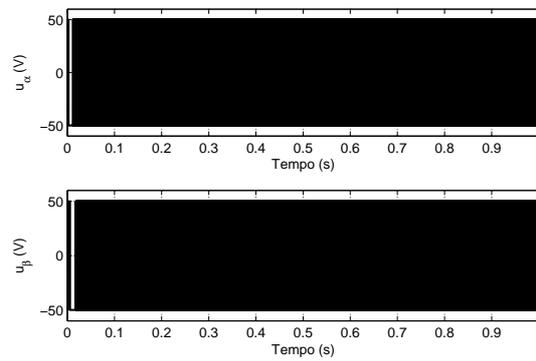


FIGURA 4.11: Sinais de controle do motor elétrico

TABELA 4.1: Parâmetros do motor elétrico de indução utilizados na simulação apresentada.

Parâmetro	Valor
$L_r$	$650 \times 10^{-6} H$
$L_s$	$650 \times 10^{-6} H$
$L_h$	$610 \times 10^{-6} H$
$R_r$	$0,015\Omega$
$R_r$	$0,035\Omega$
$N_r$	2
$R$	$0,01\Omega$
$r$	$0,01\Omega$
$C$	$100F$
$J$	$4,33 \times 10^{-4} kg.m^2$
$u_0$	$50V$

de maneira a permitir o aumento do passo de integração e a diminuição do tempo de simulação.

Cabe ressaltar que o fluxo magnético do rotor do motor geralmente não é medido, mas apenas estimado através da medição da velocidade angular do rotor, bem como das componentes da corrente no estator. O observador de fluxo é obtido através da simulação dinâmica do fluxo no sistema de coordenadas do estator  $(\alpha, \beta)$ , tal como exposto em Utkin et al. (1999). Nesta Dissertação o fluxo magnético do rotor do motor é assumido conhecido, uma vez que a implementação do observador não modificará em nada a avaliação das estratégias de gerenciamento de potência que serão feitas nos próximos capítulos desta Dissertação. A implementação deste observador fica como sugestão para trabalhos futuros.

Além disso, é importante ressaltar que o controle aqui apresentado não pode ser diretamente implementado. Para implementação, é necessário converter as tensões no estator,  $u_\alpha$  e  $u_\beta$ , para tensões de fase,  $u_a$ ,  $u_b$  e  $u_c$ . Isso é realizado através da transformação linear apresentada a seguir (Utkin et al. 1999).

$$[u_a \ u_b \ u_c]^T = (A_{\alpha,\beta}^{a,b,c})^+ [u_\alpha \ u_\beta]^T \quad (4.24)$$

na qual:

$$(A_{\alpha,\beta}^{a,b,c})^+ = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^T \quad (4.25)$$

Por fim, cabe ressaltar que o controle assume que o torque mecânico do motor é medido. Isso pode ser realizado, por exemplo, através de *strain gages*. Detalhes sobre a aplicação deste e de outros tipos de sensores para medição de torque podem ser encontrados em Webster (1999) e Bishop (2002).

## 4.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a modelagem de um motor de indução aplicável ao estudo de veículos elétricos e híbridos. O modelo é não linear e é composto por 05 (cinco) equações dinâmicas definidas no sistema de coordenadas  $(\alpha, \beta)$ . Além da realização deste modelo, conceitos básicos sobre sistemas a estrutura variável e controle por modos deslizantes foram apresentados e um controlador projetado de acordo com esta técnica foi empregado no motor elétrico.

Os resultados obtidos demonstram a validade do modelo e do controlador, e a utilidade dos mesmos em estudos do comportamento dinâmico de motores de indução.

O modelo aqui descrito será aplicado nas simulações de VECaCs que serão desenvolvidas nos próximos capítulos desta Dissertação. O objetivo do controle do motor de indução é fazer com que o mesmo forneça o torque solicitado pelo motorista do veículo. A potência necessária para tal será solicitada às fontes de energia do VECaC de acordo com critérios estabelecidos para o controlador que gerencia o fluxo de potência no veículo.

# Capítulo 5

## Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo de célula a combustível

Devido ao seu elevado rendimento e baixas emissões, os veículos de célula a combustível (VECaCs) vêm sendo produzidos pelas principais montadoras de veículos leves e despontam como a principal alternativa para substituição dos veículos de MCI.

Os VECaCs podem ser classificados em três categorias (Cho 2004): os não-híbridos, os híbridos sem regeneração e os híbridos regenerativos. A Figura 5.1 ilustra as três configurações.

Em VECaCs híbridos com regeneração, o banco de baterias (BB) permite o aproveitamento de parte da energia que seria desperdiçada durante frenagem. Essa é a principal vantagem deste tipo de veículo e o motivo pelo qual são mais difundidos (Cho 2004, Akella et al. 2001, Schell et al. 2005). Além da capacidade de carga através do aproveitamento de energia de frenagem, o banco de baterias pode também ser carregado diretamente através da pilha de células a combustível.

Em VECaCs não-híbridos não existe regeneração, e a energia gerada durante frenagem é desperdiçada através de freios de fricção ou banco de resistores. Nesta configuração, a solicitação de potência feita a pilha de CaCs irá seguir a solicitação do motorista (exceto durante frenagem), o que pode implicar em freqüente funcionamento da pilha em regiões de baixa eficiência devido à alta solicitação de potência.

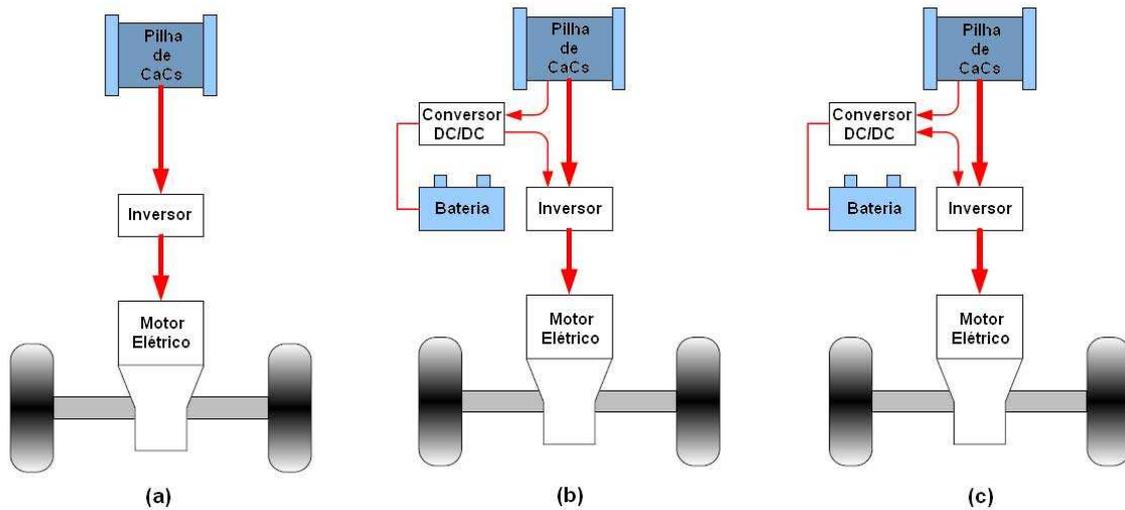


FIGURA 5.1: Configurações de veículos de célula a combustível: (a) VECaC não híbrido; (b) VECaC híbrido sem regeneração; (c) VECaC híbrido regenerativo.

Na configuração híbrida sem regeneração, o sistema de armazenamento de energia é utilizado apenas como suporte à célula a combustível, fornecendo parte da potência ao veículo quando a mesma opera em regiões de baixa eficiência. Nesses VECaCs, o banco de baterias pode ser recarregado apenas através da pilha de CaCs. As vantagens desta configuração são seu baixo custo e a simplicidade de sua eletrônica de potência em função da ausência de componentes necessários para a regeneração.

A Tabela 5.1 resume as principais vantagens e desvantagens dos três tipos de VECaCs.

Para avaliar o desempenho (consumo de combustível) de veículos de célula a combustível em função de diferentes configurações e estratégias de controle, são realizadas neste trabalho simulações com as seguintes configurações:

- VECaC não-híbrido
- VECaC híbrido em série sem regeneração
- VECaC híbrido em série regenerativo

Um VEB regenerativo e um VEB não regenerativo também são simulados e seu consumo de combustível é comparado ao consumo dos VECaCs.

As simulações são realizadas no programa *Simulink* e são baseadas em veículos leves. Os sistemas discutidos nos capítulos anteriores são utilizados em conjunto com

TABELA 5.1: Vantagens e desvantagens das diferentes configurações de VECaCs.

Configuração	Vantagens	Desvantagens
VECaCs não-híbridos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não necessita de banco de baterias;</li> <li>• Não necessita de conversores de potência para o banco de baterias;</li> <li>• Fácil de controlar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessita de pilha de CaCs com alta potência;</li> <li>• Não permite regeneração;</li> <li>• Eficiência da pilha de CaCs pode ser baixa.</li> </ul>
VECaCs híbridos sem regeneração	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessita de pilha de CaCs com menor potência;</li> <li>• Não precisa de eletrônica de potência para regeneração de energia;</li> <li>• Pode operar o sistema de CaCs em regiões de alta eficiência.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regeneração indisponível;</li> <li>• Custo e massa do BB são maiores se comparados aos VECaCs não híbridos.</li> </ul>
VECaCs híbridos regenerativos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regeneração de energia disponível;</li> <li>• Custo da pilha de CaCs pode ser diminuído;</li> <li>• Pode operar o sistema de CaCs em regiões de alta eficiência.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo e massa do BB são maiores do que os VECaCs não-híbridos;</li> <li>• Custo de manutenção do BB pode aumentar;</li> <li>• Necessita de eletrônica de potência complexa.</li> </ul>

a dinâmica do veículo para reproduzir o comportamento desejado. Os três tipos de VECaCs são implementados com estratégias de controle diferentes e o fluxo de potência entre os subsistemas do veículo (banco de baterias, pilha de CaCs e motor elétrico) é avaliado. A energia elétrica fornecida pela(s) fonte(s) é convertida em energia mecânica através do motor de indução descrito no Capítulo 4 e transferida para as duas rodas que impulsionam o veículo.

A modelagem dinâmica do automóvel é fundamental para que seja possível avaliar o desempenho do sistema. Isso porque, veículos elétricos e híbridos devem ser capazes de interagir com os outros veículos no tráfego urbano e em estradas, possuindo características de dirigibilidade semelhantes aos veículos convencionais. A comparação do desempenho de um VE ou VEH com um veículo semelhante movido por motor de combustão interna é importante para a avaliação do projeto de um veículo com essas características.

Outro fator importante de ser avaliado é o consumo de combustível do VECaC. Isso porque, este consumo influi diretamente no custo de operação e na autonomia do

veículo. Quanto maior o consumo, menor a quilometragem que o veículo será capaz de percorrer com uma mesma quantidade de combustível e, conseqüentemente, maior será o custo por quilômetro percorrido. Além disso, menor autonomia implica na necessidade de armazenamento de mais combustível, o que, por sua vez, implica em maior volume ocupado e maior peso.

Por esse motivo, é importante que seja possível avaliar o consumo do veículo através de simulações. Dessa forma, é possível prever a quilometragem que o mesmo será capaz de percorrer com uma determinada quantidade de combustível e o custo que isso irá implicar. A diminuição do consumo do veículo envolve o gerenciamento adequado da energia disponível nas diferentes fontes, no caso dos VECaCs, na pilha de CaCs e no banco de baterias.

## 5.1 Modelo dinâmico do veículo

A dinâmica do veículo é determinada através da segunda lei de Newton. O sinal de entrada do sistema é o torque proveniente do motor elétrico e a saída (velocidade do veículo) é realimentada e controlada de acordo com a solicitação do motorista.

A Equação (5.1) apresenta a dinâmica do veículo. Esta equação foi derivada da realizada em Lin et al. (2003).

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} \left( \frac{\tau_{ref} - \tau_b}{r_{roda}} - \frac{Bv}{r_{roda}^2} - F_r - F_a \right) \quad (5.1)$$

Nas qual:

$\tau_{ref}$  é o torque gerado pelo motor elétrico (torque de referência);

$\tau_b$  é o torque de fricção aplicado às rodas do veículo;

$B$  é coeficiente de amortecimento viscoso;

$r_{roda}$  é o raio das rodas do veículo;

$M$  é massa do veículo;

$v$  é velocidade do veículo;

$F_r$  é a força de resistência ao rolamento.

$F_a$  é a força de resistência ao movimento devido ao arraste aerodinâmico.

As forças de resistência ao movimento,  $F_r$  e  $F_a$  são dadas pelas Equações (5.2) e

(5.3), respectivamente, sendo  $C_d$  o coeficiente de arraste aerodinâmico,  $\rho_a$  a densidade do ar,  $A$  a área frontal do veículo,  $C_{rolamento}$  o coeficiente de resistência ao rolamento e  $F_n$  a força normal aos pneus.

$$F_r = C_{rolamento} \times F_n \quad (5.2)$$

$$F_a = \frac{1}{2} C_d \rho_a A v^2 \quad (5.3)$$

Os parâmetros do veículo utilizados nas simulações foram escolhidos de maneira que o mesmo aproxime-se ao máximo das características de um automóvel Fiat Palio 1.0. O objetivo é obter resultados representativos de veículos leves nacionais de baixa cilindrada, mais representativos do mercado brasileiro atualmente.

Os parâmetros são apresentados na Tabela 5.2 e foram, em sua maioria, retirados dos arquivos do programa ADVISOR (simulador de veículos avançado, do inglês, *advanced vehicle simulator*), um programa de simulação de veículos desenvolvido pelo departamento de energia americano (DOE, do inglês *Department Of Energy*). O ADVISOR é reconhecido como um dos principais simuladores de automóveis existentes e é largamente utilizado na literatura.

A massa do veículo, originalmente  $825kg$ , foi aumentada em  $140kg$ , de maneira a incluir o peso médio de duas pessoas. Além disso, quantidades adicionais de massa foram utilizadas para os diferentes tipos de VECaCs em função do peso aproximado das fontes de energia. Na Tabela 5.2,  $g$  representa a aceleração da gravidade.

TABELA 5.2: Parâmetros do veículo.

Parâmetro	Valor
$M$	965 a 1205kg
$A$	2,332m <sup>2</sup>
$C_d$	0,37
$r_{roda}$	0,2711m
$C_{rolamento}$	0,009
$B$	0,001
$J_r$	$\frac{181}{2,205} \times \frac{r_{roda}^2}{2} kgm^2$
$g$	9,81m/s <sup>2</sup>
$\rho_a$	1,2kgm <sup>3</sup>
$F_n$	$M \times g$

### 5.1.1 Representação do motorista do veículo

O motorista é quem impõe a velocidade ao veículo através da atuação nos pedais do acelerador e do freio. Ele fecha a malha de realimentação, medindo a velocidade do veículo e comparando com uma velocidade de referência. Do ponto de vista de controle, o motorista pode ser modelado como um controlador proporcional e integral (PI) que irá atuar através do sinal de torque de referência para o motor elétrico (Schell et al. 2005).

Por simplicidade, o controlador é projetado desconsiderando-se a não-linearidade inserida pela força de arraste aerodinâmico. Entretanto, através de um ajuste de ganhos é possível utilizar o controlador PI com o modelo dinâmico completo do veículo, incluindo a força de arraste.

A função de transferência para a dinâmica do veículo, desconsiderando-se o fator quadrático na Equação (5.1), é dada pela Equação (5.4):

$$\frac{V(s)}{\tau_{ref}(s)} = r \left( \frac{1}{s + \frac{B}{Mr^2}} \right) \quad (5.4)$$

A ação de controle de um controlador PI é definida por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (5.5)$$

Na qual  $K_p$  representa o ganho proporcional e  $T_i$  o tempo integral, cujo inverso é denominado *taxa de restabelecimento* e determina o número de vezes que a parte proporcional da ação de controle é duplicada em um minuto (Ogata 2003). O objetivo da utilização de uma ação de controle integral é a eliminação do erro em regime (erro residual), presente quando apenas controle proporcional é utilizado. A função de transferência do controlador PI é dada por (5.6) e o diagrama de blocos do sistema em malha fechada é mostrado na Figura 5.2.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (5.6)$$

O controlador PI é projetado de maneira que a entrada seja o erro entre a velocidade



FIGURA 5.2: Diagrama de blocos da dinâmica do veículo com a adição de um controlador PI.

desejada (velocidade de referência) e a velocidade atual do veículo, e a saída (sinal de controle) seja o torque que deve ser transmitido ao eixo das rodas. Esta saída pode ser entendida como sendo a posição dos pedais do acelerador e do freio, modificada de acordo com a atuação do motorista.

### 5.1.2 Subistemas do veículo

O modelo do veículo é apresentado na Figura 5.3. O modelo inclui os blocos referentes ao motorista (controlador PI), a dinâmica do veículo, a dinâmica do motor elétrico de indução e do controlador associado (tal como descrito no Capítulo 4), e a cada uma das fontes de energia (conforme os Capítulos 2 e 3), além do bloco onde são implementadas as funções de controle de alto nível. Esse modelo é variado de acordo

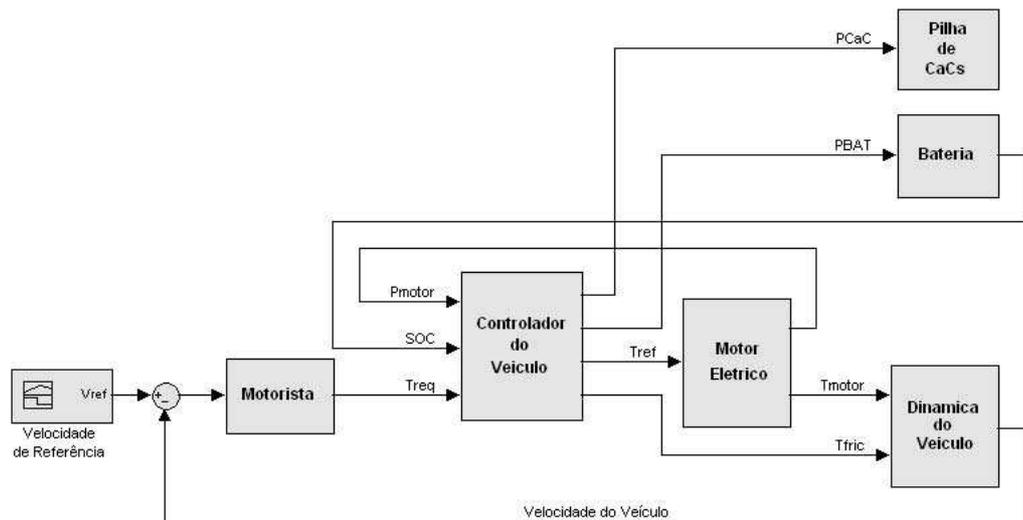


FIGURA 5.3: Diagrama de blocos do veículo híbrido de célula a combustível.

com a configuração de VECaC estudada, tal como apresentado nas seções que seguem.

## 5.2 Controle do veículo e gerenciamento de potência

O controle do veículo pode ser resumido da seguinte maneira:

1. A velocidade almejada é comparada com a velocidade atual do veículo;
2. O controlador PI gera um sinal de referência que representa o torque necessário para que o veículo atinja a velocidade estabelecida;
3. O controlador do veículo avalia o torque necessário e gera um sinal de referência para o motor elétrico;
4. O controlador do motor elétrico faz com que o mesmo gere o torque desejado;
5. A potência necessária ao motor elétrico é solicitada às fontes de energia pelo controlador do veículo. A divisão desta solicitação é feita de acordo com estratégia de controle e as restrições aplicáveis.

Cabe ressaltar que o sinal de referência (torque) transmitido ao motor elétrico pode não ser igual à solicitação do motorista. Este sinal poderá variar de acordo com: a capacidade do ME em gerar o referido torque, a capacidade das fontes de energia fornecerem a potência necessária, e com a potência desejada para carregar a bateria (durante frenagem regenerativa ou através da pilha de CaCs).

Além disso, o controlador do veículo deve, também, determinar a quantidade de torque negativo (torque de resistência ao movimento) que deve ser oriundo do motor elétrico quando em situações de frenagem, e a parcela que deve ser transmitida diretamente às rodas através de pastilhas que atritam com os discos de freio, desacelerando o veículo (torque de fricção,  $T_{fric}$ ). O torque negativo solicitado ao ME deve ser avaliado de maneira a encontrar a melhor proporção de "desperdício" de energia entre o desgaste das pastilhas de freio e o calor gerado por um banco de resistores, por exemplo.

### 5.2.1 Ciclos de condução

O ciclo de condução desejado pelo motorista pode ser simulado através de ciclos normatizados que reproduzem situações de condução diversas. Nas simulações que serão tratadas a seguir, três ciclos diferenciados foram utilizados, a saber: *Federal*

*Urban Driving Schedule* (FUDES), *Highway Fuel Economy Driving Schedule* (HFET) e *US06 Supplemental Federal Test Procedure* (SFTP), todos estes estabelecidos pela agência de proteção ambiental norte-americana (EPA, do inglês *Environmental Protection Agency*).

O ciclo FUDES representa condições de condução em cidades, com baixas velocidades e muitas situações de aceleração e frenagem; o HFET representa condução em estradas, onde velocidade razoavelmente constante é mantida e poucas situações de aceleração e frenagem são necessárias; e o ciclo SFTP simula um perfil agressivo de condução, com altas velocidade e aceleração, rápidas mudanças de velocidade e condições de condução após partida. As principais características dos três ciclos são apresentadas na Tabela 5.3.

TABELA 5.3: Principais características dos ciclos de condução FUDES, HFET e SFTP.

Ciclo	FUDES	HFET	SFTP
Distância (km)	11,8	16,5	12,8
Duração (s)	1372	766	601
Velocidade média (km/h)	31,4	77,6	77,1
Velocidade máxima (km/h)	91,2	96,4	129,2
Quantidade de paradas	18	1	8

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam a evolução da velocidade ao longo do tempo e a potência necessária ao veículo estudado para que realize cada um dos três ciclos de condução citados anteriormente, para um automóvel com  $1205\text{kg}$  (o mais pesado considerado nas simulações que serão apresentadas). Os gráficos foram obtidos através do *Simulink*. A potência é calculada em função da massa e da velocidade do veículo. Potência negativa significa operação do motor de indução como gerador, provendo potência oriunda de frenagem regenerativa. Cabe ressaltar que a potência elétrica fornecida ao motor de indução deverá ser maior do que os valores apresentados nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 pois existem perdas associadas ao sistema.

Além da potência necessária para que o veículo realize o ciclo de condução desejado, as fontes do veículo devem, também, ser capazes de prover potência para utilização dos sistemas auxiliares do veículo, tais como ar condicionado, rádio, vidros elétricos, iluminação interna, etc. Nas simulações que seguem, foi adicionado uma potência

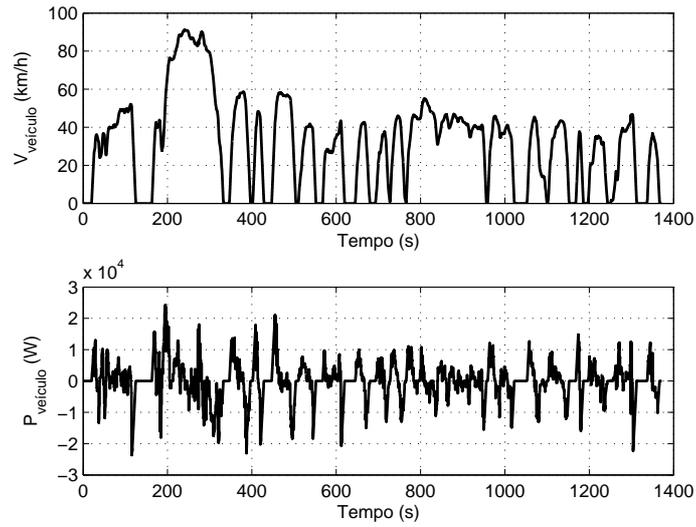


FIGURA 5.4: Velocidade do veículo e potência necessária para realização do ciclo FUDS.

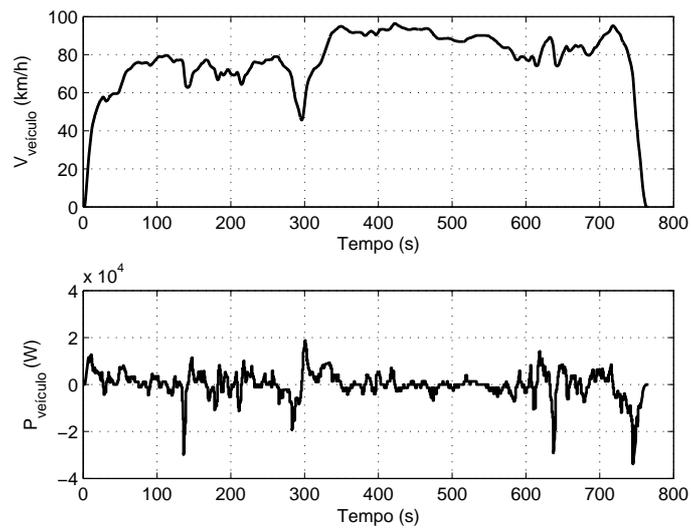


FIGURA 5.5: Velocidade do veículo e potência necessária para realização do ciclo HFET.

de 2kW em cada instante de tempo de maneira a representar a solicitação média de potência dos sistemas auxiliares de um veículo leve (Larminie & Lowry 2003).

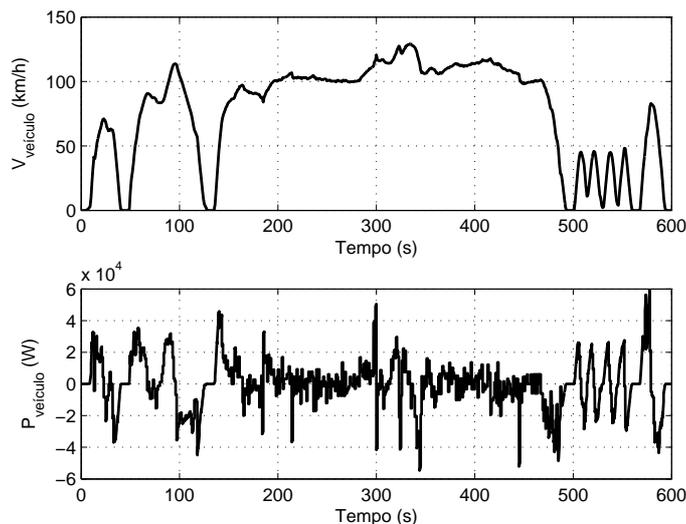


FIGURA 5.6: Velocidade do veículo e potência necessária para realização do ciclo SFTP.

### 5.3 Estratégias de controle

A seguir serão apresentados algoritmos de controle para as diferentes configurações de VECaCs descritas anteriormente e resultados de simulações que validam a utilização do modelo proposto no estudo deste tipo de veículo.

#### 5.3.1 Veículo de célula a combustível não-híbrido

A estratégia de controle para veículos de célula a combustível não-híbridos restringe-se a ajustar a potência da pilha de CaCs de maneira a satisfazer a solicitação de carga ao longo do tempo. Durante frenagem, a pilha de células a combustível é desligada e a solicitação de potência à mesma é zero. A Figura 5.7 apresenta o diagrama de blocos para esta estratégia de controle e a Figura 5.8 mostra os resultados obtidos para o ciclo de condução FUDS, utilizando a lógica de controle apresentada. Em ambas,  $P_{motor}$  é a potência necessária ao motor de indução para que o mesmo satisfaça a solicitação do motorista e a alimentação dos sistemas auxiliares do veículo, e  $P_{CaC}$  é a potência solicitada à pilha de células a combustível. Daqui por diante,  $P_{motor}$  será tratada, por simplicidade, como sendo a solicitação de potência por parte do motorista do veículo.

É verificado que a solicitação de potência feita à pilha de células a combustível segue a solicitação do motorista exceto em situações de frenagem, nas quais a pilha de

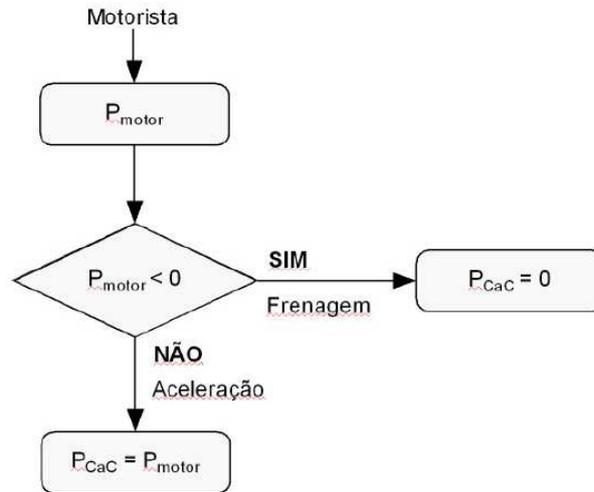


FIGURA 5.7: Estratégia de controle para VECaCs não-híbridos.

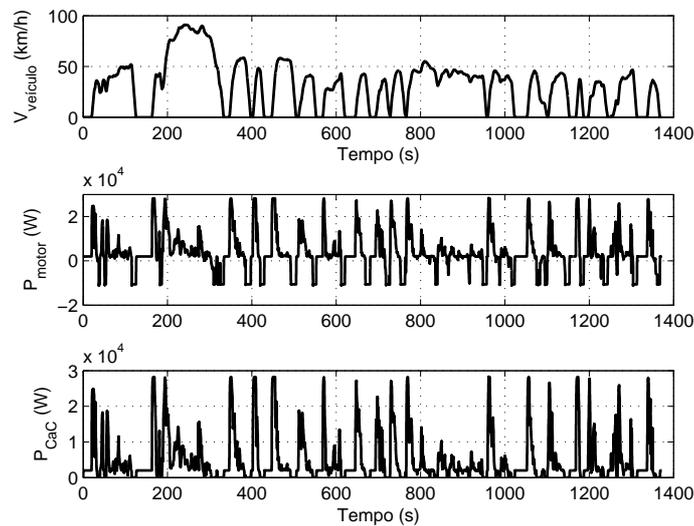


FIGURA 5.8: Simulação de VECaC não-híbrido com ciclo de condução FUDS.

CaCs é desligada. Não existe aproveitamento de energia quando os freios são acionados porque não há bateria ou outro sistema para armazenamento dessa energia.

A Tabela 5.4 apresenta a quantidade de combustível (hidrogênio) consumido e a eficiência média da pilha de CaCs ao longo dos ciclos FUDS, HFET e SFTP, utilizando a estratégia de controle para veículos não-híbridos. A eficiência média apresentada é a média aritmética da eficiência da pilha de CaCs em cada instante de tempo da simulação, calculada através da Equação (3.22).

O ciclo HFET implica no menor consumo de hidrogênio, pois a potência necessária

TABELA 5.4: Consumo de hidrogênio e eficiência média da pilha de CaCs para o VE-CaC não híbrido para três ciclos de condução diferentes.

Ciclo	Consumo de $H_2(kg)$	Eficiência Média da pilha de CaCs
FUDS	$12,90 \times 10^{-2}$	47,83%
HFET	$10,23 \times 10^{-2}$	42,62%
SFTP	$12,33 \times 10^{-2}$	43,19%

a realização deste ciclo é menor do que os outros dois. Já os ciclos SFTP e FUDS implicam em praticamente o mesmo consumo de hidrogênio.

Como não há fonte de energia auxiliar no veículo, a pilha de CaCs opera em muitos momentos com baixa eficiência, uma vez que deve prover toda a potência necessária ao veículo. Em função disto, pode-se verificar que a eficiência média da pilha de CaCs é próxima dos 40% para dois dos ciclos de condução.

### 5.3.2 Veículo de célula a combustível híbrido sem regeneração

Para VECaCs híbridos sem regeneração, o controlador deve acionar o banco de baterias para que o mesmo forneça parte da energia em situações nas quais a pilha de CaCs opera em regiões de baixa eficiência, ou quando a demanda de potência é muito elevada. Nesse caso, a potência da pilha de células a combustível é mantida constante e a diferença entre a solicitação do motorista e a potência fornecida pela pilha será suprida pelo banco de baterias. A estratégia é realizada dessa maneira até que o BB atinja um limite mínimo de estado de carga ( $SOC_{min}$ ). A partir deste momento o banco de baterias não mais será utilizado para evitar operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência até que seja novamente carregado atinjido um limite superior determinado ( $SOC_{max}$ ). Para tal, a pilha de CaCs irá carregar o banco de baterias nos momentos em que a solicitação de potência por parte do motorista for menor do que a potência máxima que a pilha de CaCs é capaz de fornecer. A Figura 5.9 apresenta o diagrama para esta lógica de controle. Nesta, a variável *descarga* indica se o BB pode (*descarga* = 1) ou não (*descarga* = 0) operar como fonte auxiliar de potência quando a eficiência da pilha de CaCs estiver baixa.

Cabe ressaltar que, quando *descarga* = 0, pode haver momentos em que a potência solicitada pelo motorista seja maior do que a pilha de CaCs pode prover. Nesta condição

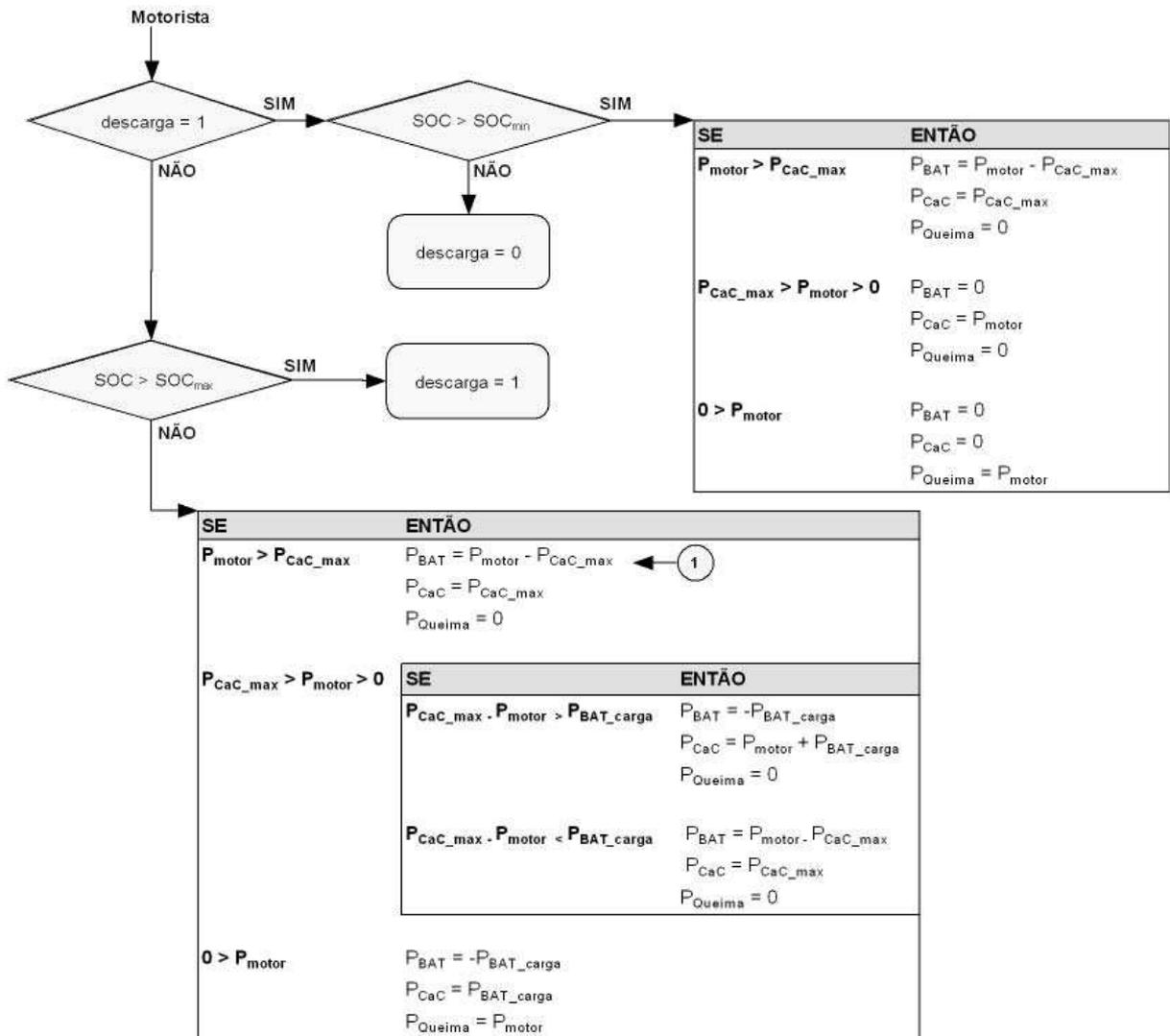


FIGURA 5.9: Estratégia de controle para VECaCs híbridos sem regeneração.

existem duas alternativas possíveis para o algoritmo de gerenciamento de potência, a saber: fornecer a potência solicitada pelo motorista através do acionamento do banco de baterias, ou suprir apenas a potência máxima que a pilha de CaCs pode fornecer e não acionar o banco de baterias, evitando descarregá-lo. Caso a primeira alternativa seja empregada, a vida útil do banco de baterias será diminuída em função do aumento dos ciclos de utilização se comparado à segunda opção, entretanto haverá momentos nos quais o desempenho do veículo será comprometido em função da potência fornecida pelas fontes de energia ser menor do que a potência demandada.

De maneira semelhante, pode ocorrer que o *SOC* do banco de baterias atinja o limite mínimo permitido e a solicitação de potência do motorista seja maior do que a

pilha de CaCs é capaz de prover. Nesse caso, deve-se optar entre descarregar o banco de baterias além do limite desejado ( $SOC_{min}$ ) de maneira a suprir a demanda de potência, ou manter o estado de carga neste limite, o que implica em não satisfazer a solicitação do motorista.

Nesta Dissertação, o banco de baterias é utilizado nas situações onde a solicitação de potência é maior do que a pilha de CaCs é capaz de prover, mesmo que se encontre em situação de carga, ou ainda que isso implique em descarga do BB além do limite inferior permitido. Dessa maneira, é garantido que a demanda de potência por parte do motorista seja sempre satisfeita. Esta situação é identificada com o número 1 na Figura 5.9.

A Figura 5.10 apresenta a distribuição de potência quando a estratégia de controle é aplicada em uma simulação na qual o veículo deve seguir o ciclo de condução normalizado FUDS. A potência máxima da pilha de CaCs é limitada de maneira a evitar a operação em regiões de baixa eficiência. Um limite de aproximadamente 30% foi utilizado como o valor mínimo de eficiência permitido. O número de células da pilha de CaCs foi reduzido à metade se comparado ao VECaC não híbrido e o banco de baterias é composto por 12 (doze) baterias do tipo chumbo ácido de 12 Volts (6 células), semelhantes as utilizadas hoje em dia em veículos leves convencionais.

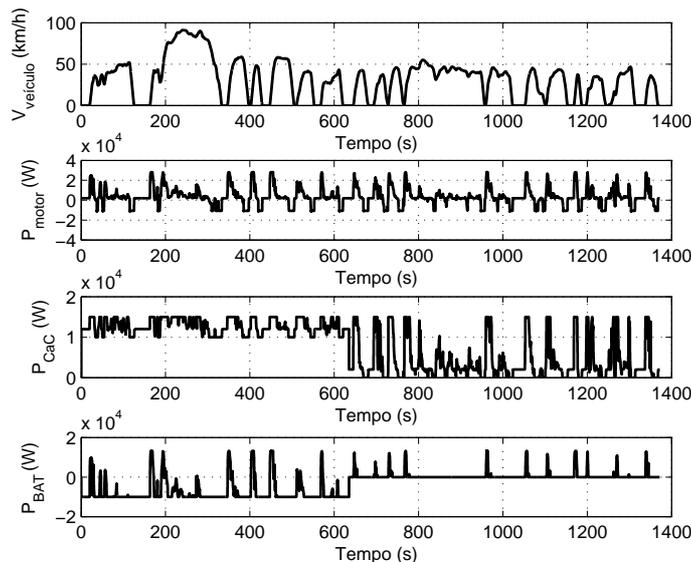


FIGURA 5.10: Distribuição de potência obtida em simulação para o VECaC híbrido sem regeneração com ciclo de condução FUDS.

O estado de carga do banco de baterias para a mesma simulação é apresentado na Figura 5.11. É observado que o BB deixa de ser carregado ao atingir 60% de sua capacidade ( $SOC_{max}$ ). Nesta simulação, o estado de carga inicial do banco de baterias foi fixado em 50%, que é o limite inferior do intervalo permitido ( $SOC_{min}$ ). A estratégia

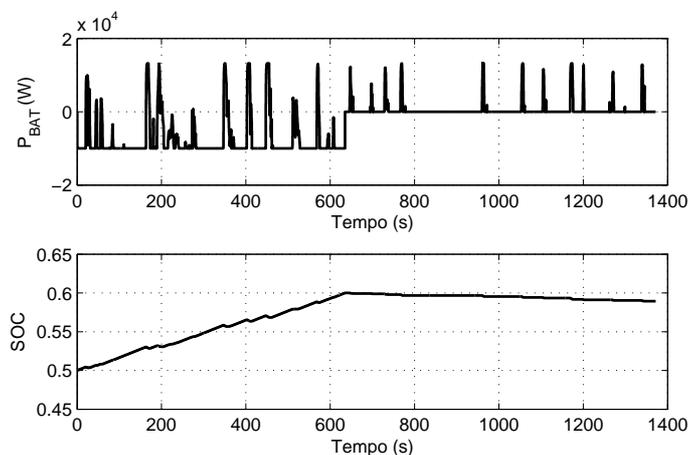


FIGURA 5.11:  $SOC$  do banco de baterias para a simulação do VECaC híbrido sem regeneração com ciclo de condução FUDS.

de controle é empregada em diferentes simulações para o mesmo veículo considerando ciclos de condução diferentes. A Tabela 5.5 resume os principais resultados obtidos.

Pode-se observar que a eficiência média da pilha de CaCs, embora ainda menor do que 50%, é maior do que as obtidas para o VECaC não híbrido para os três ciclos de condução. Este valor não é ainda maior, porque a pilha de CaCs é utilizada com frequência para carregar o banco de baterias, o que faz com que opere constantemente com eficiência próxima do valor mínimo permitido. Entretanto, com a inserção do BB, o consumo de hidrogênio diminuiu com relação ao VECaC não híbrido.

TABELA 5.5: Consumo de hidrogênio, eficiência média da pilha de CaCs e  $SOC$  médio do BB para o veículo híbrido sem regeneração para três ciclos de condução diferentes.

Ciclo	Consumo de $H_2(kg)$	Eficiência Média da pilha de CaCs	$SOC$ médio
FUDS	$12,72 \times 10^{-2}$	48,67%	56,67%
HFET	$10,01 \times 10^{-2}$	44,05%	58,58%
SFTP	$09,84 \times 10^{-2}$	44,02%	54,66%

Os resultados apresentados são a média dos valores encontrados em simulações com

diferentes estados iniciais para o  $SOC$  do banco de baterias. O objetivo é apresentar resultados representativos do comportamento do VECaC estudado sem a necessidade de realização de simulações que demandem muito tempo (algumas horas).

Em um primeiro momento, 05 (cinco) simulações foram realizadas para cada ciclo de condução, com os seguintes valores iniciais para o  $SOC$  do banco de baterias: 0, 50%, 55%, 60% e 100%. Com estes valores, estariam representadas situações nas quais o algoritmo de controle toma decisões diferenciadas em função do  $SOC$  do BB.

Entretanto, foi observado que os valores de 0 e 100% representavam casos especiais que não precisariam ser levados em consideração no cálculo da média. Isso porque, poucas serão as situações onde o banco de baterias estará totalmente carregado ou descarregado. Além disso, em simulações mais longas (maiores que 03 repetições de um mesmo ciclo de condução), que representam a utilização do veículo ao longo de distâncias maiores, o estado de carga médio tenderá a um valor contido entre os limites  $SOC_{min}$  e  $SOC_{max}$  independentemente do estado de carga inicial ( $SOC_{inicial}$ ). A Figura 5.12 ilustra esse fato. A figura apresenta a evolução do estado de carga do BB ao longo do tempo para uma simulação na qual o ciclo de condução SFTP é realizado 10 (dez) vezes seguidas. O  $SOC_{inicial}$  considerado é 0 e os valores de  $SOC_{min}$  e  $SOC_{max}$  são fixados por conveniência em 10% e 15%, respectivamente.

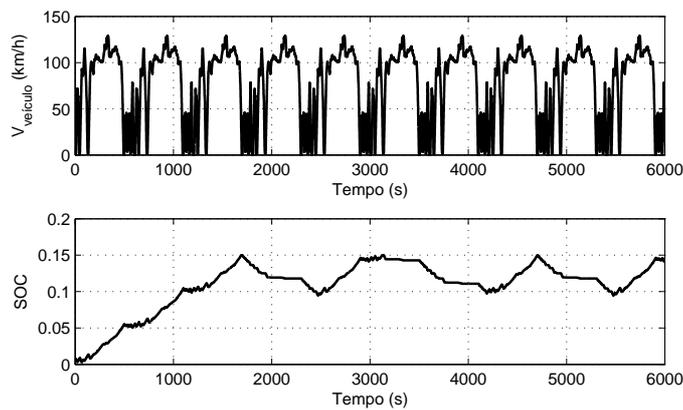


FIGURA 5.12: Velocidade do veículo e estado de carga do banco de baterias para simulação de VECaC híbrido sem regeneração com 10 repetições do ciclo de condução SFTP.

Em função de representarem casos especiais, as simulações realizadas para um ciclo de condução que não se repita, com estados de carga iniciais de 0 ou 100%, não são

representativas da estratégia de gerenciamento de potência empregada para veículos híbridos sem regeneração. Para exemplificar este fato, pode-se observar a Figura 5.13. Nesta, o veículo realiza o ciclo de condução FUDS e o banco de baterias está inicialmente descarregado. Pode-se observar que a pilha de CaCs é utilizada quase exclusivamente para propeler o veículo. Além disso, a pilha funciona a maior parte do tempo fornecendo uma quantidade elevada de potência, o que faz com que sua eficiência seja baixa. Esta condição de operação não é a condição normal neste tipo de veículo, no qual a pilha de CaCs deve fornecer alta potência apenas nas situações em que deve carregar o banco de baterias, além de fornecer a potência necessária para propeler o veículo.

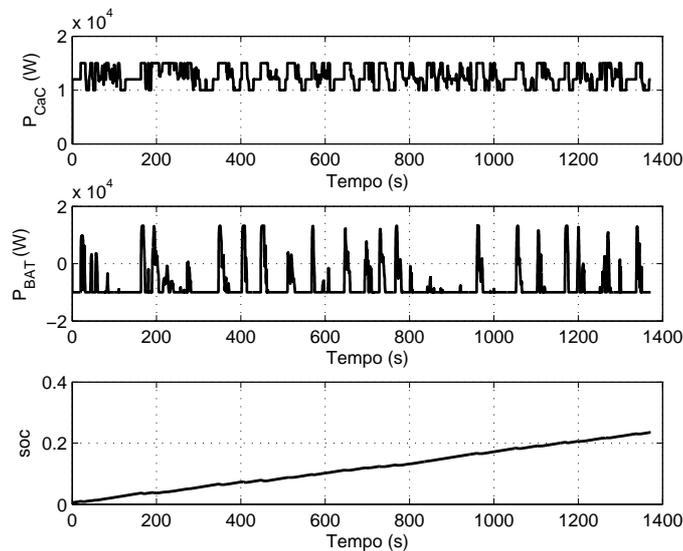


FIGURA 5.13: Potências da pilha de CaCs e do banco de baterias, e variação do  $SOC$  para simulação de VECaC híbrido sem regeneração com ciclo de condução FUDS e  $SOC_{inicial}$  igual a zero.

Pelo exposto, os resultados apresentados neste trabalho são os valores médios encontrados a partir de 03 (três) simulações para cada ciclo de condução, com  $SOC$  iniciais de 50%, 55% e 60%, que representam o limite inferior, o valor médio e o limite superior do intervalo permitido ao estado de carga do banco de baterias. As simulações de VECaCs híbridos regenerativos que serão apresentadas a seguir foram realizadas da mesma maneira.

### 5.3.3 Veículo de célula a combustível híbrido regenerativo

Em VECaCs híbridos regenerativos é possível aproveitar energia de frenagem através de um freio regenerativo. Nesse tipo de veículo, pode-se utilizar tanto a pilha de CaCs quanto o banco de baterias como principal fonte de energia. Uma maneira de avaliar qual das duas fontes é a principal é através da análise do grau de hibridização do sistema ( $GH$ ), definido através da Equação (5.7). O  $GH$  pode assumir valores entre 0 e 1, sendo os extremos, na verdade, veículos não híbridos movidos exclusivamente por células a combustível ( $GH = 0$ ) e banco de baterias ( $GH = 1$ ). O grau de hibridização pode ser utilizado como parâmetro de projeto, através da avaliação do comportamento de um veículo híbrido em função de diferentes dimensionamentos das suas fontes de energia por meio de simulações.

$$GH = \frac{P_{BAT}}{P_{BAT} + P_{CaC}} \quad (5.7)$$

Quando o grau de hibridização do veículo é maior do que 0,5, o banco de baterias é normalmente utilizado como fonte de energia principal, e quando  $GH \leq 0,5$  este assume a condição de fonte de energia auxiliar. A seguir serão apresentadas estratégias de controle para ambos os casos. Com o intuito de comparar o consumo de combustível do veículo de acordo com o emprego de ambas as fontes de energia como fonte principal, o grau de hibridização do veículo é fixado em 0,5 para as simulações que serão apresentadas.

#### 5.3.3.1 Banco de baterias como fonte principal de potência

Quando o banco de baterias é utilizado como principal fonte de energia do veículo, a estratégia de gerenciamento de potência consiste em utilizar unicamente o BB para acionar o veículo, ligando a pilha de CaCs apenas nos momentos de alta solicitação de potência, ou em situações onde o estado de carga está abaixo de um nível pré-determinado.

Portanto, a estratégia consiste em ligar a pilha de células a combustível e carregar o banco de baterias até um nível máximo de  $SOC$  pré-estabelecido e desligá-la em seguida, deixando para o BB a incumbência de fornecer a potência necessária ao motor elétrico. Dessa maneira, a solicitação de potência ao banco de baterias segue a

solicitação do ME até que o mesmo atinja um limite mínimo de  $SOC$ , a menos que a solicitação de potência seja maior do que o BB é capaz de fornecer. Neste caso, a pilha de CaCs é ligada para que forneça um adicional de potência que complemente a máxima cabível ao banco de baterias.

O  $SOC$  é limitado tal como no VECaC sem regeneração, com o objetivo de estender a vida útil do banco de baterias, evitando cargas e descargas excessivas. Os limites máximo e mínimo encontrados na literatura estão geralmente contidos no intervalo de 40 a 70% (Lin et al. 2003) da carga total possível. Nas simulações aqui realizadas esses valores são fixados em 50 e 60%, respectivamente, com o objetivo de ressaltar as diferenças entre as estratégias de controle realizadas e seu emprego para ciclos de condução diferentes.

Quando o  $SOC$  do banco de baterias atinge  $SOC_{min}$ , a pilha de células a combustível é ligada de maneira a fornecer a potência requerida pelo motor elétrico, além de uma quantidade adicional utilizada para carregar o banco de baterias. Esse adicional é denominado potência de carga.

O fluxograma da lógica de controle para VECaCs híbridos com regeneração que utilizam o banco de baterias como fonte de energia principal é apresentado na Figura 5.14. Nesta, o número 1 ressalta a opção por satisfazer a solicitação de potência realizada pelo motorista do veículo em detrimento à não utilização do banco de baterias quando o mesmo encontra-se em situação de carga, tal como realizado para o VECaC híbrido sem regeneração.

A estratégia de frenagem consiste em armazenar o máximo de energia possível no banco de baterias, fazendo-se o motor de indução operar como gerador transformando energia cinética do veículo em energia elétrica, desde que o  $SOC$  do banco de baterias esteja abaixo do limite máximo permitido. A máxima energia absorvida pela bateria em um espaço de tempo é limitada pela potência máxima de carga ( $P_{BAT-carga}$ ), e a quantidade excedente de potência gerada pelo motor elétrico ( $P_{Queima}$ ) deve ser descartada, uma vez que não existem outros elementos armazenadores de energia no veículo.

A Figura 5.15 ilustra a distribuição de potência obtida através de simulação para um VECaC híbrido com regeneração e  $GH = 0,5$  para que o veículo realize o ciclo de condução FUDS. Nesta simulação,  $SOC_{inicial} = 50\%$ .

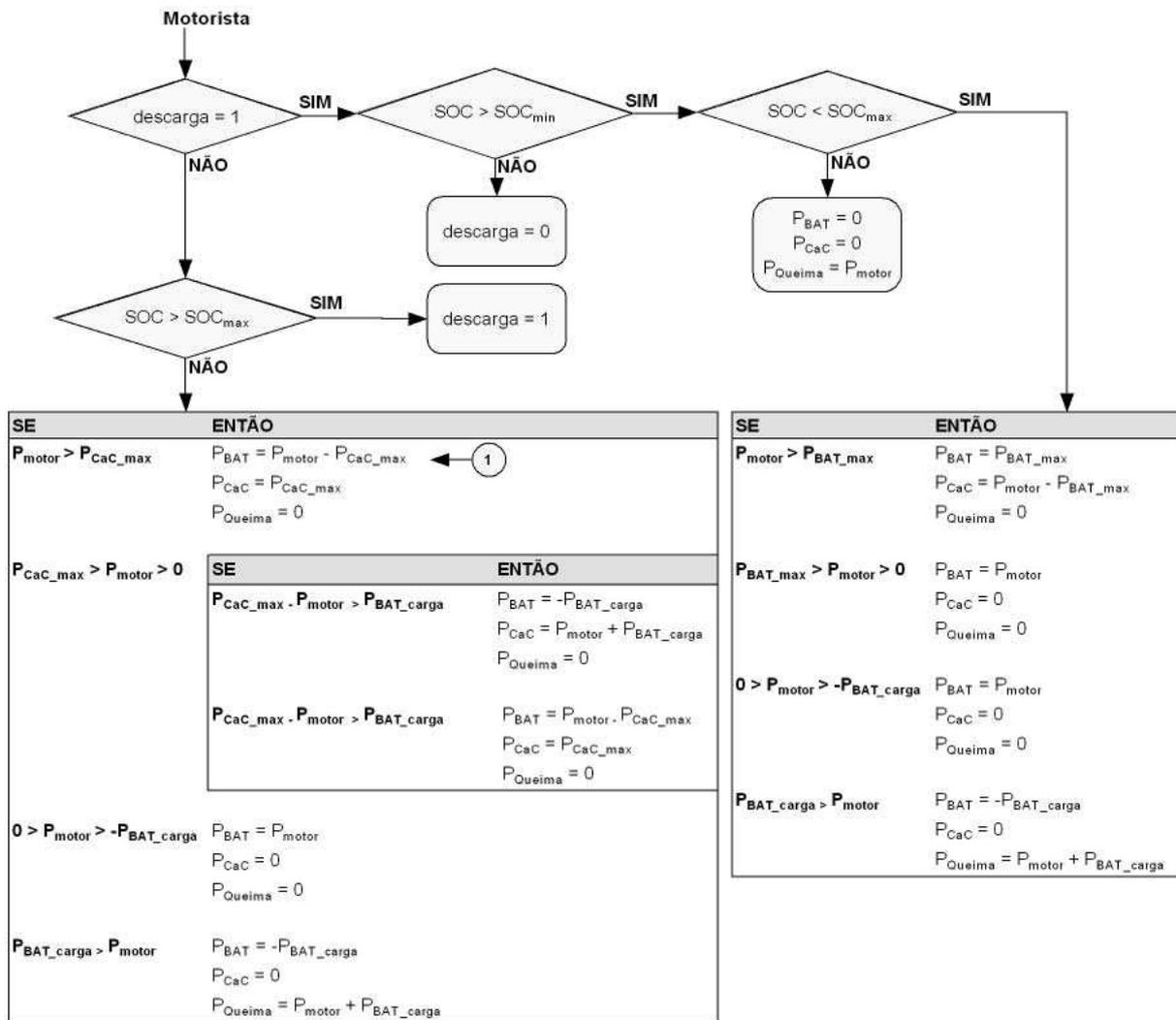


FIGURA 5.14: Estratégia de controle para VECaCs híbridos regenerativos com banco de baterias como fonte principal de potência.

A Tabela 5.6 resume os principais resultados das simulações realizadas para os ciclos de condução FUDS, HFET e SFTP para o VECaC híbrido com regeneração,  $GH = 0,5$  e banco de baterias como principal fonte de energia.

A menor utilização da pilha de CaCs faz com que o consumo de hidrogênio seja menor em todos os ciclos se comparado aos VECaC não regenerativo e VECaC híbrido sem regeneração descritos nas seções anteriores. O valor médio da eficiência da pilha de células a combustível também aumentou.

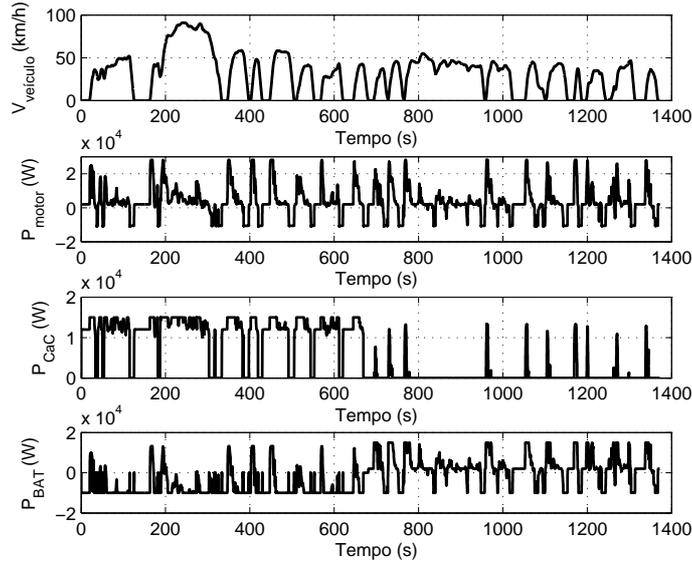


FIGURA 5.15: Simulação de VECaC híbrido com banco de baterias como fonte principal de potência e ciclo de condução FUDS.

TABELA 5.6: Consumo de hidrogênio, eficiência média da pilha de CaCs e *SOC* médio do banco de baterias do VECaC híbrido com regeneração e BB como fonte de potência principal para três ciclos de condução diferentes.

Ciclo	Consumo de $H_2(kg)$	Eficiência Média da pilha de CaCs	<i>SOC</i> médio
FUDS	$10,82 \times 10^{-2}$	62,40%	55,05%
HFET	$08,40 \times 10^{-2}$	60,24%	54,79%
SFTP	$07,73 \times 10^{-2}$	54,94%	53,11%

### 5.3.3.2 Pilha de células a combustível como fonte principal de potência

Em veículos híbridos nos quais a pilha de células a combustível é utilizada como fonte de energia principal, a estratégia de controle é semelhante a empregada para VECaCs híbridos sem regeneração, porém com a capacidade de armazenamento de energia proveniente de frenagem. A estratégia consiste em fazer com que a solicitação de potência à pilha de CaCs siga a solicitação do motorista exceto em situações nas quais a eficiência da pilha atinge um valor mínimo determinado, ou durante frenagem.

Quando a eficiência da pilha decai a um limite mínimo pré-estabelecido, a solicitação de potência à mesma é limitada ao valor corrente, de maneira a evitar que a eficiência diminua ainda mais. A potência adicional que deve ser fornecida ao veículo é obtida do banco de baterias.

O  $SOC$  é limitado entre os valores  $SOC_{min}$  e  $SOC_{max}$  e o BB pode ser carregado através do aproveitamento de energia de frenagem ou diretamente através da pilha de células a combustível. Nesse caso, a potência de carga fornecida pela pilha de CaCs ao BB é limitada pela potência máxima que a pilha pode fornecer e pela diferença entre este valor e a potência solicitada pelo motorista.

A Figura 5.16 apresenta a lógica de controle empregada para veículos híbridos regenerativos que utilizam a pilha de CaCs como fonte de energia principal. A equação marcada com o número 1 representa a opção por descarregar a bateria em detrimento ao não suprimento da potência solicitada pelo motorista. Na Figura 5.17 pode-se observar o resultado da aplicação da estratégia descrita nesta seção a um VECaC com  $GH = 0,5$  para realização do ciclo de condução FUDS. A exemplo das simulações apresentadas para os VECaCs descritos anteriormente, o  $SOC$  inicial do BB foi fixado em 50%. A Tabela 5.7 resume os principais resultados obtidos.

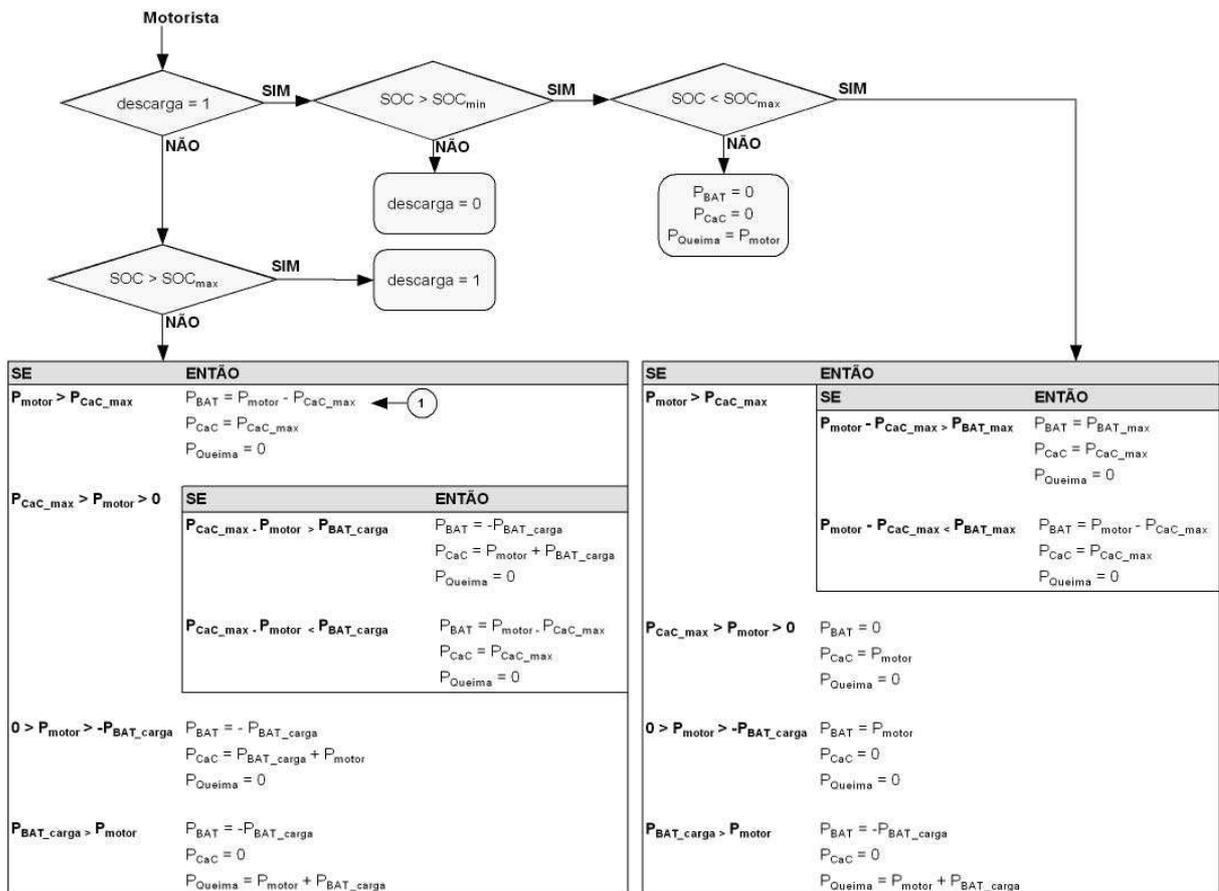


FIGURA 5.16: Estratégia de controle para VECaCs híbridos regenerativos com a pilha de CaCs como fonte de energia principal.

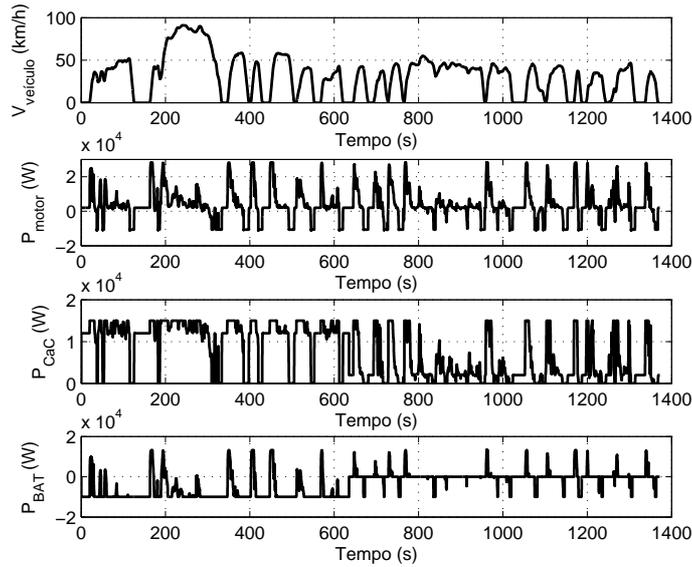


FIGURA 5.17: Simulação de VECaC híbrido regenerativo com pilha de CaCs como fonte de energia principal.

TABELA 5.7: Consumo de hidrogênio, eficiência média da pilha de CaCs e *SOC* médio do BB para o VECaC híbrido regenerativo com pilha de CaCs como principal fonte de energia para três ciclos de condução.

Ciclo	Consumo de $H_2(kg)$	Eficiência Média da pilha de CaCs	<i>SOC</i> médio
FUDS	$12,21 \times 10^{-2}$	49,43%	56,67%
HFET	$09,96 \times 10^{-2}$	44,10%	55,25%
SFTP	$09,34 \times 10^{-2}$	45,61%	54,66%

O consumo de hidrogênio obtido para o VECaC descrito nesta seção é maior do que o obtido para o veículo descrito na seção anterior para os três ciclos de condução simulados. Isso se deve ao fato de a pilha de CaCs operar a maior parte do tempo com eficiência menor no primeiro caso. Como na estratégia realizada na seção anterior o BB é utilizado por mais tempo, o consumo de hidrogênio ao final dos ciclos de condução fica menor do que o obtido através da estratégia descrita nesta seção.

### 5.3.3.3 Estratégia com modo de recarga rápido e controle da eficiência da pilha de CaCs e do *SOC* do banco de baterias

As estratégias de controle para VECaCs híbridos regenerativos desenvolvidas nas seções anteriores possuem a vantagem de ser simples de implementar, além de satisfazer

a necessidade de manutenção do estado de carga do banco de baterias entre limites pré-estabelecidos. Entretanto, pode-se melhorar o desempenho do veículo através da implementação de algumas modificações nestas estratégias. As mudanças têm como objetivos aumentar o aproveitamento da energia proveniente de frenagem e manter o  $SOC$  do banco de baterias o mais próximo possível de um valor ideal pré-determinado ( $SOC_{ideal}$ ). Para tal, além de evitar a operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência de maneira a evitar altas perdas de potência, e controlar o  $SOC$  do BB entre limites pré-determinados, o algoritmo de controle deve penalizar o  $SOC$  do banco de baterias em função da diferença entre seu valor atual e o  $SOC_{ideal}$ . Dessa maneira, a deterioração imposta a bateria decorrente de altas correntes de carga e descarga é minimizada.

Para alcançar estes objetivos, um algoritmo de controle foi desenvolvido baseado no realizado por Cho (2004). O controlador opera o veículo em dois modos distintos: recarga rápida e recarga normal.

O modo de recarga rápida é implementado de maneira a evitar que a bateria tenha seu estado de carga diminuído além de  $SOC_{min}$ . Quando o veículo opera no modo de recarga rápida, a pilha de células a combustível gera continuamente sua potência máxima até que o  $SOC$  da bateria atinja o estado de carga ideal pré-determinado. Neste estudo, o  $SOC_{ideal}$  é fixado em 55%, que é o valor médio do intervalo permitido.

No modo de recarga normal, a potência solicitada a pilha de CaCs é controlada entre os valores mínimo ( $P_{min}$ ) e máximo ( $P_{max}$ ). Além disso, o  $SOC$  do banco de baterias é mantido entre os valores  $SOC_{min}$  e  $SOC_{max}$  e têm sua flutuação com relação ao  $SOC_{ideal}$  penalizada através do aumento ou da diminuição da solicitação de potência feita ao banco de baterias. Quanto maior a diferença entre o  $SOC$  corrente e o  $SOC_{ideal}$ , menor será a potência solicitada (descarga) ou fornecida (carga) ao banco de baterias. O modo de recarga normal pode ser descrito através de quatro etapas diferenciadas, a saber:

- Regeneração: o fornecimento de potência por parte da pilha de células a combustível é interrompido e o banco de baterias é carregado através da energia proveniente do freio regenerativo. Quando o  $SOC$  do BB atinge  $SOC_{max}$ , a regeneração é interrompida.

- Baixa potência: Evita operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência. Quando pouca potência é demandada ao veículo, a pilha de CaCs é desligada e o banco de baterias fornece a potência necessária.
- Alta potência: A pilha de CaCs fornece sua potência máxima enquanto o banco de baterias provê a potência adicional necessária para propelir o veículo.
- Potência moderada: Quando o  $SOC$  do banco de baterias está acima do valor ideal (valor médio do intervalo permitido), o BB é descarregado proporcionalmente a diferença entre o  $SOC$  e o  $SOC_{ideal}$ , tal como exposto na Equação (5.8). A potência adicional necessária é fornecida pela pilha de CaCs. Quando o  $SOC$  do banco de baterias está abaixo do  $SOC$  ideal, a pilha de CaCs fornece a potência necessária para propelir o veículo além de um adicional para carregar o BB. Esse adicional é calculado de maneira semelhante à situação de descarga, tal como exposto na Equação (5.9).

$$P_{bat} = (P_{motor} - P_{CaC_{max}}) \times \frac{\left(\frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2}\right) - SOC}{\left(\frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{2}\right)} \quad (5.8)$$

$$P_{bat} = -P_{motor} \times \frac{\left(\frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2}\right) - SOC}{\left(\frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{2}\right)} \quad (5.9)$$

A Figura 5.18 ilustra a lógica de controle. Nesta,  $modo = 0$  indica modo de recarga rápida e  $modo = 1$  indica modo de recarga normal.  $f(SOC)$  representa o quociente das equações (5.8) e (5.9).

Na Figura 5.19 podem ser observadas a velocidade do veículo e as potências solicitadas a cada uma das fontes de energia para que o mesmo realize o ciclo de condução FUDS utilizando a estratégia de controle descrita nesta seção. O grau de hibridização do veículo utilizado nesta simulação é 0,5 e o estado de carga inicial do banco de baterias fixado em 50%. Na Figura 5.20 é apresentado o estado de carga do banco de baterias para a mesma simulação.

Pode-se verificar em ambas as figuras que o sistema inicia sua operação no modo de recarga rápida, uma vez que o  $SOC$  inicial do banco de baterias é o limite mínimo permitido. A operação do veículo é mantida no modo de recarga rápida por aproximadamente 340s, tempo necessário para que o BB alcance 55% de sua carga ( $SOC_{ideal}$ ).

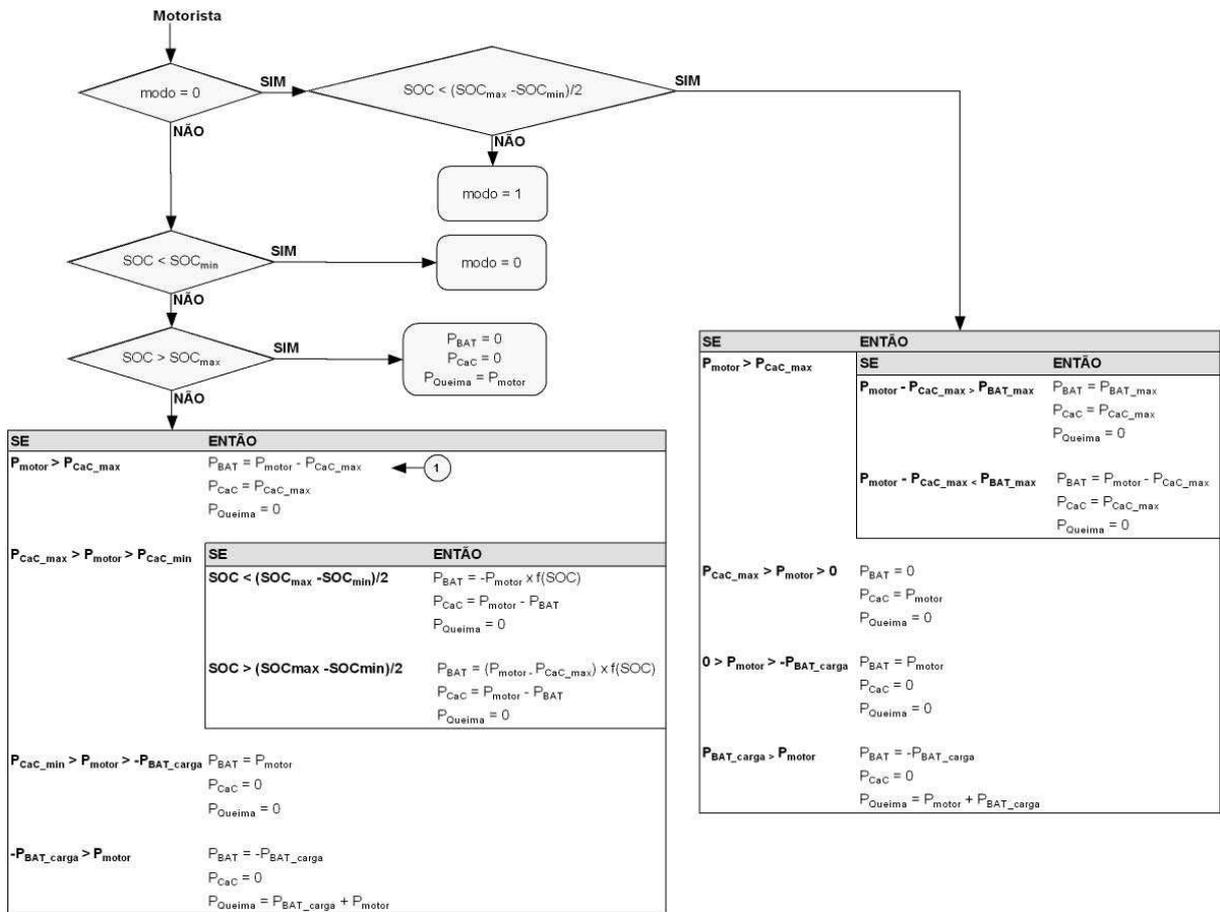


FIGURA 5.18: Lógica de controle para veículos híbridos com penalidade para  $SOC$  e operação da pilha de CaCs fora de regiões de baixa eficiência.

Nesse instante, o sistema passa a operar no modo de recarga normal o que faz com que a pilha de CaCs não seja mais acionada para carregar a bateria. A mesma é carregada durante os instantes em que o motor de indução opera como gerador gerando energia elétrica a partir da energia mecânica gerada durante frenagem.

Com o objetivo de ressaltar as diferenças entre a estratégia proposta nesta seção e as apresentadas nas seções anteriores, são apresentadas na Figura 5.21 as variações do  $SOC$  do banco de baterias em função do emprego das três estratégias ao longo do ciclo de condução FUDS com  $SOC$  inicial igual a 50%.

Em todos os casos, a pilha de CaCs é utilizada preferencialmente ao longo dos primeiros instantes do ciclo, pois  $SOC_{inicial} = SOC_{min}$ . Nesse período, a pilha provê a potência solicitada pelo motorista (sempre que for menor do que  $P_{CaC_{max}}$ ) além de um adicional para carregar o BB. Para as estratégias das seções 5.3.3.2 e 5.3.3.1,

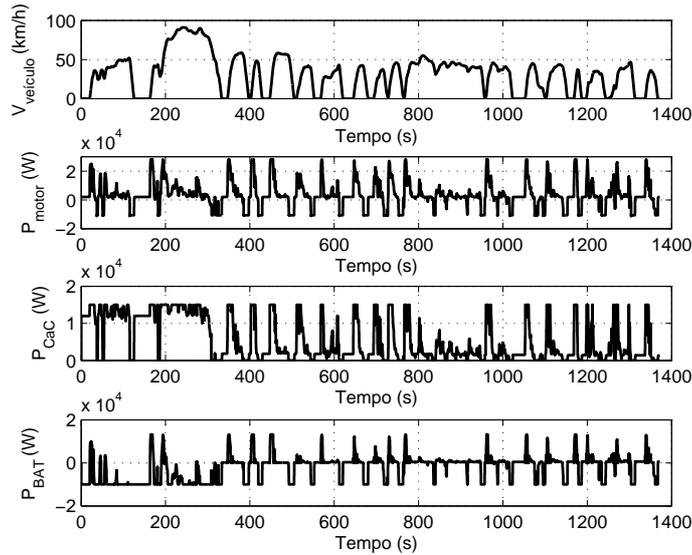


FIGURA 5.19: Simulação de VECaC híbrido regenerativo com estratégia de controle que evita operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência e penaliza o  $SOC$  do banco de baterias para o ciclo de condução FUDS.

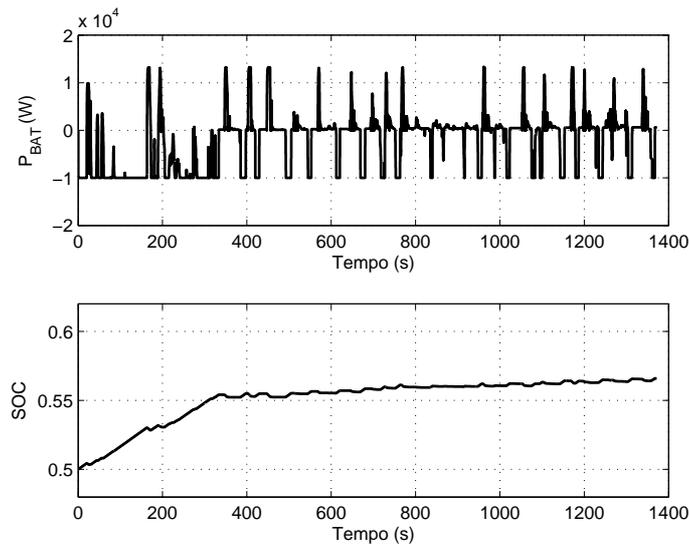


FIGURA 5.20: Potência solicitada/fornecida ao banco de baterias e  $SOC$  para simulação de veículo híbrido regenerativo com a estratégia de controle que opera a pilha de CaCs fora de regiões de baixa eficiência e penaliza o  $SOC$  do banco de baterias para o ciclo de condução FUDS.

essa condição se mantém até que o estado de carga atinja  $SOC_{max}$ . A partir de então, pode-se verificar a diferença entre ambas as simulações. Para a estratégia que utiliza o banco de baterias preferencialmente, o  $SOC$  começa a decair em função da solicitação

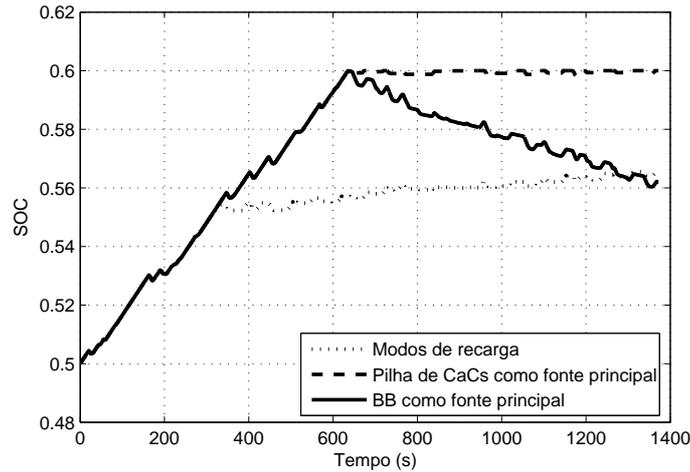


FIGURA 5.21:  $SOC$  do banco de baterias para a realização do ciclo de condução FUDS utilizando as três estratégias para gerenciamento de potência em VE-CaCs híbridos regenerativos.

de potência ao BB ser maior, enquanto para a estratégia que utiliza a pilha de CaCs preferencialmente o  $SOC$  do banco de baterias mantém-se razoavelmente constante, decaído e tornando a subir sempre próximo ao limite superior. Isso se deve ao fato da potência solicitada ao BB no intervalo de tempo que segue ser baixa, uma vez que nessa estratégia o BB fornece apenas a diferença entre a solicitação do motorista e o que a pilha de CaCs pode prover. Além disso, há absorção de energia por parte do BB sempre que existe energia de frenagem disponível e o  $SOC$  do banco de baterias é menor do que  $SOC_{max}$ . Para a estratégia que utiliza a pilha de CaCs como principal fonte, isso implica em desperdício de energia de regeneração em função do  $SOC$  ficar próximo de  $SOC_{max}$  por muito tempo, o que faz com que a energia aproveitada seja limitada para que o  $SOC$  não ultrapasse o limite máximo permitido.

Para a estratégia que implementa os modos de recarga rápido e normal, a utilização da pilha de CaCs com alta potência cessa mais rapidamente se comparado às outras duas. Quando o  $SOC$  do banco de baterias atinge 55% o sistema chaveia para o modo de recarga normal e a quantidade de potência solicitada às fontes de energia começa a ser ponderada de acordo com a diferença entre o  $SOC$  e o  $SOC_{ideal}$ , o que faz com que o aproveitamento da energia de regeneração seja melhorado e com isso o  $SOC$  distancia-se menos (e mais lentamente) do valor ideal.

A Tabela 5.8 apresenta a quantidade de energia absorvida por regeneração e a

quantidade de energia da pilha CaCs utilizada para carga da bateria ao longo das simulações apresentadas nas Figuras 5.15 a 5.21.

TABELA 5.8: Energia da pilha de CaCs utilizada para carga do BB e energia aproveitada durante frenagem regenerativa para as estratégias de gerenciamento de potência para VECaCs com  $GH = 0,5$ ,  $SOC_{inicial} = 50\%$  e ciclo de condução FUDS.

	Pilha de CaCs como principal fonte	BB como principal fonte	Estratégia com modos de recarga
Energia da pilha de CaCs utilizada para carga da bateria (W)	$4,2635 \times 10^6$	$4,2635 \times 10^6$	$2,3078 \times 10^6$
Energia aproveitada durante frenagem regenerativa (W)	$2,5111 \times 10^6$	$2,5887 \times 10^6$	$2,5887 \times 10^6$

É verificado que a estratégia proposta nesta seção gasta 45,87% menos energia da pilha de CaCs para carregar a bateria, ao mesmo tempo que aproveita ao máximo a energia de regeneração disponível ao longo do ciclo. A estratégia que utiliza bateria como fonte de energia principal aproveita, no exemplo apresentado, tanta energia de regeneração quanto a estratégia com modos de recarga, já a estratégia que utiliza a pilha de CaCs como principal fonte faz com que o banco de baterias absorva menos energia de regeneração.

A Tabela 5.9 apresenta os principais resultados obtidos com a utilização da estratégia de controle descrita nesta seção. A Figura 5.22 apresenta o consumo de hi-

TABELA 5.9: Consumo de hidrogênio, eficiência média da pilha de CaCs e  $SOC$  médio do banco de baterias do VECaC híbrido regenerativo com aplicação da estratégia de controle com modos de recarga para três ciclos de condução diferentes.

Ciclo	Consumo de $H_2(kg)$	Eficiência Média da pilha de CaCs	$SOC$ médio
FUDS	$07,94 \times 10^{-2}$	55,89%	55,29%
HFET	$04,79 \times 10^{-2}$	55,37%	53,86%
SFTP	$08,35 \times 10^{-2}$	47,08%	54,55%

drogênio obtido em simulação para o VECaC híbrido regenerativo com o emprego da estratégia de controle descrita nesta seção comparado ao consumo obtido com as estratégias descritas nas seções 5.3.3.1 e 5.3.3.2. O consumo do veículo que utiliza a pilha

de CaCs como principal fonte de potência é usado como parâmetro de referência. A estratégia que implementa modos de recarga implica em uma diminuição do consumo de hidrogênio de 45% para o ciclo de condução FUDS e 52% para o ciclo HFET. Para o ciclo de condução SFTP, o consumo diminui com relação à utilização da pilha de CaCs como fonte de energia principal, porém fica acima da estratégia que utiliza o banco de baterias como principal fonte.

Entretanto, cabe ressaltar que o consumo de hidrogênio não é o único gasto de energia do veículo. Por esse motivo, é importante que a energia utilizada ou armazenada no banco de baterias também seja levada em consideração quando diferentes estratégias de gerenciamento de potência forem comparadas. Uma maneira de fazer isso será apresentada na próxima seção.

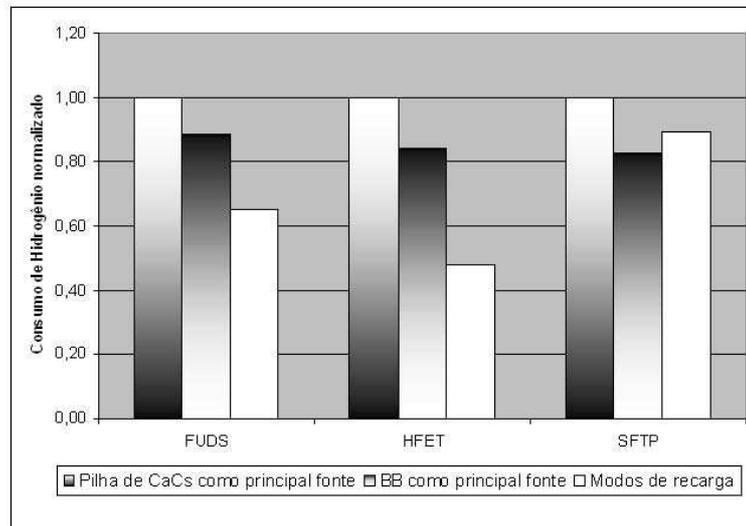


FIGURA 5.22: Consumo de hidrogênio para um veículo híbrido com  $GH = 0,5$  para as três estratégias de controle descritas.

## 5.4 Comparação com veículos convencionais

Uma vez que a energia para acionamento do VECaC é proveniente de duas fontes distintas, é importante que a energia gasta por ambas seja levada em consideração ao comparar diferentes configurações e/ou estratégias de controle para VECaCs. Em outras palavras, para que seja possível comparar de maneira adequada o consumo de combustível dos VECaCs avaliados nesta Dissertação, é importante considerar não

apenas o consumo de hidrogênio, mas também a energia utilizada ou fornecida ao banco de baterias.

Uma maneira de realizar esta comparação é calcular um consumo de combustível equivalente à utilização do banco de baterias. Este consumo pode ser somado ao consumo da pilha de CaCs e o total pode ser comparado com outros veículos.

Entretanto, além de comparar diferentes VECaCs, é desejável que seja possível avaliar o consumo dos mesmos com relação a veículos leves movidos por motor de combustão interna. Para que isso seja possível, é necessário realizar a equivalência entre a energia consumida pelos VECaCs, e a energia equivalente gasta por um veículo convencional. Para tal, pode-se calcular um consumo equivalente de gasolina que representa a massa de hidrogênio consumido somada a energia da bateria gasta pelo VECaC. O cálculo é realizado de acordo com o apresentado em Cho (2004) através da Equação (5.10).

$$Consumo_{km/l_{gasolina}} = k \times \frac{PCI_{gas} \times \rho_{gas} \times D}{\frac{E_{bat}}{\overline{\eta_{CaC}} \times \overline{\eta_{bat}}} + (m_{H_2} \times PCI_{H_2})} \quad (5.10)$$

Na qual  $PCI_{gas}$  e  $PCI_{H_2}$  são os poderes caloríficos inferiores da gasolina e do hidrogênio ( $43,5MJ/kg$  e  $119,950MJ/kg$ ), respectivamente,  $\rho_{gas}$  é a densidade da gasolina ( $755kg/m^3$ ),  $D$  é a distância em metros percorrida pelo veículo,  $E_{bat}$  é a energia consumida pelo banco de baterias (KJ),  $\overline{\eta_{CaC}}$  e  $\overline{\eta_{bat}}$  são as eficiências médias da pilha de CaCs e do banco de baterias, respectivamente, e  $k = 1000$  representa os fatores de conversão de unidades ( $kJ$  para  $MJ$ ,  $m^3$  para  $l$  e  $m$  para  $km$ ).

A Tabela 5.10 mostra o consumo equivalente de gasolina para os VECaCs não híbrido, híbrido sem regeneração e híbrido regenerativo (com a estratégia de controle descrita na seção 5.3.3.3). O consumo equivalente, em km/l de gasolina, é o que seria gasto pelo veículo simulado caso o mesmo fosse movido por MCI de gasolina.

TABELA 5.10: Consumo equivalente em km/l de gasolina para os VECaCs não híbrido, híbrido com regeneração e híbrido sem regeneração.

Veículo	FUDS	HFET	SFTP
VECaC não híbrido (apenas pilha de CaCs)	25,45	62,49	36,65
VECaC híbrido sem regeneração (pilha de CaCs + BB)	39,07	63,35	34,02
VECaC híbrido regenerativo (pilha de CaCs + BB)	39,43	65,95	43,23

Tendo em mente que o consumo de um veículo Palio 1.0 convencional gira em torno de 12 km/l de gasolina, os resultados mostram o menor consumo de combustível para veículos de célula a combustível se comparados a veículos convencionais propelidos através de motor de combustão interna.

Além disso, é verificado o ganho obtido através da utilização de frenagem regenerativa no VECaC descrito nesta Dissertação.

## 5.5 Veículos elétricos a bateria

Além da avaliação do consumo de VECaCs com relação aos veículos convencionais de motores de combustão interna, outra análise interessante diz respeito a comparação deste tipo de veículo com os veículos elétricos a bateria (VEBs). Isso porque, ambos são veículos elétricos e possuem características semelhantes tais como emissão zero e baixo ruído e são alternativas para os veículos convencionais movidos a combustão interna.

Para comparar o consumo dos VEBs e VECaCs, o modelo do veículo foi adaptado de maneira a representar um veículo elétrico a bateria com capacidade de regeneração e outro não regenerativo.

A estratégia de controle empregada para o VEB sem regeneração é semelhante à utilizada para VECaCs não híbridos, e para o VEB com regeneração é implementada a capacidade de aproveitamento da energia de frenagem. As Figuras 5.23 e 5.24 ilustram ambas estratégias para o gerenciamento de potência nestes veículos.

Da mesma forma que para os VECaCs, o desempenho (consumo) dos VEBs enquanto sujeitos a diferentes ciclos de condução foi avaliado. A Tabela 5.11 resume os resultados obtidos. O consumo equivalente demonstra a quantidade de gasolina que os veículos iriam consumir caso fossem movidos através de motor de combustão interna. É

TABELA 5.11: Consumo equivalente em km/l de gasolina para VEBs com regeneração e não regenerativo.

Ciclo	VEB não regenerativo	VEB regenerativo
FUDS	44,00	63,73
HFET	93,41	99,44
SFTP	57,05	67,80

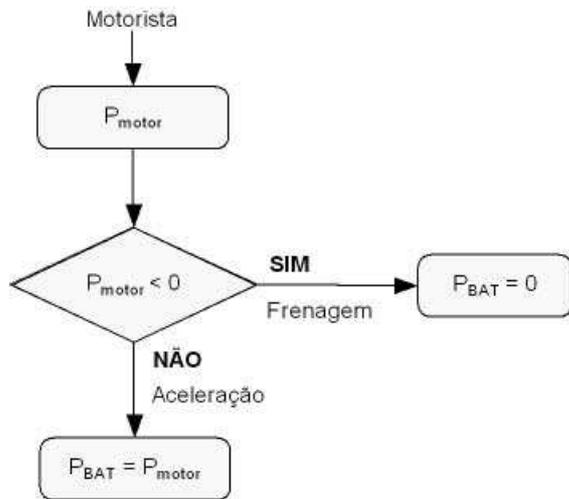


FIGURA 5.23: Estratégia de controle para VEBs sem regeneração.

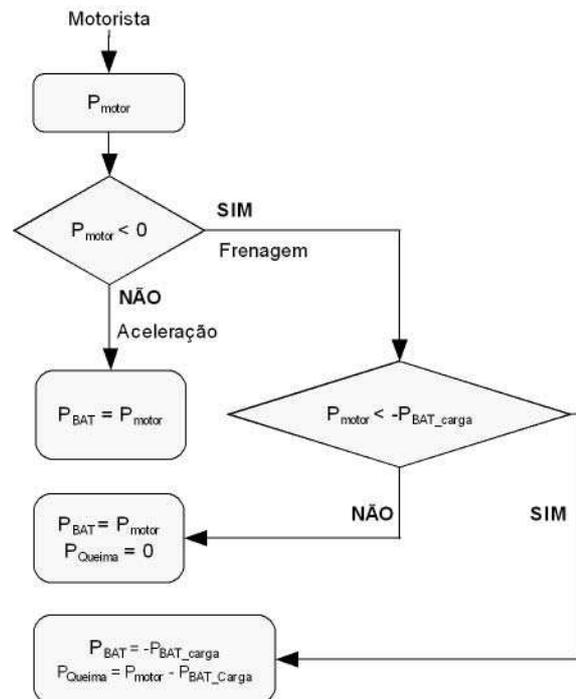


FIGURA 5.24: Estratégia de controle para VEBs com regeneração.

comprovado que o consumo de um veículo elétrico a bateria é significativamente menor do que o de veículos de célula a combustível. Entretanto, conforme discutido anteriormente nesta Dissertação, estes veículos possuem limitações que segregam sua utilização a nichos específicos de mercado tais como carros de golf e pequenos scooters. Dentre as principais limitações deste tipo de veículo pode-se citar o fraco desempenho com relação a aceleração e velocidade máxima, baixa autonomia e necessidade de recarga.

A Figura 5.25 e a Tabela 5.12 resumem os resultados obtidos para o consumo dos diferentes tipos de VEs simulados neste capítulo e a média de consumo de um veículo convencional de MCI para cada um dos três ciclos de condução.

Fica evidente a dependência do consumo do veículo com relação ao ciclo de condução realizado. A condução do veículo em estrada (ciclo HFET) implica em consumo menor do que a condução em cidade (FUDES) e/ou a condução agressiva (SFTP). Em todos os casos, entretanto, o consumo do veículo híbrido diminuiu com relação ao não híbrido. Ao considerarmos a estratégia com modos de recarga em comparação com o VECaC não híbrido, a diminuição do consumo foi de 54,93% para o ciclo FUDES, 5,54% para o

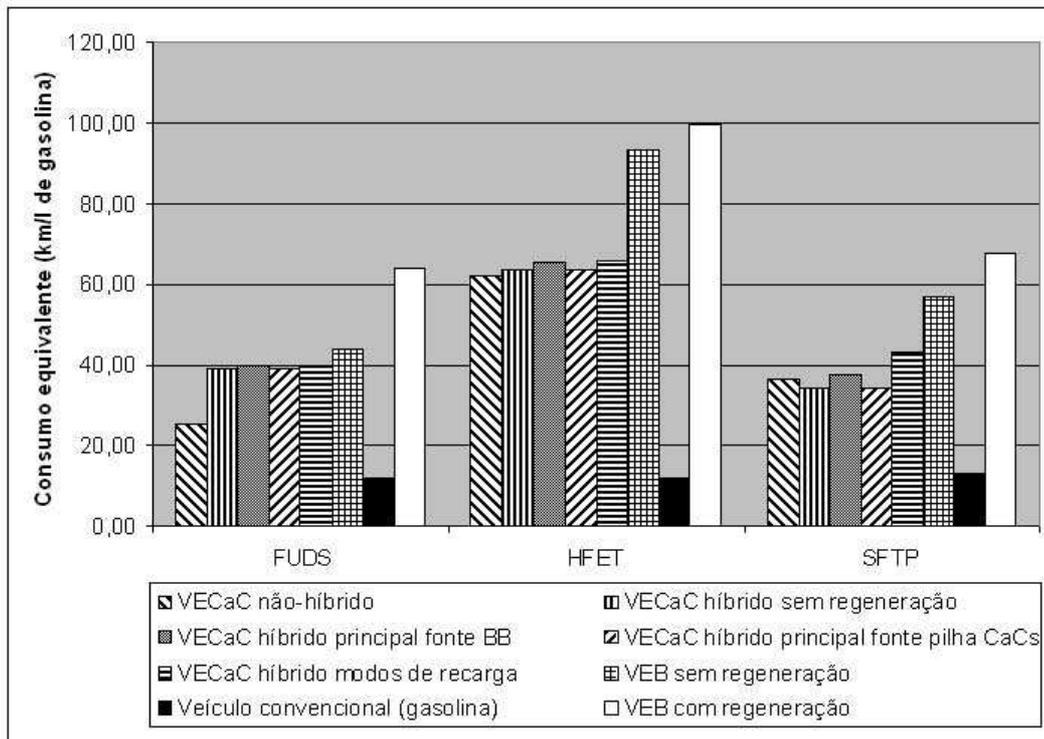


FIGURA 5.25: Consumo equivalente em km/l de gasolina para cada ciclo de condução.

TABELA 5.12: Consumo equivalente em km/l de gasolina para cada ciclo de condução.

Veículo	FUDS	HFET	SFTP
Palio 1.0 Convencional	12,00	12,00	12,00
VECaC não híbrido	25,45	62,49	36,65
VECaC híbrido sem regeneração	39,07	63,35	34,02
VECaC híbrido com bateria como principal fonte	39,92	65,31	37,79
VECaC híbrido com pilha de CaCs como principal fonte	39,07	63,35	34,02
VECaC com modos de recarga	39,43	65,95	43,23
VEB sem regeneração	44,00	93,41	57,05
VEB com regeneração	63,73	99,44	67,80

HFET e 17,95% para o SFTP.

Além do menor custo associado a energia da bateria, a inserção da capacidade de regeneração provou ser uma forma de reduzir o consumo do VECaC. Observando a redução de consumo, pode-se verificar que a melhoria é mais acentuada no VECaC híbrido com relação ao não-híbrido para os ciclos FUDS e SFTP, nos quais existe maior quantidade de energia de regeneração.

Entre os VECaCs híbridos, a estratégia que implementa dois modos de recarga foi

a que demonstrou melhor desempenho (menor consumo), com destaque para o ciclo SFTP.

## 5.6 Conclusão

O objetivo deste capítulo foi comparar estratégias baseadas em regras para o gerenciamento de potência em VECaCs. Para tal, foi desenvolvido um modelo no qual é possível simular o comportamento de tais veículos de acordo com diferentes solicitações de potência por parte do motorista. O modelo é composto por blocos que representam a dinâmica do veículo, a pilha de células a combustível, o banco de baterias e o motor elétrico de indução, além de blocos onde são implementadas as funções de controle e o comportamento do motorista.

De maneira a apresentar o fluxo de potência entre as diferentes fontes do veículo e comparar o desempenho das estratégias de controle empregadas, foram realizadas simulações de VECaC não híbrido, VECaC híbrido sem regeneração, VECaC híbrido regenerativo, VEB sem regeneração e VEB com regeneração. Além disso, três estratégias de controle diferenciadas foram empregadas para o VECaC híbrido. Na primeira, o banco de baterias é utilizado como fonte principal de potência e a pilha de CaCs como fonte auxiliar. Na segunda o inverso acontece, e na terceira são implementados dois modos de operação distintos, a saber: recarga rápida e recarga normal.

Os resultados comprovam a melhoria no consumo de combustível dos VEs com relação a veículos convencionais de MCI e demonstram o melhor desempenho (menor consumo) dos VECaCs híbridos se comparados aos outros tipos (a exceção dos VEBs) quando uma estratégia de controle adequada é implementada. Este fato não se aplica aos VEBs. Entretanto, estes possuem desvantagens que os tornam menos atraentes do que os VECaCs, a saber: baixa autonomia, necessidade de tempo para recarga e alto volume ocupado pelo banco de baterias, além de aceleração e velocidade máxima aquém do objetivado para veículos leves para uso urbano e em estradas.

As simulações comprovam que o consumo de combustível de um VECaC pode ser diminuído da seguinte maneira:

1. Controle da operação da pilha de CaCs fora de regiões de baixa eficiência, o que implica em menor consumo de hidrogênio;

2. Controle do *SOC* entre limites pré-determinados e penalização do *SOC* com relação a diferença entre este e o valor ideal. Isso implica em um melhor aproveitamento de energia proveniente de frenagem (regeneração).

O algoritmo de controle proposto na seção 5.3.3.3 apresenta as características descritas acima e demonstra que, se bem empregados, esses conceitos podem implicar em reduções de consumo (equivalente, em km/l de gasolina) da ordem 27% com relação as outras estratégias avaliadas (resultado obtido para o ciclo SFTP, comparando-se os VECaC híbrido sem regeneração e híbrido com modos de recarga).

Por fim, cabe ressaltar que o modelo desenvolvido pode ser facilmente adaptado a diferentes tipos de veículos e pode servir de base para a realização de estudos posteriores em veículos híbridos, tais como a inserção da dinâmica de outros sistemas do veículo (sistemas de potência, instrumentos auxiliares, etc), a avaliação do desempenho quando da utilização de outras fontes de potência e o desenvolvimento de novas estratégias de controle.

# Capítulo 6

## Gerenciamento de potência pelo método ECMS

No capítulo anterior foram apresentadas estratégias de controle para veículos híbridos de célula a combustível baseadas em regras. Foi demonstrado que este tipo de abordagem possui bom desempenho, se levarmos em consideração a simplicidade de sua implementação. Entretanto, ficou claro que as estratégias baseadas exclusivamente em controle do tipo liga/desliga, ainda que fundamentadas em evitar operação da pilha de CaCs em regiões de baixa eficiência, possuem desempenho inferior com relação a estratégias mais elaboradas. O algoritmo apresentado na Seção 5.3.3.3 é um bom exemplo disso.

Entretanto, conforme foi discutido no Capítulo 1 desta Dissertação, a busca pela minimização do consumo de combustível em VEHs faz com que a aplicação de algoritmos de otimização para o gerenciamento de potência seja o caminho natural. Estes algoritmos tendem a melhorar o desempenho do controlador, entretanto são mais complexos que os baseados em regras, e nem sempre podem ser implementados em tempo real.

Algoritmos fundamentados em programação dinâmica são um bom exemplo desse fato. Estes algoritmos são uma alternativa para a solução do problema de otimização global associado ao gerenciamento de potência em VEHs, entretanto não podem ser aplicados em sistemas de controle de tempo real, devido à necessidade de conhecimento prévio do ciclo de condução que será realizado (Lin et al. 2003, Schell et al. 2005, Lin

et al. 2004, Musardo & Staccia 2003). Por esse motivo, a avaliação de outras técnicas de controle que superem essa dificuldade torna-se de grande interesse.

Neste capítulo será apresentada uma técnica baseada em conceitos de otimização para o gerenciamento de potência em VEHs em tempo real, denominada ECMS (estratégia de minimização do consumo equivalente, do inglês *equivalent consumption minimization strategy*). Esta técnica já vêm sendo abordada por alguns autores na literatura e é apresentada em sua maioria para aplicação em veículos híbridos com motor de combustão interna. Neste capítulo será desenvolvida uma análise da técnica ECMS quando aplicada ao modelo de VECaC realizado anteriormente nesta Dissertação. O desempenho do algoritmo, obtido através de simulações, será comparado aos resultados alcançados no capítulo anterior.

## 6.1 Formulação do problema

A principal idéia que norteia a aplicação da técnica ECMS para o gerenciamento de potência em VEHs, é a redução de um problema de otimização global para um problema de otimização instantânea, através da introdução de uma função de custo dependente apenas das variáveis do sistema em cada instante de tempo (Musardo & Staccia 2003). A definição desta função de custo requer um fator de equivalência que possibilite a comparação da energia elétrica com a energia do combustível utilizado pelo veículo.

Conforme discutido anteriormente, o gerenciamento de potência em veículos híbridos consiste na determinação da quantidade de potência que deve ser solicitada a cada uma das fontes de energia de maneira a satisfazer a solicitação do motorista e as restrições existentes no sistema. Além disso, almeja-se que o controlador seja capaz de realizar esta tarefa de maneira a alcançar o menor consumo de combustível possível. Este é um objetivo global, uma vez que a quantidade de combustível a ser minimizada é integral ao longo do tempo (ciclo de condução), enquanto as ações de controle são locais (realizadas em cada instante de tempo).

Matematicamente, o problema pode ser formulado para um veículo de célula a combustível como segue:

$$\begin{aligned}
J &= \int_0^{t_f} \dot{m}_{H_2} dt \\
\{P_{CaC}^{otim}(t), P_{BAT}^{otim}(t)\} &= arg \min_{\{P_{CaC}(t), P_{BAT}(t)\}} J \quad t = 0 \dots t_f
\end{aligned} \tag{6.1}$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$\begin{aligned}
P_{motor}(t) &= P_{CaC}(t) + P_{BAT}(t) \\
SOC_{min} &\leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad \forall t \\
0 &\leq P_{CaC}(t) \leq P_{CaC,max} \\
P_{BAT,min} &\leq P_{BAT}(t) \leq P_{BAT,max}
\end{aligned} \tag{6.2}$$

Na qual  $J$  é a função de custo,  $\dot{m}_{H_2}$  é o consumo de hidrogênio,  $P_{CaC}$  e  $P_{BAT}$  são as potências requisitadas a pilha de CaCs e ao banco de baterias, respectivamente,  $P_{CaC}^{otim}$  e  $P_{BAT}^{otim}$  são os valores ótimos para  $P_{CaC}$  e  $P_{BAT}$ ,  $P_{motor}$  é a potência necessária ao motor elétrico para que a solicitação do motorista seja satisfeita ou a potência fornecida pelo ME durante frenagem regenerativa,  $SOC$  é o estado de carga do banco de baterias,  $SOC_{min}$  e  $SOC_{max}$  são os limites inferior e superior permitidos ao  $SOC$ ,  $P_{BAT,max}$ ,  $P_{BAT,min}$  são os valores máximo e mínimo permitidos para  $P_{BAT}$ , e  $P_{CaC,max}$  a máxima potência fornecida pela pilha de CaCs.

Este problema pode ser resolvido através da aplicação de programação dinâmica, entretanto para tal é necessário o conhecimento prévio do ciclo de condução (Lin et al. 2003, Schell et al. 2005, Lin et al. 2004, Musardo & Staccia 2003). Uma abordagem alternativa consiste em substituir o critério global por um critério local, reduzindo o problema a uma otimização instantânea. Este critério pode ser formulado como segue:

No instante  $t$ :

$$\begin{aligned}
J &= J(P_{CaC}(t), P_{BAT}(t)) \\
\{P_{CaC}^{otim}(t), P_{BAT}^{otim}(t)\} &= arg \min_{\{P_{CaC}(t), P_{BAT}(t)\}} J
\end{aligned} \tag{6.3}$$

Sujeito as restrições:

$$\begin{aligned}
P_{motor}(t) &= P_{CaC}(t) + P_{BAT}(t) \\
SOC_{min} &\leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad \forall t \\
0 &\leq P_{CaC}(t) \leq P_{CaC,max} \\
P_{BAT,min} &\leq P_{BAT}(t) \leq P_{BAT,max}
\end{aligned} \tag{6.4}$$

Devido à restrição de manutenção da carga da bateria (manutenção do  $SOC$  entre limites pré-estabelecidos), a função de custo deve levar em consideração, além do consumo de combustível (hidrogênio), as variações na quantidade de energia elétrica armazenada. Para tal, pode-se avaliar a função de custo em cada instante como sendo a soma do consumo de combustível ( $\dot{m}_{CaC}(\cdot)$ ) com um consumo equivalente relacionado a utilização da bateria, tal como segue:

$$J = \dot{m}_{CaC}(P_{CaC}(t)) + \varsigma(P_{BAT}(t)) \tag{6.5}$$

na qual  $\varsigma(P_{BAT}(t))$  representa o consumo de combustível equivalente a utilização da energia elétrica. Esta função é dependente de todas as condições de operação que levam a conversão da energia do combustível em energia elétrica e vice-versa, que pode ocorrer tanto no passado quanto no futuro. Por esse motivo, a função  $\varsigma(P_{BAT}(t))$  não pode ser avaliada exatamente.

Para que seja possível aplicar o critério local, é necessário que um fator de conversão entre a energia do combustível e a energia elétrica seja determinado. Existem algumas abordagens diferentes na literatura para a determinação deste fator. Estas abordagens podem ser encontradas em Paganelli et al. (2001), Sciarretta, Back & Guzzella (2004) e Musardo & Staccia (2003).

Nesta Dissertação um fator de conversão simplificado será utilizado, tal como o apresentado em Guezennec, Choi, Paganelli & Rizzoni (2003):

$$\varsigma(P_{BAT}(t)) = \frac{P_{BAT}}{\alpha_e PCI_{H_2}} \tag{6.6}$$

Na qual  $PCI_{H_2}$  é o poder calorífico inferior do hidrogênio e  $\alpha_e$  é o custo médio

da eletricidade (custo médio da conversão de energia do combustível em eletricidade e vice-versa).

O consumo de hidrogênio da pilha de CaCs em função da potência solicitada possui a forma apresentada na Figura 6.1. A figura foi obtida em simulação para uma pilha de CaCs de 200 células.

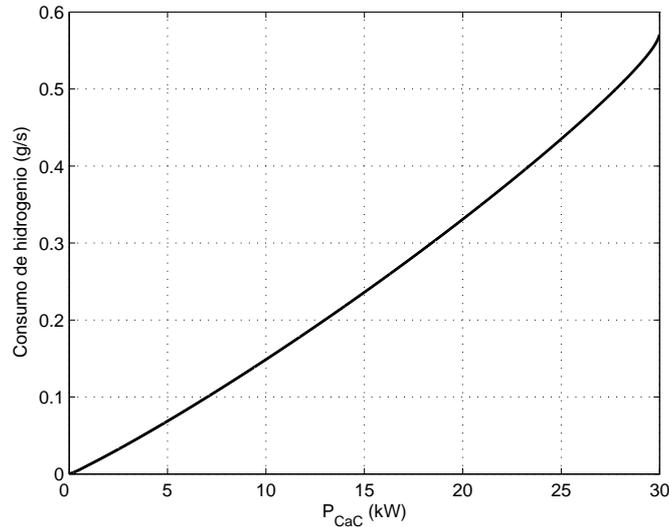


FIGURA 6.1: Consumo de hidrogênio (g/s) de uma célula a combustível de 200 células em função da potência solicitada (kW).

Portanto, o consumo de hidrogênio em função da potência solicitada a CaC pode ser facilmente modelado por uma função polinomial. Na realidade,  $\dot{m}_{CaC}(\cdot)$  possui comportamento semelhante a uma função linear de  $P_{CaC}$  no que diz respeito ao procedimento de minimização realizado em cada instante de tempo. Isso faz com que o problema de otimização seja simples e rápido de ser resolvido. A próxima seção discute esse fato.

## 6.2 Procedimento de otimização

Seja a função de custo:

$$J(x_1, x_2) = f(x_1) + f(x_2) = \alpha x_1 + \beta x_2 \quad \alpha, \beta \in \mathbb{R} \quad (6.7)$$

O objetivo do procedimento de otimização é encontrar o par  $[x_1, x_2]$  que minimiza

$J(x_1, x_2)$ . Seja a restrição  $r(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = K$ . As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam gráficos de  $J(x)$  e  $r(x)$  para diferentes valores de  $\alpha$  e  $\beta$ .

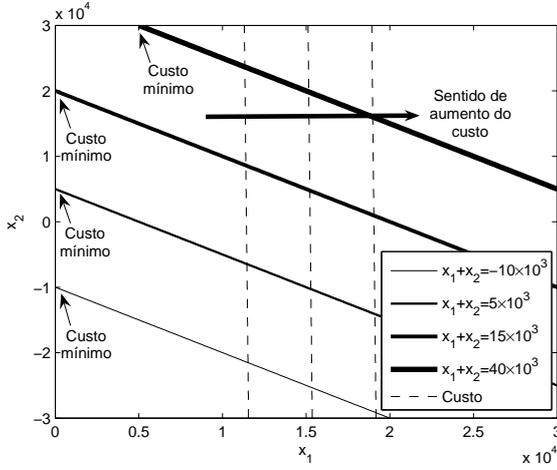


FIGURA 6.2: Funções de custo para diferentes valores de  $\alpha > \beta$  e restrições do tipo  $x_1 + x_2 = K$ .

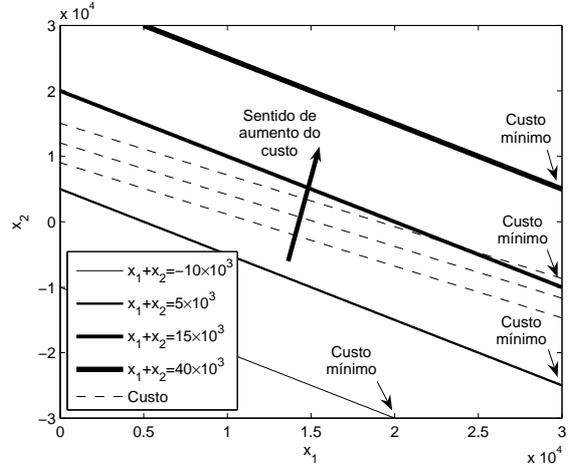


FIGURA 6.3: Funções de custo para diferentes valores de  $\alpha < \beta$  e restrições do tipo  $x_1 + x_2 = K$ .

O custo mínimo alcançável para um determinado valor de  $r(x)$  será o ponto onde a reta tangencia  $J(x_1, x_2)$ . Portanto, para  $\alpha > \beta$ , o custo mínimo será alcançado ao utilizar o maior valor possível para  $x_2$  e, para  $\alpha < \beta$ , o custo mínimo implica na utilização do maior valor possível para  $x_1$ . O par  $[x_1, x_2]$  que fornece o menor custo para as restrições mostradas nas Figuras 6.2 e 6.3 estão indicados nas mesmas.

O gerenciamento de potência em VECaCs através do método ECMS implica em um procedimento de otimização tal como descrito acima, pois o consumo de hidrogênio por parte da pilha de CaCs é aproximadamente linear, o que implica em uma função de custo também linear.

Dessa maneira, seja  $x_1 = P_{CaC}$ ,  $x_2 = P_{BAT}$  e  $K$  a potência solicitada pelo motorista, a implementação da estratégia ECMS implica em dois modos de operação distintos, a saber: se  $\alpha > \beta$ , a pilha de CaCs é utilizada como fonte principal de potência e, se  $\alpha < \beta$ , a bateria é utilizada como principal fonte.

No primeiro caso, a pilha de CaCs irá fornecer a máxima potência possível. Caso a potência solicitada seja maior do que  $P_{CaC,max}$ , a bateria fornecerá a diferença e, caso a potência solicitada seja menor do que  $P_{CaC,max}$ , a bateria será carregada através da pilha de CaCs.

Quando  $\alpha < \beta$ , a bateria funciona como principal fonte de potência, satisfazendo a solicitação do motorista por completo até o limite de sua capacidade ( $P_{BAT,max}$ ). Nos casos em que a potência solicitada é maior do que este limite, a Pilha de CaCs fornece a diferença.

Cabe ressaltar que uma restrição do tipo  $r(x) = x_1 + x_2 = K$ , onde  $K$  é negativo significa a operação do motor de indução como gerador, disponibilizando potência gerada através de frenagem regenerativa. Neste caso esta potência será absorvida pelo banco de baterias, desde que o estado de carga do mesmo esteja dentro dos limites especificados.

### 6.3 Função de penalização

A função de custo apresentada até o momento não garante o controle do  $SOC$  do banco de baterias. Para que isso seja possível, a função de custo é complementada com uma função de penalização,  $f(SOC)$ , tal como o exposto abaixo (Guezennec et al. 2003, Musardo & Staccia 2003):

$$J(P_{CaC}(t), P_{BAT}(t), SOC) = \dot{m}_{FC}(P_{CaC}(t)) + f(SOC) \times \varsigma(P_{BAT}(t)) \quad (6.8)$$

A forma da função de penalização pode ser obtida através da normalização do estado de carga do banco de baterias, tal como segue (Musardo & Staccia 2003):

$$x_{SOC}(t) = \frac{SOC(t) - \frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2}}{\frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{2}} \quad \forall t \quad (6.9)$$

Dessa maneira, o controle do  $SOC$  do banco de baterias entre os limites  $SOC_{max}$  e  $SOC_{min}$  é equivalente ao controle de  $x_{SOC}(t)$  entre os valores 1 e -1. O valor ideal para o estado de carga normalizado é zero.

Com esta notação, se  $x_{SOC}(t) > 0$ , o custo equivalente deve ser ponderado de maneira que o banco de baterias seja utilizado preferencialmente com relação a pilha de células a combustível. Caso  $x_{SOC}(t) < 0$ , a pilha de CaCs deve ser utilizada preferencialmente, e toda energia de regeneração possível deve ser armazenada no banco de baterias. A maneira mais simples de obter este comportamento é através da utilização

da seguinte função de penalização (Musardo & Staccia 2003):

$$f(SOC) = 1 - x_{SOC}(t) = \frac{\frac{SOC_{max} + SOC_{min}}{2} - SOC(t)}{\frac{SOC_{max} - SOC_{min}}{2}} \quad (6.10)$$

Dessa maneira, e de acordo com o que foi exposto na Seção 6.2, o *SOC* do banco de baterias será penalizado com relação a desvios do valor ideal, mesmo que estes sejam pequenos. Quando a função de penalização assumir valor maior do que 1, a pilha de CaCs será utilizada preferencialmente e o banco de baterias irá funcionar como fonte de potência auxiliar, podendo ser carregado caso haja potência da pilha de CaCs disponível ou através de regeneração. Quando a função de penalização assumir valor menor do que 1 a bateria será utilizada como fonte principal de potência e a pilha de CaCs assumirá o papel de fonte auxiliar.

Uma forma de permitir que o *SOC* possa variar em um intervalo maior ao redor do valor ideal, é introduzir uma função de penalização não linear tal como apresentado abaixo (Musardo & Staccia 2003):

$$f(SOC) = 1 - x_{SOC}^n(t) \quad n = 2k + 1, k \in \mathbb{N} \quad (6.11)$$

Com essa forma, a função de penalização introduz uma realimentação proporcional do *SOC* do banco de baterias de maneira que o processo de minimização do custo equivalente considere o desvio do *SOC* atual com relação ao valor desejado. Quanto maior o grau do termo polinomial, maior será a liberdade de variação do *SOC* do banco de baterias. A Figura 6.4 mostra a função de penalização para diferentes valores de  $n$ .

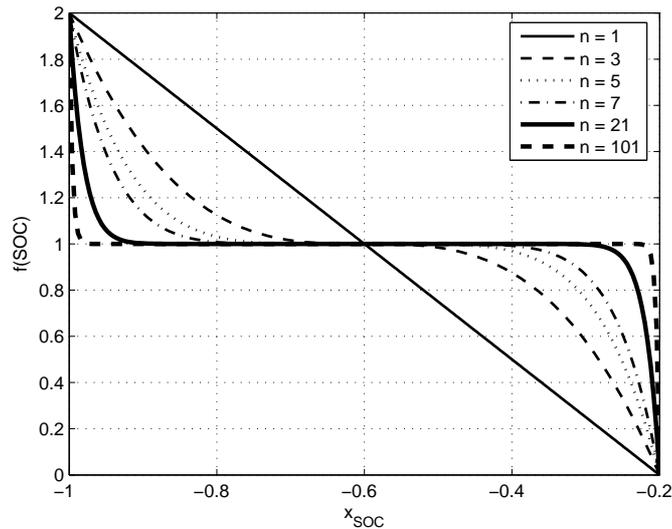


FIGURA 6.4: Função de penalização para diferentes valores do termo polinomial.

Para valores grandes de  $n$  a função de penalização assume valor aproximadamente igual a 1 para a maior parte do domínio, o que significa que desvios do  $SOC$  do banco de baterias com relação ao nível ideal são penalizados por valores desprezíveis neste intervalo. Por consequência, o  $SOC$  poderá distanciar-se mais do valor ideal e as fontes de energia serão ligadas e desligadas um menor número de vezes.

A Figura 6.5 apresenta a evolução do  $SOC$  do banco de baterias para simulações com emprego de diferentes valores de  $n$ . As simulações foram realizadas utilizando os primeiros 100 segundos do ciclo de condução FUDS. O estado de carga inicial do banco de baterias foi fixado em 53%, por conveniência, em ambas simulações, sendo  $SOC_{ideal} = 55\%$  o ponto médio do intervalo permitido. É verificado que quando  $f(SOC)$  não linear é empregada, o  $SOC$  do banco de baterias varia mais ao redor do valor ideal do que na simulação com função de penalização linear.

Entretanto, a utilização de realimentação proporcional não garante que o erro em regime convergirá para zero. Tal como em controladores PID, uma ação de controle integral pode ser adicionada a função de penalização de maneira a fazer com que desvios prolongados do  $SOC$  com relação ao valor ideal sejam mais penalizados do que desvios breves (Musardo & Staccia 2003). Um peso pode ser adicionado de maneira a ponderar a influência do termo integral com relação ao proporcional. A função de penalização

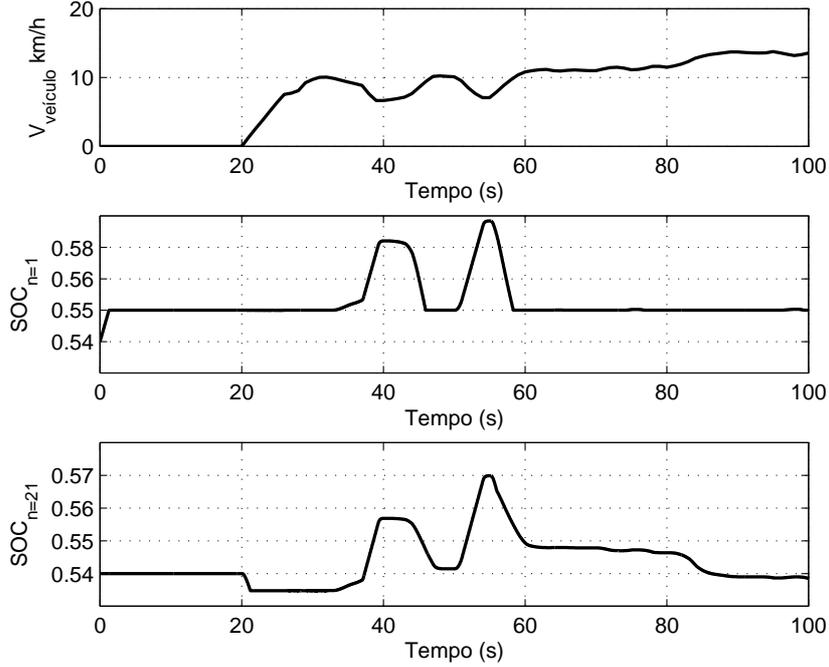


FIGURA 6.5: Velocidade do veículo e  $SOC$  do banco de baterias para simulações com  $n=1$  e  $n=21$  em  $f(SOC) = 1 - x_{SOC}^n(t)$ .

pode, portanto, ser reescrita tal como apresentado na Equação (6.12).

$$f(SOC) = 1 - x_{SOC}^n(t) - \mu \int_0^t x_{SOC}(\tau) d\tau \quad n = 2k + 1, k \in \mathbb{N} \quad (6.12)$$

Na Equação (6.12),  $\mu$  é o peso imposto ao termo integral.

## 6.4 Simulação e resultados obtidos

A implementação do algoritmo ECMS no modelo do veículo realizado em *Simulink* é feita através da inclusão de um bloco que executa uma rotina externa em cada instante de tempo ao longo da simulação.

Embora o *Matlab* possua rotinas que implementam algoritmos de otimização, como por exemplo a rotina *fmincon*, que realiza minimização de uma função de custo sujeito à restrições lineares e não-lineares, o cálculo do custo mínimo de combustível equivalente realizado em cada instante de tempo no método ECMS pode ser implementado através de condicionais do tipo *se/então* devido a sua simplicidade. Isso implica em menor tempo gasto com a busca pelo mínimo da função de custo em cada instante.

Dessa maneira, foi adicionado ao modelo do VECaC realizado em *Simulink* um bloco que realiza o procedimento de minimização em cada instante de tempo de acordo com a função de custo de momento, atualizada através dos valores obtidos em *Simulink*.

A Figura 6.6 apresenta a distribuição de potência obtida em simulação para que o veículo realize o ciclo de condução FUDS. O estado inicial do banco de baterias é 50% ( $SOC_{min}$ ). A simulação foi realizada para um veículo com  $GH=0,5$  cujos parâmetros são idênticos aos utilizados no Capítulo 5. Foram realizadas 03 (três) simulações para

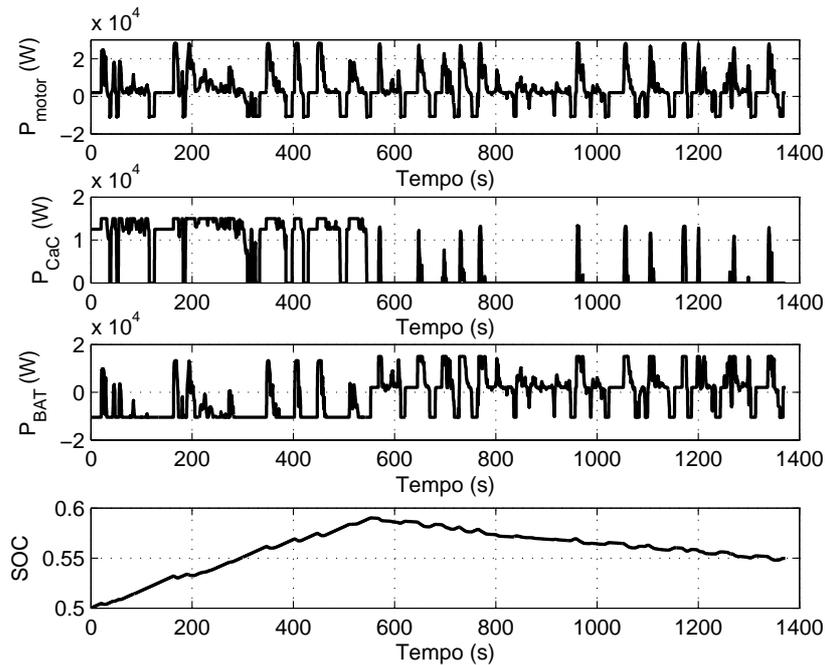


FIGURA 6.6: Potência necessária ao motor elétrico, potência requisitada ao banco de baterias, potência requisitada a pilha de CaCs e  $SOC$  do banco de baterias para realização do ciclo de condução FUDS.

os ciclos de condução normalizados FUDS, HFET e SFTP, da mesma maneira que no Capítulo 5. O consumo equivalente, em km/l de gasolina, obtido através da Equação (5.10) foi calculado de maneira a comparar o desempenho do algoritmo desenvolvido neste capítulo com a lógica apresentada na Seção 5.3.3.3, aqui denominada *Lógica 01* por conveniência. A Tabela 6.1 e a Figura 6.7 apresentam os resultados obtidos.

Houve redução do consumo de combustível para os três ciclos de condução considerados, o que demonstra a utilidade do algoritmo proposto para aplicação em diferentes condições de condução.

TABELA 6.1: Consumo equivalente em km/l de gasolina obtidos em simulação para a lógica de controle da Seção 5.3.3.3 e para o emprego da técnica ECMS e ganho associado.

Ciclo	Consumo Lógica 1	Consumo ECMS	Ganho
FUDS	39,43	44,15	11,97%
HFET	65,95	81,26	23,20%
SFTP	43,23	45,78	05,88%

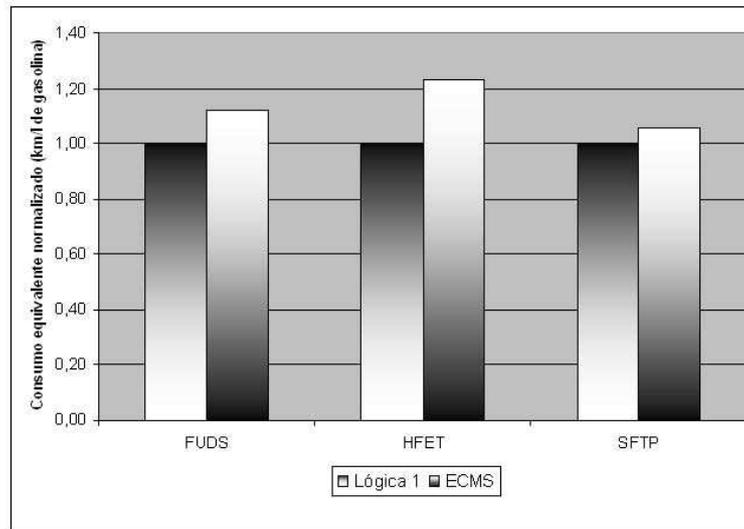


FIGURA 6.7: Consumo equivalente em km/l de gasolina obtidos em simulação para a lógica de controle da Seção 5.3.3.3 e para o emprego da técnica ECMS e ganho associado.

## 6.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia para o gerenciamento de potência em VEHS baseada em conceitos de otimização. A técnica, denominada ECMS, é fundamentada na substituição do critério global inerente à minimização do consumo de combustível em VEHS por um critério local que depende apenas das variáveis do sistema em cada instante de tempo. Portanto, pode ser implementada em sistemas de controle de tempo real uma vez que não necessita do conhecimento prévio do ciclo de condução a ser realizado.

A estratégia consiste em minimizar uma função de custo que representa o consumo equivalente de combustível. Para tal, a utilização de energia elétrica do banco de baterias é convertida em um consumo equivalente de hidrogênio que é somado ao

consumo da pilha de CaCs. Em cada instante de tempo, um procedimento simples de otimização é realizado. O resultado é a potência que deve ser solicitada a cada uma das fontes de energia de maneira a alcançar o menor consumo de combustível possível.

A estratégia ECMS foi aplicada ao modelo de VECaC desenvolvido anteriormente neste trabalho e os resultados obtidos comprovam que sua utilização implica em um menor consumo de combustível. Uma diminuição de até 23,2% foi alcançada com relação a estratégia da Seção 5.3.3.3, que obteve o melhor desempenho dentre as estratégias apresentadas no Capítulo 5 e já emprega o conceito de penalização do *SOC* do banco de baterias.

O emprego da estratégia ECMS ao gerenciamento de potência em VECaCs tal como o desenvolvidos nesta Dissertação é extremamente simples e, na realidade, a estratégia torna-se baseada em regras tais como as apresentadas no Capítulo 5. O desenvolvimento de um modelo mais detalhado de uma pilha de CaCs levando em consideração os sistemas de alimentação de combustível, controladores de umidade etc, tende a aumentar a complexidade do sistema e tornar o emprego da estratégia ECMS mais trabalhoso.

# Capítulo 7

## Considerações finais

Neste trabalho foi realizada a modelagem de um veículo híbrido de célula a combustível e a avaliação de diferentes estratégias de gerenciamento de potência para o mesmo. Um modelo computacional para simulação de VECaCs foi desenvolvido, o qual permite simular o comportamento do veículo quando submetido a diferentes solicitações de potência.

O modelo é composto por um banco de baterias, uma pilha de células a combustível e um motor elétrico, além de um controlador PI que representa o comportamento do motorista, um controlador por modos deslizantes para o motor elétrico e um controlador que realiza o gerenciamento de potência do veículo.

O modelo do banco de baterias é fundamentado no conceito de capacidade de Peukert e possui como única variável de estado o *SOC*, cuja variação depende da potência solicitada a bateria.

O modelo da pilha de células a combustível leva em consideração as perdas devido a ativação do anodo e do catodo, a perda ôhmica e a perda devido ao transporte de massa, e determina o consumo de hidrogênio em função da solicitação de potência feita a pilha. Entretanto, algumas variáveis são assumidas controladas, a saber: temperatura da pilha de CaCs, suprimento de combustível e umidade da membrana polimérica.

O motor elétrico é simulado através de cinco equações de estado que representam a dinâmica das tensões no estator, o fluxo magnético e a velocidade de rotação no rotor do motor. O controle é realizado através de  $u_\alpha$  e  $u_\beta$ , que são as componentes de tensão no estator em coordenadas  $(\alpha, \beta)$ .

De maneira a avaliar o fluxo de potência entre as fontes de energia do veículo e analisar o consumo de combustível, foram realizadas simulações para veículos de célula a combustível não híbrido, híbrido sem regeneração e híbrido regenerativo, além de veículos a bateria. Três ciclos de condução normatizados foram utilizados, a saber: FUDS, HFET e SFTP.

Diversas estratégias para o gerenciamento de potência do veículo foram realizadas. Para os VECaCs híbridos, o *SOC* do banco de baterias é controlado entre valores determinados de maneira a estender a vida útil do banco de baterias e garantir a mantabilidade de carga ao longo do tempo.

Por fim, um algoritmo para o gerenciamento de potência foi desenvolvido baseado no conceito de consumo equivalente de combustível. O método, denominado ECMS, implica em minimizar a soma do consumo de combustível da pilha de CaCs e do consumo equivalente associado a utilização da bateria em cada instante de tempo.

Os resultados obtidos comprovam a validade do modelo desenvolvido no estudo de veículos elétricos híbridos de célula a combustível, além do modelo ser facilmente adaptado para avaliação de outras configurações.

Dentre os principais resultados, cabe ressaltar:

1. O consumo de combustível de um VECaC pode ser minimizado através do controle da operação da pilha de CaCs fora de regiões de baixa eficiência;
2. A implementação da técnica ECMS para o modelo de VECaC estudado pode ser facilmente realizada através de condicionais do tipo *se/então*;
3. A técnica ECMS diminuiu o consumo equivalente, em km/l de gasolina, do VECaC em até 23,2% com relação as outras estratégias apresentadas.

## 7.1 Trabalhos futuros

Como primeiro trabalho do Laboratório de Controle da COPPE, considera-se que esta Dissertação alcançou o objetivo de levantar os principais conceitos relacionados a veículos elétricos, híbridos e de célula a combustível, bem como de discussão sobre as principais linhas de pesquisa relacionadas ao gerenciamento de potência em VEHs.

Os conceitos aqui apresentados e o modelo desenvolvido podem servir de base para diversos trabalhos futuros, dentre os quais pode-se ressaltar:

1. Aprimoramento do modelo desenvolvido através da inclusão da modelagem detalhada de outros subsistemas do veículo, tais como conversores DC/DC e sistemas de engrenagens;
2. Avaliação de outras técnicas de controle para o gerenciamento de potência em VEHs, tais como lógica fuzzy e redes neurais artificiais, controle  $H_\infty$  e teoria dos jogos, tal como alguns artigos mais recentes na literatura (Gielniak & Shen 2004, Pisu & Rizzoni 2004, Chen & Salman 2005), e sua aplicabilidade em VECaCs;
3. Realização de estudos experimentais através da construção de protótipo de tamanho reduzido.
4. Ampliação do modelo da pilha de células a combustível aqui desenvolvido e realização de estudos de controle para o suprimento de gases, umidificação da membrana e temperatura de operação.
5. Avaliação da implementação de outros tipos de bateria e banco de supercapacitores como fontes de energia do VECaC.

Além disso, seria interessante comparar os resultados obtidos neste trabalho com o consumo de energia e o custo associado à utilização de gás natural e etanol como fontes de energia em veículos leves, uma vez que estes combustíveis estão sendo cada vez mais utilizados no mercado brasileiro.

# Apêndice A

## Cadeias de Markov

Com o objetivo de ampliar o entendimento do método de gerenciamento de potência de veículos híbridos utilizando programação dinâmica estocástica desenvolvido por Lin et al. (2004) e citado no Capítulo 1 desta Dissertação, serão expostos abaixo os principais conceitos introdutórios ao estudo de *cadeias de Markov*.

*Cadeias de Markov* representam uma classe especial de sistemas dinâmicos que envolve probabilidade. Estes modelos podem ser considerados uma subclasse dos sistemas lineares positivos.

Uma *cadeia de Markov* de tempo discreto é um processo estocástico de tempo discreto que apresenta a propriedade de Markov. A definição desta propriedade, também chamada de memória markoviana, é que os estados anteriores são irrelevantes para a predição dos estados seguintes, desde que o estado atual seja conhecido.

### A.1 Cadeias de Markov finitas

Uma *cadeia de Markov* finita é um processo discreto que em qualquer instante pode estar em algum estado dentro de um conjunto finito. Se a cadeia tem  $n$  estados possíveis, é dita cadeia de ordem  $n$ . Em cada instante a cadeia pode mudar de seu estado atual para outro, sendo esta mudança determinada probabilisticamente de acordo com um conjunto de *probabilidades de transição de estados*. Portanto, o processo se move de maneira randômica entre um número finito de estados.

**Definição 2** *Um processo em cadeia de Markov de ordem  $n$  é determinado por um*

conjunto de  $n$  estados  $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  e por um conjunto de probabilidades de transição de estados  $p_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . O processo pode estar em apenas um estado em cada instante de tempo. Se no instante  $k$  o processo encontra-se no estado  $S_i$ , então no instante  $k+1$  estará no estado  $S_j$  com probabilidade  $p_{ij}$ . Um estado inicial é especificado.

Para facilitar o entendimento, um exemplo é apresentado a seguir (Luenberger 1979).

**Exemplo A.1** *O clima em uma determinada cidade pode ser caracterizado como ensolarado, nublado ou chuvoso. Caso o clima em um determinado dia esteja ensolarado, então Sol e chuva são igualmente prováveis para o dia seguinte. Caso esteja nublado, então existe 50% de chance de que o dia seguinte seja ensolarado, 25% de chance de que se mantenha nublado e 25% de chance de que seja chuvoso. Caso esteja chovendo, certamente não haverá Sol no dia seguinte, entretanto a probabilidade de haver chuva é a mesma de o clima se manter nublado.*

*Denotando as três condições climáticas como S, N e C, respectivamente, este modelo pode ser representado pela Tabela A.1.*

TABELA A.1: Probabilidades de mudança da condição climática de um dia para outro.

	S	N	C
S	0.50	0.50	0
N	0.50	0.25	0.25
C	0	0.25	0.50

*A coluna da esquerda corresponde a condição climática do dia corrente, e o valor em cada uma das outras colunas corresponde a probabilidade do clima ser o indicado na primeira linha no dia seguinte. O processo tem início com uma determinada condição climática e muda a cada dia para uma outra condição. Não existe uma maneira de prever exatamente qual a transição que irá ocorrer.*

*Outra maneira de representar o modelo descrito neste exemplo é através do diagrama apresentado na Figura A.1, no qual os nós correspondem a estados e as trajetórias diretas entre os estados correspondem as transições possíveis. A probabilidade da transição ocorrer é apresentada pelos números associados a cada trajetória.*

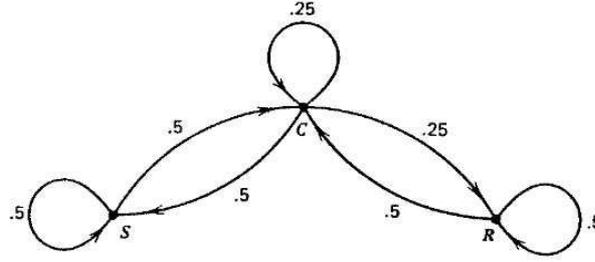


FIGURA A.1: Diagrama representativo do modelo de mudança climática.

## A.2 Matrizes estocásticas e vetores de probabilidade

As probabilidades de transição de estados associadas a uma *cadeia de Markov* são mais convenientemente abordadas como elementos de uma matriz  $P^{n \times n}$ , tal como apresentado na Equação (A.1).

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Todos os elementos de uma matriz  $P$  associada a uma *cadeia de Markov* são não-negativos. Além disso, a soma dos elementos de qualquer linha deve ser igual a 1, pois a probabilidade de o processo migrar para qualquer um dos estado possíveis no próximo instante de tempo é de 100%. Uma matriz  $P$  quadrada que possui estas características é denominada *matriz estocástica*.

Um vetor é dito *vetor de probabilidade* se todos os seus elementos são não-negativos e sua soma é igual a 1. Uma relação fundamental entre *matrizes estocásticas* e *vetores de probabilidade* é que se  $x^T$  é um *vetor de probabilidade* e  $P$  é uma matriz estocástica, então o vetor linha  $x^T P$  é também um *vetor de probabilidade* (Luenberger 1979).

### A.3 Processo com transições sucessivas

Se uma *cadeia de Markov* de ordem  $n$  com matriz de transição  $P$  é iniciada em um estado  $S_i$ , então após um instante de tempo estará no estado  $S_j$  com probabilidade  $p_{ij}$ . Este fato pode ser caracterizado através da construção do vetor linha  $r^T$ , no qual cada elemento representa a probabilidade de transição para cada um dos estados possíveis em um instante de tempo determinado, tal como exposto na Equação (A.2).

$$r^T = \begin{bmatrix} p_{i1} & p_{i2} & \dots & p_{in} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$r^T$  é um *vetor de probabilidade*.

Suponha que o processo seja analisado após dois instantes de tempo. Iniciando em um estado inicial  $S_i$ , o processo estará em um estado  $S_j$  qualquer após dois instantes de tempo. A transição de  $S_i$  para  $S_j$  é obtida por duas aplicações da matriz de transição de estados. Seja  $p_{ij}^{(2)}$  a probabilidade de o processo se mover do estado  $S_i$  para o estado  $S_j$  em dois instantes de tempo. Caso fosse de conhecimento que o processo estaria no estado  $S_k$  após um instante de tempo, então:

$$p_{ij}^{(2)} = p_{kj} \quad (\text{A.3})$$

Entretanto, a probabilidade de o processo estar no estado  $S_k$  após um instante de tempo é  $p_{ik}$ . Somando sobre todos os possíveis estados após um instante de tempo obtém-se:

$$p_{ij}^{(2)} = \sum_{k=1}^n p_{ik} p_{kj} = [P^2]_{ij} \quad (\text{A.4})$$

Portanto, a probabilidade  $p_{ij}^{(2)}$  é igual ao  $i$ -ésimo elemento da matriz  $P^2$ . Logo, a matriz de transição de estados para dois instantes de tempo é  $P^2$ . De maneira similar, as probabilidades de transição de estados para  $m$  instantes de tempo são definidas pelos elementos da matriz  $P^m$ .

Dessa maneira, pode-se associar uma *cadeia de Markov* a um sistema linear. Seja  $x(k)^T$  um vetor linha  $n$ -dimensional cuja componente  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  corresponde a probabilidade de o estado no instante  $k$  ser igual a  $S_j$ . Se o processo é iniciado no estado  $S_i$ , então  $x(0)^T$  é o vetor unitário com o valor 1 na  $i$ -ésima posição. *Vetores de*

*probabilidade* sucessivos são gerados através da Equação (A.5).

$$x(k+1)^T = x(k)^T P \quad (\text{A.5})$$

A Equação A.5 representa um sistema linear invariante no tempo expresso em termos de vetores linha ao invés de vetores coluna. Esta é a forma mais usual de representação quando se trabalha com *cadeias de Markov* (Luenberger 1979).

Cabe ressaltar que o vetor  $x(k)^T$  não é realmente o estado do processo de Markov. Em cada instante de tempo, o estado é um dos  $n$  estados distintos  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . O vetor  $x(k)^T$  fornece as probabilidades de que o processo de Markov irá assumir determinados valores. Portanto, a seqüência de  $x(k)^T$  não é uma seqüência de estados reais, mas apenas a projeção do conhecimento probabilístico do sistema.

# Apêndice B

## Principais equações do modelo realizado em *Simulink*

Neste Apêndice são resumidas as principais equações do modelo do veículo elétrico híbrido de célula a combustível realizado nesta Dissertação.

### B.1 Banco de baterias

Estado de carga (SOC):

$$SOC = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{I_{bat}(t)}{C} dt \quad (B.1)$$

Voltagem de circuito aberto:

$$E = n \times [2 + 0.15(SOC)] \quad (B.2)$$

Resistência interna:

$$R_{int} = n \times \frac{0.022}{I_{10}} \quad (B.3)$$

Voltagem de operação:

$$V = E - R_{int}I \quad (B.4)$$

Nas quais:

$I_{bat}$  é a corrente elétrica que flui pelos terminais da bateria (A);

$C$  é a capacidade máxima da bateria (Ah);

$n$  é o número de células da bateria;

$I_{10}$  é a corrente elétrica que descarregaria a bateria por completo no decorrer de 10 horas caso fosse aplicada de maneira constante ao longo do tempo

(A).

## B.2 Pilha de CaCs

Voltagem de circuito aberto (potencial termodinâmico) de uma CaC:

$$E_{nerst} = \frac{\Delta G}{2 \times F} + \frac{\Delta S}{2 \times F} \times (T - T_{ref}) + \frac{R \times T}{2 \times F} \times [\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \times \ln(P_{O_2})] \quad (B.5)$$

Perda devido a ativação do anodo e do catodo:

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln C_{O_2} + \xi_4 T \ln i_{FC}] \quad (B.6)$$

Concentração de oxigênio na interface catalítica do catodo:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \times 10^6 \times e^{\frac{-498}{T}}} \quad (B.7)$$

Concentração de hidrogênio na interface catalítica do anodo:

$$C_{H_2} = \frac{P_{H_2}}{1,09 \times 10^6 \times e^{\frac{77}{T}}} \quad (B.8)$$

Perda ôhmica:

$$V_{ohmic} = i_{FC} \times (R_M + R_C) \quad (B.9)$$

Resistência equivalente da membrana:

$$R_M = \frac{\rho_M \times L}{A_{fc}} \quad (B.10)$$

Resistividade da membrana:

$$\rho_M = \frac{181.6[1 + 0.03(\frac{i_{FC}}{A_{FC}}) + 0.062(\frac{T}{303})^2(\frac{i_{FC}}{A_{FC}})^{2.5}]}{[\psi - 0.634 - 3(\frac{i_{FC}}{A_{FC}})] \exp(4.18[\frac{T-303}{T}])} \quad (B.11)$$

Perda por transporte de massa:

$$V_{con} = -B \times \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (\text{B.12})$$

Voltagem de saída de uma célula:

$$V_{FC} = E_{nerst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (\text{B.13})$$

Dinâmica da célula:

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{i_{FC}}{C} - \frac{V_d}{\tau} \quad (\text{B.14})$$

Tensão e potência da pilha de CaCs.

$$V_{Pilha} = n \times V_{FC} \quad (\text{B.15})$$

$$P_{Pilha} = n \times V_{FC} \times i_{FC} \quad (\text{B.16})$$

Consumo de hidrogênio, oxigênio e quantidade de água produzida por uma célula (para encontrar o consumo da pilha basta multiplicar pelo número de células que a constituem).

$$\frac{dm_{H_2}}{dt} = M_{H_2} \times \frac{i_{FC}}{2F} = 1.05 \times 10^{-8} \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (\text{B.17})$$

$$\frac{dm_{ar}}{dt} = 3.57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (\text{B.18})$$

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{P_{CaC}}{V_{FC}} \quad (\text{B.19})$$

Eficiência da CaC:

$$\eta_{FC} = \mu_f \times \frac{V_{FC}}{1.48} \times 100\% \quad (\text{B.20})$$

Nas quais:

$\Delta G$  = mudança na energia livre de Gibbs (J/mol);

$F$  = constante de Faraday (96.487 C);

$\Delta S$  = variação de entropia (J/mol);

$R$  = constante universal dos gases (8.314 J/K×mol);

$P_{O_2}$  = pressão parcial de Oxigênio (atm);

$P_{H_2}$  = pressão parcial de Hidrogênio (atm);  
 $T$  = temperatura de operação da célula a combustível (K);  
 $T_{ref}$  = temperatura de referência (K);  
 $\varepsilon_i$  = coeficientes de parametrização;  
 $R_M$  = resistência equivalente da membrana ( $\Omega$ );  
 $R_C$  = resistência a transferência de prótons através da membrana ( $\Omega$ );  
 $i_{FC}$  = corrente que flui através da célula a combustível (A);  
 $A_{fc}$  = área da célula a combustível ( $cm^2$ );  
 $\rho_M$  = resistividade da membrana ( $\Omega.cm$ );  
 $L$  = espessura da membrana (cm);  
 $\psi$  = parâmetro ajustável que é função da preparação da membrana e da umidificação da mesma, dentre outros fatores;  
 $B$  = coeficiente de parametrização que depende da célula e de seu estado de operação (Volts);  
 $J$  = densidade de corrente atual (mA/cm<sup>2</sup>);  
 $J_{max}$  = densidade de corrente máxima (mA/cm<sup>2</sup>);  
 $\tau$  = constante de tempo associada a dinâmica da CaC (s);  
 $n$  = número de células da pilha de CaCs;  
 $M_{H_2}$  = massa molar do hidrogênio (g/mol);  
 $\mu_f$  = coeficiente de utilização de combustível.

### B.3 Motor elétrico de indução

Modelo dinâmico (em coordenadas  $(\alpha, \beta)$ ):

$$\begin{aligned}
 \frac{di_\alpha}{dt} &= \beta\eta\psi_\alpha + \beta\omega\psi_\beta - \gamma i_\alpha + \frac{1}{\sigma L_S} u_\alpha \\
 \frac{di_\beta}{dt} &= \beta\eta\psi_\beta - \beta\omega\psi_\alpha - \gamma i_\beta + \frac{1}{\sigma L_S} u_\beta \\
 \frac{d\psi_\alpha}{dt} &= -\eta\psi_\alpha - \omega\psi_\beta + \eta L_h i_\alpha \\
 \frac{d\psi_\beta}{dt} &= -\eta\psi_\beta + \omega\psi_\alpha + \eta L_h i_\beta \\
 T &= \frac{3N_r L_h}{2L_r} (i_\beta \psi_\alpha - i_\alpha \psi_\beta)
 \end{aligned}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T - T_l) \quad (\text{B.21})$$

Nas quais:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{R_r}{L_r} \\ \beta &= \frac{L_r}{\sigma L_S L_r} \\ \sigma &= 1 - \frac{L_h^2}{L_S L_r} \\ \gamma &= \frac{R_S + \frac{L_h^2}{L_r} R_r}{\sigma L_S} \end{aligned} \quad (\text{B.22})$$

E:

$i_\alpha, i_\beta$  = componentes da corrente no estator nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$  (A);

$\psi_\alpha, \psi_\beta$  = componentes do fluxo magnético no rotor nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$  (V.s);

$u_\alpha, u_\beta$  = componentes da voltagem no estator nas coordenadas  $(\alpha, \beta)$  (V);

$L_r, L_S, L_h$  = indutâncias do rotor, estator e mútua, respectivamente (H);

$R_r, R_S$  = resistências do rotor e do estator ( $\Omega$ );

$\omega$  = velocidade angular do rotor (rad/s);

$J$  = Momento de inércia do rotor do motor ( $\text{kg.m}^2$ );

$T$  = torque do motor (N.m);

$T_l$  = torque da carga (N.m);

$N_r$  = quantidade de pares de pólos.

## B.4 Motorista do veículo

O motorista do veículo é modelado por um controlador PI.

Ação de controle de um controlador PI:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (\text{B.23})$$

Na qual  $K_p$  representa o ganho proporcional e  $T_i$  o tempo integral.

## B.5 Dinâmica do veículo

Dinâmica do centro de massa do veículo:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} \left( \frac{\tau_{ref} - \tau_b}{r_{roda}} - \frac{Bv}{r_{roda}^2} - F_r - F_a \right) \quad (\text{B.24})$$

Força de resistência ao rolamento:

$$F_r = C_{rolamento} \times F_n \quad (\text{B.25})$$

Força de arraste aerodinâmico:

$$F_a = \frac{1}{2} C_d \rho_a A v^2 \quad (\text{B.26})$$

Nas quais:

$\tau_{ref}$  = torque gerado pelo motor elétrico (torque de referência) (N.m);

$\tau_b$  = torque de fricção aplicado às rodas do veículo (N.m);

$B$  = coeficiente de amortecimento viscoso (N.m.s/rad);

$r_{roda}$  = raio das rodas do veículo (m);

$M$  = massa do veículo (kg);

$v$  = velocidade do veículo (m/s);

# Referências Bibliográficas

- ABVE (2006), ‘Estatuto da associação brasileira do veículo elétrico’.
- Akella, S., Sivashankar, N. & Gopalswamy, S. (2001), ‘Model-based systems analysis of a hybrid fuel cell vehicle configuration’, *Proc. American Contr. Conf.* pp. 1777–1782.
- Barsali, S. & Ceraolo, M. (2002), ‘Dynamical models of lead-acid batteries implementation issues’, *IEEE Trans. on Energy Conversion Systems* **17**(1), 16–23.
- Baumann, B. M., Washington, G., Glenn, B. C. & Rizzoni, G. (2000), ‘Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles’, *IEEE Trans. on Mechatronics* **5**(1), 58–72.
- Bishop, R. H. (2002), *The Mechatronics Handobook*, CRC Press LLC.
- Ceraolo, M. (2000), ‘New dynamical models of lead-acid batteries’, *IEEE Trans. on Power Systems* **15**(4), 1184–1190.
- Chan, C. C. (2002), ‘The state of the art of electric and hybrid vehicles’, *Proceedings of the IEEE* **90**(2), 247–275.
- Chan, C. C. & Chau, K. T. (1997), ‘An overview of power electronics in electric vehicles’, *IEEE Trans. on Industrial Electronics* **44**(1), 3–13.
- Chan, C., Leung, W. & Ng, C. (1990), ‘Adaptive decoupling control of induction motor drives’, *IEEE Transaction on Industrial Electronics* **37**(1), 41–47.
- Chen, J.-S. & Salman, M. (2005), ‘Learning energy management strategy for hybrid electric vehicles’, *Vehicle Power and Propulsion* pp. 68–73.
- Cho, H. Y. (2004), A new power control strategy for hybrid fuel cell vehicles, Master’s thesis, Mississippi State University.
- Corrêa, J. M., Farret, F. A., Canha, L. N. & Simões, M. G. (2004), ‘An electrochemical-based fuel-cell model suitable for electrical engineering automation approach’, *IEEE Trans. on Industrial Electronics* **51**(5), 1103–1112.
- EGG Technical Services, I. S. A. I. C. (2002), *Fuel Cell Handbook*, sixth edn, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, P.O. Box 880, Morgantown, West Virginia 26507-0880.
- Emelyanov, S. V. (1970), *Theory of variable structure systems*, Nauka.

- Friedman, D. (2003), 'A new road: The technology and potential of hybrid vehicles', Union of Concerned Scientists.
- Gielniak, Y. J. & Shen, Z. J. (2004), 'Power management strategy based on game theory for fuel cell hybrid electric vehicles', *Vehicular Technology Conference* **6**, 4422–4426.
- Gökdere, L. U., Benlyazid, K., Dougal, R. A., Santi, E. & Brice, C. W. (2002), 'A virtual prototype for a hybrid electric vehicle', *Mechatronics* **12**, 575–593.
- Golbert, J. & Lewin, D. R. (2004), 'Model-based control of fuel cells: (1) regulatory control', *Journal of Power Sources* **135**, 135–151.
- Guenter, M. B. (2001), Modelling and design optimization of low speed fuel cell hybrid electric vehicles, Master's thesis, University of Victoria.
- Guezennec, Y., Choi, T.-Y., Paganelli, G. & Rizzoni, G. (2003), 'Supervisory control of fuel cell vehicles and its link to overall system efficiency and low-level control requirements', *Proc. American Contr. Conf.* pp. 2055–2061.
- Itkis, U. (1976), *Control Systems of Variable Structure*, Wiley.
- Jalil, N., Kheir, N. A. & Salman, M. (1997), 'A rule-based energy management strategy for a series hybrid vehicle', *Proc. American Contr. Conf.* pp. 689–693.
- Larminie, J. & Dicks, A. (2003), *Fuel cell systems explained*, John Wiley and Sons Ltd.
- Larminie, J. & Lowry, J. (2003), *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley and Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
- Lee, H.-D. & Sul, S.-K. (1998), 'Fuzzy-logic-based torque control strategy for parallel-type hybrid electric vehicle', *TIE* **45**(4), 625–632.
- Levant, A. (1993), 'Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control', *Int. J. Control* **58**(6), 1247–1263.
- Lin, C., Kang, J.-M., Grizzle, J. & Peng, H. (2001), 'Energy management strategy for a parallel hybrid electric truck', *Proc. American Contr. Conf.* **4**, 2878–2883.
- Lin, C., Peng, H. & Grizzle, J. W. (2003), 'Power management strategy for a parallel hybrid electric truck', *IEEE Trans. on Control Systems Technology* **11**(6), 839–849.
- Lin, C., Peng, H. & Grizzle, J. W. (2004), 'A stochastic control strategy for hybrid electric vehicles', *Proc. American Contr. Conf.* **5**, 4710–4715.
- Luenberger, D. G. (1979), *Introduction to Dynamic Systems - Theory, Models, and Applications*, John Wiley and Sons.
- Mann, R. F., Amphlett, J. C., Hooper, M. A. I., Jensen, H. M., Peppley, B. A. & Pierre R, R. (1999), 'Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a pem fuel cell', *Journal of Power Sources* **86**(1-2), 173–180.

- Maxoulis, C. N., Tsinoglou, D. N. & Koltsakis, G. C. (2004), ‘Modeling of automotive fuel cell operation in driving cycles’, *Energy Conversion and Management* **45**, 559–573.
- Musardo, C., Rizzoni, G. & Staccia, B. (2005), ‘A-ecms: An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management’, *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005* pp. 1816–1823.
- Musardo, C. & Staccia, B. (2003), Energy management strategy for hybrid electric vehicles, Master’s thesis, Politecnico di Milano.
- Ogata, K. (2003), *Engenharia de Controle Moderno*, Prentice Hall.
- Paganelli, G., Ercole, G., Brahma, A., Guezennec, Y. & Rizzoni, G. (2001), ‘General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles’, *Society of Automotive Engineers of Japan* **22**(4), 511–518.
- Pisu, P. & Rizzoni, G. (2004), ‘ $H_\infty$  control for hybrid electric vehicles’, *43rd IEEE Conference on Decision and Control* pp. 3497–3502.
- Pisu, P. & Rizzoni, G. (2005), ‘A supervisory control strategy for series hybrid electric vehicles with two energy storage systems’, *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference* pp. 65–72.
- Pukrushpan, J. T., Peng, H. & Stefanopoulou, A. G. (2002), ‘Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model’, *Proceedings of 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress AND Exposition* pp. 1–12.
- Pukrushpan, J. T., Stefanopoulou, A. G. & Peng, H. (2004), ‘Control of fuel cell breathing: Initial results on the oxygen starvation problem’, *IEEE Control Systems Magazine* pp. 30–46.
- Rayment, C. & Sherwin, S. (2003), *Introduction to Fuel Cell Technology*, Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, USA.
- Salmanx, M., Schouten, N. J. & Kheir, N. A. (2000), ‘Control strategies for parallel hybrid vehicles’, *Proc. American Contr. Conf.* **1**, 524–528.
- Schell, A., Peng, H., Tran, D., Stamos, E., Lin, C.-C. & Kim, M. J. (2005), ‘Modelling and control strategy development for fuel cell electric vehicles’, *Annual Reviews in Control* **29**(3), 159–168.
- Schouten, N. J., Salman, M. A. & Kheir, N. A. (2002), ‘Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles’, *IEEE Trans. on Control Systems Technology* **10**(3), 460–468.
- Sciarretta, A., Back, M. & Guzzella, L. (2004), ‘Optimal control of parallel hybrid electric vehicles’, *IEEE Transactions on control systems technology* **12**(3), 352–363.

- Shan, Y. & Choe, S.-Y. (2005), ‘A high dynamic pem fuel cell model with temperature effects’, *Journal of Power Sources* **145**, 30–39.
- US Department of Energy, D. (2004), ‘Fuel cell world survey 2003’.
- US Department of Energy, D. (2006), ‘International energy outlook 2006’.
- US Environmental Protection Agency, E. (2006), ‘Inventory of us greenhouse gas emissions and sinks: 1990 - 2004’.
- Utkin, V., Guldner, J. & Shi, J. (1999), *Sliding mode control in electromechanical systems*, Taylor and Francis Inc., Philadelphia, USA.
- Utkin, V. I. (1993), ‘Sliding mode control design principles and applications to electric drives’, *IEEE Trans. on Industrial Electronics* **40**(1), 23–36.
- Vilas, L. H. L. (2003), Células a combustível. sua importância em geração de energia elétrica e redução de impactos ambientais, Monografia, Universidade Federal de Lavras.
- Webster, J. G. (1999), *Measurement, Instrumentation and Sensores Handbook*, CRC Press LLC.
- Wendt, H., Götz, M. & Linardi, M. (1999), ‘Tecnologia de células a combustível’, *Química Nova* **23**(4), 538–546.
- Yan, W., Pisu, P., Utkin, V. I. & Rizzoni, G. (2004), ‘Power flow control for hybrid electric vehicles’, *8th IEEE Workshop on Variable Structure Systems* pp. 1–6.