

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Estudo de Sistema de Interface entre Múltiplas Fontes Energéticas Associadas à Tração de um HEV

Diana da Costa Soares

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor Armando Luís Sousa Araújo

30 de Junho de 2014

A Dissertação intitulada

“Estudo de Sistema de Interface Entre Múltiplas Fontes Energéticas Associadas
à Tração de um HEV”

foi aprovada em provas realizadas em 23-07-2014

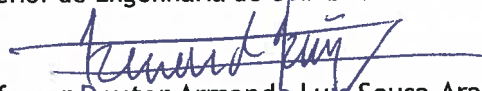
o júri



Presidente Professor Doutor António José de Pina Martins
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professora Doutora Maria Teresa Duarte Baroca Delgado Outeiro
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto
Superior de Engenharia de Coimbra



Professor Doutor Armando Luis Sousa Araújo
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Diana da Costa Soares

Resumo

O crescente interesse nos veículos com tração elétrica trouxe com ele um conjunto de novos desafios associados às fontes energéticas a utilizar. A dificuldade atual em conseguir, nos veículos elétricos, uma fonte energética capaz de satisfazer as necessidades em energia e potência presentes nos veículos com motores a combustão coloca alguns entraves ao aparecimento e crescimento desta tecnologia no mercado automóvel, já que o fantasma da autonomia está sempre presente na hora da decisão.

Por outro lado, a possibilidade de se usarem múltiplas fontes de energia, para a tração de um veículo, é já uma realidade, realidade esta que exige o desenvolvimento de complexos sistemas de controlo, responsáveis por otimizar os fluxos energéticos das mesmas.

Desta forma, esta dissertação centra-se no estudo da interface entre diferentes fontes energéticas e o sistema de tração associada à transformação de um veículo com motor de combustão interna num veículo híbrido, concretamente a transformação de um "smart for two".

Assim, para este efeito, são apresentados neste documento os principais conceitos associados aos elementos utilizados no sistema desenvolvido. Destes elementos, fazem parte, entre outros, as três fontes de energia utilizadas (motor de combustão interna, baterias e supercondensadores), o motor de tração elétrica, e todo o controlo de alto nível. Para que as fontes energéticas, e o sistema associado à tração pudessem ser devidamente dimensionados, foi também necessário estudar a dinâmica longitudinal do veículo e consequentes necessidades energéticas.

Posteriormente, foram modeladas as máquinas elétricas utilizadas, juntamente com o controlo vetorial associado e o comando dos respetivos inversores trifásicos. Após modelação dos elementos associados à tração do veículo, foram também modeladas as fontes energéticas. Esta modelação tornou possível um conjunto de análises aos comportamentos das fontes utilizadas, e de que forma estas fontes devem contribuir para o sistema global. Foram ainda dimensionados os conversores e controlo associados às referidas fontes.

Por último, e após modelação e análise em separado dos elementos do sistema, foi desenvolvida a máquina de estados responsável por gerir o fluxo de energia entre as fontes de energia e o sistema associado à tração. Todo o sistema foi implementado e validado em ferramentas de simulação computacional, nomeadamente *Matlab/Simulink*[®] e *PSIM*[®], tendo sido devidamente validado através dos resultados apresentados.

Abstract

The growing interest in electric vehicles brought with it a new set of challenges related with the energy sources they should use. Using more than one energy source associated with vehicle traction is advantageous but requires development of complex control systems, which are responsible for energy flow optimization.

As the main goal of the present work is to transform an internal combustion engine vehicle with an into a hybrid vehicle the control interface between the different energy sources and the traction system is the primary target of study.

Pursuing these goals, this document starts presenting the main concepts related to the core elements used in the developed system which are the three proposed energy sources (internal combustion engine, batteries and supercapacitors), the electric traction motor, and the high-level control system, among some others.

In order to properly determine the size and main specifications of the energy sources and the traction related system, it was also necessary to study the longitudinal vehicle's dynamics and its energy needs.

Afterwards, the electrical machines were modelled as well as the field-oriented control technique. After modelling the traction related elements, it was also necessary to model the energy sources. This modelling made it possible to analyze the energy sources behaviour, and how these sources should contribute to the overall system.

Finally, after modelling and analysis of all the main elements of the system, the finite-state machine responsible for managing the energy flow between the power sources and the traction system was developed. The entire system has been implemented and validated using *Matlab/Simulink*[®] and *PSIM*[®], and it was properly validated by the obtained results.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Armando Luís Sousa Araújo, pelo apoio e dedicação oferecida não só durante este semestre da dissertação mas também durante o meu percurso académico e por me ter criado a oportunidade de desenvolver este tema que me motiva bastante.

Ao Professor Doutor Adriano Carvalho pelo constante interesse pelo meu trabalho sempre com objetivo de me ajudar.

Aos meus pais, pelo amor, paciência, crença, orgulho, incentivo, apoio incondicional que sempre me deram, sacrifícios a que se deparam para me dar tudo o que tenho e sou, e por me proporcionarem a realização desta formação superior.

Às minhas irmãs, que ajudaram a construir um pouco do que hoje sou. Dou também um agradecimento especial à minha irmã Marisa, pelas risadas, saídas, alegria e apoio que me proporcionou durante estes cinco anos.

À minha melhor amiga desde a infância, Joana Gonçalves pela amizade incondicional e inigualável que sempre me proporcionou.

Aos meus amigos do Porto, Filipe Gonçalves, Daniela Xavier, João Parreira, João Carvalho, Gonçalo Ferreira, Cátia Viães e muitos outros que ajudaram a que estes cinco anos da minha vida fossem inesquecíveis e únicos. A todos eles um muito obrigada e espero que continue a ser assim por largos anos.

Ao Daniel Magalhães, Agostinho Rocha, Filipe Barbosa e entre os outros tantos colegas que me ajudaram com alguma crítica construtiva ou conhecimento no decorrer do trabalho.

Por fim, mas com uma grande importância e carinho, ao Fernando Cunha pela dedicação, paciência e enorme ajuda que sempre me prestou, por acreditar sempre no meu trabalho e empenho, pelo incentivo que ofereceu em cada instante menos bom, pelas palavras espontâneas e confortantes que me transmitiu no momento exato e por tudo o que me proporcionou nestes quase três anos e nos próximos que ainda hão de vir.

A todos, o meu sincero obrigada
Diana Soares

*“The problem with the world is that
the intelligent people are full of doubts
while the stupid ones are full of confidence.”*

Charles Bukowski

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	O projeto	2
1.2.1	Conceito do sistema	3
1.3	Objetivos a alcançar	5
1.4	Metodologia	5
1.5	Estrutura do documento	6
2	Estado da Arte	7
2.1	Introdução	7
2.2	Tipos de veículos: tradicional e elétrico	7
2.3	Veículos elétricos híbridos	8
2.3.1	Configurações de HEV	8
2.4	Conclusão	29
3	Dimensionamento do Sistema	31
3.1	Introdução	31
3.2	Análise Dinâmica do Veículo	32
3.3	Dimensionamento do Motor de Tração	36
3.4	Dimensionamento do Gerador e do Motor de Combustão Interna	37
3.5	Dimensionamento das fontes de armazenamento de energia	37
3.5.1	Supercondensadores	37
3.5.2	Baterias	38
3.6	Conclusão	40
4	Modelação e Controlo das Máquinas Utilizadas	41
4.1	Introdução	41
4.2	Motor de combustão interna	42
4.2.1	Modelação	42
4.2.2	Controlo do ICE para máxima eficiência	44
4.2.3	Resultados e validação	46
4.3	Motor de tração/gerador	47
4.3.1	Modelação da máquina	49
4.3.2	Controlo da Máquina	50
4.3.3	Resultados e validação	54
4.4	Conclusão	59

5	Modelação e Controlo das Fontes de Energia Utilizadas	61
5.1	Introdução	61
5.2	Baterias	62
5.2.1	Modelação do pack de baterias	62
5.2.2	Análise estática do modelo de baterias	63
5.2.3	Conversor associado à bateria	64
5.2.4	Controlo do conversor da bateria	66
5.2.5	Resultados e validação	66
5.3	Supercondensadores	68
5.3.1	Modelação do pack de supercondensadores	68
5.3.2	Análise estática do modelo de supercondensadores	69
5.3.3	Conversor associado aos supercondensadores	70
5.3.4	Controlo do conversor dos supercondensadores	70
5.3.5	Resultados e validação	71
5.4	Conclusão	72
6	Controlo do Sistema HEV	73
6.1	Introdução	73
6.2	Estrutura do controlo do sistema	73
6.2.1	Funcionalidades de cada estado	74
6.2.2	I/Os (<i>Inputs/Outputs</i>) e transições de estado	75
6.3	Conclusão	79
7	Resultados	81
7.1	Introdução	81
7.2	Resultados de análise estática do sistema	85
7.3	Resultados de análise dinâmica do sistema	88
7.4	Conclusão	89
8	Conclusão e trabalho futuro	91
8.1	Conclusões	91
8.2	Trabalho futuro	92
	Referências	93
A	Implementação em Software do Sistema Realizado	97

Lista de Figuras

1.1	Componentes do sistema alvo de estudo - HEV série.	3
1.2	Esquema de todos os componentes em estudo no documento.	4
2.1	Diferentes arquiteturas dos veículos híbridos.	9
2.2	Veículo com arquitetura série.	10
2.3	Veículo com arquitetura série.	10
2.4	Representação dos quatro tempos do motor de quatro tempos a gasolina	11
2.5	Característica ideal para uma aplicação em HEV do binário e potência em relação à velocidade.	12
2.6	Diferentes características dos motores de indução.	12
2.7	Característica binário-velocidade de uma máquina de ímanes permanentes.	13
2.8	Curva de característica binário-velocidade de um SRM.	14
2.9	Modelo do circuito equivalente de um supercondensador.	16
2.10	Método de identificação de C e R_{ESR}	17
2.11	Comparação de características de alguns dispositivos de armazenamento e/ou produção de energia, bem como a sua perspectiva de desenvolvimento.	18
2.12	Comparação de atributos de fontes de armazenamento de energia.	18
2.13	Conversor DC/DC bidirecional <i>Buck-Boost</i>	19
2.14	Sistema passivo em cascada baterias/supercondensadores.	20
2.15	Topologia passiva em cascada de bateria e condensador com <i>buck-boost</i>	20
2.16	Sistema ativo em cascada bateria/supercondensador.	21
2.17	Sistema ativo de bateria e condensador em paralelo.	21
2.18	Topologia proposta de um conversor de potência de múltiplas entradas.	22
2.19	Sistema de múltiplas entradas (bateria/supercondensador).	23
2.20	Topologia híbrida proposta para fontes de armazenamento de energia.	23
2.21	Inversor trifásico controlado a transístores.	24
2.22	Estados de comutação de um inversor trifásico de tensão de dois níveis.	25
2.23	Retificador trifásico controlado a transístores.	26
2.24	Diagrama de blocos do controlo do veículo.	27
2.25	Possível diagrama de blocos associado ao Controlo do sistema do veículo - <i>Vehicle system controller</i>	27
2.26	Estratégias de gestão de energia de um veículo.	28
3.1	Análise dinâmica do veículo.	32
3.2	Ciclo de percurso extra urbano (NEDC).	34
3.3	Análise.	35
4.1	Diagrama de blocos dos subsistemas abordados no capítulo 4.	41
4.2	Características típicas de desempenho de um motor a gasolina.	42

4.3	Curvas típicas de binário e potência em função da velocidade de um ICE em plena carga (pontos importantes estão assinalados).	43
4.4	Curvas de binário em função da velocidade para diferentes ângulos do pedal de aceleração.	43
4.5	Modelo do motor de combustão interna em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	44
4.6	Características esforço de tração de um veículo com um motor a gasolina.	45
4.7	Características de economia de combustível de um motor a gasolina.	45
4.8	Várias curvas de características de um motor a gasolina.	46
4.9	Curvas do ICE modelado em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	47
4.10	Referenciais aplicados na modelação da máquina elétrica.	48
4.11	Circuito equivalente no referencial dq	49
4.12	Arquitetura de controlo do sistema PMSM.	52
4.13	Vetores espaciais gerados pelo VSI trifásico (esquerda) e principio de operação SVM para um setor k genérico.	52
4.14	Etapas de geração de sequência temporal.	54
4.15	LUT (Look-up Table) dos três interruptores superiores do inversor.	54
4.16	Resultados de uma simulação computacional ao motor elétrico com variações de binário de referência.	55
4.17	Resultados de uma simulação computacional ao gerador com uma velocidade de referência de 1500rpm e uma carga de 50N.	56
4.18	Resultados de uma simulação computacional ao gerador com uma carga de 50N e variações de velocidade de referência.	57
4.19	Resultados de uma simulação computacional do gerador elétrico acoplado ao motor de combustão interna.	58
5.1	Diagrama de blocos dos subsistemas abordados neste capítulo.	62
5.2	Esquema equivalente do pack de baterias.	62
5.3	Esquema de uma bateria, eletrólito e eléctrodos, com as divisões de secções.	63
5.4	Análise estática do modelo de uma célula de baterias.	64
5.5	Esquema do conversor DC/DC <i>Buck-Boost</i>	64
5.6	Controlo do conversor associado às baterias em modo Buck.	66
5.7	Teste de carregamento das baterias a uma corrente contínua de 10 A.	67
5.8	Teste de descarregamento das baterias a uma corrente contínua de 10 A.	67
5.9	Esquema equivalente do pack de supercondensadores.	68
5.10	Análise estática do modelo de uma célula de supercondensador.	69
5.11	Controlo do conversor dos supercondensadores em modo <i>Buck</i>	70
5.12	Teste de carregamento dos supercondensadores a uma corrente contínua de 10 A.	71
5.13	Teste de descarregamento dos supecondensadores a uma corrente contínua de 10 A.	71
6.1	Máquina de estados implementada no <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	78
7.1	Estado do estado <i>Ini</i> da máquina de estados em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	82
7.2	Estado do estados <i>Start</i> da máquina de estados em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	83
7.3	Estado do estado <i>Electric</i> da máquina de estados em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	83
7.4	Estado do estado <i>Charge to turn off</i> da máquina de estados em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	83
7.5	Estado dos estados <i>Hybrid</i> da máquina de estados em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	84
7.6	Estado do estado <i>Braking</i> da máquina de estados em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	84
7.7	Estado do estado <i>ICE alone</i> da máquina de estados em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	84
7.8	Estado do estado <i>Stop</i> da máquina de estados em <i>MATLAB/Simulink</i> [®]	84

7.9	Resultados de uma simulação ao veículo em modo de operação Elétrico com $SOC_{sc} > SOC_{scmin}$.	85
7.10	Resultados de uma simulação ao veículo em modo de operação Elétrico com $SOC_{sc} < SOC_{scmin}$ e $SOC_{bat} > SOC_{batmin}$.	86
7.11	Resultados de uma simulação ao veículo em modo de operação Elétrico.	87
7.12	Resultados de uma simulação ao veículo em modo de operação Regeneração Energética.	87
7.13	Resultados de uma simulação ao veículo com uma transição de modos de operação: Elétrico para Regeneração Energética.	89
A.1	Sistema total, sem controladores, realizado em <i>PSIM</i> [®] .	97
A.2	Gerador, conversor e controlo associados realizado em <i>PSIM</i> [®] .	98
A.3	Supercondensadores e controlo PWM associados realizado em <i>PSIM</i> [®] .	99
A.4	Baterias e controlo PWM associados realizado em <i>PSIM</i> [®] .	99
A.5	Motor de tração, inversor e controlo associados realizado em <i>PSIM</i> [®] .	100
A.6	Bloco do motor de combustão e interligação com o gerador, realizado em <i>MATLAB/Simulink</i> [®] .	100
A.7	Aquisição de sinais e interligação entre <i>MATLAB/Simulink</i> [®] e <i>PSIM</i> [®] .	101
A.8	Dinâmica do veículo em <i>MATLAB/Simulink</i> [®] .	101
A.9	Bloco do controlo do veículo com as entradas e saídas mencionadas no capítulo 6, realizado em <i>MATLAB/Simulink</i> [®] .	101
A.10	Bloco de controlo dos supercondensadores realizado em <i>MATLAB/Simulink</i> [®] .	102
A.11	Bloco de seleção e controladores de cada modo do conversor associado aos supercondensadores, realizado em <i>MATLAB/Simulink</i> [®] .	102
A.12	Controlo dos supercondensadores em modo elevador em <i>MATLAB/Simulink</i> [®] .	103
A.13	Bloco de controlo das baterias realizado em <i>MATLAB/Simulink</i> [®] .	103
A.14	Bloco de seleção e controladores de cada modo do conversor associado às baterias, realizado em <i>MATLAB/Simulink</i> [®] .	104

Lista de Tabelas

1.1	Estrutura e descrição dos capítulos do documento.	6
2.1	Características principais de veículos elétricos (BEV), veículos elétricos híbridos (HEV) e veículos elétricos de células de combustível (FCEV).	8
2.2	Comparação qualitativa entre os diferentes tipos de baterias.	15
2.3	Comparação das tipologias.	24
3.1	Características do Smart fortwo Coupé 0.6i.	31
3.2	Parâmetros para a dinâmica.	36
3.3	Características do EMRAX 228.	36
3.4	Características do motor de combustão interna.	37
3.5	Características do supercondensador Maxwell bcap 3000.	38
3.6	Características de diferentes tipos de baterias.	39
3.7	Características das baterias <i>Lithium - Polymer</i>	39
3.8	Resumo do dimensionamento e escolha dos componentes do sistema.	40
5.1	Dimensionamento dos componentes do conversor DC/DC associado às baterias.	66
5.2	Características da modelação de um supercondensador de N células.	68
5.3	Características da modelação do pack de supercondensadores do projeto.	69
5.4	Dimensionamento dos componentes do conversor DC/DC associado aos supercondensadores.	70
6.1	Ações de cada estado da máquina de estados do controlo do veículo.	75
6.2	Transições entre estados da máquina de estados do controlo do veículo.	76
6.3	Limitações de parâmetros dos componentes do sistema.	77

Abreviaturas e Símbolos

Abreviaturas

AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico a Baterias)
CC	Corrente Contínua
CSI	<i>Current Source Inverter</i> (Inversor de Corrente)
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DEEC	Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
EMI	<i>Electromagnetic interference</i> (Interferência Eletromagnética)
EV	<i>Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico)
FC	<i>Fuel Cell</i> (Células de Combustível)
FCEV	<i>Fuel cell Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico a Células de Combustível)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FOC	<i>Field-Oriented Control</i> (Controlo por Orientação de Campo)
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> (Veículo Híbrido)
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i> (Motor de Combustão Interna)
IM	<i>Induction Machine</i> (Máquina de Indução)
IP	Ímanes Permanentes
I-V	<i>Current/Voltage</i> (Corrente-Tensão)
I/Os	<i>Inputs/Outputs</i> (Entradas/Saídas)
LUT	<i>Look-up Table</i> (Tabela de consulta)
METP	<i>Maximum Efficiency Tracking Point</i> (Ponto Máximo de Eficiência)
MTPA	<i>Maximum Torque Per Ampere</i> (Máximo Binário por Ampere)
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i> (Novo Ciclo de Condução Europeu)
PI	<i>Proportional-Integrator</i> (Proporcional-Integrador)
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i> (Máquina Síncrona de Ímanes Permanentes)
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RC	Resistência-Condensador
SC	Supercondensadores
SOC	<i>State of Charge</i> (Estado de Carga)
SOH	<i>State of Health</i> (Estado de Vida)
SRM	<i>Switched Reluctance Machine</i> (Máquinas de Relutância Comutada)
SVM	<i>Space Vector Modulation</i> (Modulação Vetorial Espacial)
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i> (Inversor de Tensão)

Símbolos

α	ângulo de inclinação da superfície
----------	------------------------------------

η	rendimento
$\eta_{conversor}$	rendimento do conversor
η_n	eficiência nominal do motor
θ	posição elétrica em relação ao eixo d
λ_a	fluxo magnético equivalente da fase a
λ_b	fluxo magnético equivalente da fase b
λ_c	fluxo magnético equivalente da fase c
λ_d	componente do fluxo de entreferro do eixo direto
λ_f	fluxo magnético do rotor
λ_q	componente do fluxo de entreferro do eixo em quadratura
λ_s	amplitude do fluxo magnético entreferro
μ_{rr}	coeficiente de resistência de rolamento
ρ_{air}	densidade do ar
ω_e	velocidade angular do sistema elétrico
ω_{eixo}	velocidade angular do eixo do motor
ω_m	velocidade angular mecânica
ω_{wheel}	velocidade angular da roda
a_{car}	aceleração do veículo
A_{front}	área frontal do veículo
B	coeficiente de fricção
<i>brake</i>	pedal do travão
C	capacidade
C_0	capacidade inicial
C_{cell}	capacidade da célula
C_{drag}	coeficiente de fricção
C_f	capacidade <i>fast</i>
C_m	capacidade <i>medium</i>
$C_{minicial}$	capacidade mínima inicial
C_{pack}	capacidade do pack
$C_{pack/DOD}$	capacidade do pack com a profundidade de descarga
C_s	capacidade <i>slow</i>
$C_{total-sc}$	capacidade total dos supercondensadores
D	<i>duty cycle</i>
E	Energia
$E_{armazenamento}$	Energia de armazenamento
e_d	componente da força contra-eletromotriz do eixo direto
E_{MAX}	Densidade de energia máxima
e_q	componente da força contra-eletromotriz do eixo em quadratura
E_{total}	energia total
ESR	resistência equivalente em série
f	frequência
f_g	força gravítica
f_i ou f_a	inércia
f_n	reação normal
f_{rr}	força de atrito cinético
f_t	força total
f_{wind}	resistência do ar
G	<i>gear</i>

g	aceleração da gravidade
i_a	corrente da fase a
i_b	corrente da fase b
I_{batMAX}	corrente máxima da bateria
I_{busMAX}	tensão máxima do barramento CC
i_c	corrente da fase c
$I_{contnua}$	Corrente contínua
i_d	componente da corrente no eixo d
i_L	corrente na bobina
I_{MAX}	Corrente máxima
$I_{MAXdescarga}$	Corrente de descarga máxima
i_q	componente da corrente no eixo q
I_s	amplitude da corrente no estator
I_{scMAX}	corrente máxima dos supercondensadores«
I_{gni}	botão on/off
J	momento de inércia
L	indutância«
L_d	indutância no eixo d
L_q	indutância no eixo q
L_s	indutância por fase no estator
M_{car}	massa do veículo
N	número de células
$n_{paralelo}$	número de strings
n_{serie}	número de células em série
p	par de pólos da máquina elétrica
P	potência
P_{bat}	potência das baterias
$P_{contnua}$	potência contínua
P_{eixo}	potência no eixo do motor
P_{MAX}	potência máxima
P_{needed}	potência necessária à tração
P_t	potência de tração
P_{pico}	potência de pico
R_f	resistência <i>fast</i>
R_{int}	resistência interna
$R_{leakage}$	resistência de fugas
R_m	resistência <i>medium</i>
R_s	resistência <i>slow</i>
R_s	resistência do estator
R_{serie}	resistência em série
r_{wheel}	raio da roda
RPM_{MAX}	rotações por minuto máximas
$speed$	velocidade
SOC_{bat}	estado de carga da bateria
SOC_{sc}	estado de carga dos supercondensadores
T	período
T/I	binário/Corrente do motor
$T_{contnuo}$	binário contínuo

T_{eixo}	binário no eixo do motor
T_{em}	binário eletromagnético
T_L	binário de carga
T_{MAX}	binário máximo
t_{on}	tempo em que permanece ligado
$T_{transmissao}$	binário associado à transmissão
Trq	acelerador
V_{α}	componente da tensão do estator no eixo α
V_{β}	componente da tensão do estator no eixo β em V
v_a	tensão da fase a
$V_{alimentao}$	tensão de alimentação do EMRAX 228
v_{aN}	tensão nominal da fase a
v_b	tensão da fase b
$V_{barramento}$	tensão no barramento
V_{bat}	tensão das baterias
v_{bN}	tensão nominal da fase b
V_{bus}	tensão do barramento CC
v_c	tensão da fase c
V_{ca}	tensão em circuito aberto
v_{car}	velocidade do veículo
V_{cell}	tensão da célula
v_{cN}	tensão nominal da fase c
v_d	componente da tensão do estator no eixo d
V_{dc}	tensão DC
V_{in}	tensão de entrada
v_{max}	velocidade máxima
V_{MAX}	tensão máxima
V_n	Tensão nominal
V_{out}	tensão de saída
v_q	componente da tensão do estator no eixo q
V_s^*	amplitude da tensão do estator para o cálculo do SVM
$V_{total-bat}$	tensão total das baterias
V_{sc}	tensão dos supercondensadores
$V_{total-sc}$	tensão total dos supercondensadores
v_{wind}	velocidade do vento

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é feita uma introdução de todo o trabalho desenvolvido no decorrer desta dissertação. Assim, apresenta-se a motivação para o desenvolvimento do projeto, seguindo-se uma breve descrição do problema. Haverá também lugar neste capítulo para uma introdução ao conceito do sistema, onde será possível ter uma visão global de todo o projeto. Por último, são apresentados de forma sucinta os objetivos a alcançar, seguindo-se a estrutura do presente documento.

1.1 Motivação

Dos veículos terrestres de quatro rodas, os que usam motor de combustão interna são os mais utilizados a nível mundial. Estes veículos são abastecidos com combustíveis fósseis, prejudiciais ambiental e economicamente. Contudo, os veículos com ICE (motor de combustão interna) continuam a ser os mais procurados devido ao preconceito existente do público alvo relativamente aos restantes tipos de sistemas de tração e fontes de energia utilizadas. De facto, os veículos com tração elétrica podem ainda ser alvo de desenvolvimentos em diversas áreas.

No entanto, os desenvolvimentos até à data na área dos veículos de tração elétrica, quer puramente elétricos quer híbridos, são suficientes para se poder concluir que é uma tecnologia mais eficiente a nível energético.

O desenvolvimento dos veículos elétricos (EV) e híbridos (HEV) tem aumentado na última década, estimulado por vários fatores que vão desde as questões ambientais, redução de consumo de energia e aumento da eficiência [1, 2, 3, 4, 5]. Estas tecnologias de HEV e EV surgiram como um complemento e até mesmo um concorrente para veículos com apenas motor de combustão interna (ICE) [5].

Autonomia e potência máxima são as principais características e metas a alcançar num veículo, e dependem dos sistemas de energia a bordo do automóvel [4]. Consequentemente, surge a necessidade de desenvolvimento de sistemas de armazenamento compactos, leves e eficientes, que ao mesmo tempo sejam economicamente acessíveis e com um ciclo de vida aceitável. O

sistema de tração, composto pelo motor elétrico, inversor e circuitos associados, não são os limitadores para que se obtenha alto desempenho e eficiência nestes veículos, mas sim os sistemas de armazenamento de energia [6].

Existe assim a necessidade de garantir que os sistemas de armazenamento e produção de energia sejam capazes de satisfazer as necessidades energéticas do sistema de tração [3]. Estes dispositivos de armazenamento podem ser baterias, supercondensadores (SC), células de combustível (FC), entre outros. Cada uma destas diferentes fontes de energia tem vantagens e desvantagens associadas. O projeto e dimensionamento das fontes de energia depende do modo de condução do veículo. Assim, para o projeto de um sistema de armazenamento de energia devem ser considerados diversos fatores, entre os quais: massa, volume, ciclos de vida, capacidade de operação a diversas temperaturas, regimes de carga e descarga, entre outros [4]. Uma combinação dos melhores aspectos de cada fonte de alimentação permite colmatar as lacunas de cada uma, oferecendo assim grandes perspectivas na gestão mais eficiente da energia [7].

Para que haja uma gestão de trocas de energia entre o sistema de tração e as fontes de energia e armazenamento, são necessários conversores de potência combinados com uma estratégia de controlo adequada. Assim, uma interface otimizada em todos os aspetos deverá criar um veículo que maximiza a economia do combustível, durabilidade, desempenho, redução de custos, entre outros [1].

A questão essencial a ser abordada centra-se nesta mesma interface entre as variadas fontes de armazenamento ou produção de energia e o sistema de tração, bem como o seu controlo. Assim, será definida a topologia de conversão de energia a usar, juntamente com o seu controlo, e qual o melhor arranjo das fontes para a otimização associados às diferentes condições de trabalho impostas pelo veículo.

1.2 O projeto

O projeto em estudo na presente dissertação consiste num sistema de interface entre as diversas fontes energéticas utilizadas num veículo HEV e o sistema de tração. Os componentes deste sistema encontram-se ilustrados na figura 1.1. A topologia do HEV é em série, o que quer dizer que a tração do veículo é puramente elétrica, como se pode observar pela figura. Assim, a topologia em estudo é composta por um motor de tração elétrico que é alimentado por três fontes energéticas distintas: baterias, supercondensadores e motor ICE.

Assim, o trânsito de potência que se gera no barramento CC (Corrente Contínua) ao longo do percurso do veículo tem que ser controlado e gerido. Desta forma, o principal objetivo passa por conjugar o controlo das diversas fontes energéticas de forma a que a tensão no barramento CC seja mantida constante, e que a corrente entregue ao sistema de tração seja suficiente para cumprir todas as exigências.

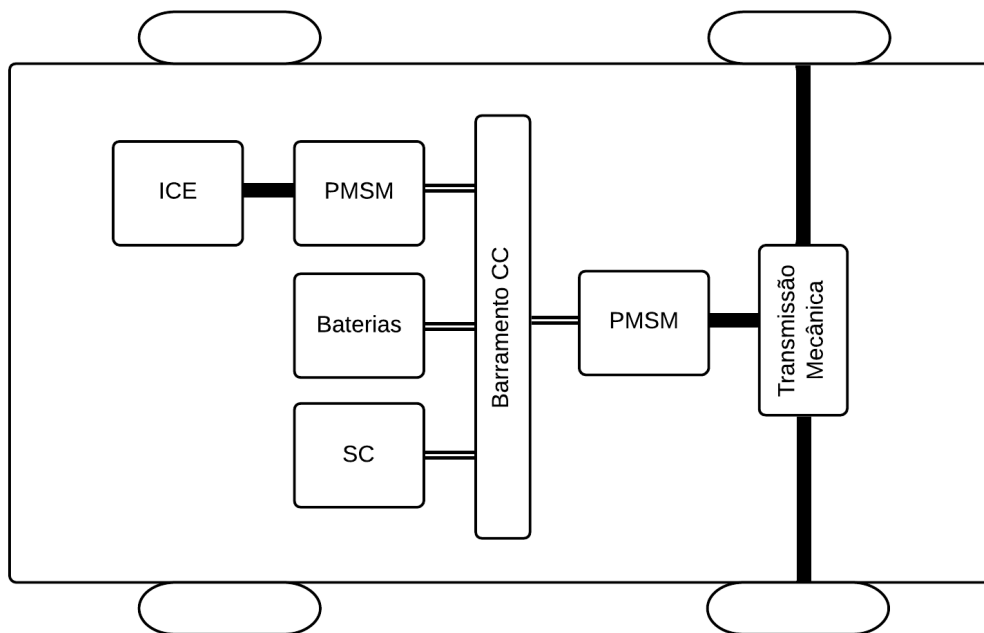


Figura 1.1: Componentes do sistema alvo de estudo - HEV série.

1.2.1 Conceito do sistema

Todos os subsistemas, bem como os componentes associados a cada um deles, estão ilustrados na figura 1.2.

O sistema global pode ser dividido em cinco subsistemas: subsistema do motor de combustão, das baterias, dos supercondensadores, de tração e, por fim, do controlo do veículo.

O subsistema do motor de combustão consiste no próprio motor, um gerador a ele acoplado e um conversor AC/DC (corrente alternada/corrente contínua) que está ligado ao barramento CC. Este subsistema tem como objetivo fornecer energia ao barramento quando o subsistema das baterias não tem essa capacidade. O gerador funciona aqui como meio de transporte e transformação da energia gerada pelo ICE, pois o ICE é aqui a fonte energética.

O subsistema das baterias é a principal fonte energética da tração. É o subsistema que é mais utilizado durante o funcionamento normal, sendo as restantes fontes consideradas como fontes de suporte, normalmente utilizadas em situações em que ofereçam melhor eficiência ou potência, dependendo do regime de condução.

O subsistema dos supercondensadores é utilizado neste projeto devido à elevada densidade de potência que este tipo de fontes apresenta. Assim, os supercondensadores são utilizados quando existem picos de potência, tanto em situações de descarga (acelerações bruscas), ou em situações de carga (travagem regenerativa).

O subsistema de tração é composto por um inversor de tensão trifásico e um motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM). O inversor de tensão trifásico (VSI), transforma tensão contínua vinda do barramento CC num sistema de tensões trifásico simétrico e equilibrado, de frequência e amplitude variável, que alimenta o motor. O PMSM, por sua vez, deve ser controlado de forma

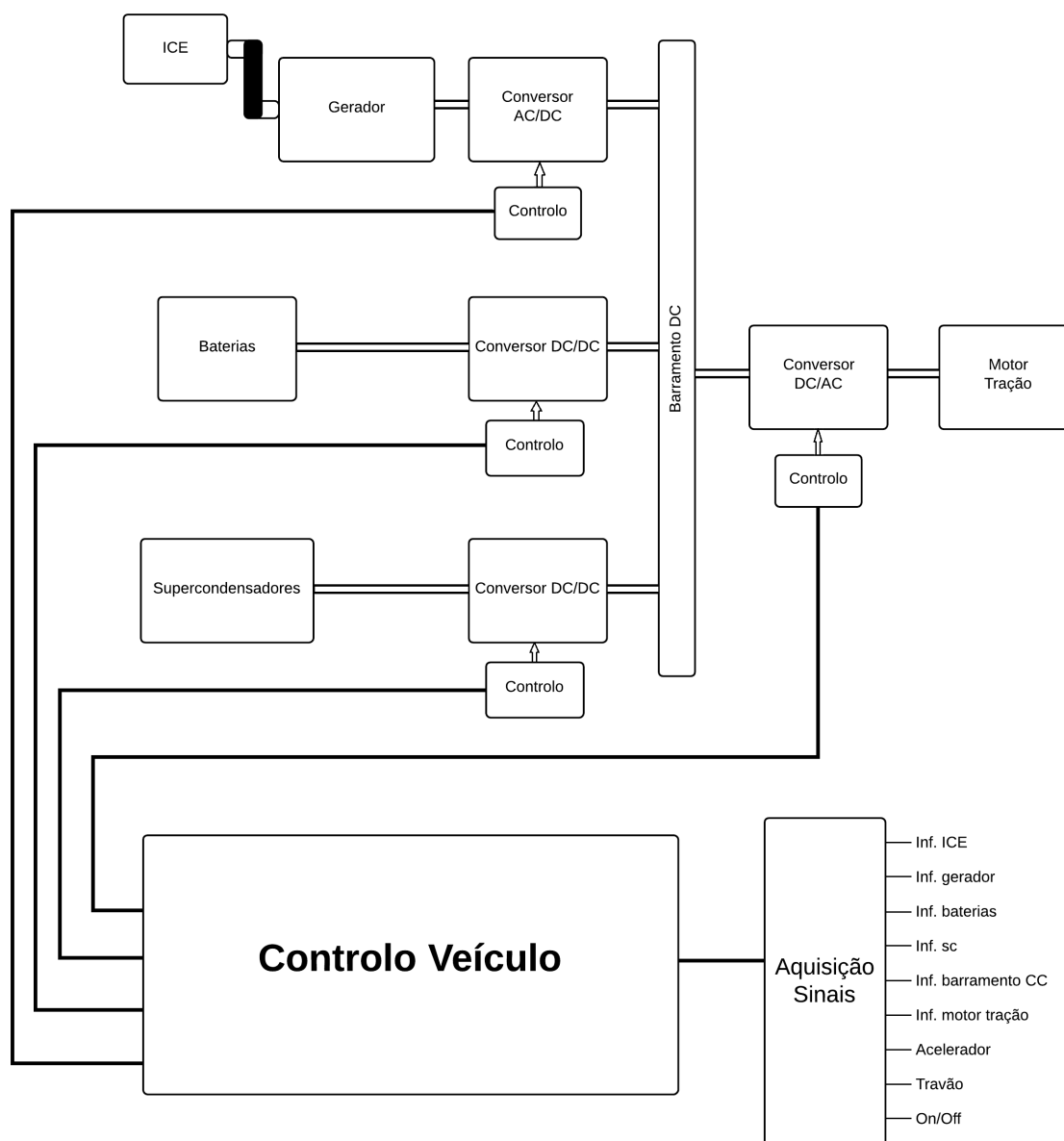


Figura 1.2: Esquema de todos os componentes em estudo no documento.

apropriada para que seja possível obter uma boa resposta aos comandos do condutor. Assim, o método de controlo vetorial a desenvolver, em conjunto com o método de comando do VSI, deve cumprir estes requisitos.

Por último, o subsistema de controlo do veículo é feito a partir de um conjunto de sinais decorrentes de todos os componentes do sistema, juntamente com os comandos do condutor. Este subsistema tem como objetivo calcular as necessidades da tração e decidir quais as fontes que deverão satisfazer estas necessidades da melhor forma, tanto a nível de eficiência, como de tempo de resposta, entre outros [8, 9].

1.3 Objetivos a alcançar

Neste projecto, considera-se que o controlo do trânsito de potência entre as fontes energéticas e o sistema de tração é o objetivo principal. Este controlo deve ser desenvolvido de forma a que o sistema global tenha um bom desempenho, rendimento e eficiência, considerando também o seu custo global.

Assim, e tendo em conta toda a descrição do projeto realizada no decorrer do presente capítulo, é possível listar de forma sucinta todos os objetivos para esta dissertação, que tornam possível alcançar o objetivo principal:

- Estudo do estado de arte relativo a veículos HEV em série e dos componentes e controlo associados;
- Estudo das necessidades energéticas do veículo em causa para percursos típicos (NEDC - *New European Driving Cycle*);
- Modelação e dimensionamento das baterias;
- Modelação e dimensionamento dos supercondensadores;
- Modelação e dimensionamento do motor de combustão;
- Modelação e dimensionamento do sistema de tração;
- Estudo e dimensionamento dos conversores para cada componente, assim como o respetivo controlo;
- Estudo do controlo do sistema global;
- Implementação e testes do sistema de controlo do veículo em ambiente de simulação computacional.

1.4 Metodologia

Como já foi referido no decorrer deste capítulo, para que seja possível desenvolver o sistema de controlo, proposto nesta dissertação, é necessário modelar os principais elementos que dele fazem parte. Assim, todos os modelos associados aos sistemas de armazenamento de energia utilizados, ao motor de combustão interna, gerador e motor de tração foram desenvolvidos em *MATLAB/Simulink*[®] e *PSIM*[®]. Da mesma forma, o controlador de nível superior desenvolvido, e que envolve todos os subsistemas anteriores, foi também desenvolvido e testado recorrendo às mesmas ferramentas, num conjunto de co-simulações.

1.5 Estrutura do documento

Este documento está dividido em 8 capítulos. Na tabela 1.1 é apresentada a estrutura do documento, em conjunto com uma breve descrição de cada um.

Tabela 1.1: Estrutura e descrição dos capítulos do documento.

Capítulo	Descrição
Capítulo 1: Introdução	Descrição e contextualização do projeto.
Capítulo 2: Estado de Arte	Revisão bibliográfica dos temas alvos de estudo.
Capítulo 3: Dimensionamento do Sistema	Análise dinâmica do veículo e dimensionamento dos principais componentes do sistema.
Capítulo 4: Modelação e Controlo das Máquinas Utilizadas	Estudo teórico dos modelos elétricos bem como o controlo das máquinas utilizadas no sistema: máquinas elétricas e motor de combustão interna. Implementação em ambiente de simulação dos modelos das máquinas, dos conversores e do controlo associado. Exposição e discussão de resultados.
Capítulo 5: Modelação e Controlo das Fontes de Energia Utilizadas	Estudo teórico das fontes de energia utilizadas no projeto. Implementação em ambiente de simulação dos modelos das fontes de armazenamento de energia, dos conversores e controlo associado. Exposição e discussão de resultados.
Capítulo 6: Controlo do Sistema HEV	Estudo e desenvolvimento do controlo do sistema global. Implementação em ambiente de simulação do controlo do sistema.
Capítulo 7: Resultados	Exposição e discussão dos resultados de simulação computacional obtidos ao longo do projeto.
Capítulo 8: Conclusão e Trabalho Futuro	Conclusão e discussão do trabalho realizado e por realizar. Indicação de possíveis melhorias e sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o levantamento bibliográfico dos principais assuntos associados ao tema em estudo nesta dissertação. Serão inicialmente abordadas as arquiteturas mais comuns de veículos elétricos e híbridos. São expostas as noções essenciais dos elementos que integram o sistema de interface entre as diversas fontes de energia e o barramento CC. Haverá também lugar para uma introdução dos conceitos associados ao controle e aos modos de funcionamento de um veículo híbrido em série.

2.2 Tipos de veículos: tradicional e elétrico

O tipo de motor utilizado para a tração de um veículo terrestre de quatro rodas é um dos possíveis critérios associados à sua divisão em duas categorias bem distintas: veículos tradicionais com tração baseada em motor de combustão interna (ICE), e veículos com tração elétrica.

Os veículos tradicionais, que só utilizam motor ICE, têm como fonte energética os combustíveis fósseis e são atualmente dotados de tecnologia capaz de melhorar consideravelmente o seu rendimento. No entanto, sendo a energia mecânica produzida através de uma conversão química, existem algumas desvantagens associadas. A sua eficiência é muito baixa, emitem muitos poluentes ambientais e o combustível que utilizam é caro. Por outro lado, o elevado número de componentes mecânicos traduz-se em maiores custos de manutenção.

Dentro da categoria dos veículos que recorrem a tração elétrica, pode ainda ser feita a divisão em três grandes grupos: veículos elétricos a baterias (BEV), veículos elétricos híbridos (HEV) e veículos elétricos a células de combustível (FCEV). Os HEV são veículos cuja energia de propulsão é obtida através de duas ou mais fontes de energia [10].

A tabela 2.1 apresenta as características dos veículos BEV, HEV e FCEV.

Tabela 2.1: Características principais de veículos elétricos (BEV), veículos elétricos híbridos (HEV) e veículos elétricos de células de combustível (FCEV) [10].

Types of EV	PEV	HEV	FCEV
Energy source	(i) Battery	(i) Battery/ultracapacitor (ii) Internal combustion engines	(i) Fuel cells
Propulsion technique	(i) Electric motor drives	(i) Electric motor drives (ii) Internal combustion engines	(i) Electric motor drives
Characteristics and feature	(i) Zero emission (ii) Short driving range (iii) Higher initial costs	(i) Low emission (ii) Longer range (iii) Complex	(i) Zero emission (ii) Highest initial costs (iii) Medium driving range
Major techniques	(i) Electric motor control (ii) Battery management (iii) Charging device	(i) Electric motor control (ii) Battery management (iii) Managing multiple energy sources and optimal system efficiency (iv) Components sizing	(i) Fuel processor (ii) Fueling system (iii) Fuel cell cost
Regenerative braking	(i) Yes	(i) Yes	(i) Yes

2.3 Veículos elétricos híbridos

Existem diversos tipos de HEV, que não passam de combinações de duas ou mais fontes de energia, entre elas: baterias, células de combustível, supercondensadores, motores ICE, etc [10].

2.3.1 Configurações de HEV

Os veículos híbridos podem ser classificados com base nas suas arquiteturas [11, 12, 13]. Podem ser definidas quatro arquiteturas diferentes para este tipo de veículos: híbrido série, híbrido paralelo, híbrido série-paralelo e híbrido complexo [11, 13]. Na figura 2.1 estão ilustradas as arquiteturas definidas.

É válido afirmar que as arquiteturas série e paralelo, figuras 2.1a e 2.1b respetivamente, são as principais, sendo as restantes derivadas destas. Numa simples análise às tipologias das figuras 2.1a e 2.1b, é visível que a principal diferença entre elas centra-se na forma como o motor de combustão interna contribui para o funcionamento do veículo. Num veículo série, o motor ICE não está ligado diretamente à transmissão, enquanto num veículo paralelo, tanto o motor elétrico como o motor ICE estão ligados diretamente à transmissão.

Veículo Paralelo Nesta configuração de veículos híbridos, a tração pode feita pelo motor elétrico, pelo motor de combustão interna ou por ambos ao mesmo tempo [13]. Os motores estão acoplados mecanicamente à transmissão. A forma de acoplamento gera diversos tipos de configurações de veículos distintos.

Neste tipo de arquitetura pode existir um menor consumo de combustível numa condução em autoestrada. Numa condução deste tipo, não existem grandes variações de carga, logo é possível que o motor de combustão funcione no ponto de maior eficiência. Uma grande desvantagem de veículos com arquitetura paralela centra-se no facto de ambos os motores utilizados terem de ser dimensionados para cumprir totalmente as exigências de tração.

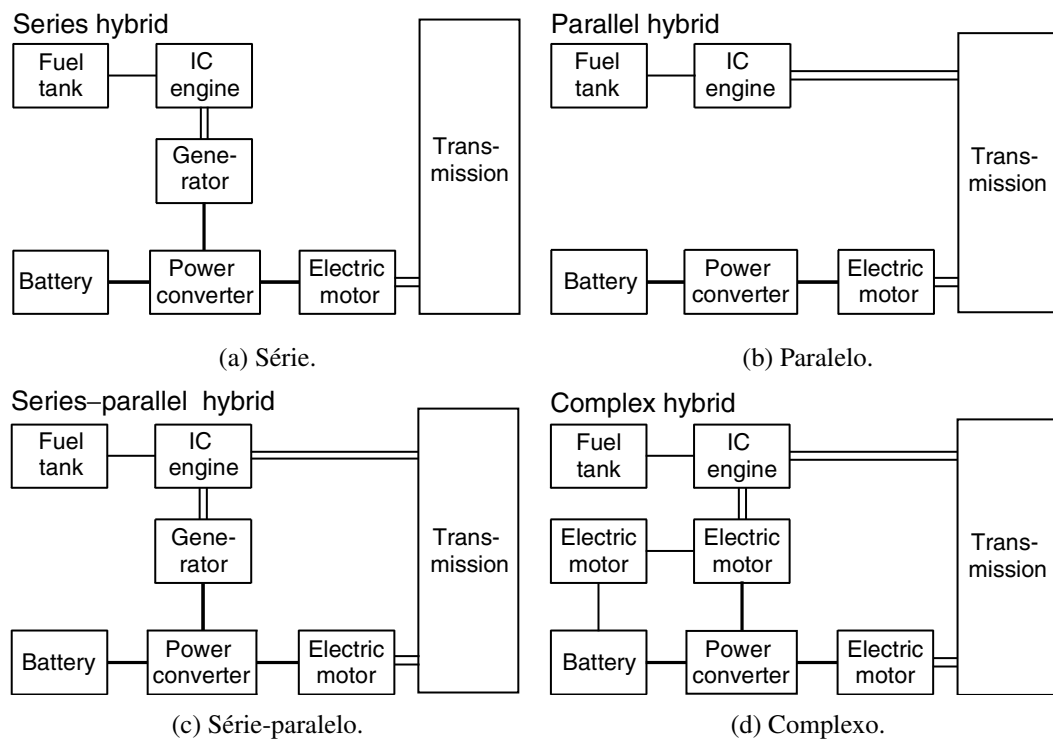


Figura 2.1: Diferentes arquiteturas dos veículos híbridos [11].

Veículo Série A arquitetura representada por um veículo série pode adotar tipologias distintas. O sistema é constituído por diferentes tipos de fontes: ICE, gerador elétrico, motor elétrico de tração, baterias, etc. Nesta topologia, o motor de combustão interna não está ligado diretamente à transmissão, podendo ser controlado de forma a funcionar sempre no seu melhor ponto de eficiência e reduzindo assim as emissões de poluentes e consumo de combustível.

Algumas das fontes são unidirecionais, isto é, apenas fornecem energia e não podem armazená-la, sendo assim indicadas para condições de carga constante. Por outro lado, existem outro tipo de fontes, que são bidirecionais, conseguindo assim fornecer e receber energia. Este tipo de fontes são então indicadas para condições de carga variável devido à sua capacidade de receber e fornecer energia. Estas fontes estão ligadas entre si através de conversores eletrónicos de potência e partilham o mesmo barramento CC.

O motor de tração é tipicamente elétrico e é também ligado ao mesmo barramento CC por meio de um conversor. Estes conversores de potência podem também eles ser unidirecionais ou bidirecionais, dependendo da necessidade de utilizar o motor elétrico como gerador.

Em [12], o sistema ICE e gerador estão ligados unicamente à bateria através de um conversor retificador, tal como ilustrado na figura 2.2. Deste modo, a arquitetura do veículo é essencialmente um veículo elétrico com uma fonte de energia para o carregamento das baterias.

Optando por projetar o sistema como ilustrado na figura 2.1a, é possível reduzir o tamanho das baterias em comparação com a figura 2.2. A figura 2.3 mostra mais detalhadamente os componentes do sistema.

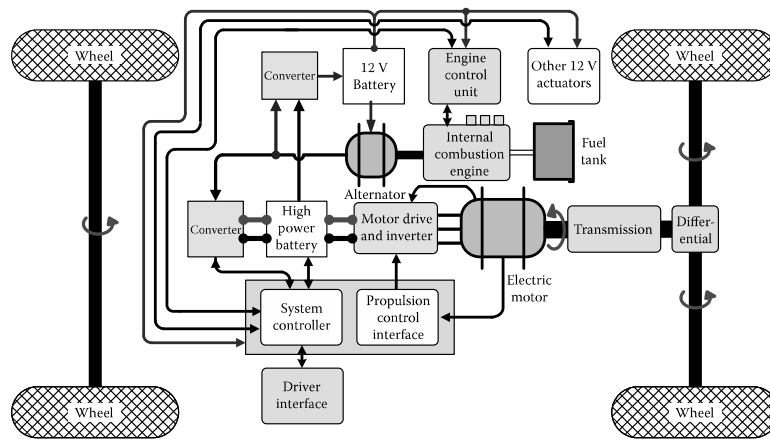


Figura 2.2: Veículo com arquitetura série [12].

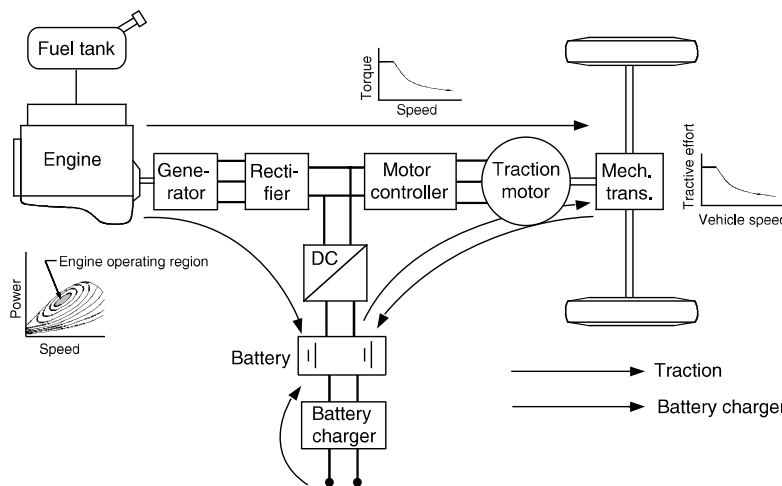


Figura 2.3: Veículo com arquitetura série [11].

Na figura 2.3, as fontes de energia partilham um barramento CC que por sua vez é partilhado também com o motor elétrico de tração.

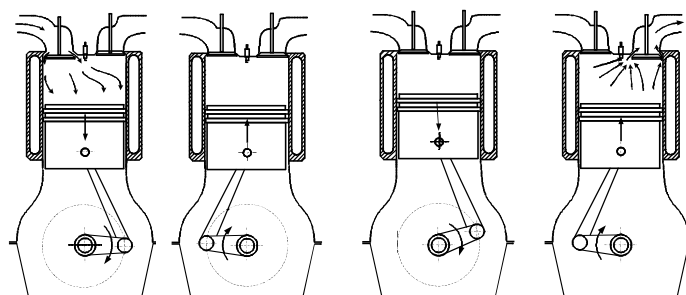
2.3.1.1 Máquinas associados

As máquinas associadas ao projeto do veículo híbrido série são de dois tipos: máquinas elétricas e motores de combustão interna (ICE - *internal combustion engine*).

Motor de combustão interna O motor de combustão interna produz energia mecânica a partir de combustível fóssil. Este tipo de motor proporciona um bom desempenho e um tempo de operação longo, utilizando as vantagens do combustível de petróleo que tem alta densidade energética. Contudo, o ICE é pobre em economia de combustível e consideravelmente poluente. Algumas das suas grandes desvantagens baseiam-se no facto e a sua característica de eficiência de combustível

ser incompatível com as exigências do acionamento; dissiparem muita energia cinética durante travagens o que é muito frequente em zonas urbanas; e terem uma baixa eficiência [11].

Existem, maioritariamente, três tipos de motores de combustão: de quatro tempos (4S) a gasolina (ignição por faísca), de quatro tempos a gasóleo (ignição por compressão) e de dois tempos (2S) a gasolina [11, 14]. O motor a gasolina de quatro tempos é o mais frequente. O funcionamento deste motor é, como o próprio nome indica, realizado em quatro etapas distintas:



(a) Admissão. (b) Compressão. (c) Explosão. (d) Exaustão.

Figura 2.4: Representação dos quatro tempos do motor de quatro tempos a gasolina [11].

Admissão : A válvula de admissão é aberta e a de escape é fechada. O pistão tem um movimento descendente no cilindro o que permite a entrada para dentro do cilindro da mistura ar e combustível a partir da válvula de admissão.

Compressão : Ambas as válvulas de admissão e escape são fechadas e o pistão sobe no cilindro. À medida que o pistão se aproxima do topo do cilindro, a mistura é comprimida e a vela de ignição produz uma faísca para inflamar a mistura de ar/combustível.

Explosão : devido à faísca para inflamar a mistura, a chama propaga-se por toda a mistura. A temperatura e a pressão aumentam o que faz mover o pistão para baixo. É nesta fase do ciclo que se gera potência.

Exaustão : A válvula de escape é aberta, e quando o pistão se desloca para cima no cilindro, os gases restantes no cilindro são expulsos. No final deste curso, a válvula de escape fecha-se.

Máquinas elétricas As máquinas elétricas podem funcionar como um motor ou como um gerador. Um motor elétrico converte energia elétrica em energia mecânica, enquanto o gerador elétrico realiza a conversão de forma inversa. As máquinas elétricas, para aplicações em veículos, podem ser divididas em dois tipos distintos: máquinas com comutador e máquinas sem comutador. Na figura 2.5 estão representadas as características ideais de um motor para uma aplicação em HEV [15].

As máquinas com comutador são as tradicionais máquinas DC. Estas máquinas têm um controlo simples e o seu comutador atua como um inversor robusto. Contudo, a sua construção apresenta problemas devido à necessidade de manutenção das escovas e anéis e, portanto, é menos fiável. A máquina DC é, no entanto, um bom candidato para aplicações de baixa potência, sendo contudo menos atrativa para aplicações em HEV [15, 16, 17].

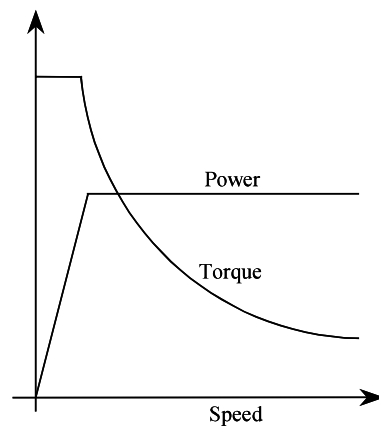


Figura 2.5: Característica ideal para uma aplicação em HEV do binário e potência em relação à velocidade [15].

Por outro lado, as máquinas sem comutador mais atrativas em aplicações de HEV são: máquinas de indução (IM), máquinas síncronas de ímãs permanentes (PMSM) e as máquinas de relutância comutada (SRM). Estas máquinas praticamente não necessitam de manutenção e são mais fiáveis do que as máquinas DC.

As máquinas de indução são muito conhecidas pela sua construção simples. São máquinas com fiabilidade, robustez, baixa manutenção, baixo custo e capacidade de operar em ambientes hostis. A figura 2.6 mostra as características típicas desta máquina.

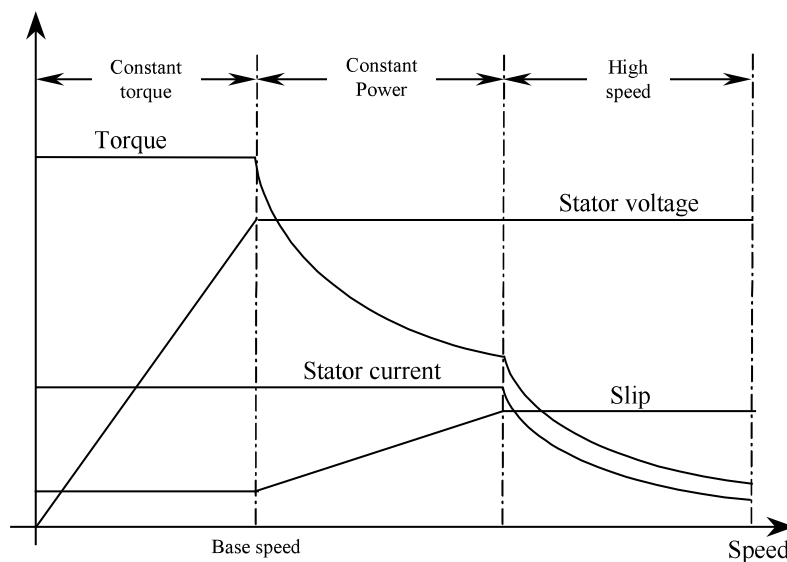


Figura 2.6: Diferentes características dos motores de indução [15].

Contudo, as máquinas IM têm algumas desvantagens em comparação com os motores PMSM e SRM. As principais desvantagens são: perdas elevadas, menor eficiência, menor fator de potência, e a existência de rotura do binário na região de potência constante. Estas desvantagens

dificultam a aplicação deste tipo de máquinas em HEV, pois podem ter um impacto considerável sobre o desempenho do veículo [15, 16, 17].

As máquinas de ímanes permanentes são o resultado da substituição dos enrolamentos de campo de um motor de indução por ímanes permanentes. Deste modo, as escovas e os anéis de deslizamento são dispensáveis eliminando assim as perdas de cobre dos enrolamentos. As principais vantagens destas máquinas tem origem no uso de ímanes permanentes (IP). Os IP de alta energia formam o campo magnético, sendo que desta forma o peso e volume total podem ser reduzidos de forma significativa para um dado binário, o que resulta numa densidade de binário maior. Devido também aos IP, não existem perdas de cobre do rotor, o que leva a uma eficiência inerente superior ao que os IM podem alcançar. Na figura 2.7 encontra-se a curva de característica binário-velocidade de uma máquina de ímanes permanentes.

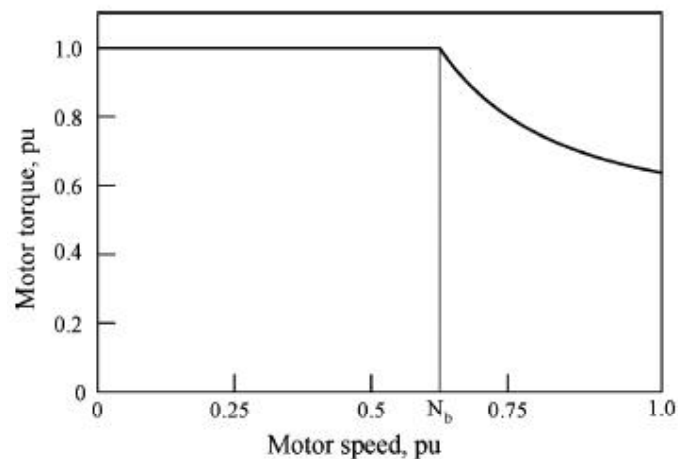


Figura 2.7: Característica binário-velocidade de uma máquina de ímanes permanentes [17].

Contudo, este tipo de máquinas tem uma região de potência constante pequena. Com objetivo de aumentar a gama da velocidade e melhorar a eficiência, o conversor de potência pode ser controlado acima da velocidade base da máquina. Todavia, numa gama de velocidade muito alta, a eficiência pode decair e a máquina desmagnetizar durante a operação [15, 16, 17].

Este tipo de máquinas são assim as mais utilizadas, hoje em dia, para aplicações em HEV.

As máquinas de relutância ainda estão pouco utilizadas, mas têm vindo a ser alvo de interesse crescente para aplicações na área automóvel, uma vez que a sua característica binário-velocidade é muito próxima do ideal para este tipo de aplicações. Na figura 2.8 está representada esta característica. A construção destas máquinas é simples e robusta e algumas das suas vantagens são a tolerância a falhas, o controlo simples e a capacidade de operar a altas velocidades.

Uma grande vantagem das SRM em relação a todas as restantes máquinas é a sua capacidade de operar com uma gama de binário constante extremamente longa. Contudo existem algumas desvantagens que para muitas aplicações superam as vantagens. As desvantagens são basicamente geração de ruído acústico, a oscilação do binário, a topologia do conversor é especial, excessiva oscilação de corrente na alimentação, geração de ruído eletromagnetismo interferente (EMI).

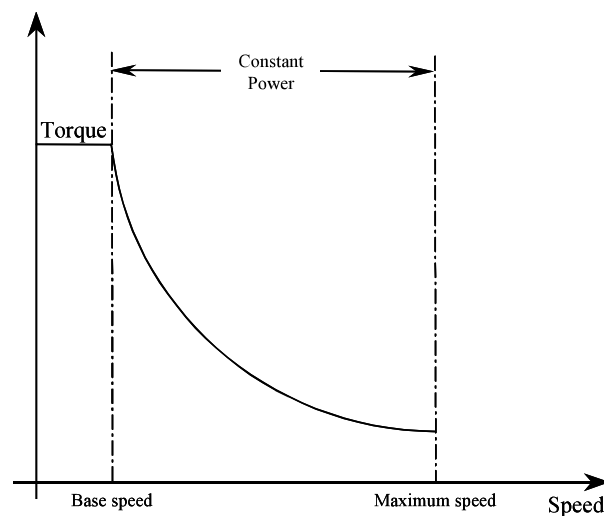


Figura 2.8: Curva de característica binário-velocidade de um SRM [15].

Apesar destas vantagens e desvantagens, as máquinas de relutância podem ser um candidato para aplicações de HEV. [15, 16, 17].

2.3.1.2 Fontes de armazenamento de energia associadas ao projeto

As fontes de armazenamento de energia associadas ao projeto são as baterias e os supercondensadores. Estas fontes podem ser descarregadas e carregadas e são utilizadas em aplicações de veículos tanto híbridos como elétricos.

Baterias As baterias armazenam energia em forma eletroquímica. Na tabela 2.2 são identificadas os diferentes tipos de baterias, bem como uma comparação de algumas das suas principais características.

Dentro destes diferentes tipos, as que têm atualmente mais destaque são as baterias de polímeros de lítio. Estas baterias são a melhor escolha para aplicações em veículos elétricos, uma vez que apresentam uma boa densidade energética, boa longevidade e elevada eficiência [19, 20].

As baterias são compostas por células unidas em série, para aumentar a tensão fornecida, e/ou em paralelo, para aumentar a corrente do conjunto de células. Pode-se então definir que a tensão de uma bateria é a soma das tensões de todas as células agrupadas em série, e a corrente que fornece corresponde à soma das correntes do número agrupamentos de células existentes em paralelo.

A capacidade, C , representa a energia armazenada e normalmente é expressa em Ampere-hora (Ah). A Energia específica é a quantidade total de energia, em watt-hora (Wh), que a bateria pode fornecer por quilograma a uma dada corrente de descarga. A densidade energética, por sua vez, é a quantidade de energia em Wh que a bateria pode fornecer por unidade de volume, m^3 , numa determinada condição de descarga. A potência específica é a quantidade total de potência, em Watt, que a bateria pode fornecer por Kg para uma determinada taxa de descarga. E por fim, a densidade de potência é a potência máxima em W que a bateria pode fornecer numa descarga

Tabela 2.2: Comparação qualitativa entre os diferentes tipos de baterias [18].

Características	Tipos de bateria					
	Pb - Acid	NiCd	NiMH	Li - ion	Li-poly	Zebra
Custo	Baixo	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado	Baixa
Densidade energética	Má	Mecia	Boa	Muito boa	Muito boa	Boa
Densidade de potência	Má	Boa	Media	Muito boa	Muito boa	Baixa
Ciclos de vida	Baixo	Alto	Alto	Alto	Alto	Não disponível
Reciclagem	Possível	Possível (riscos elevados)	Possível	Possível (alguns riscos)	Possível (pouco riscos)	Não disponível
Risco de sobre aquecimento	Muito Reduzido	Reduzido	Medio	Alto	Medio	Não disponível
Elementos tóxicos	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Segurança de utilização	Boa	Má	Boa	Má	Média	Altamente segura
Efeito da temperatura nos ciclos de vida	Baixo	Muito alto	Alto	Medio	Medio	Não disponível
Carga rápida	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não disponível
Manutenção	3 a 6 meses	30 a 60 dias	30 a 60 dias	Não é necessário	Não é necessário	Não disponível

específica por unidade de volume. Esta última é uma característica especialmente importante para veículos elétricos, pois influenciará a capacidade de aceleração do veículo.

As baterias possuem também alguns parâmetros que permitem a sua caracterização. O estado de carga, SOC(%), é a relação de energia disponível na bateria com a energia máxima possível que ela pode armazenar. Esta relação permite saber a quantidade de energia ainda presente na bateria que por ela pode ser fornecida e, assim, estimar o tempo de funcionamento que esta ainda vai permitir ao sistema. Permite também estimar o estado atual de funcionamento da bateria, isto é, se esta precisa ou não de ser substituída, e pode ser utilizado pelos sistemas de controlo de forma a evitar danos na bateria. Contudo, a estimacão do SOC depende de condições não lineares internas e externas à bateria.

O ciclo de vida da bateria é outro parâmetro importante, e corresponde à contagem do número total de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada durante a sua vida útil. Quando a bateria não consegue ser carregada acima de 80% do seu estado de carga nominal, considera-se que a sua vida útil chegou ao fim.

O estado de vida (SOH), pode ser definido como a relação entre o estado atual da bateria ou célula e o estado inicial da mesma. Esta relação indica se a bateria ou célula está a chegar ao fim do seu ciclo de vida. Esta relação é apresentada em percentagem.

De entre vários outros fatores, as baterias estão sujeitas ao efeito da amplitude da corrente de descarga, efeito da temperatura, de envelhecimento, de recuperação, etc [18, 1, 2, 6, 21].

Quando comparadas aos supercondensadores, revelam uma baixa densidade de potência e

comportamento dinâmico inferior [22], mas com uma maior densidade de energia, podendo armazenar até 30 vezes mais carga do que os supercondensadores [23].

Supercondensadores Os condensadores comuns armazenam energia elétrica por acumulação e separação física de diferentes cargas. Estas cargas são armazenadas em duas placas, os eletrodos, paralelos entre si e separados por um material dielétrico. Os supercondensadores são assim condensadores especiais capazes de armazenar uma quantidade substancial de energia a uma tensão reduzida. Isto é possível com uma grande área de superfície e uma alta permissividade dielétrica [3]. A energia armazenada no supercondensador pode ser medida em Coulomb ou A*s pela equação 2.1.

$$Q = CV = \frac{A\varepsilon}{d}V \quad (2.1)$$

onde A corresponde à área das placas, ε corresponde à permissividade do dielétrico e d à distância entre as placas.

O modelo do circuito equivalente de um supercondensador é representado na figura 2.9. O circuito consiste num condensador C que representa a capacidade, uma resistência R_{ESR} que representa a resistência de carga ou descarga, e uma resistência R_{EPR} que simboliza as perdas de auto-descarga [24].

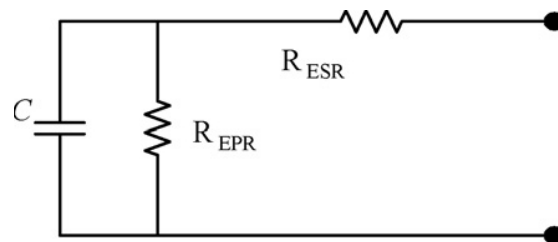


Figura 2.9: Modelo do circuito equivalente de um supercondensador [24].

A constante de tempo dos ciclos de carga e descarga corresponde a CR_{ESR} , enquanto a constante de tempo de auto-descarga é CR_{EPR} . Estes valores podem ser determinados recorrendo a testes de carga e descarga a uma corrente constante. Um exemplo teórico destes testes é representado na figura 2.10. Aqui, pode obter-se a capacidade e a resistência R_{ESR} a partir das equações 2.2, 2.3 e da figura 2.10 [25].

$$R_{ESR} = \frac{\Delta V}{I} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{I}{\Delta V_0 / \Delta t_0} \quad (2.3)$$

Os supercondensadores apresentam várias vantagens em relação às restantes fontes de energia. Possuem uma eficiência de carga/descarga elevada e a perda de energia na forma de calor, durante cada ciclo, é relativamente baixa, podendo ainda ser carregados num curto período de

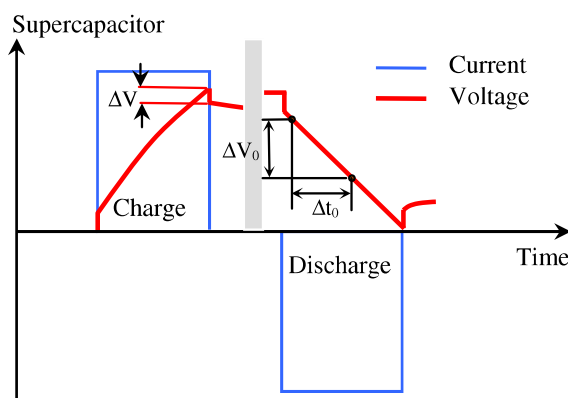


Figura 2.10: Método de identificação de C e R_{ESR} [25].

tempo. Possuem também uma alta densidade de potência, elevada eficiência e um tempo de vida muito superior às baterias no que a ciclos de carga e descarga diz respeito [23, 26]. Um bom comportamento dinâmico também é uma característica dos supercondensadores [22]. Uma vantagem dos supercondensadores, para aplicações em automóveis, é que suportam a regeneração de energia com elevada eficiência durante as desacelerações e fornecem a energia armazenada durante as acelerações [6].

No entanto, os supercondensadores apresentam uma baixa densidade de energia quando comparados com as baterias [27]. Têm também baixas tensões de células, sendo que para se obter um supercondensador com uma tensão superior é necessário juntar várias células em série, o que eleva consideravelmente o custo global do sistema.

Comparação das baterias e supercondensadores Depois da abordagem realizada sobre estes tipos de fontes de armazenamento, é então possível fazer uma comparação baseada em características de interesse para veículos elétricos e híbridos. Existem alguns avanços no desenvolvimento de dispositivos de armazenamento de energia que oferecem boas promessas em termos de densidade de energia e de potência, contudo nenhum deles tem a combinação perfeita de todas essas características, já aqui discutidas no decorrer deste documento. Na figura 2.11 é possível observar os próximos desenvolvimentos de alguns destes dispositivos [3, 28].

Uma vez que nenhum dispositivo existente é capaz de alcançar todos os requisitos de diferentes aplicações em veículos, é considerado então o conceito de combinar diversos dispositivos diferentes para obter as melhores características de cada um nos diversos regimes de funcionamento. Assim, são considerados como parâmetros de escolha o tempo de resposta às exigências de potência, a capacidade de armazenar energia, entre outros. A figura 2.12 compara as FC, baterias e SC nos diferentes aspetos.

2.3.1.3 Topologias de conversores e controladores associados

Existe a necessidade de realizar uma interface entre as fontes de energia e o sistema de tração do veículo, respeitando os requisitos do sistema. Uma vez que os supercondensadores apresentam

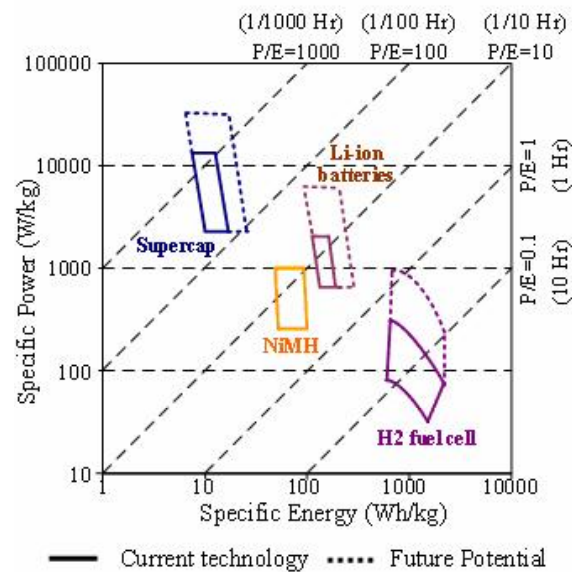


Figura 2.11: Comparação de características de alguns dispositivos de armazenamento e/ou produção de energia, bem como a sua perspectiva de desenvolvimento [28].

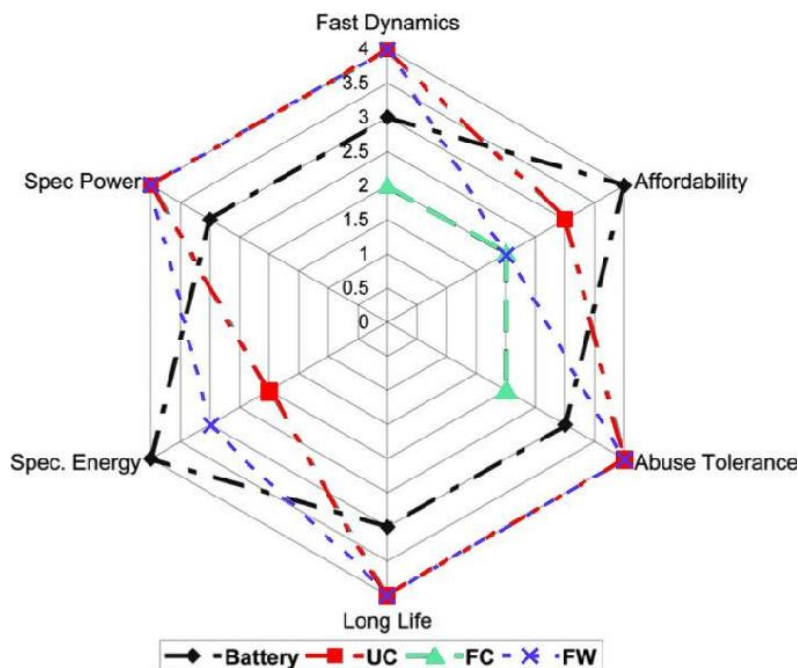


Figura 2.12: Comparação de atributos de fontes de armazenamento de energia (adaptado de [3]).

baixas tensões, e as baterias necessitam de usar uma baixa tensão aos seus terminais para que a sua resistência interna seja o mais pequena possível, é necessário um conversor DC/DC elevador para ligar estas fontes a um barramento CC comum. Estas fontes podem também ser carregadas, o que implica que os conversores associados sejam bidirecionais.

Em relação ao ICE, este utiliza um gerador acoplado para converter energia mecânica em elétrica. Contudo, é também necessário um conversor AC/DC, também denominado de retificador,

para converter a energia de AC para DC. Este conversor é unidirecional, uma vez que o motor ICE é apenas uma fonte energética e não uma fonte de armazenamento, não permitindo regenerar energia.

Por fim, é necessário um conversor DC/AC para o motor de tração. Este conversor irá converter a energia DC do barramento CC em energia AC quando este está a funcionar como motor. Quando o motor de tração estará a realizar regeneração, é necessário que o conversor suporte uma conversão inversa.

A existência de conversores entre as diversas fontes e o barramento CC que alimenta o sistema de tração proporciona um poder de controlo do fluxo de energia. Este controlo possibilita uma melhor gestão de energia melhorando a eficiência e rendimento do veículo.

Conversão dc/dc bidirecional Existem diversas topologias de conversores DC/DC bidirecionais. Em [29], são abordados os seguintes conversores: *Buck-Boost*, *Cúk* e *Full-bridge*. Destes três, o mais apropriado para o sistema é o conversor *Buck-Boost*. Este conversor satisfaz todos os requisitos necessários para os conversores DC/DC bidirecionais do sistema. Os restantes conversores também satisfazem esses mesmos requisitos, contudo possuem mais componentes eletrónicos, o que eleva o seu custo total.

A figura 2.13 apresenta o conversor DC/DC *Buck-Boost* convencional.

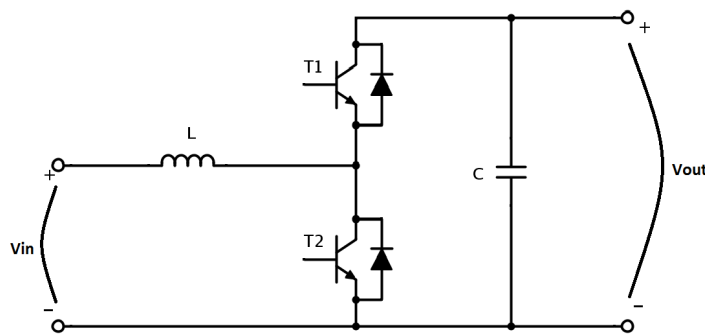


Figura 2.13: Conversor DC/DC bidirecional *Buck-Boost*.

A fonte de armazenamento de energia é colocada aos terminais de menor tensão, que na figura 2.13 corresponde a V_{in} . Consequentemente, o barramento CC corresponde aos terminais V_{out} , que tem um nível de tensão superior às fontes. A bobina L funciona como um tanque de armazenamento de corrente durante os processos do conversor.

Neste tipo de conversor existem dois tipos de conversão distinta devido à sua bidirecionalidade. Quando funciona em modo abaixador (*Buck*), o conversor entrega corrente do barramento CC para a fonte. Para realizar este processo, o interruptor T_1 é comutado enquanto o interruptor T_2 se mantém desligado. Quando o interruptor T_1 é desligado, o barramento CC injeta corrente na bobina L , e quando é ligado a bobina entrega a corrente que armazenou à fonte.

Por outro lado, quando funciona em modo elevador (*Boost*), o conversor descarrega a fonte e entrega a corrente ao barramento CC. Para isso, o interruptor T_1 permanece desligado e o interruptor T_2 comuta. No momento em que o interruptor T_2 se encontra ligado, a fonte injeta corrente na bobina, que por sua vez vai armazenando essa mesma corrente. Quando o interruptor T_2 é aberto, a energia acumulada na bobina é entregue ao barramento CC.

As fontes de armazenamento de energia, baterias e supercondensadores, podem ser combinadas com os conversores DC/DC de diversas formas. A ligação em paralelo direta de fontes é a topologia mais convencional [30]. Na figura 2.14 está representada uma topologia simples em que as fontes são ligadas paralelamente, e de seguida apresenta um conversor DC/DC de dois quadrantes em que a sua saída é o barramento. A bateria e o supercondensador têm sempre a mesma tensão, sendo no entanto que a bateria deve carregar o supercondensador e fornece a potência exigida pela carga [30, 31]. O sistema de controlo avalia os valores medidos instantaneamente da corrente da carga e das fontes, e aciona o modo de operação mais adequado. Esta topologia é mais adequada a uma condução urbana de baixa velocidade e com frequentes paragens.

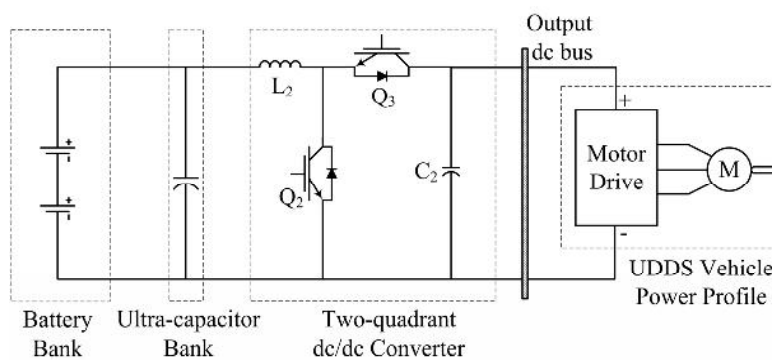


Figura 2.14: Sistema passivo em cascata baterias/supercondensadores [30].

Uma outra topologia semelhante, liga o supercondensador diretamente ao barramento CC, como é ilustrado na figura 2.15. Esta topologia apresenta vantagens em relação à anterior. O supercondensador suporta os picos de potência que vêm da carga ou que por ela sejam solicitados. Deste modo, é possível tirar partido das vantagens do supercondensador, poupando a bateria destes picos. Estando também a bateria ligada a um conversor, a tensão desta pode ser menor do que a do supercondensador, reduzindo o custo total. [22].

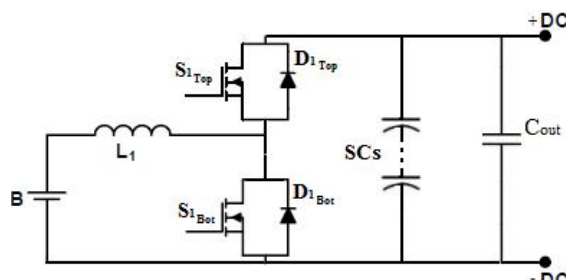


Figura 2.15: Topologia passiva em cascata de bateria e condensador com buck-boost [2].

A topologia representada na figura 2.16 é um melhoria das tipologias passivas anteriores. A corrente da bateria pode ser controlada de forma mais eficiente, quando comparado com as ligações passivas. A bateria fornece energia média à carga, e o supercondensador proporciona potência instantânea à carga, recuperando rápido de carregamentos de travagem regenerativa. A desvantagem desta topologia centra-se no facto de não ser possível carregar a bateria por travagem regenerativa nem pelo supercondensador, devido ao conversor *boost* unidirecional [30, 31].

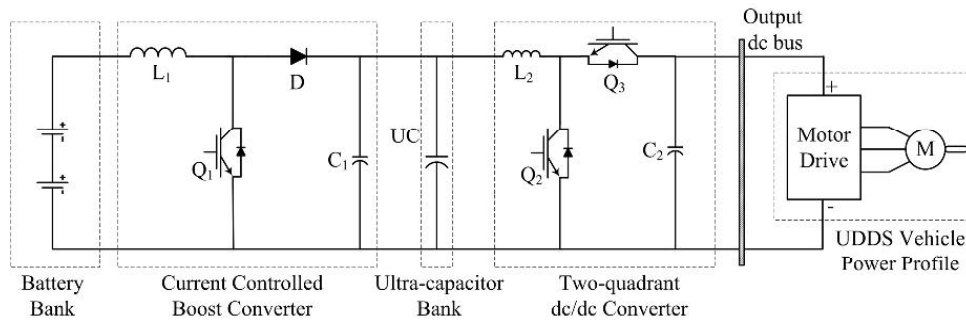


Figura 2.16: Sistema ativo em cascada bateria/supercondensador [30].

Na figura 2.17 é apresentada uma topologia em que as baterias e o supercondensador são ligados ao barramento CC em paralelo, interligados por conversores bidirecionais. As tensões das fontes são elevadas quando o sistema de tração pedir, e são baixadas para condições de carregamento. Durante a travagem regenerativa, são fornecidos ao barramento valores altos de potência. Uma vez que as baterias não suportam altas correntes de carga, esta energia é absorvida pelos SC não danificando as baterias. A direção do fluxo das fontes pode ser controlado separadamente, oferecendo flexibilidade à gestão de energia [2, 6, 22, 31].

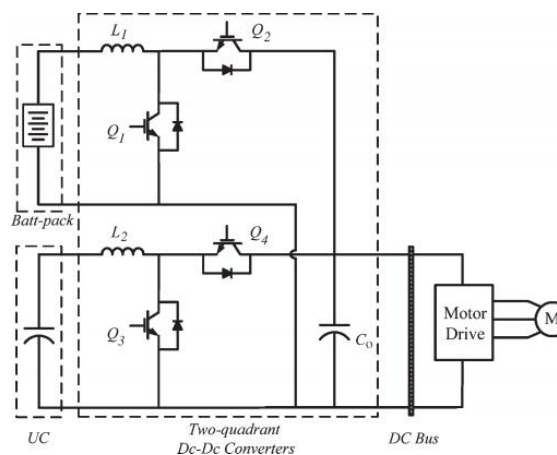


Figura 2.17: Sistema ativo de bateria e condensador em paralelo [31].

Similarmente à topologia da figura 2.18, é possível integrar uma outra fonte: células de combustível. Solero L. apresenta um estudo [6] com uma FC, baterias e SC. Também nesta topologia são usados conversores bidirecionais de forma a que possam fornecer e receber energia. De notar

que o conversor da célula de combustível é apenas unidirecional, uma vez que estas também não recebem energia do barramento.

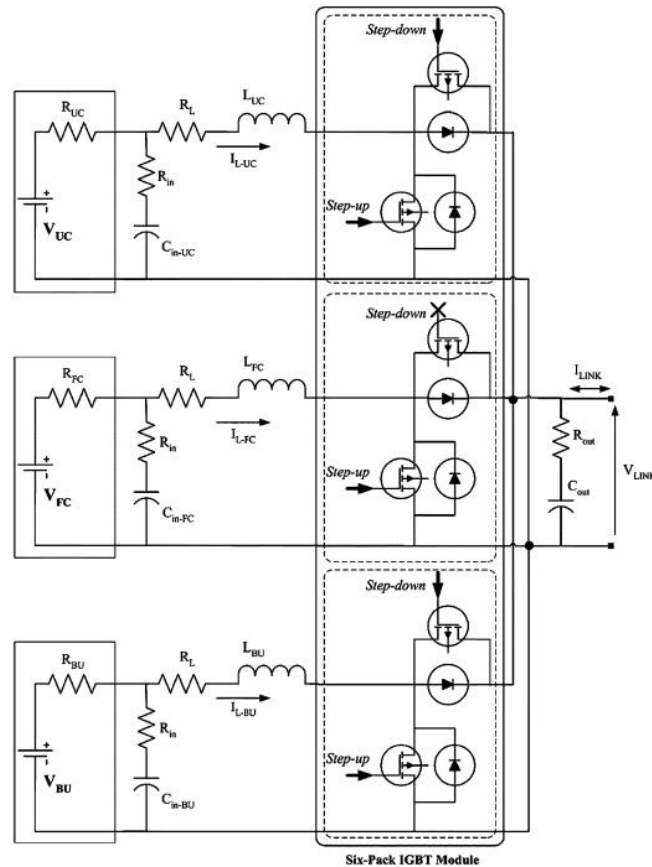


Figura 2.18: Topologia proposta de um conversor de potência de múltiplas entradas [6].

Uma outra topologia de múltiplas entradas é proposta em [31], ilustrada na figura 2.19. Ambas as fontes, baterias e supercondensadores, são ligados a uma bobina comum por interruptores paralelos. Os díodos em série com os interruptores são projetados para evitar curto-circuitos entre as fontes. É possível a adição de mais fontes, sendo estas ligadas em paralelo às restantes e à bobina comum. Contudo, a estratégia de controlo e a gestão de fluxo de energia tornam-se mais complexos [31].

Também em [31], é proposta uma topologia híbrida de dispositivos de armazenamento de energia, ilustrada na figura 2.20. Esta topologia liga o supercondensador diretamente ao barramento, sendo este de tensão superior para alimentar os picos de potência exigidos pelo sistema de tração. A bateria, com uma tensão muito mais baixa, é ligada por um conversor ou por um diodo de potência. Esta topologia pode operar em quatro modos de operação distintos: baixa potência, alta potência, travagem e aceleração. O supercondensador fornece energia quando é pedida baixa energia, e as baterias fornecem quando este pedido energético aumenta. A travagem regenerativa carrega o supercondensador para carregamentos rápidos, ou para ambas as fontes para carregamentos menos rápidos [31].

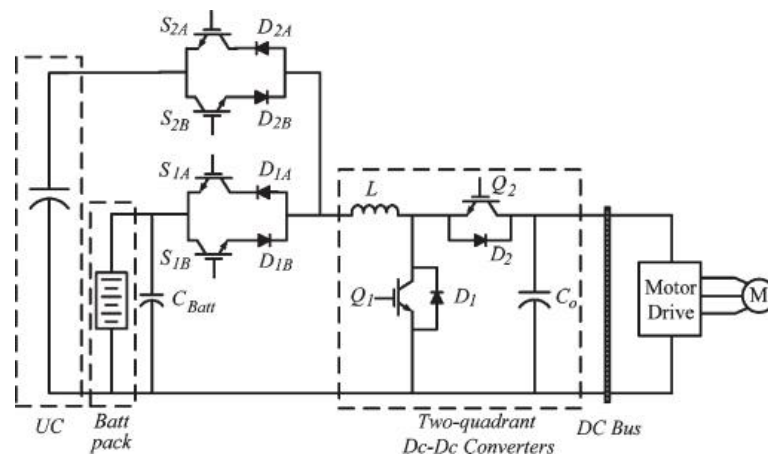


Figura 2.19: Sistema de múltiplas entradas (bateria/supercondensador) [31].

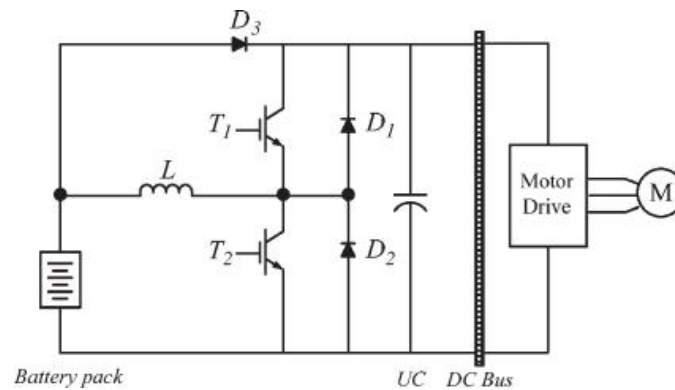


Figura 2.20: Topologia híbrida proposta para fontes de armazenamento de energia [31].

Em interfaces sem conversão de energia, e acoplando diretamente as fontes e unidades de armazenamento de energia ao barramento, acabam por ser simples e por ter um comportamento limitado.

Os conversores e controlo associado são responsáveis pela gestão de fluxo de energia num veículo para cada modo de operação. Portanto, é necessário proceder ao seu estudo para que possa ser feita a implementação da solução que melhor cumpra os requisitos do veículo. Na tabela 2.3 é possível observar uma comparação de todas as topologias mencionadas neste capítulo [6].

Estas topologias foram as mais abordadas e aprofundadas nesta revisão de literatura. A topologia a ser escolhida deve ter em conta a quantidade de componentes que utiliza e deve ser o mais eficiente possível, obedecendo aos requisitos de bidirecionalidade já aqui descritos.

Conversão dc/ac trifásica Este conversor é tipicamente chamado de inversor. É responsável por transformar tensão e corrente DC em AC, e vice-versa. O inversor é necessário para a ligação do barramento CC ao motor elétrico trifásico de tração. As topologias dos inversores podem ser

Tabela 2.3: Comparação das tipologias.

	$V_{bateria} vs V_{SC}$	Interruptores	Díodos	Controlo	Travagem Regenerativa
Figura 2.14	$V_{bateria} = V_{SC}$	2	0	Menor controlo das fontes	Baterias
Figura 2.15	$V_{bateria} < V_{SC}$	$2n^{(1)}$	0	Menor controlo do SC	
Figura 2.16	$V_{bateria} < V_{SC}$	$2 + n^{(1)}$	n	Menor controlo das baterias	SC
Figura 2.17	$V_{bateria} \neq V_{SC}$	$2n$	0	Menos complexo	Baterias e/ou SC
Figura 2.18	$V_{bateria} \neq V_{SC}$	$2n$	0	Menos complexo	Baterias e/ou SC
Figura 2.19	$V_{bateria} \neq V_{SC}$	$2 + 2n$	$2n$	Mais complexo	Baterias e/ou SC
Figura 2.20	$V_{bateria} < V_{SC}$	$2n^{(1)}$	$3n$	Menor controlo do SC	Baterias e/ou SC

⁽¹⁾ Sem contar os supercondensadores como fonte.

as seguintes: inversores de tensão (VSI) e inversores de corrente (CSI) [12]. A topologia mais comum é o inversor de tensão, ilustrado na figura 2.21.

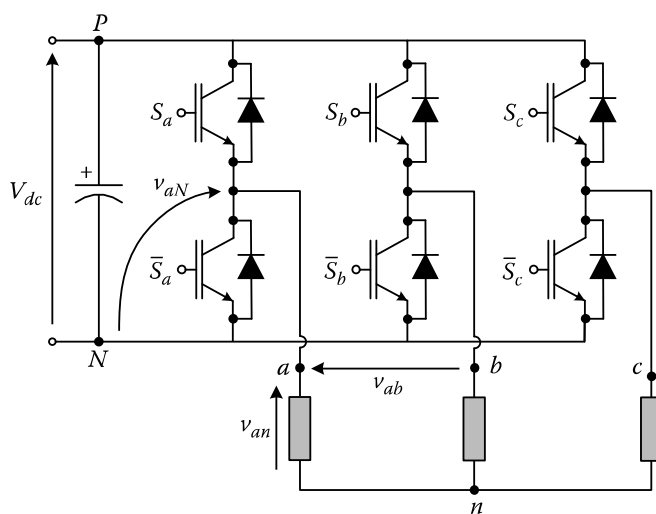


Figura 2.21: Retificador trifásico controlado a transístores [12].

O inversor da figura 2.21 é composto por três braços inversores. A tensão à saída de cada braço do inversor pode ser determinada pela equação 2.4 [12].

$$v_{xN} = S_x V_{dc}, \quad S_x \in [0, 1] \quad x = a, b, c \quad (2.4)$$

Na equação 2.4, V_{DC} corresponde à fonte contínua, v_{xN} corresponde à tensão em v_{aN} , v_{bN} ou

v_{cN} , e S_x aos interruptores S_{aN} , S_{bN} ou S_{cN} respetivamente, de acordo com a figura 2.21. Exemplificando com o braço a , quando $S_a = 1$ o interruptor superior do braço encontra-se ligado e o inferior desligado, sendo a tensão do braço $v_{aN} = V_{DC}$. Caso $S_a = 0$ então o interruptor superior do braço é desligado e ligado o inferior, tornando assim a tensão do braço $v_{aN} = 0$. Escrevendo todas as combinações possíveis dos estados de condução dos três braços, é possível concluir que existem 8 estados distintos possíveis de comutação. Na figura 2.22 é possível comparar os oito estados de comutação do inversor.

Switching State	Gating Signals			Output Voltage			Space Vector
	S_a	S_b	S_c	v_{aN}	v_{bN}	v_{cN}	v_s
1	0	0	0	0	0	0	$V_0 = 0$
2	1	0	0	V_{dc}	0	0	$V_1 = \frac{2}{3} V_{dc}$
3	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	0	$V_2 = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(\pi/3)}$
4	0	1	0	0	V_{dc}	0	$V_3 = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(2\pi/3)}$
5	0	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	$V_4 = \frac{-2}{3} V_{dc}$
6	0	0	1	0	0	V_{dc}	$V_5 = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(4\pi/3)}$
7	1	0	1	V_{dc}	0	V_{dc}	$V_6 = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(5\pi/3)}$
8	1	1	1	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}	$V_7 = 0$

Figura 2.22: Estados de comutação de um inversor trifásico de tensão de dois níveis [12].

Conversão ac/dc trifásica Existem dois grandes tipos de conversores AC/DC trifásicos: controlados e não controlados. Os conversores AD/DC não controlados são chamados de retificadores trifásicos a díodos. Por sua vez, os controlados podem ser a tístores ou transístores.

Este conversor é utilizado para ligar o gerador trifásico, que é alimentado pelo ICE, ao barramento CC. Como tal, a topologia mais adequada são os retificadores trifásicos a transístores, como o ilustrado na figura 2.23. Este tipo de conversor é equivalente ao inversor de tensão trifásico da figura 2.21.

No retificador da figura 2.23, o gerador é ligado às ligações trifásicas do lado esquerdo da mesma, e do lado direito encontra-se o barramento CC. O seu funcionamento, isto é, a comutação dos transístores é idêntico ao inversor de tensão trifásico.

2.3.1.4 Controlo associado ao sistema HEV

O principal desafio do projeto de um veículo elétrico híbrido centra-se na gestão de energia das múltiplas fontes de energia. Esta gestão depende de vários fatores: modos de operação da

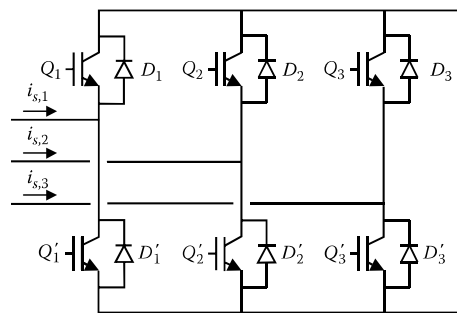


Figura 2.23: Retificador trifásico controlado a transístores [12].

condução, estado de carga das fontes de armazenamento, da energia de cada fonte, entre outros. O objetivo principal do controlo é conseguir a melhor eficiência global do sistema durante o uso do veículo. Para tal, o controlador tem que ser desenhado para tirar o melhor partido de cada unidade de energia. Desta forma, o controlador do veículo é a chave do processo do projeto do sistema [13, 32].

O principal objetivo das estratégias do controlo do veículo é satisfazer os seguintes pontos:

- Minimizar o consumo de combustível ou maximizar a sua economia;
- Minimizar as emissões de poluentes;
- Permitir uma condução simples e cómoda.

O controlador do veículo deverá decidir o binário exigido ao motor elétrico de tração, gerador, ICE e travagem mecânica de acordo com o binário pedido pelo condutor, velocidade do veículo e estado de carga da bateria [13]. Sendo um controlo com alguma complexidade, é necessário o uso de um controlo por hierarquias multi-nível.

A figura 2.24 apresenta um possível diagrama de blocos associado ao controlo do veículo estudado em [13]

Este controlo consiste em três blocos distintos: interprete de comando de condução, controlador do sistema do veículo e controlador eletrónico. No bloco *Driver command interpreter* é calculado o binário exigido pela condução a partir da velocidade desejada e da velocidade atual do veículo. A velocidade do veículo, por sua vez, é controlada pelo condutor a partir dos pedais do acelerador e travão. O bloco *Vehicle system controller* é já um pouco mais complexo e consiste no controlo geral do veículo. Na figura 2.25 está representado um possível diagrama de blocos para este sistema. Este bloco é necessário devido às diversas fontes presentes no veículo e, assim, à necessidade de dividir a potência necessária entre elas. O diagrama de blocos do controlo do veículo inclui ainda um último bloco *Electronic controller* que recebe a decisão de função de cada fonte num dado instante e controla os conversores associados às determinadas fontes, de forma a que estas recebam ou forneçam energia dependendo do bloco de controlo anterior [13].

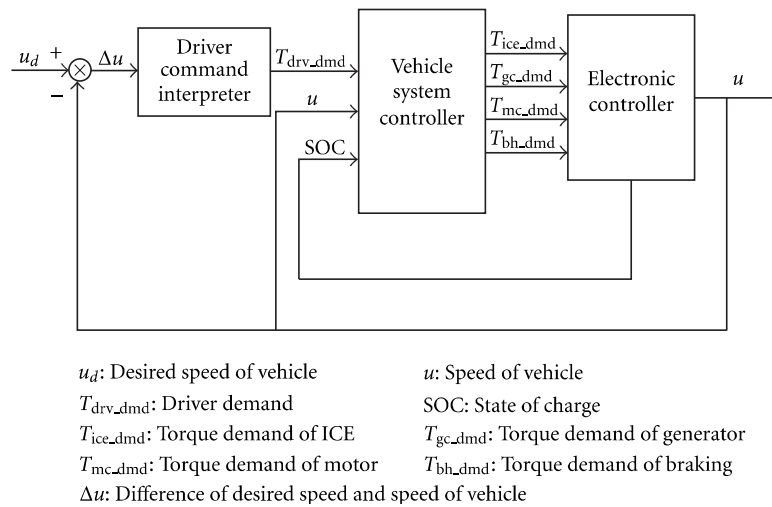


Figura 2.24: Diagrama de blocos do controlo do veículo [13].

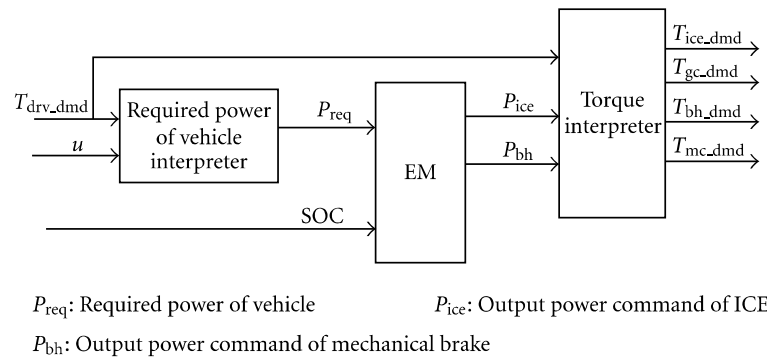


Figura 2.25: Possível diagrama de blocos associado ao Controlo do sistema do veículo - *Vehicle system controller* [13].

O último bloco de controlo, *Electronic controller*, inclui a unidade de controlo do ICE, a unidade de controlo do motor elétrico, a unidade de controlo do gerador, a unidade de sistema de controlo de travagem mecânica e o sistema de gestão das baterias.

A unidade de controlo do ICE faz com que o binário desejado à saída do ICE seja obtido de acordo com o comando efetuado. Uma vez que o motor de combustão num veículo elétrico híbrido série não está ligado diretamente à transmissão, a velocidade do ICE é controlada pelo binário exigido ao gerador que se encontra acoplado mecanicamente ao motor de combustão.

A unidade de controlo do motor elétrico faz o motor de tração operar com binário desejado. Geralmente são utilizadas técnicas de controlo vectorial, como FOC (*field-oriented control*) ou DTC (*direct-torque control*). Este motor também funciona como gerador em situações de travagem ou descida do veículo. A energia cinética destes casos, em vez de ser dissipada, é absorvida pelo motor e entregue às baterias ou supercondensadores.

A estratégia de gestão de energia do veículo, já mencionada, é baseada em regras para otimizar a eficiência do fluxo de energia em tempo real. Estas estratégias de gestão de energia são agrupadas

em dois grupos: métodos de controlo global ótimo e métodos de controlo instantâneo, e estão ilustradas na figura 2.26.

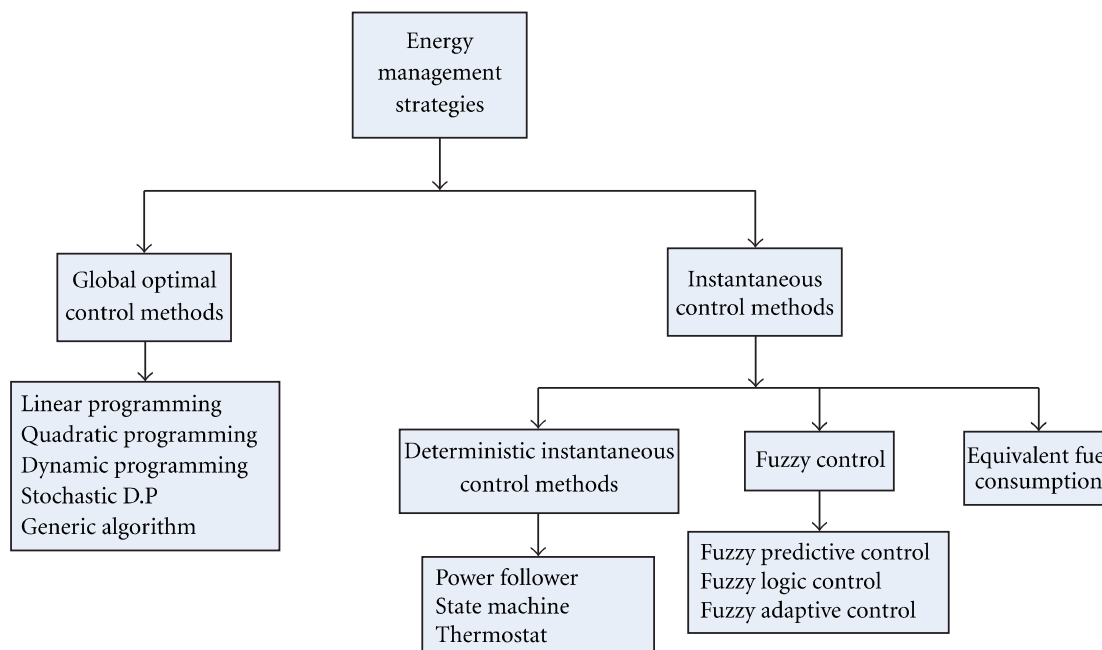


Figura 2.26: Estratégias de gestão de energia de um veículo [13].

Os métodos de controlo ótimo global são baseados na teoria de controlo ótimo. Têm como objetivo minimizar as perdas de consumo de combustível, ou perdas de energia, num dado período de tempo, permitindo encontrar soluções ótimas globais com a informação da condução com antecedência. Esta abordagem não pode ser usada em tempo real devido às suas elevadas exigências computacionais, tornando-a uma estratégia de controlo não utilizável, neste tipo de aplicações.

Os métodos de controlo instantâneo, por sua vez, só conseguem otimizar em tempo limitado, como o próprio nome indica. Embora estes métodos tenham a desvantagem de não optar, em algumas situações, pela solução ótima, acabam por conseguir combinações de vantagens suficientes [13].

Modos de funcionamento Para a realização de algumas estratégias de controlo é necessário analisar ao pormenor os modos de funcionamento que podem surgir na condução de um veículo. São listados de seguida os modos de operação de um veículo elétrico híbrido com configuração série, como o da figura 2.3.

O *drive train*, todo o sistema associado à tração, de um veículo híbrido série tem geralmente os seguintes modos de operação [11]:

1. **Puramente elétrico** : neste modo o motor de combustão é desligado e o motor de tração é apenas alimentado pelas baterias.
2. **Puramente mecânico** : neste modo as baterias são desligadas e o motor de tração é apenas alimentado pelas gerador que está acoplado ao ICE.

3. **Híbrido** : o motor de tração é alimentado tanto pelas baterias como pelo ICE em simultâneo.
4. **Tração pelo ICE e carregamento das baterias** : o ICE alimenta o motor de tração e carrega as baterias simultaneamente.
5. **Travagem regenerativa** : o motor de tração funciona como gerador e, com a energia mecânica proveniente da travagem ou desaceleração do veículo, carrega as baterias.
6. **Carregamento das baterias** : o motor de tração fica em *stand-by* e o ICE carrega as baterias.
7. **Carregamento híbrido** : o motor de tração a funcionar como gerador e o ICE carregam em simultâneo as baterias.

2.4 Conclusão

Neste capítulo foram abordados os principais aspetos, considerados importantes, associados aos elementos que serão utilizados nesta dissertação. Este estudo consistiu nas possíveis fontes energéticas de um HEV, em que foram definidas as mais apropriadas para o projeto em questão. Foi aqui discutido que a utilização de baterias, supercondensadores e um motor ICE com gerador acoplado foram uma excelente combinação de fontes, capazes de cumprir todos os requisitos.

Posteriormente, foram abordados os conversores necessários para o funcionamento do sistema. Com base então neste estudo, foi possível concluir sobre as necessidades de utilização de conversores DC/DC bidirecionais, sendo a topologia *Buck-Boost* uma das mais indicadas para a interação entre baterias, supercondensadores e barramento CC. Foi também abordado o conversor AC/DC trifásico associado ao gerador e o inversor bidireccional associado ao motor de tração.

Por fim, foram abordados os diferentes tipos de controlo do sistema global, entre eles a estratégia de máquinas de estados que será a solução selecionada para este projeto.

Capítulo 3

Dimensionamento do Sistema

Neste capítulo é realizado um estudo associado ao dimensionamento dos vários componentes da arquitetura funcional. Apresenta-se ainda uma análise dinâmica do veículo alvo de estudo. É realizada a análise da dinâmica do veículo, suportada pelas características do mesmo, usando um percurso europeu normalizado. É, também, efetuado o dimensionamento dos principais sistemas: sistemas de armazenamento, motor de tração, motor de combustão e gerador.

3.1 Introdução

A modelação da dinâmica do veículo e conseqüente estudo das necessidades energéticas associadas é essencial para o dimensionamento dos principais componentes do sistema: armazenamento de energia, motor de tração, motor de combustão e gerador. Este estudo é realizado com base num percurso normalizado misto: ciclo de percurso extra urbano (NEDC). Mais informação sobre este percurso pode ser consultada em [33]. Com este estudo é possível escolher devidamente o motor de tração com base na potência exigida pelo percurso ao veículo em questão. Ainda a partir deste estudo, com a energia necessária, é possível dimensionar as fontes de energia e de armazenamento da mesma.

O veículo em estudo trata-se de um *Smart Fortwo*. A primeira versão deste automóvel surgiu em 1998, tendo sofrido alterações constantes, passando também por uma linha puramente elétrica. Com o objetivo de transformar este veículo com motor de combustão num veículo híbrido é necessário conhecer as suas principais características. Estas são apresentadas na tabela 3.1 [34].

Tabela 3.1: Características do Smart fortwo Coupé 0.6i [34].

Característica	Valor	Unidade
Massa (inclui condutor)	1000	Kg
Área frontal	2.418	m ²
roda	0.283	m
Potência do motor	45 (33)	Hp (kW)

3.2 Análise Dinâmica do Veículo

Um veículo, parado ou em movimento, é sujeito a diversas forças [33]. Na figura 3.1 estão ilustradas as forças exercidas num veículo em movimento num plano inclinado. Existe assim a necessidade de entender a origem e a magnitude das forças. A força necessária para a movimentação do veículo a uma aceleração desejada é o somatório de todas as forças enumeradas no decorrer da presente secção. Com este estudo é possível prosseguir com dimensionamento dos principais elementos do sistema em estudo.

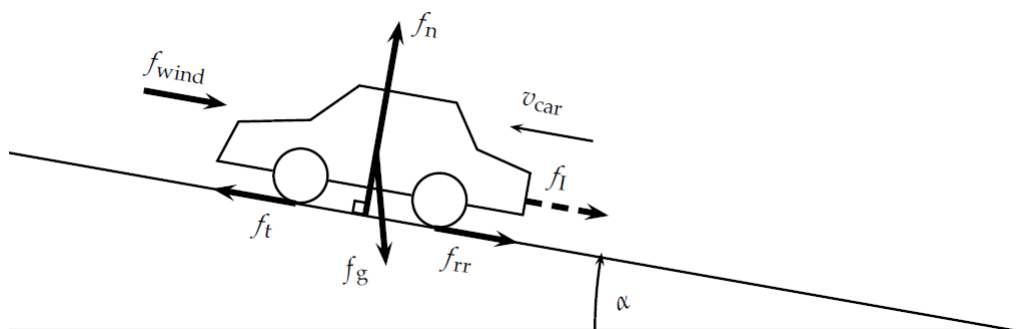


Figura 3.1: Análise dinâmica do veículo [33].

Da figura 3.1 é possível observar-se a resistência do ar f_{wind} , a inércia f_l , a força gravítica f_g , a reação normal f_n , a força de atrito cinético f_{rr} e a força total f_t . De notar que a análise destas forças serão realizadas num sistema de eixos cartesianos, onde no eixo x estão presentes as forças longitudinais a atuar no veículo, e no eixo y estão as forças normais ao veículo.

Resistência ao ar Um veículo em movimento está sujeito à resistência do ar. De forma simplificada, considera-se que esta resistência apenas se exerce na zona frontal do veículo. A resistência é expressa em forma de uma força, na figura 3.1 como f_{wind} , e pode ser calculada pela na equação 3.1.

$$f_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_{drag} A_{front} (v_{car} + v_{wind})^2 \quad (3.1)$$

Pela equação 3.1 é possível observar-se que a força de resistência do ar depende de duas constantes: densidade do ar, ρ_{air} , e coeficiente de fricção, C_{drag} . Também é perceptível a dependência da área frontal do veículo, A_{front} , da velocidade do veículo e do vento, respetivamente, v_{car} e v_{wind} .

Inércia A Inércia é a resistência de um corpo à alteração do seu estado de movimento ou repouso. A força resultante desta resistência, f_a , está representada na figura 3.1 como f_l , e pode ser calculada como na equação 3.2.

$$f_a = M_{car} \frac{dv_{car}}{dt} = M_{car} a_{car} \quad (3.2)$$

A força de aceleração depende da massa do veículo, M_{car} , e da aceleração ou variação de velocidade do veículo, a_{car} .

Força gravítica Qualquer corpo, em repouso ou movimento, é sujeito a uma força exercida pelo campo gravitacional de um objeto à sua superfície. Neste caso, o veículo é sujeito a uma força gravítica à superfície da Terra. Na equação 3.3 é possível obter a magnitude desta força que depende da massa do veículo, M_{car} , da aceleração da gravidade, g , e do ângulo de inclinação da superfície, α .

$$f_g = M_{car}g \sin(\alpha) \quad (3.3)$$

Pela terceira lei de Newton, sempre que um corpo A exerce uma força sobre um corpo B, simultaneamente o corpo B exerce uma força em sentido contrário sob o corpo A. Assim sendo, a força gravítica origina uma força normal ao objeto, representada na figura 3.1 por f_n , com a magnitude da equação 3.4.

$$f_n = M_{car}g \cos(\alpha) \quad (3.4)$$

Atrito cinético O atrito cinético é uma força de resistência ao movimento de um corpo devido ao contacto com uma superfície. No movimento do veículo, esta força é exercida entre os pneus do veículo e a estrada. Esta força é representada na figura 3.1 como f_{rr} , e pode ser calculada pela equação 3.5.

$$f_{rr} = M_{car}g \cos(\alpha)\mu_{rr} \quad (3.5)$$

Esta força depende do peso do veículo, $M_{car}g$, do ângulo de inclinação da superfície, α , e do coeficiente de resistência de rolamento, μ_{rr} .

Força total A força total, que é necessário exercer no veículo para garantir uma aceleração desejada numa superfície é dada pela equação 3.6.

$$f_t = f_a + f_g + \text{sign}(v_{car})f_{rr} + \text{sign}(v_{car} + v_{wind})f_{wind} \quad (3.6)$$

Após o cálculo da força total necessária, pode ser determinado o binário e velocidade que o motor de tração terá que exercer para originar esta força.

Potência A potência necessária na roda para que o veículo se movimente com a aceleração desejada é calculada a partir da equação 3.7

$$P_t = f_t v_{car} \quad (3.7)$$

Energia A energia que o veículo necessita durante o trajeto, provem da variação da potência ao longo do tempo e é determinada a partir da equação 3.8.

$$E = \int P_t(t)dt \quad (3.8)$$

Transmissão Depois de todas as componentes calculadas, é então possível calcular a potência necessária que o motor de tração terá que fornecer. A partir da equação 3.13 pode observar-se que a potência depende do binário e da velocidade no eixo do motor.

$$T_{transmissao} = f_t r_{wheel} \quad (3.9)$$

$$\omega_{wheel} = \frac{v_{car}}{r_{wheel}} \quad (3.10)$$

$$T_{eixo} = \begin{cases} \eta \frac{T_{transmissao}}{G} & \text{se } P_t < 0 \\ \frac{T_{transmissao}}{\eta * G} & \text{se } P_t \geq 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\omega_{eixo} = \omega_{wheel} G \quad (3.12)$$

$$P_{eixo} = T_{eixo} \omega_{eixo} \quad (3.13)$$

O percurso europeu normalizado está ilustrado no gráfico da figura 3.2. Este percurso é composto por um *start-and-stop* habitual e uma parte extra-urbana. O veículo alcança uma velocidade máxima de 120km/h, sendo a distância total de 11,2km durante 1180s.

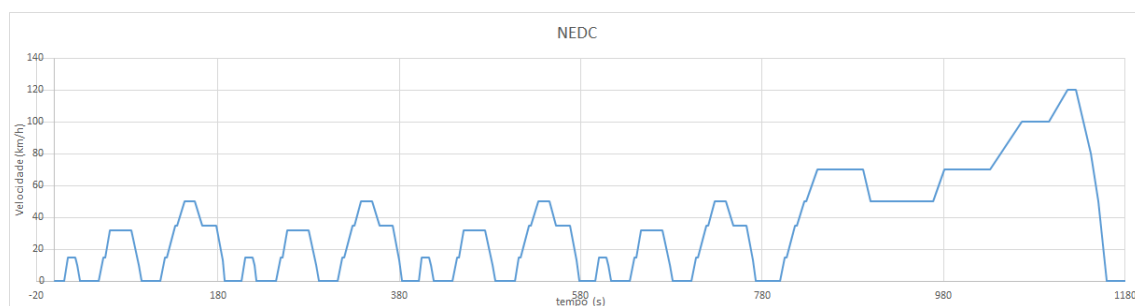
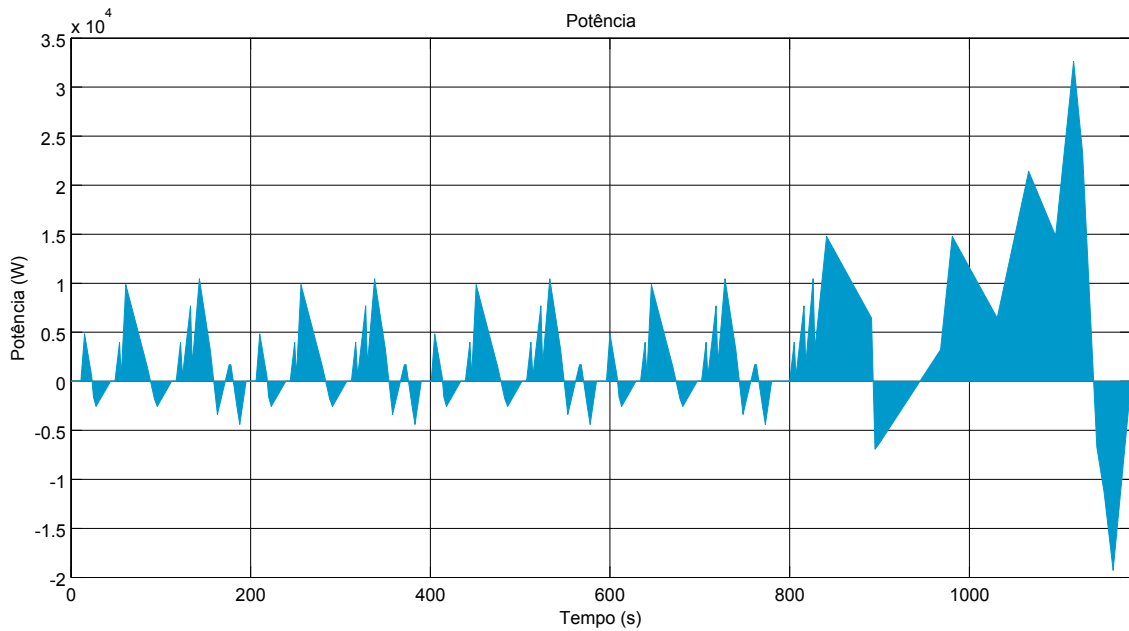


Figura 3.2: Ciclo de percurso extra urbano (NEDC) [33].

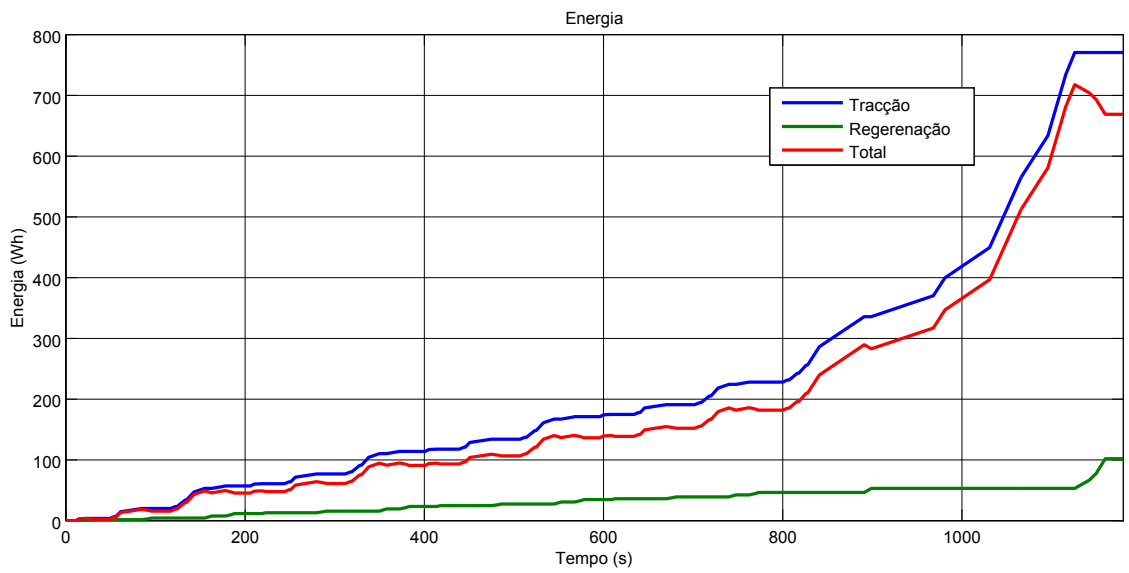
Na tabela 3.2 encontram-se os valores das constantes necessárias para a análise dinâmica do veículo.

Após a aplicação dos cálculos da análise dinâmica, utilizando a ferramenta *Simulink*, obtiveram-se os resultados da figura 3.3.

O desempenho do veículo é apresentado na figura 3.3, quando sujeito ao percurso da figura 3.2. Na figura 3.3a está representada a potência necessária em cada instante à tração. Na figura 3.3b é apresentada a energia necessária ao longo do tempo. Por observação dos gráficos, é perceptível a



(a) Potência necessária.



(b) Energia total necessária, cinzento, da tração, azul, da frenagem, laranja.

Figura 3.3: Análise.

Tabela 3.2: Parâmetros para a dinâmica.

Característica	Valor	Unidade
ρ_{air}	1.204	Kg/m^3
C_{drag}	0.3	
g	9.81	m/s^2
μ_{rr}	0.01	
v_{wind}	0	m/s
α	0	graus

necessidade de uma potência máxima superior a 30 kW e uma energia de consumo total superior a 700 Wh.

3.3 Dimensionamento do Motor de Tração

Tal como referido na secção 3.2, o motor de tração necessita de fornecer uma potência de pico de 33 kW.

O motor EMRAX 228 está neste momento disponível no DEEC, e cumpre as necessidades exigidas para esta aplicação. Ainda que a potência fornecida por este motor seja bastante superior à pretendida, o facto de estar disponível para utilização imediata faz com que seja a máquina escolhida para este projeto. Este motor é uma máquina síncrona de ímanes permanentes e as suas principais características estão listadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Características do EMRAX 228.

Característica	Valor	Unidade
$V_{alimentao}$	50 - 400	V_{dc}
P_{pico} (breves momentos)	100	kW
$P_{contnua}$ (depende do RPM)	30 - 50	kW
RPM_{MAX}	4000	RPM
I_{MAX} (breves momentos)	240	A_{rms}
$I_{contnua}$	115	A_{rms}
T_{MAX} (breves momentos)	240	Nm
$T_{contnuo}$	125	Nm
T/I	1,1	$Nm/1A_{phrms}$
η_n	93 - 96	%
$R_{int\ fase 25^{\circ}C}$	18	Ω
L_d	175	μH
L_q	180	μH
par de polos	10	
$Specific\ idle\ speed$	9,8	$RPM/1V_{dc}$

3.4 Dimensionamento do Gerador e do Motor de Combustão Interna

Gerador A escolha do gerador a utilizar deverá ser feita de acordo com o pior caso a que pode estar sujeito no que ao fornecimento de potência diz respeito. Esta situação ocorre quando o gerador tem que fornecer toda a potência exigida pelo motor de tração. Como já foi referido na secção 3.3 a potência máxima será de 37 kW. Uma vez que o gerador tem as mesmas exigências que o motor de tração, é admissível que a máquina selecionada seja a mesma, pelos mesmos motivos já anteriormente referidos. Assim, o gerador é uma máquina EMRAX 228. As características da máquina encontram-se na secção anterior, secção 3.3, na tabela 3.3.

Motor de Combustão Interna Sendo um dos objetivos o aproveitamento do máximo de componentes já existentes, o motor de combustão interna a utilizar será o original do veículo. Trata-se de um motor a gasolina de 600cm^3 com 45CV. Na tabela 3.4 estão enumeradas algumas das características do motor.

Tabela 3.4: Características do motor de combustão interna.

Característica	Valor
P	33 kW (45Hp) @ 5250 rpm
T	70/3000 Nm/rpm
v_{MAX}	135 Km/h
Consumo (cidade)	6,11 / 100km
Consumo (média)	4,9l / 100km

3.5 Dimensionamento das fontes de armazenamento de energia

3.5.1 Supercondensadores

Os supercondensadores selecionados são da *Maxwell* bcap 3000. Na tabela 3.5 é possível consultar as características do bcap 3000.

Os supercondensadores têm que ser capazes de conseguir armazenar toda a energia regenerada no pior caso. O pior caso situa-se na maior energia regenerada, na simulação do percurso já anteriormente mencionado. Na figura 3.3a é possível visualizar que esta situação ocorre na maior área do gráfico de desaceleração do veículo. A energia regenerada neste ponto é de 232 kJ. Utilizando as equações 3.14 e 3.15, que dependem da capacidade e tensão de cada célula, C_{cell} e V_{cell} , é possível obter o número de supercondensadores em série, n_{serie} e do número de strings, $n_{paralelo}$.

$$C_{total-sc} = C_{cell} \frac{n_{paralelo}}{n_{serie}} \quad (3.14)$$

$$V_{total-sc} = V_{cell} n_{serie} \quad (3.15)$$

Tabela 3.5: Características do supercondensador Maxwell bcap 3000.

Característica	Valor	Unidade
C	3000	F
$C_{minicial}$	3000	F
ESR_{DC}	0,29	$m\Omega$
V_n	2,7	V
V_{MAX}	2,85	V
I_{MAX}	130 @ $\Delta T = 15^\circ C$	A_{rms}
I_{MAX}	2200 @ 1s	A
m	510	g
P_d	5900	W/Kg
P_{MAX}	12000	W/Kg
E_{MAX}	6	Wh/Kg
$E_{armazenamento}$	3,04	Wh

$$E = \frac{1}{2} C_{total-sc} V_{total-sc}^2 \quad (3.16)$$

$$E = \frac{1}{2} C_{cell} \frac{n_{paralelo}}{n_{serie}} V_{cell}^2 n_{srie}^2 \quad (3.17)$$

$$E = \frac{1}{2} n_{serie} n_{paralelo} C_{cell} V_{cell}^2 \quad (3.18)$$

Com as equações 3.14, 3.15 e 3.16 é possível chegar à equação 3.18 e calcular a quantidade ideal de células necessárias, que corresponde a $n_{srie} * n_{paralelo}$. Utilizando os valores da energia e as características dos supercondensadores, são necessárias 22 células de supercondensadores. Um pack de 22 células de supercondensadores em série tem, de acordo com a equação 3.15, uma tensão de 59,4V. Uma vez que esta tensão é muito baixa em relação aos valores típicos de barramento, é ideal que o pack de baterias não seja dividido em strings, uma vez que originaria um abaixamento de tensão. Concluí-se assim que o pack de supercondensadores terá 22 células de bcap 3000 em série.

3.5.2 Baterias

Antes do dimensionamento das baterias é necessário selecionar o tipo de baterias mais adequado. Na tabela 3.6 estão representados alguns tipos assim como algumas das características de cada um.

Nesta seleção é necessário ter em atenção que a melhor bateria é aquela que apresenta uma maior densidade energética e densidade de potência, resultando assim num pack de baterias de menor volume e peso. Seguindo estes requisitos, e com base na tabela 3.6, o tipo de baterias selecionado foram as de *Lithium - Polymer*.

Posteriormente à seleção do tipo de baterias, segue-se o dimensionamento do pack. Para tal são necessárias as características das baterias escolhidas. Na tabela 3.7 estão algumas das

Tabela 3.6: Características de diferentes tipos de baterias.

Tipo de Bateria	Energia específica (Wh/Kg)	Potência específica (W/Kg)
<i>Lead - Acid</i>	43	285
<i>Nickel - Metal Hydride</i>	65	200
<i>Lithium - Polymer</i>	155	315
<i>Lithium - Ion</i>	120	260

características mais relevantes.

Tabela 3.7: Características das baterias *Lithium - Polymer*.

Características	Valor	Unidade
V_{cell}	3,7	V
C_{cell}	11	Ah
factor de descarga	5	C
factor de carga	1	C
P	0,2015	Kg

Os requisitos do pack de baterias são baseados na energia necessária, a partir da análise realizada em ambiente de simulação, *Simulink*, na secção 3.2. O pack terá que conseguir fornecer uma energia total de 2754,45 Wh. Considerando que o conversor das baterias terá um rendimento de 90%, a energia a fornecer é 3060,5 Wh.

Para o cálculo do número de células e string do pack de baterias devem ser conhecidos alguns termos e valores dos mesmos. Assim, é necessário o conhecimento da energia total, da tensão de barramento, e ter em conta a capacidade de descarga e carga de corrente do pack. Sabendo que os valores típicos de tensão para um barramento CC de um veículo de tração elétrica encontram-se entre 300 a 400 V e que o motor de tração selecionado necessita de ser alimentado com uma tensão de 50 a 400 V, foi necessário encontrar o valor de tensão ideal para o barramento.

Depois de alguns testes, com as equações 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, foi encontrado um número ideal de células de bateria em série e de strings.

$$V_{total-bat} = V_{cell}n_{srie} \quad (3.19)$$

$$C_{pack} = \frac{E_{total}}{V_{barramento}} \quad (3.20)$$

$$C_{pack} = C_{packc/DOD}\eta_{conversor} \quad (3.21)$$

$$C_{packc/DOD} = C_{cell}n_{paralelo} \quad (3.22)$$

$$I_{MAXdescarga} = C_{cell}factor_{descarga}n_{paralelo} \quad (3.23)$$

$$I_{MAXcarga} = C_{cell}factor_{carga}n_{paralelo} \quad (3.24)$$

Com uma tensão de barramento CC de 300V, uma energia total de 3060,5 Wh, são necessários 2 packs de 72 células em série de baterias. O pack de 144 células no total, terá uma corrente de descarga máxima de 110Ah e de carga de 22Ah, e uma tensão média de 266,4V, com um máximo de 302,4V e mínimo de 230,4V.

3.6 Conclusão

Neste capítulo, através da análise dinâmica do veículo, foram obtidas as grandezas necessárias para o dimensionamento dos componentes do sistema. Os resultados da potência e energia necessárias ao veículo para fazer o percurso normalizado, são requisitos para o dimensionamento dos diversos componentes.

A tabela 3.8 sumariza as escolhas e dimensionamentos dos componentes do sistema.

Tabela 3.8: Resumo do dimensionamento e escolha dos componentes do sistema.

Componente	Descrição	Observações
Motor de tração	EMRAX 228	
Gerador	EMRAX 228	
ICE	600cm ³ (45CV)	
Baterias	<i>Lithium - polymer</i>	144 células (2 strings de 72 células em série)
Supercondensadores	Maxwell bcap 3000	22 células (1 string de 22 células em série)

Capítulo 4

Modelação e Controlo das Máquinas Utilizadas

Neste capítulo são inicialmente abordadas as máquinas elétricas utilizadas, no seu funcionamento como motor e gerador. Posteriormente são abordados os aspetos associados ao motor de combustão interna do veículo. O estudo do controlo das máquinas elétricas é também apresentado, seja na necessidade de utilização de conversores e o seu controlo associado, como também no controlo vetorial das máquinas elétricas. O estudo das máquinas elétricas presente neste capítulo é focado apenas nas necessidades do projeto.

4.1 Introdução

Na figura 4.1 estão ilustrados os pontos de análise deste capítulo. Numa primeira fase, é necessário conhecer o modelo das diversas máquinas: motor de combustão interna, gerador e motor de tração. Estas necessidades residem na possível proximidade da realidade que este projeto poderá chegar. Quanto mais próximo da realidade for, melhor é o controlo e melhor é a implementação num veículo real. Posteriormente, é realizado um estudo dos conversores e controlos associados, também de acordo com o sistema. Por fim, são exibidos alguns resultados deste estudo e discutido a validação do estudo do capítulo.

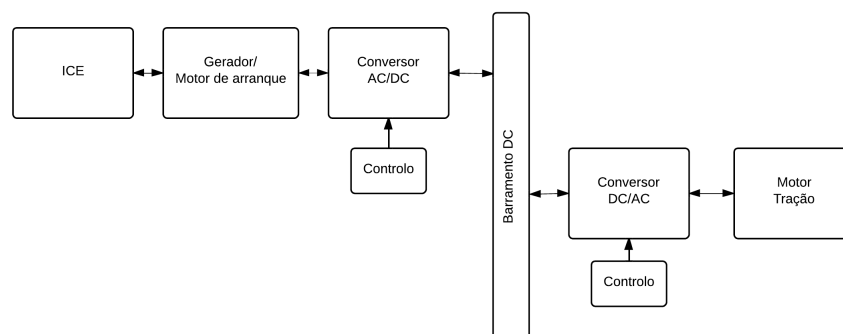


Figura 4.1: Diagrama de blocos dos subsistemas abordados no capítulo 4.

4.2 Motor de combustão interna

O motor de combustão interna é um sistema complexo e sua análise completa requer um conhecimento multidisciplinar. O controlo e a eletrónica são as partes cruciais de análise neste projeto. O controlo gera os parâmetros operacionais do motor de forma a tentar assegurar um bom compromisso entre a capacidade de condução, consumo de combustível e controlo de emissões.

Tal como explicado nas etapas do funcionamento do motor no capítulo 2, o pistão gera um movimento linear que vai ser convertido em movimento rotacional na cambota. A pressão que origina o movimento do pistão, força a cambota a produzir o binário do motor [35]. Na figura 4.2 estão representadas as características típicas mais importantes do desempenho de um motor a gasolina que vão ser posteriormente analisadas.

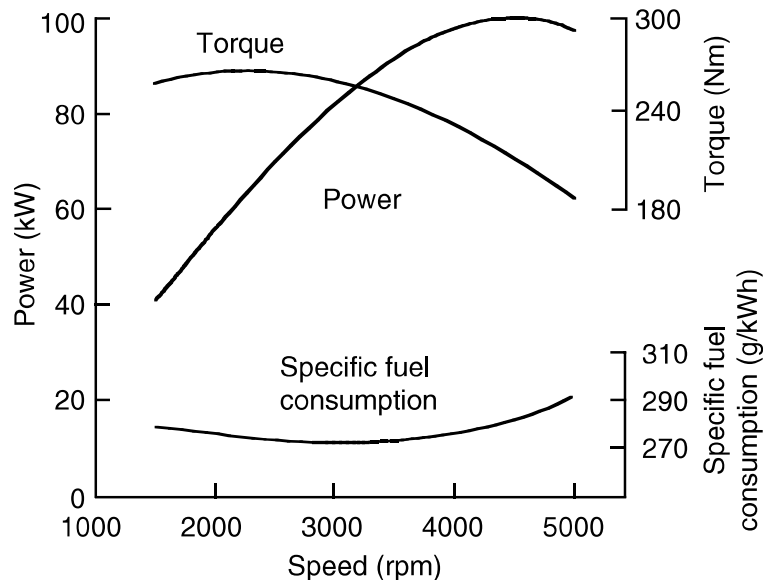


Figura 4.2: Características típicas de desempenho de um motor a gasolina [11].

4.2.1 Modelação

Do ponto de vista da análise global ao *powertrain*, as ações e interações dentro do motor não são essenciais. A questão importante é a forma como o motor entrega a potência. As curvas de características do motor demonstram o seu desempenho e, como tal, fornecem informação útil para a modelação do ICE.

Os mapas de aceleração máxima, plena carga ou mesmo do pedal do acelerador no máximo, são curvas em que se pode analisar a potência e binário máximos de desempenho do motor. A figura 4.3 ilustra as duas curvas de binário e potência em função da velocidade do motor quando está sujeito a plena carga. Os pontos de potência e binário máximo estão assinalados, e pode-se concluir que o ponto de máximo binário é obtido a uma velocidade inferior aquela em que aparece o ponto de máxima potência [35].

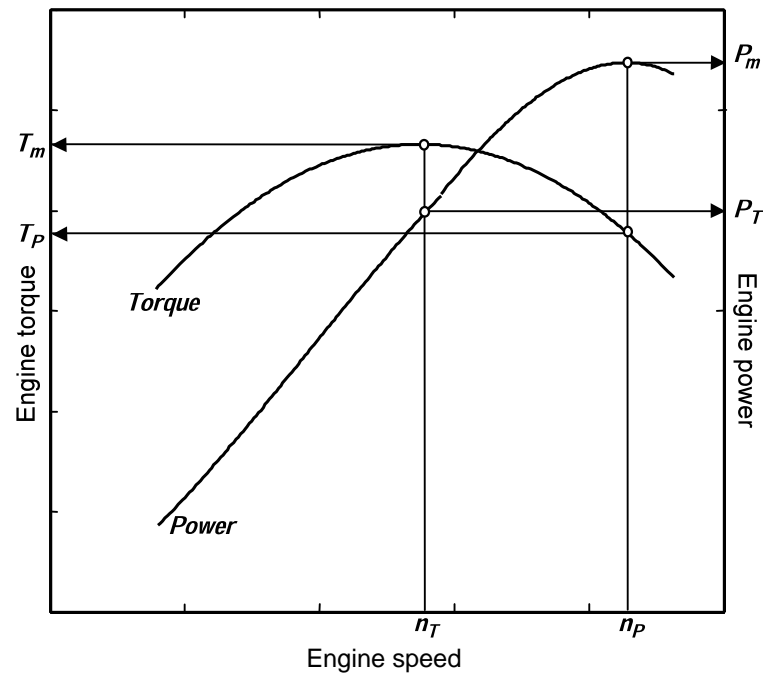


Figura 4.3: Curvas típicas de binário e potência em função da velocidade de um ICE em plena carga (pontos importantes estão assinalados) [35].

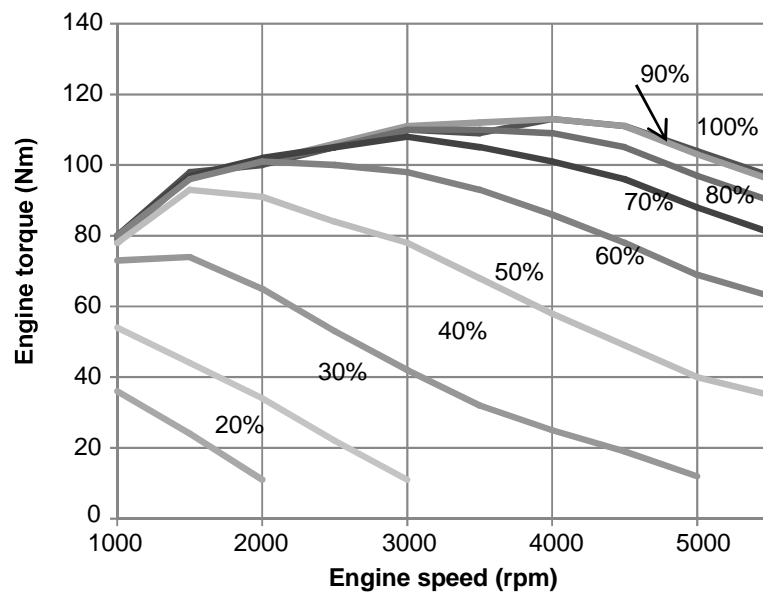


Figura 4.4: Curvas de binário em função da velocidade para diferentes ângulos do pedal de aceleração [35].

Tendo em conta o desempenho do ICE, pelas características já referidas, é realizada uma modelação do mesmo. Neste projeto, o interesse recai apenas no binário e velocidade produzidos pelo motor a partir do sinal do acelerador. Foi então adaptado um modelo já existente, disponível em *MATLAB/Simulink*[®]. O modelo está ilustrado na figura 4.5.

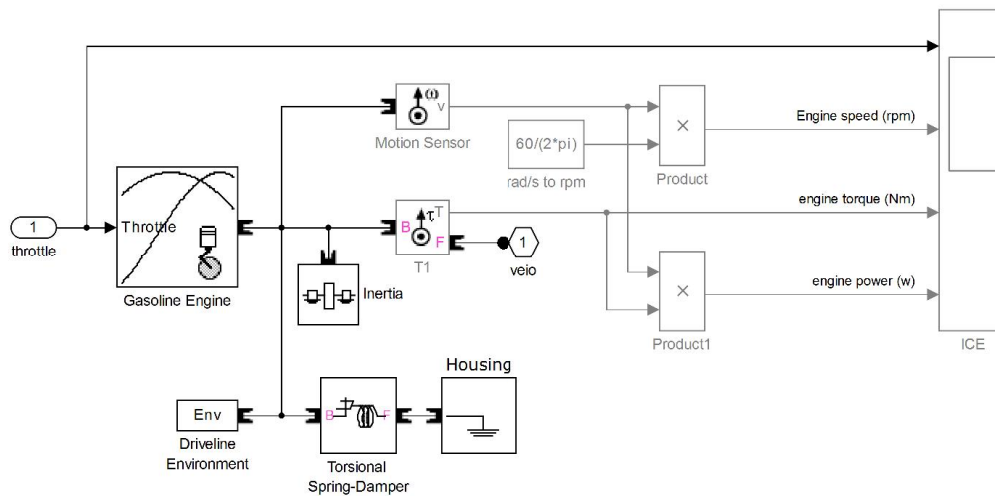


Figura 4.5: Modelo do motor de combustão interna em *MATLAB/Simulink*[®].

O motor funciona a uma velocidade variável que se pode controlar com o sinal do acelerador. O sinal controla diretamente o binário e indiretamente a velocidade que o motor produz. Se a velocidade do motor exceder a velocidade máxima especificada, o motor não gera binário.

4.2.2 Controlo do ICE para máxima eficiência

Um motor a gasolina, como se pode observar na figura 4.2, possui uma curva de característica potência-velocidade ligeiramente distinta da que um veículo naturalmente exige. Assim, é introduzida uma caixa de velocidades que serve para aumentar ou reduzir a velocidade oferecida pelo motor a um dado binário. Na figura 4.6 é ilustrada a curva ideal da relação entre o binário e a velocidade na condução do veículo, assim como as curvas de binário para cada combinação de engrenagens da caixa de velocidades.

No HEV em estudo neste projeto, o motor de combustão não está diretamente acoplado à transmissão, e como tal não é influenciado pelas variações de carga no processo de condução. Desta forma, é possível colocá-lo a operar na sua região de eficiência ótima. O motor de combustão não possui apenas um ponto ótimo de eficiência mas sim uma região ótima de eficiência. A existência de uma região ao invés de um único ponto deve-se ao seguinte [36]:

- existem vários pontos de máxima eficiência ou de consumo de combustível mínimo;
- todos os componentes associados ao funcionamento do motor são fisicamente limitados, o que quer dizer que a eficiência máxima de um determinado componente não significa que os restantes componentes também estejam a operar nessas condições. Assim, é necessário observar a eficiência global, obtida por diferentes combinações entre todos os componentes.

Nas figuras 4.7 e 4.8 estão ilustradas as regiões de consumo específico para as diferentes curvas características dos ICE [11].

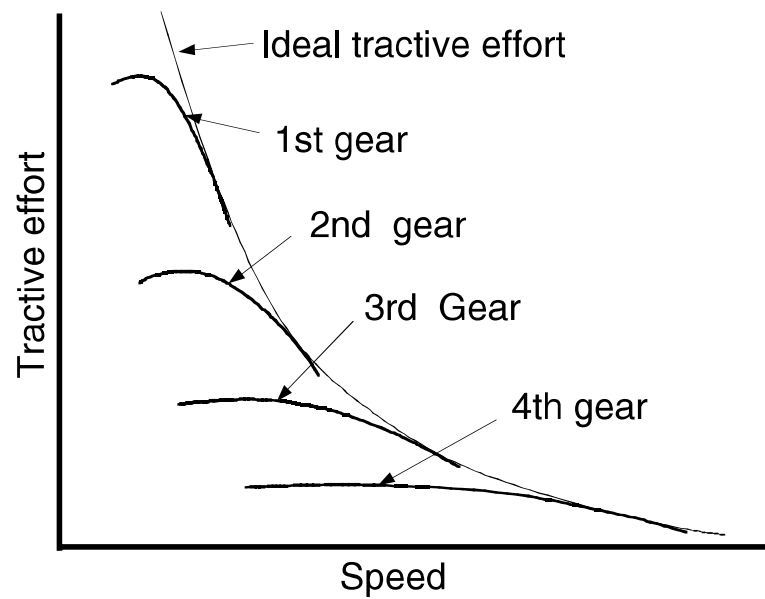


Figura 4.6: Características esforço de tração de um veículo com um motor a gasolina [11].

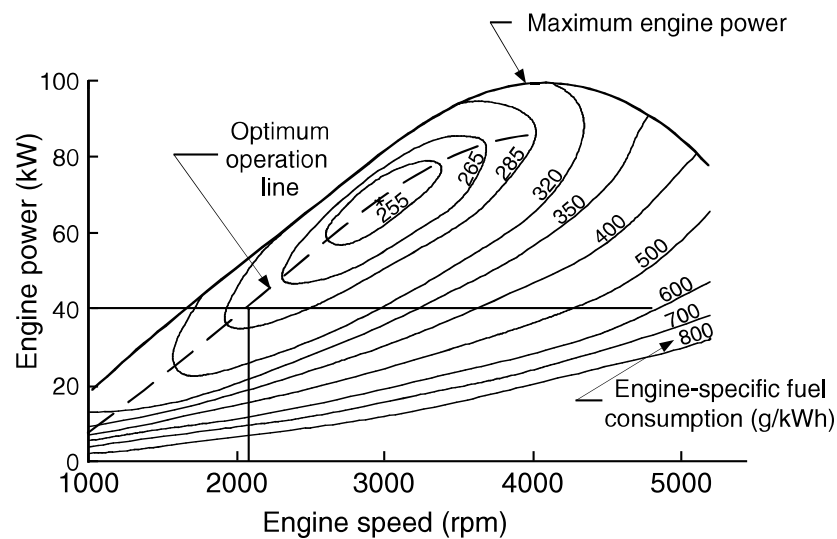


Figura 4.7: Características de economia de combustível de um motor a gasolina [11].

No sistema do projeto, o veículo não possui uma caixa de velocidades para o motor de combustão. Assim, existirá apenas uma única curva para cada característica, como representado nas figuras 4.7 e 4.8. A carga exigida ao motor de combustão vai ser sempre a mesma durante o seu funcionamento. Esta restrição ajuda a melhorar a sua eficiência pois o seu ponto de funcionamento não será alterado constantemente para conseguir acompanhar as exigências das cargas atuais.

Como já explicado, o motor de combustão estará a funcionar na sua região de ótima combinação de potência, velocidade e consumo. Embora o motor não sofra variações de carga, é necessário

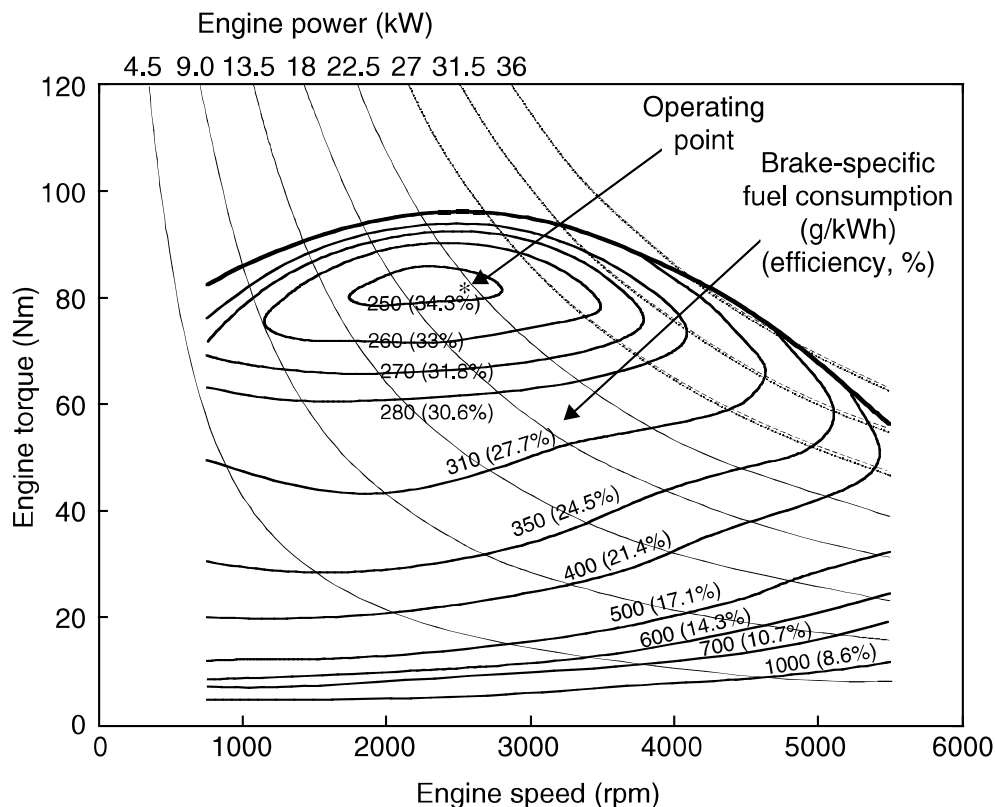


Figura 4.8: Várias curvas de características de um motor a gasolina [11].

que ele seja controlado de forma a conseguir funcionar nesta região definida.

Existem duas estratégias para a realização deste controlo: preditiva e não preditiva.

O controlo preditivo recorre a um mapa de eficiência do motor, controlando-o para funcionar na região de óptima eficiência e menor consumo já conhecida. Este controlo inclui então informação do motor e informação baseada no percurso, que permite a realização de decisões durante a operação, baseada na informação futura.

Por sua vez, o controlo não preditivo analisa a informação do passado ou utiliza regras pré-definidas como meio de otimizar a eficiência e o consumo. A computação, necessária para este controlo, recolhe e processa a informação de forma a encontrar máximos de eficiência locais [37].

4.2.3 Resultados e validação

Após modelação do motor em *MATLAB/Simulink*[®], foi realizado um teste às características do mesmo. O teste consistiu em colocar o motor com uma carga e com o sinal do acelerador no máximo. As curvas binário e potência em relação à velocidade deverão coincidir com as curvas da figura 4.3.

Na figura 4.9 estão ilustradas as curvas de binário e potência em função da velocidade de motor modelado.

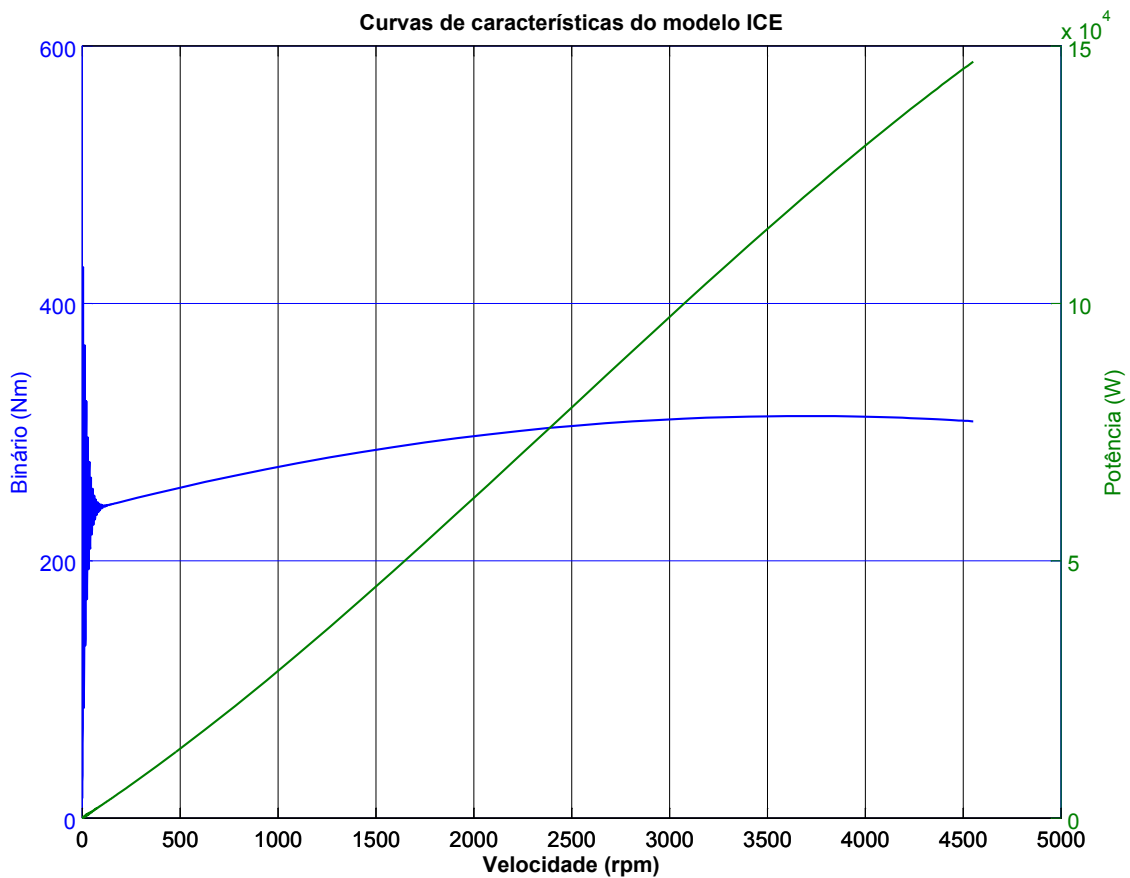


Figura 4.9: Curvas do ICE modelado em *MATLAB/Simulink*[®].

As características do motor, na figura 4.9, são similares às esperadas. A curva do binário tem o formato esperado, bem como a curva da potência. Como referido anteriormente, o máximo binário é obtido a uma velocidade inferior à máxima potência do motor.

O modelo proposto cumpre os requisitos necessários para a continuidade do projeto.

4.3 Motor de tração/gerador

Uma máquina síncrona de ímãs permanentes é composta por um rotor, que contém os ímãs permanentes, e um estator, com enrolamentos de três fases distribuídos proporcionalmente.

São criados dois referenciais normalizados distintos: um referencial estacionário no estator e um referencial rotativo no rotor. Na figura 4.10 é possível observar os três enrolamentos do estator, eixos *abc*, distribuídos uniformemente. Os eixos $\alpha\beta$ correspondem ao referencial estacionário no estator, já os eixos *dq* constituem o referencial rotativo no rotor que roda a uma velocidade elétrica, ω_e , em relação ao estator. É então adotado o referencial de referência no rotor por simplicidade. O princípio deste modelo assume que o fluxo no rotor está alinhado com o eixo *d*. Estando o eixo *q* em quadratura com o eixo *d*, que corresponde aos 90° elétricos, não existe fluxo no rotor ao longo

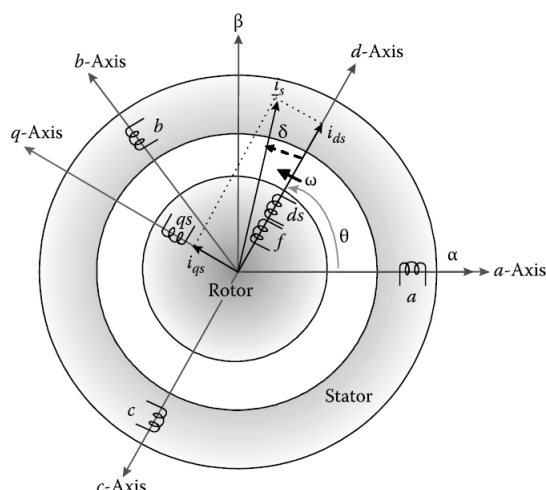


Figura 4.10: Referenciais aplicados na modelação da máquina elétrica.

do eixo q . É assumido também que as perdas no núcleo do motor são desprezáveis, assim como as variações de fluxo magnético devido às variações de temperatura.

Existe então necessidade de entender os eixos estacionário e rotativo em relação às grandezas trifásicas. Como a máquina trifásica está equilibrada entre fases, as correntes e tensões estão desfasadas 120° entre si. Assim, é realizada uma projeção deste referencial trifásico para um referencial bifásico. A projeção é realizada a partir da transformação Clarke, descrita na equação 4.1. Na equação da transformação de Clarke, X pode ser qualquer grandeza trifásica da máquina.

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Após a transformação das grandezas no referencial $\alpha\beta$, é necessário colocar o eixo a a rodar sincronizadamente com o campo rotativo. É assim utilizada a transformação da equação 4.2, do referencial $\alpha\beta$ no referencial dq . Esta transformação possibilita que todas as unidades associadas a esta referência passem a estar constantemente em regime estacionário.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A transformação direta de grandezas trifásicas no eixo dq é denominada pela transformação de Park, e é realizada de acordo com a equação 4.3.

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.3.1 Modelação da máquina

As equações 4.4 ilustram as tensões por fase no estator de uma máquina trifásica. Estas equações modelam a máquina síncrona no sistema de coordenadas trifásico. Nas equações 4.4, λ representa os fluxos magnéticos equivalentes por fase que depende da posição do rotor, enquanto v , i e R_s corresponde às tensões, correntes e resistências equivalentes por fase, respetivamente.

$$\begin{cases} v_a = R_s i_a + \dot{\lambda}_a \\ v_b = R_s i_b + \dot{\lambda}_b \\ v_c = R_s i_c + \dot{\lambda}_c \end{cases} \quad (4.4)$$

Aplicando a transformada de Park ao fluxo, que depende da posição do rotor, é possível obter os fluxos em dq . Estas equações são expressas em 4.5, onde L é a indutância e λ_f corresponde ao fluxo no rotor.

$$\begin{cases} \lambda_d = \lambda_f + L_d I_d \\ \lambda_q = L_q I_q \end{cases} \quad (4.5)$$

Passando as equações do estator em coordenadas trifásicas para o referencial do rotor, é possível chegar às equações 4.6 a partir das transformações de Clarke e Park.

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \dot{\lambda}_d - e_d \\ v_q = R_s i_q + \dot{\lambda}_q + e_q \end{cases} \quad (4.6)$$

Substituindo as equações 4.5 do fluxo nas equações 4.6, obtêm-se as equações 4.7.

$$\begin{cases} v_d = R_s i_d + \dot{\lambda}_d - \omega_e \lambda_q \\ v_q = R_s i_q + \dot{\lambda}_q + \omega_e \lambda_d \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} v_d = R_s i_d + \dot{\lambda}_d - \omega_e L_q i_q \\ v_q = R_s i_q + \dot{\lambda}_q + \omega_e (\lambda_f + L_d i_d) \end{cases} \quad (4.7)$$

O circuito equivalente no referencial do rotor fica então como ilustrado na figura 4.11.

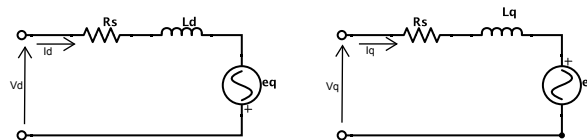


Figura 4.11: Circuito equivalente no referencial dq .

Para completar a modelação da máquina é necessário obter a expressão do binário eletromagnético e a equação mecânica da máquina. Na equação 4.9 é possível ver que o binário, T_{em} , depende do produto interno entre a corrente e o fluxo no estator. Substituindo na equação 4.8 as equações 4.5, pode-se obter a ultima expressão da equação 4.9. Já a equação mecânica do motor, expressa na equação 4.10, depende do binário de carga, T_L , do coeficiente de fricção no eixo de rotação, B , e do momento de inércia do rotor, J .

$$T_{em} = \frac{3}{2}p \left(\vec{\lambda}_s \times \vec{I}_s \right) = \frac{3}{2}p (\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \quad (4.8)$$

$$= \frac{3}{2}p (\lambda_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad (4.9)$$

$$T_{em} = T_L + B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (4.10)$$

$$\omega_m = \int \left(\frac{T_{em} - T_L - B\omega_m}{J} \right) dt$$

4.3.2 Controlo da Máquina

O controlo vetorial com abordagem de *Field-Oriented Control* é realizado com objetivo de controlar de forma mais eficaz as máquinas neste sistema. O controlo vetorial de uma PMSM deriva do modelo dinâmico da máquina e tem como princípio o desacoplamento da corrente em duas componentes: binário e fluxo, de forma a controlá-las separadamente.

O controlo integra apenas um controlo de binário, ficando a malha de controlo de velocidade fechada pelo condutor, no caso do motor de tração, e pela injeção de combustível no ICE, no caso do gerador. O condutor e a injeção atuam como controladores.

As correntes trifásicas são dadas pelas equações 4.11.

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = i_s \begin{bmatrix} \sin(\omega_e t + \delta) \\ \sin(\omega_e t + \delta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_e t + \delta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Aplicando as transformações de Clarke e Park, equações 4.1 e 4.3 respetivamente, obtêm-se as correntes no eixo rotórico dq nas equações 4.12, que dependem do ângulo de binário, δ . De mencionar que i_{qs} é a componente responsável pela produção de binário e i_{ds} responsável pelo fluxo.

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} = i_s \begin{bmatrix} \sin(\delta) \\ \cos(\delta) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

O ângulo de binário tem diversas definições, sendo que entre elas é possível destacar que o ângulo de binário é formado pelos vetores de corrente e de fluxo magnético. É então possível reescrever a equação 4.13 do binário em função do ângulo de binário com as equações 4.9 e 4.12.

$$T_{em} = \frac{3}{2}p \left(\lambda_f i_s \sin(\delta) + \frac{1}{2} (L_d - L_q) i_s^2 \sin(2\delta) \right) \quad (4.13)$$

As estratégias de controlo vetorial são classificadas na forma como é obtida a posição do rotor. As duas estratégias mais utilizadas são o controlo do ângulo do binário a 90° e o controlo MTPA, *Maximum Torque per Ampere*.

Estratégia do ângulo do binário a 90° O ângulo do binário é mantido a 90°, ou $\pi/2rad$, o que origina uma corrente i_d nula. Substituindo na equação 4.13 do binário esta resulta na equação 4.14.

$$T_{em} = \frac{3}{2}p\lambda_f i_q \quad (4.14)$$

Esta estratégia corresponde à aplicação da estratégia MTPA para máquinas sem saliência, isto é $L_d = L_q$, pois o binário neste tipo de máquinas não tem a componente de relutância.

Estratégia MTPA O ângulo do binário é controlado de forma a maximizar o binário a uma dada corrente. É então necessário escrever a equação do binário por unidade de corrente, expressa na equação 4.15.

$$\frac{T_{em}}{I_s} = \frac{3}{2}p \left(\lambda_f \sin(\delta) + \frac{1}{2}(L_d - L_q) i_s \sin(2\delta) \right) \quad (4.15)$$

Para maximizar a relação é necessário deriva-la em ordem à corrente e iguala-la a zero. A equação da derivada é representada em 4.16.

$$(L_d - L_q) i_d^2 + \lambda_f i_d - (L_d - L_q) i_q^2 = 0 \quad (4.16)$$

Das duas soluções que a equação 4.16 origina, apenas é considerada a solução com sinal negativo para o ângulo ser superior a 90°, reduzindo assim o fluxo no entreferro. Fica então apenas a solução da equação 4.17.

$$i_d = \frac{\lambda_f}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\lambda_f^2}{4(L_q - L_d)^2 + i_q^2}} \quad (4.17)$$

A arquitetura escolhida, como já mencionado, é baseada em FOC por ser um controlo que apresenta boa eficiência com baixo ripple de binário e resposta rápida. O controlo vetorial com a estratégia do ângulo do binário a 90° é uma das possíveis abordagens nesta arquitetura. Na figura 4.12 é ilustrada a arquitetura escolhida. A estratégia MTPA foi excluída pois os resultados previstos seriam muito idênticos à estratégia de 90° devido à baixa diferença entre as indutâncias.

SVM - Space Vector Modulation Para a conclusão do estudo do controlo resta apenas a abordagem da modulação vetorial. A escolha para este projeto centrou-se no SVM. O algoritmo SVM é basicamente uma estratégia PWM (*Pulse-Width Modulation*), sendo no entanto diferente na forma como calcula os tempos de comutação e os estados de comutação do VSI. Os métodos de modulação baseados em espaço vetorial são apenas usados para inversores trifásicos.

A tensão do vetor de espaços de um VSI pode ser definido num plano complexo $\alpha\beta$ por:

$$v_s = \frac{2}{3} [v_{aN} + av_{bN} + a^2 v_{cN}] \quad (4.18)$$

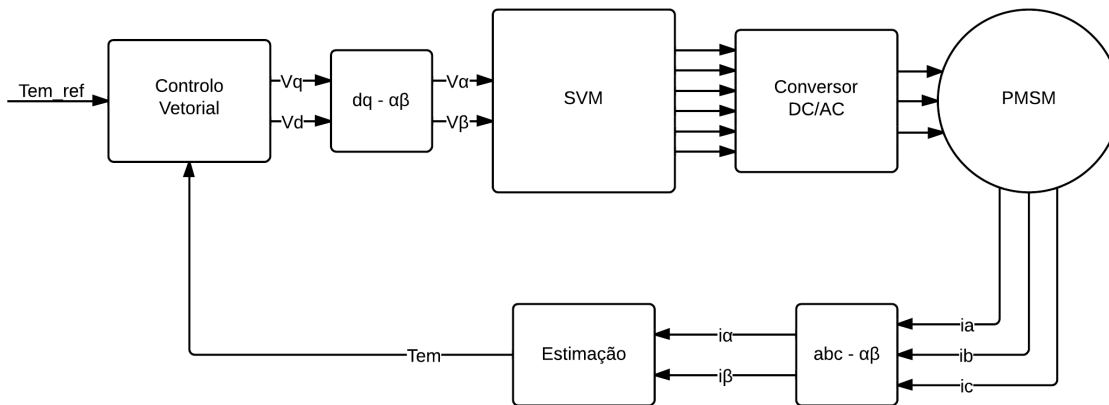


Figura 4.12: Arquitetura de controlo do sistema PMSM.

onde,

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{4.19}$$

A tensão de saída por fase do inversor pode ser definida pelos sinais das *gates* como já mencionado na figura 2.22. A tensão do vetor de espaços pode também ser definida como:

$$v_s = \frac{2}{3}V_{dc} [S_a + aS_b + a^2S_c] \tag{4.20}$$

As combinações binárias de S_a , S_b e S_c originam oito vetores de espaço, em que dois desses vetores são nulos. Na figura 4.13 são ilustrados os oito vetores no plano $\alpha\beta$, resultando numa representação de estados de vetores de espaço de tensão do VSI.

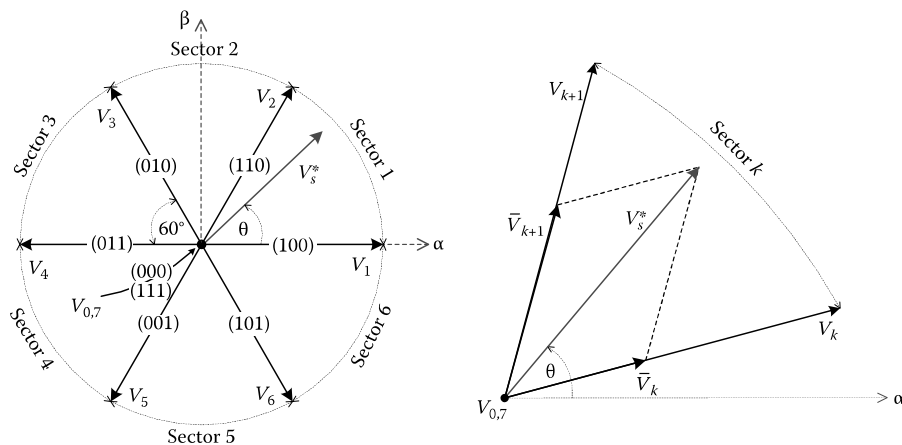


Figura 4.13: Vetores espaciais gerados pelo VSI trifásico (esquerda) e princípio de operação SVM para um setor k genérico [12].

A partir da tabela da figura 2.22 e pela figura 4.13 observa-se que todos os vetores ativos, excluindo os vetores nulos V_0 e V_7 , têm a mesma magnitude e diferentes ângulos, definidos nas

equações 4.21 e 4.22 respectivamente.

$$|V_k| = \frac{2}{3}V_{dc} \quad (4.21)$$

$$\angle \{V_k\} = (k-1) \frac{\pi}{3} \quad (4.22)$$

com $k = 1, \dots, 6$

Cada par de vetores ativos adjacentes definem uma área no plano $\alpha\beta$, dividindo-o em seis vetores.

A modulação SVM pode então ser resumida em três passos [12]

1. Determinar V_α , V_β , V_s^* e θ ;
2. Determinar os tempos T_0 , T_k e T_{k+1} ;
3. Determinar a sequência de comutação dos interruptores.

Para o primeiro passo, as tensões V_α e V_β são calculadas pela transformação de Clarke. A tensão $V_s^* = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2}$, e o ângulo $\theta = \arctan \frac{V_\beta}{V_\alpha}$. Com o ângulo θ é possível identificar, comparando com os ângulos dos diferentes vetores, em que setor se situa V_s^* .

No segundo passo, os valores de $\frac{t_0}{T_m}$, $\frac{t_k}{T_m}$ e $\frac{t_{k+1}}{T_m}$ representam o *duty cycle* de cada vetor k , sendo T_m o período de modelação. Então, estes tempos são calculados pelas seguintes equações:

$$t_k = \frac{3T_m|V_s|}{2V_{dc}} \left\{ \cos(\theta - \theta_k) - \frac{\sin(\theta - \theta_k)}{\sqrt{3}} \right\} \quad (4.23)$$

$$t_{k+1} = \frac{3T_m|V_s|}{V_{dc}} \frac{\sin(\theta - \theta_k)}{\sqrt{3}} \quad (4.24)$$

$$t_0 = T_m - t_k - t_{k+1} \quad (4.25)$$

Por fim, no terceiro passo é a geração da sequência de comutação. Os tempos anteriormente calculados são então comparados com a onda portadora. Esta onda portadora é triangular com período T_m , amplitude $T_m/2$ e *duty cycle* de 0.5. Devido à existência de oito vetores (número par), e uma vez que dois deles são vetores nulos, restam apenas sete vetores distintos. Os tempos definidos pelas equações 4.26 e 4.27 são então transformados em períodos. Estes períodos são comparados com a onda portadora e somados gerando um degrau com três níveis para a seleção de cada vetor adjunto e nulo, como ilustrado na figura 4.14. Com o degrau e o setor, é recorrendo a uma *Look-up-table*, ilustrada na figura 4.15, são obtidos os sinais do comando para uma determinada situação num dado instante [12, 17].

$$T_{center} = \begin{cases} T_m - \frac{t_{k+1}}{2} & \text{para número ímpar de setores} \\ T_m - \frac{t_k}{2} & \text{para número par de setores} \end{cases} \quad (4.26)$$

$$T_{middle} = \begin{cases} T_{center} - \frac{t_k}{2} & \text{para número ímpar de setores} \\ T_{center} - \frac{t_{k+1}}{2} & \text{para número par de setores} \end{cases} \quad (4.27)$$

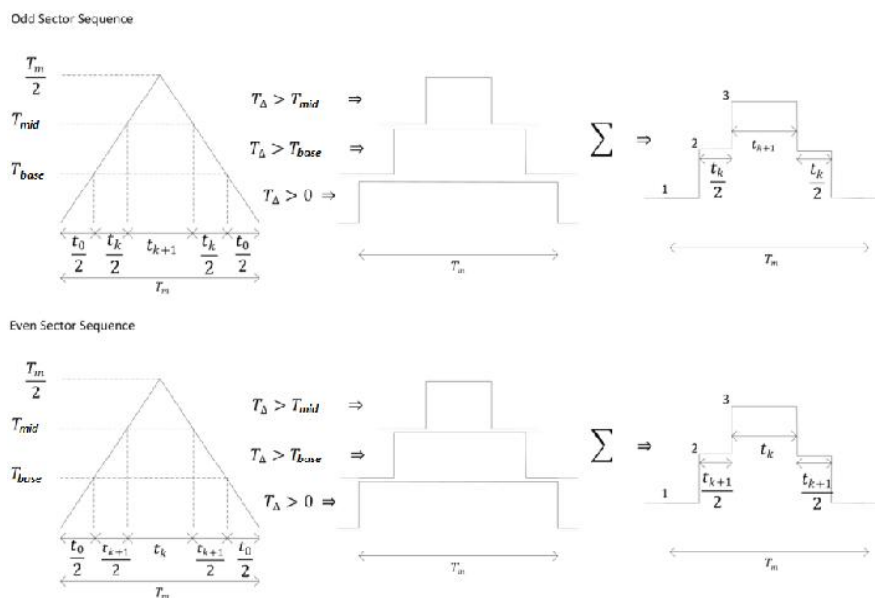


Figura 4.14: Etapas de geração de sequencia temporal [17].

	S_1				S_3				S_5		
	V_0	V_k	V_{k+1}		V_0	V_k	V_{k+1}		V_0	V_k	V_{k+1}
	(1)	(2)	(3)		(1)	(2)	(3)		(1)	(2)	(3)
Sector 1	1	1	1	Sector 1	0	1	1	Sector 1	0	0	1
Sector 2	1	0	0	Sector 2	1	1	0	Sector 2	0	0	0
Sector 3	0	0	1	Sector 3	1	1	1	Sector 3	0	1	1
Sector 4	0	0	0	Sector 4	1	0	0	Sector 4	1	1	0
Sector 5	0	1	1	Sector 5	0	0	1	Sector 5	1	1	1
Sector 6	1	1	0	Sector 6	0	0	0	Sector 6	1	0	0

Figura 4.15: LUT dos três interruptores superiores do inversor [17].

4.3.3 Resultados e validação

Após modelação e projeto do controlador da máquina elétrica, foi analisado o seu desempenho recorrendo a simulações computacionais em *MATLAB/Simulink*[®] e *PSIM*[®].

4.3.3.1 Controlo do motor de tração

A figura 4.16 ilustra os resultados de uma simulação do motor de tração para um dado regime. O motor foi sujeito a três variações de binário distintas. A componente da corrente i_d , como men-

cionado na estratégia de controlo, é mantida a zero. A componente da corrente i_q apresenta uma resposta rápida, e devido a i_d ser nulo, tem uma resposta semelhante à do binário. Tanto o binário como i_q apresentam um *ripple* baixo.

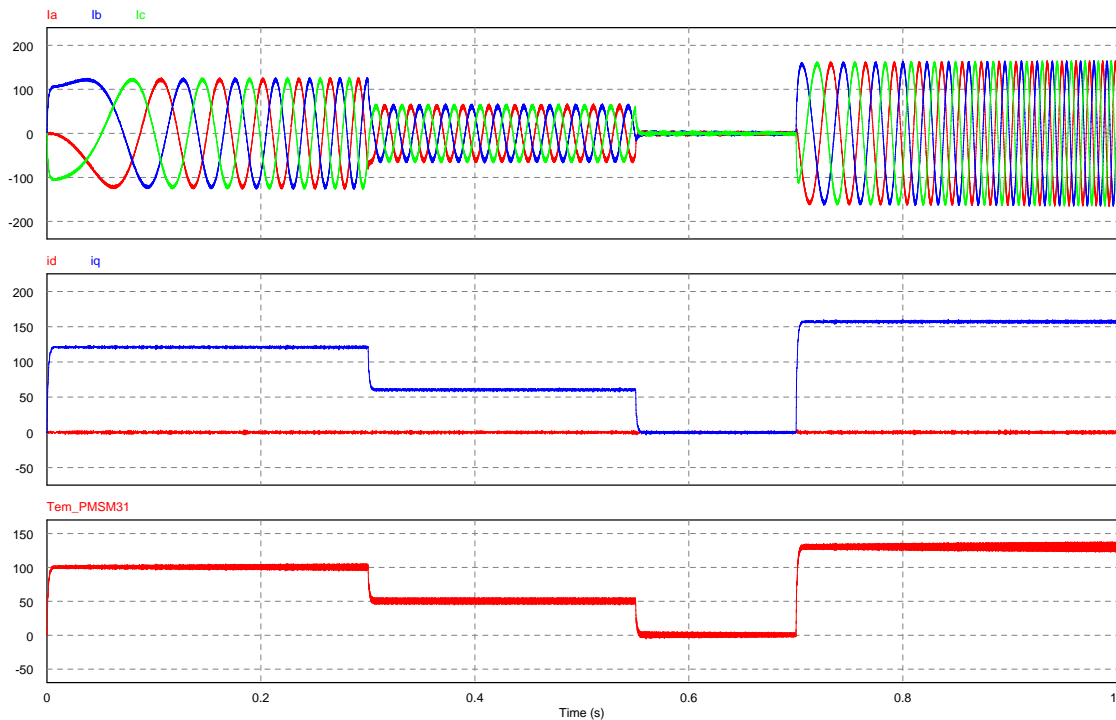


Figura 4.16: Resultados de uma simulação computacional ao motor elétrico com variações de binário de referência.

O binário imposto inicialmente é de 100Nm, sendo que aos 0.3s foi alterado para 50Nm, seguindo-se uma referência de binário nulo. Por último, aos 0.7s foi aumentado para 140Nm. O controlador apresenta uma rápida resposta de binário e sem *overshoot* com a devida calibração dos controladores PI (*Proportional-Integrator*). A componente da corrente i_q conseguiu acompanhar com bom desempenho estas variações e as correntes por fase refletem na sua amplitude os diversos binários.

4.3.3.2 Controlo do gerador

A figura 4.17 ilustra os resultados de uma simulação computacional do gerador com o controlo mencionado. Estão ilustradas as correntes por fase, as componentes das correntes d e q , o binário produzido pelo gerador e a velocidade em rpm do eixo do gerador.

O visível atraso na resposta da velocidade do gerador pode ser considerado desprezável nesta situação. De facto, o gerador está acoplado a um motor de combustão que tem constantes de tempo superiores, e que dominam a resposta em frequência do sistema de tração.

A frequência das correntes por fase não é perceptível pelo seu gráfico pois deu-se mais importância à melhor observação de resposta no tempo, contudo esta pode ser calculada a partir da

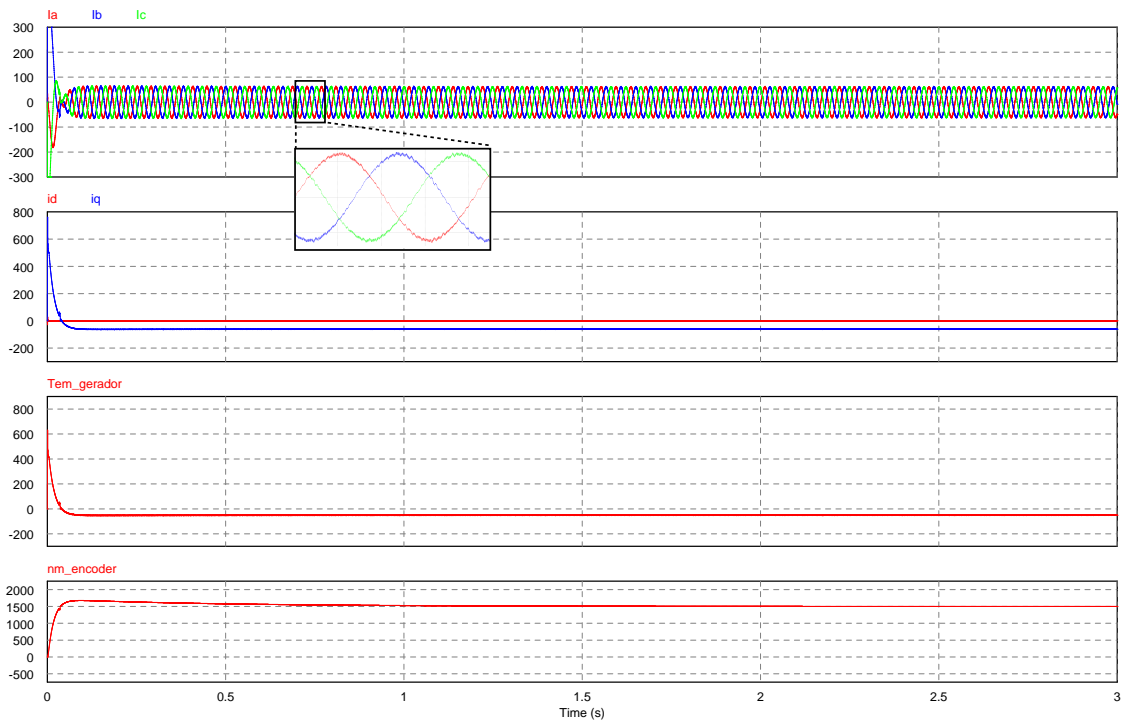


Figura 4.17: Resultados de uma simulação computacional ao gerador com uma velocidade de referência de 1500rpm e uma carga de 50N.

velocidade do gerador. A componente i_d permanece nula, tal como deveria estar pelo controlo aplicado, e a componente i_q apresenta um comportamento bom ao longo do tempo. O sinal do binário e da componente i_q é negativo o que demonstra que a máquina está a funcionar como gerador.

Na figura 4.18 encontram-se os resultados do gerador a diferentes variações de velocidade. As frequências das correntes por fase não são também visíveis, contudo é perceptível que existem variações. Estas variações são devidas às variações de velocidade.

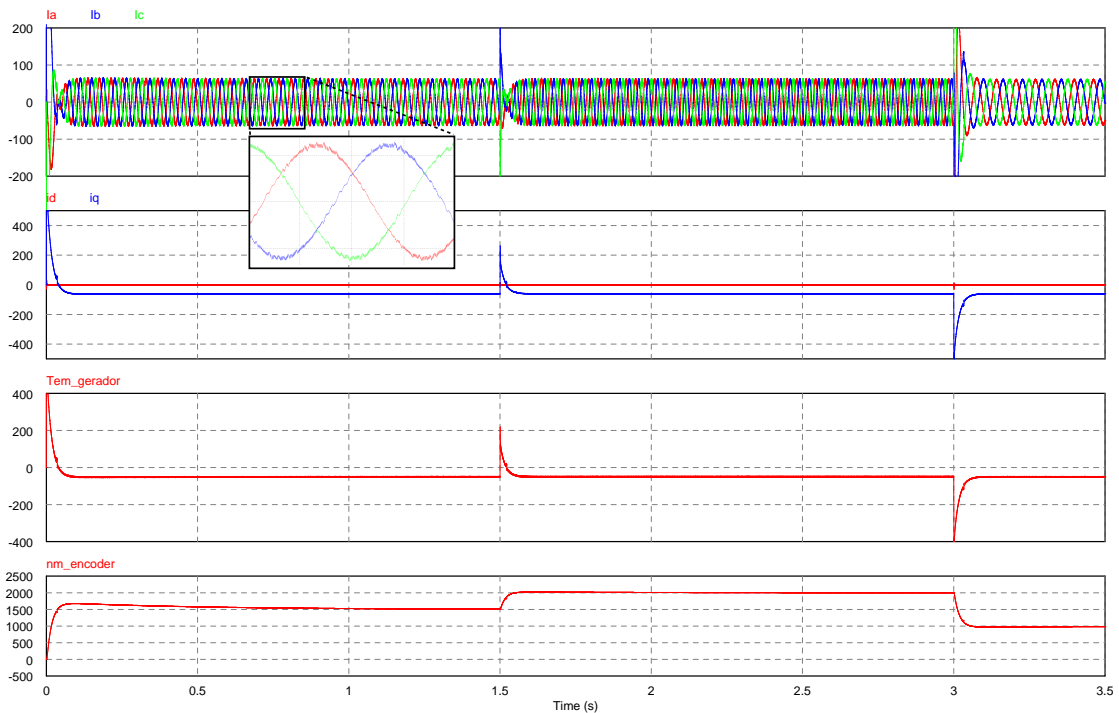


Figura 4.18: Resultados de uma simulação computacional ao gerador com uma carga de 50N e variações de velocidade de referência.

Embora com algumas perturbações, as respostas do binário e das correntes são as esperadas. A velocidade, tanto a nível de tempo de resposta como de *ripple*, acompanha muito bem as referências impostas. É dada uma referência de 1500rpm até aos 1,5 segundos sendo de seguida alterada para 2000rpm e posteriormente reduzida para 1000rpm.

É de salientar que estas variações de velocidade não serão situações com as quais o gerador se irá deparar numa situação real. Porém, considerando uma possível falha ou defeito do motor de combustão, considera-se pertinente expor os resultados com variações na referência, para que se verifique a robustez e bom desempenho do controlador do gerador.

Na figura 4.19 são demonstrados os resultados do gerador com o motor de combustão acoplado. A velocidade é controlada pelo controlo do gerador mas é gerada pelo motor de combustão. Este mesmo controlo exige uma componente i_d nula. O binário imposto no veio do gerador é proveniente do motor de combustão.

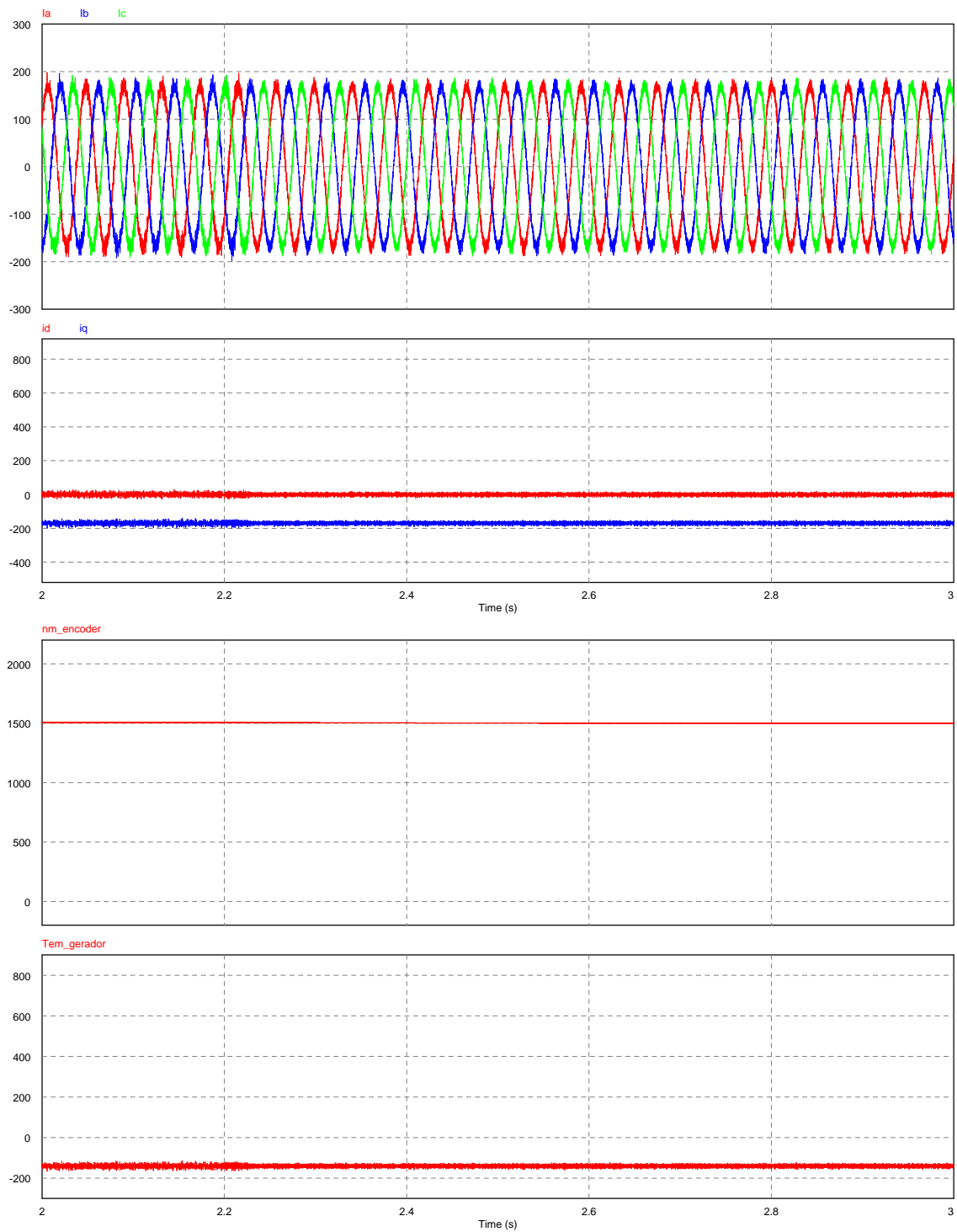


Figura 4.19: Resultados de uma simulação computacional do gerador elétrico acoplado ao motor de combustão interna.

4.4 Conclusão

Os modelos utilizados para as máquinas foram validados no decorrer deste capítulo, em conjunto com o controlo associado. O modelo utilizado para o motor de combustão, ainda que seja uma simplificação de modelos mais reais, é capaz de reproduzir os principais fenómenos e características associados ao seu funcionamento no sistema. Assim, a utilização destes modelos cumpre os requisitos para o desenvolvimento do projeto. Os controlos utilizados mostraram um bom desempenho nos resultados das simulações dos subsistemas.

Capítulo 5

Modelação e Controlo das Fontes de Energia Utilizadas

No presente capítulo são abordadas e modeladas as fontes de energia utilizadas no projeto, assim como o controlo de fluxo energético entre essas fontes e o barramento CC. Deste modo, para cada um das fontes, é inicialmente estudada uma possível modelação, seguindo-se o estudo do controlo do fluxo energético. Para controlar o fluxo energético, foi utilizado um conversor DC/DC juntamente com o controlo dos seus interruptores. Por último, são realizados e analisados os testes feitos aos sistemas estudados neste capítulo.

5.1 Introdução

Para dar continuidade à construção do sistema é necessário proceder à modelação das fontes de armazenamento de energia utilizadas. Esta modelação, deverá ser o mais precisa possível dentro daqueles que são os requisitos computacionais associados a um sistema de controlo deste tipo. Após modelação das fontes, é necessário dimensionar um conversor DC/DC associado a cada fonte com os parâmetros de dimensionamento do sistema. Existe também a necessidade de controlar os conversores utilizados de forma a obter um fluxo de corrente ótimo entre as fontes e o barramento CC.

São realizados também testes de validação dos modelos, bem como de resultados dos subsistemas. Os resultados das simulações do subsistema têm que ser adequados de forma a que seja possível incluir estes subsistemas, ilustrados na figura 5.1, no sistema global.

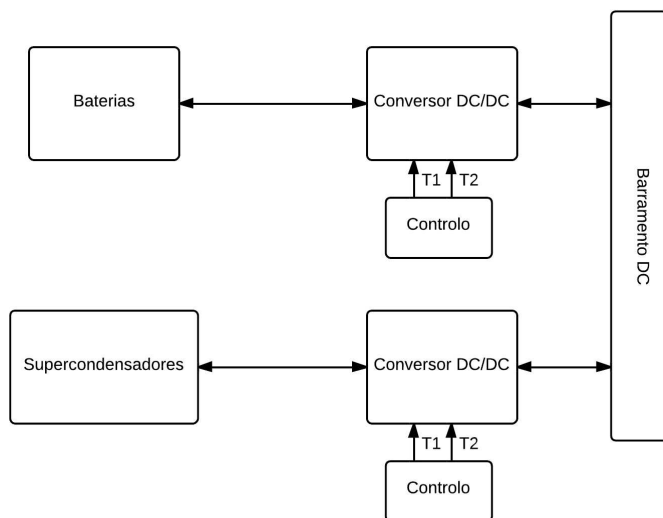


Figura 5.1: Diagrama de blocos dos subsistemas abordados neste capítulo.

5.2 Baterias

5.2.1 Modelação do pack de baterias

O modelo mais simples de uma bateria consiste numa fonte de tensão ideal de circuito aberto e uma resistência interna constante. Contudo, este modelo não tem em conta algumas exigências do sistema.

O modelo de baterias necessário para o sistema deve ter em conta: o efeito de recuperação, a taxa de carga e descarga e o efeito de variação da taxa de carga. O modelo do pack de baterias proposto para o projeto é, então, um modelo estudado e desenvolvido em [18] e [38]. Este modelo consegue suportar as exigências do sistema, que será analisado no decorrer desta secção. O esquema da modelação das baterias está representado na figura 5.2.

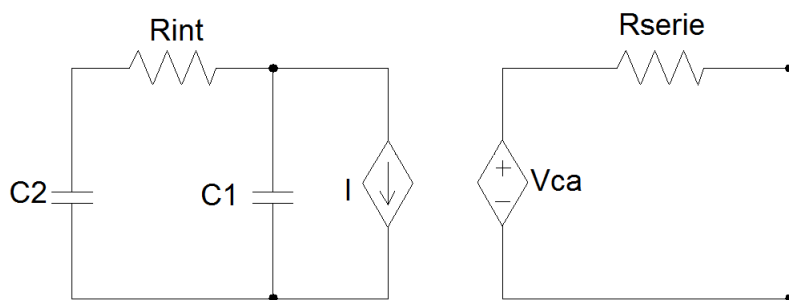


Figura 5.2: Esquema equivalente do pack de baterias.

O modelo representado na figura 5.2 consiste em dois circuitos distintos. Do lado direito, está representado um circuito composto por uma resistência e uma fonte de tensão dependente. Esta resistência representa a resistência da bateria, R_{serie} , e está associada à variação de tensão em mudanças de carga. Num ensaio de carga ou descarga, no momento da mudança de carga, a bateria sofre uma variação brusca de tensão aos seus terminais, sendo então este fenómeno representado

pela resistência em série. Relativamente à fonte de tensão, V_{ca} , depende do estado de carga da bateria.

O circuito do lado esquerdo, da figura 5.2, representa o estado de carga da bateria. Neste circuito estão representadas a capacidade da bateria, $C_1 + C_2$, e a resistência de ligação, R_{int} . Por observação do comportamento da transição de carga no eletrólito entre os elétrodos, como ilustrado na figura 5.3, é possível uma modelação da bateria o mais perto possível da realidade. A resistência simboliza a dificuldade de transição de uma secção do eletrólito para a secção seguinte, o condensador C_1 a concentração das partículas junto do elétrodo, e o condensador C_2 a concentração das partículas no eletrólito.

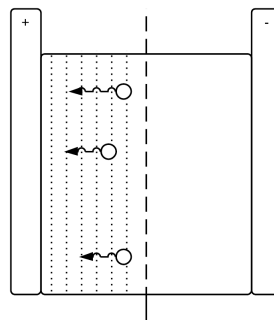


Figura 5.3: Esquema de uma bateria, eletrólito e elétrodos, com as divisões de secções.

5.2.2 Análise estática do modelo de baterias

Segundo os autores do artigo [39], as baterias comportam-se de uma forma específica quando se deparam com uma carga ou descarga a uma corrente contínua. Nos instantes de mudança de carga, início e fim de uma carga ou descarga, as baterias deverão ter uma variação abrupta de tensão. Nos momentos de carga ou descarga, a tensão das baterias decairá ou subirá respetivamente a uma taxa que depende das suas características. Quando a bateria se encontra em repouso, i.e. depois de uma carga ou descarga, haverá uma recuperação da carga que se traduz numa ligeira descida ou subida, respetivamente, na tensão aos seus terminais [39].

No ensaio ilustrado na figura 5.4, a bateria é descarregada a uma corrente contínua constante de 11A. Posteriormente, a descarga é interrompida deixando a bateria em repouso, sendo que de seguida é carregada a uma corrente contínua constante de 11A.

Continuando a análise do ensaio ilustrado na figura 5.4, durante a descarga, a variação da tensão é acentuada nos primeiros instantes, passando a descarregar de forma mais suave ao longo do tempo. No instante da interrupção da descarga, ocorre uma subida abrupta de tensão seguida por uma recuperação da mesma. Quando é novamente realizada uma alteração de carga, observa-se novamente uma subida abrupta de tensão no instante inicial, seguida de um aumento de tensão com uma taxa equivalente à da descarga.

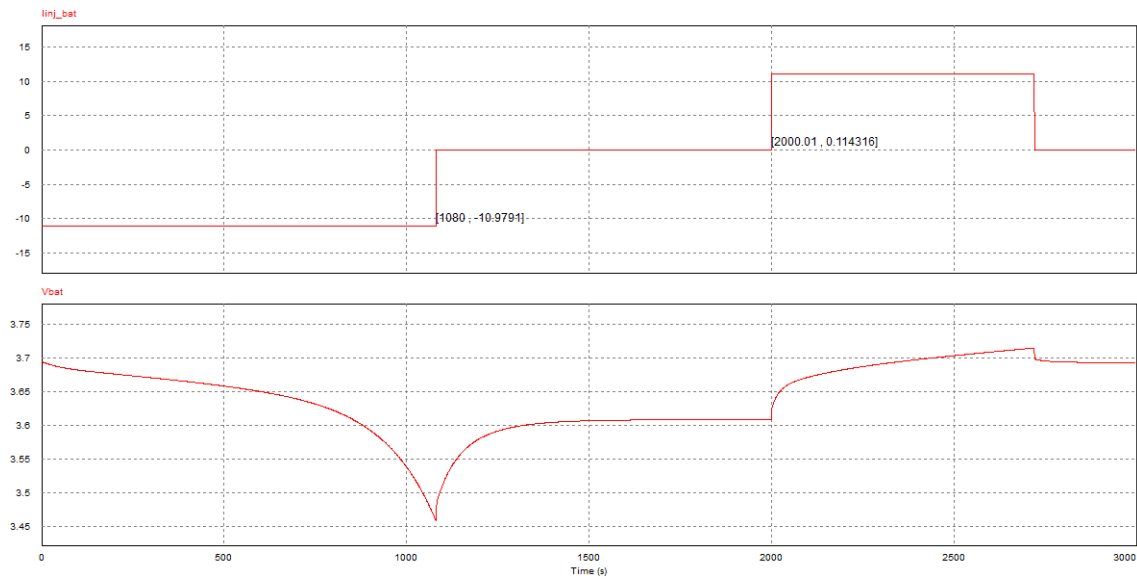


Figura 5.4: Análise estática do modelo de uma célula de baterias.

O esquema equivalente das baterias proposto para análise nesta secção reproduz os fenómenos e comportamentos esperados, sendo portanto este modelo simplificado um modelo válido para que possa ser utilizado no projeto do sistema.

5.2.3 Conversor associado à bateria

O conversor seleccionado para ligação às baterias é um conversor DC/DC *Buck-Boost*. O esquema de princípio do mesmo é ilustrado na figura 5.5. Este é constituído por dois interruptores, $T1$ e $T2$, uma bobina, L , e um condensador C . Na figura, a fonte representada por V_{in} , corresponde a uma fonte de armazenamento de energia (bateria ou supercondensadores), e a fonte representada por V_{out} corresponde ao barramento CC.

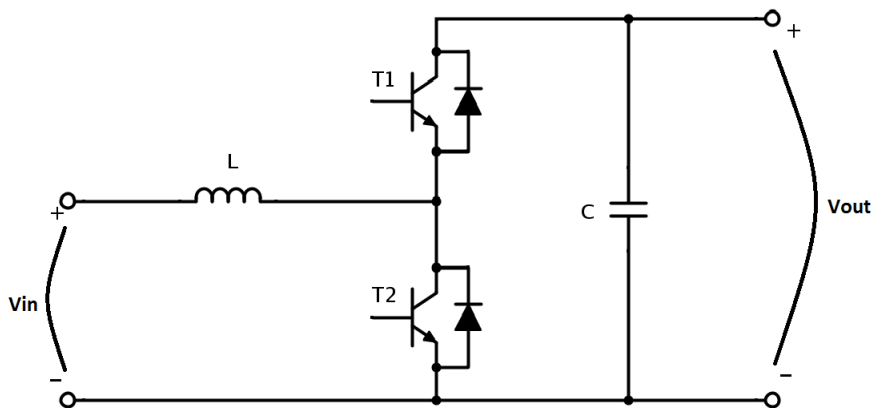


Figura 5.5: Esquema do conversor DC/DC *Buck-Boost*.

O conversor pode funcionar em dois modos distintos: abaixador de tensão (*Buck*), em que o conversor carrega a fonte de armazenamento, e elevador de tensão (*Boost*), no qual a fonte de armazenamento é descarregada e alimenta o barramento CC.

Boost No modo elevador, o conversor liga e desliga o interruptor $T2$, mantendo $T1$ sempre desligado. A relação entre o tempo em que o interruptor está ligado e as tensão de entrada e de saída é dada pela equação 5.1.

$$\frac{V_{DC}}{V_{bat}} = \frac{1}{1 - D_{T2}} \quad (5.1)$$

O *duty cycle*, D_{T2} , é a percentagem de tempo em que o interruptor $T2$ está ligado em relação ao período de tempo associado à frequência de comutação, como na equação 5.2

$$D_T = \frac{t_{on}}{T} \quad (5.2)$$

Durante o tempo em que o interruptor $T2$ está ligado, t_{on} , a bateria fornece corrente à bobina L . Quando $T2$ é desligado, a corrente que circula na bobina L é enviada para o barramento CC. A equação 5.3 define a corrente da bobina L .

$$\Delta i_L = \begin{cases} \frac{V_{bat} t_{on}}{L} = \frac{V_{bat} D_{T2} T}{L} & 0 \leq t \leq t_{on} \\ \frac{(V_{bat} - V_{DC})(T - t_{on})}{L} = \frac{(V_{bat} - V_{DC})T(1 - D_{T2})}{L} & t_{on} \leq t \leq T \end{cases} \quad (5.3)$$

Enquanto a bobina entrega energia suficiente para o barramento permanecer à tensão desejada, o condensador mantém essa tensão constante. A equação 5.4 mostra a relação da variação da tensão de saída com os restantes parâmetros do conversor.

$$\Delta V_C = \begin{cases} \frac{-i_{out} t_{on}}{C} = \frac{-i_{out} D_{T2} T}{C} & 0 \leq t \leq t_{on} \\ \frac{(i_L - i_{out})(T - t_{on})}{C} = \frac{(i_L - i_{out})(1 - D_{T2})T}{C} & t_{on} \leq t \leq T \end{cases} \quad (5.4)$$

Buck No modo abaixador, o conversor comuta o interruptor $T1$, mantendo sempre $T2$ desligado. Neste modo, o *duty cycle* passa a ter a relação da equação 5.5.

$$\frac{V_{bat}}{V_{DC}} = D_{T1} \quad (5.5)$$

Durante o tempo em que o interruptor $T1$ está fechado, a bobina é carregada pelo barramento, e quando o transístor é aberto, a bobina descarrega para a bateria. A equação 5.6 define a corrente da bobina L .

$$\Delta i_L = \begin{cases} \frac{(V_{DC} - V_{bat}) t_{on}}{L} = \frac{(V_{DC} - V_{bat}) D_{T1} T}{L} & 0 \leq t \leq t_{on} \\ \frac{-V_{bat}(T - t_{on})}{L} = \frac{-V_{bat}(1 - D_{T1})T}{L} & t_{on} \leq t \leq T \end{cases} \quad (5.6)$$

Após esta análise, e sabendo a potência total necessária, foi possível obter os valores da tabela 5.1 para o dimensionamento dos componentes: bobina L e condensador C , bem como o *duty cycle*.

Tabela 5.1: Dimensionamento dos componentes do conversor DC/DC associado às baterias.

Dados:			Resultados:	Buck	Boost
P_{MAX}	2244,1	W	$duty.cycle$	0,9	0,1
V_{bus}	300	V	L	1,624mH	
I_{busMAX}	7,48	A	C	2,49 μ F	
V_{bat}	270	V			
I_{batMAX}	8,311	A			
f	20	kHz			
ΔI_L	10	%			
ΔV_{bus}	7	%			

5.2.4 Controlo do conversor da bateria

O controlo do conversor das baterias utilizado funciona como controlador de corrente. Na figura 5.6 está ilustrado o diagrama de blocos do controlo do conversor DC/DC das baterias do sistema.

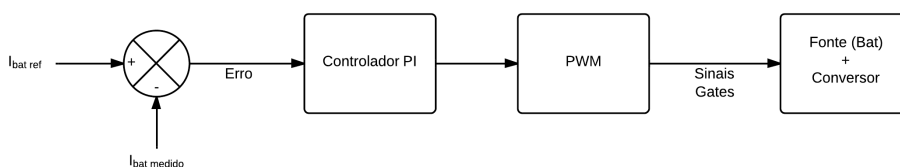


Figura 5.6: Controlo do conversor associado às baterias em modo Buck.

O controlador passa por várias etapas. Inicialmente, é determinado o erro entre a corrente medida nas baterias e a referência, servindo esse erro de entrada para um controlador linear PI. O controlador PI produz um sinal que servirá de entrada para o bloco de modulação PWM. A modulação PWM, por sua vez, gera os sinais de comando para os interruptores do conversor DC/DC.

5.2.5 Resultados e validação

Os resultados de testes realizados ao conversor DC/DC associado às baterias estão representados nas figuras 5.7 e 5.8.

No teste de carregamento das baterias, figura 5.7, a bateria é sujeita a uma injeção de corrente contínua de 10A. É possível observar-se que o controlo estabiliza a corrente medida nas baterias na corrente de referência. A tensão da bateria, como consequência, tem tendência a elevar-se.

Posteriormente, num teste de descarga das baterias, figura 5.8, a bateria é sujeita a uma extração de uma corrente contínua de 10A. No gráfico superior da figura 5.8, é visível que o controlador tenta estabilizar a corrente medida na corrente de referência. Como consequência da extração de corrente das baterias, a tensão decai.

Os resultados das simulações de carga e descarga das baterias são coerentes com os resultados previstos, tanto do comportamento do modelo das baterias, como do conversor DC/DC a elas associado.

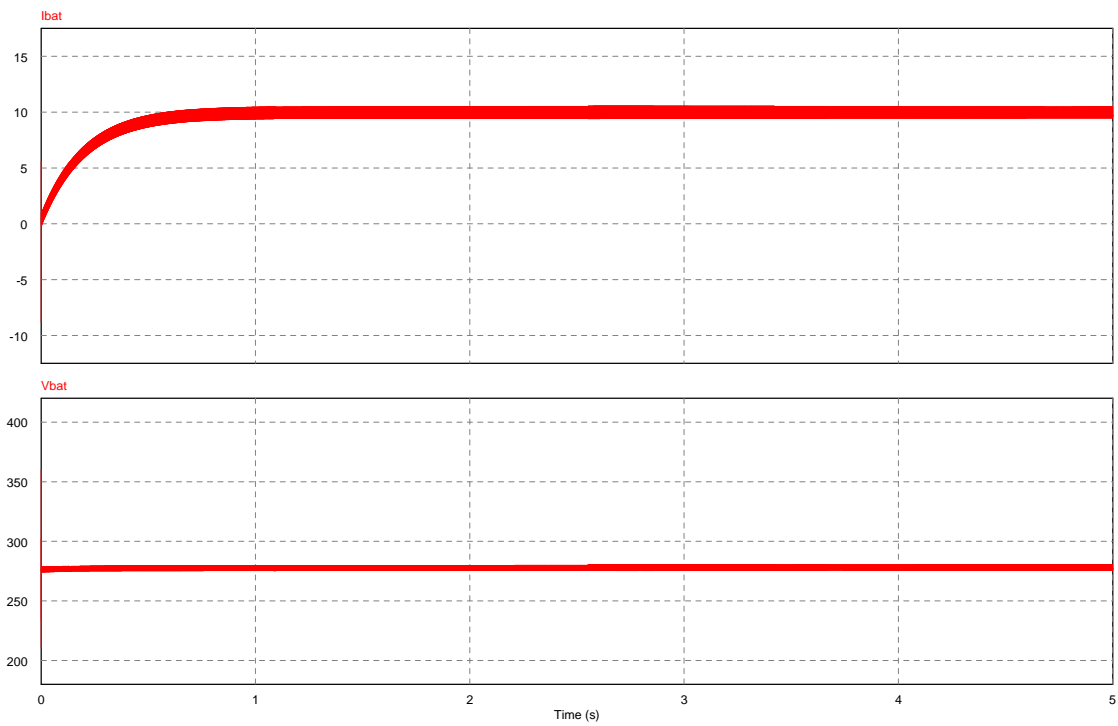


Figura 5.7: Teste de carregamento das baterias a uma corrente contínua de 10 A.

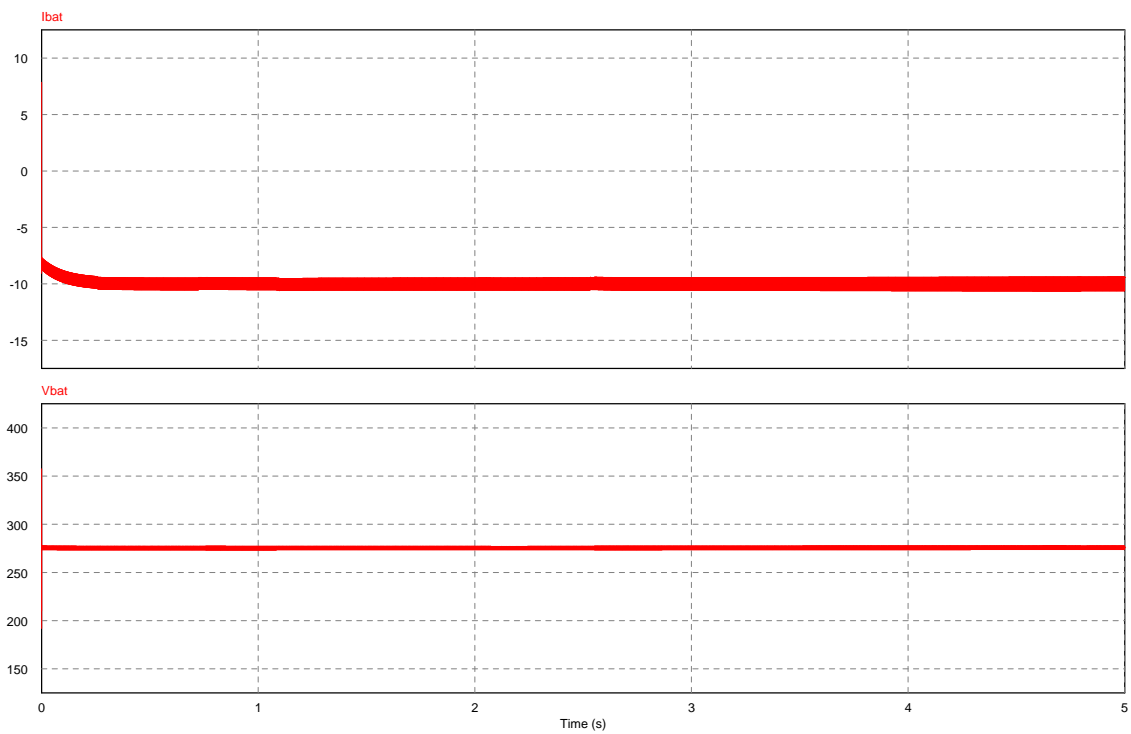


Figura 5.8: Teste de descarregamento das baterias a uma corrente contínua de 10 A.

5.3 Supercondensadores

5.3.1 Modelação do pack de supercondensadores

A empresa fabricante dos supercondensadores *bcap 3000, Maxweel*, disponibiliza informação documental na qual sugere uma modelação de supercondensadores. Na figura 5.9 é ilustrada a modelação dos supercondensadores proposta pelo fabricante em [40].

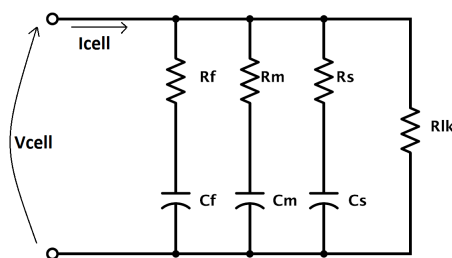


Figura 5.9: Esquema equivalente do pack de supercondensadores [40].

Os valores dos componentes elétricos da figura 5.9 são obtidos a partir da tabela 5.2, onde os valores de ϕ , j e k são calculados pela equação 5.7.

Tabela 5.2: Características da modelação de um supercondensador de N células [40].

<i>Fast</i>		<i>Medium</i>		<i>Slow</i>		<i>Leakage</i>	
R_f	$\frac{2N}{3}ESR$	R_m	$\frac{2N}{3}\phi^{-(2k-1)}ESR$	R_s	$\frac{2N}{3}\phi^{-(2k+1)}ESR$	R_{lk}	$NR_{leakage}$
C_f	$\frac{1,05}{N}C_0$	C_m	$\frac{1,05}{N}\phi^{+(2j+1)}C_0$	C_s	$\frac{1,05}{N}\phi^{+(2j-1)}C_0$		
τ_f	$\frac{2,1}{3}C_0ESR$	τ_m	$\frac{2,1}{3}\phi^{+2(1+j-k)}C_0ESR$	τ_s	$\frac{2,1}{3}\phi^{+2(1+j-k)}C_0ESR$		

$$\begin{aligned}\phi &= 0,5(\sqrt{5}-1) \\ j &= 2 \\ k &= 8\end{aligned}\tag{5.7}$$

As constantes: N , número de células, ESR , resistência equivalente em série, C_0 , capacidade inicial e $R_{leakage}$, resistência de fugas, da tabela 5.2, são também mencionadas nas tabelas 3.5 e 3.8 do capítulo 3. Substituindo os valores dos supercondensadores do projeto, os componentes elétricos terão os valores da tabela 5.3.

Tabela 5.3: Características da modelação do pack de supercondensadores do projeto.

<i>Fast</i>		<i>Medium</i>		<i>Slow</i>		<i>Leakage</i>	
R_f	4,253m Ω	R_m	5,80 Ω	R_s	15,19 Ω	R_{lk}	$NR_{leakage}$
C_f	204,5H	C_m	12,9H	C_s	33,8H		
τ_f	0,609s	τ_m	74,902s	τ_s	74,902s		

5.3.2 Análise estática do modelo de supercondensadores

Após a modelação do pack de supercondensadores, é necessário validar o modelo proposto. Os testes aos supercondensadores são realizados em *PSIM*[®] com base no seu esquema equivalente, e nos dados da tabela 5.3.

A figura 5.10 ilustra o teste de carga e descarga realizado. Foi injetada uma corrente contínua de 100 A nos supercondensadores, o que originou uma subida linear de tensão. Após cerca de 35 segundos, a injeção de corrente foi interrompida. É possível observar-se o fenómeno de auto-descarga dos supercondensadores após a interrupção de injeção de corrente. Aos 70 segundos foi simulada uma descarga a uma corrente contínua de 100 A. Este teste originou uma queda de tensão linear. Quando a tensão atingiu o valor nulo, observa-se uma ligeira recuperação de tensão dos supercondensadores. Esta recuperação irá acabar por voltar a uma tensão nula devido à auto-descarga dos supercondensadores.

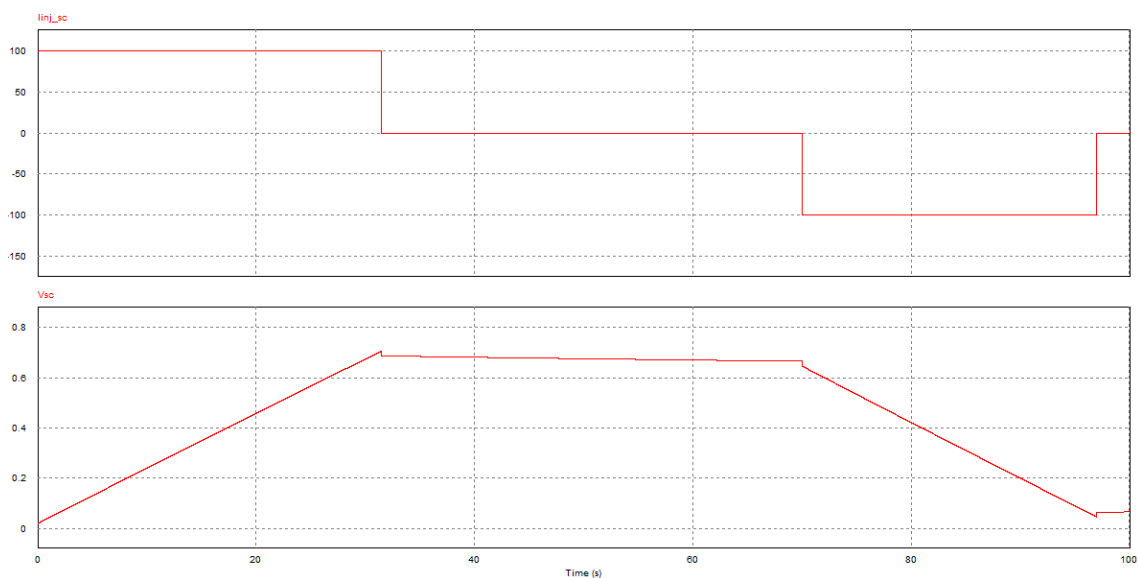


Figura 5.10: Análise estática do modelo de uma célula de supercondensador.

O esquema equivalente de supercondensadores utilizado traduz os fenómenos e comportamentos de um pack de supercondensadores. Como tal, a modelação proposta é validada pelos resultados aqui apresentados.

5.3.3 Conversor associado aos supercondensadores

O conversor associado aos supercondensadores é semelhante ao conversor das baterias, discutido na subsecção 5.2.2. Contudo, no caso dos supercondensadores os requisitos de conversão são diferentes, devido às diferentes características da fonte. A tensão de saída do conversor, que representa o barramento CC, tem uma tensão de 300 V. A potência máxima que poderá ser exigida a esta fonte é de 36252 W. Considerando que o conversor terá um rendimento de 100%, a potência de entrada é igual à de saída. Na tabela 5.4 estão os dados para o dimensionamento, bem como os valores dos componentes elétricos do conversor.

Tabela 5.4: Dimensionamento dos componentes do conversor DC/DC associado aos supercondensadores.

Dados:			Resultados:		
P_{MAX}	36252	W	<i>duty.cycle</i>	0,198	0,802
V_{bus}	300	V	L	3,403mH	
I_{busMAX}	120,84	A	C	75,135 μ F	
V_{sc}	59,4	V			
I_{scMAX}	7	A			
f	20	kHz			
ΔI_L	10	%			
ΔV_{bus}	7	%			

5.3.4 Controlo do conversor dos supercondensadores

O controlo do conversor dos supercondensadores segue o mesmo princípio que o controlo do conversor das baterias. Na figura 5.11 é representado diagrama de blocos do método de controlo do conversor dos supercondensadores proposto, quando o conversor se encontra em modo abaixador. O controlo do conversor, quando se encontra em modo elevador, apenas difere na diferença entre a corrente medida e a de referência. No modo elevador, o erro da corrente é a diferença entre a corrente medida e a de referência, enquanto no modo abaixador corresponde à diferença entre a referência e a medida.

O sinal do erro da corrente é a diferença entre a corrente que está a ser injetada (medida), e a corrente de referência. O sinal originado é utilizado por um controlador linear PI. O sinal à saída do controlador PI é utilizado pelo bloco de modulação PWM que por sua vez cria os comandos para os interruptores do conversor DC/DC.

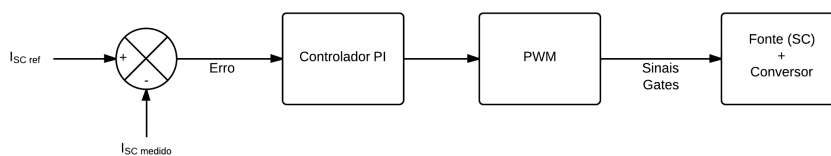


Figura 5.11: Controlo do conversor dos supercondensadores em modo *Buck*.

5.3.5 Resultados e validação

As figuras 5.12 e 5.13 apresentam os resultados de testes realizados ao conversor DC/DC.

O teste da figura 5.12, consistiu na injeção de uma corrente contínua de 10 A nos supercondensadores. É possível verificar através do gráfico superior da figura, que a corrente dos supercondensadores está a seguir a corrente de referência de 10 A. A tensão dos supercondensadores, que inicialmente era de 50 V, aumenta no decorrer da simulação. Este teste obteve resultados coerentes com os esperados, uma vez que o conversor está a funcionar em modo abaixador, sendo injetada corrente nos supercondensadores, o que originará uma subida de tensão na fonte.

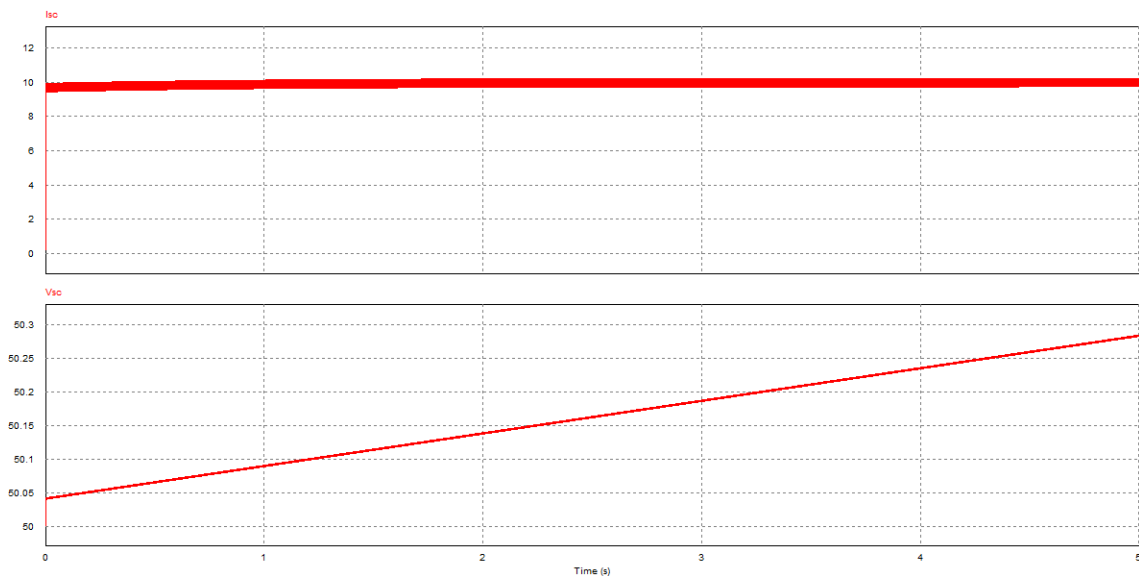


Figura 5.12: Teste de carregamento dos supercondensadores a uma corrente contínua de 10 A.

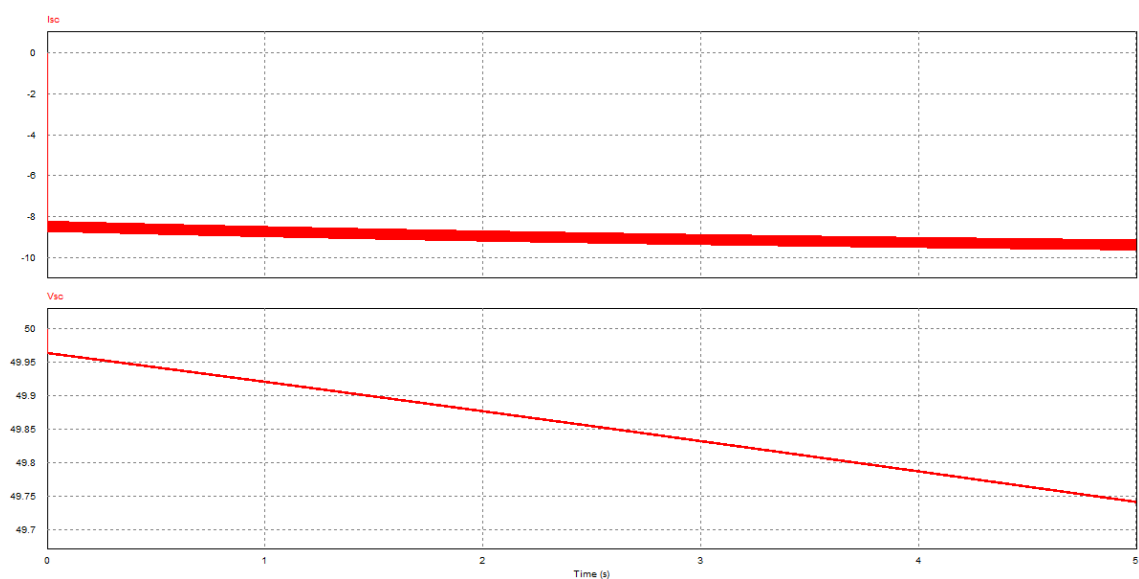


Figura 5.13: Teste de descarregamento dos supercondensadores a uma corrente contínua de 10 A.

O teste da figura 5.13 baseia-se por sua vez, na extração de uma corrente contínua de 10 A nos supercondensadores. Por observação aos gráficos da figura 5.13, pode-se verificar que está a ser retirada corrente aos supercondensadores. A corrente dos supercondensadores está a ser retificada pelo controlo do conversor para seguir a referência de 10 A. Consequentemente, a tensão dos supercondensadores está a decair. Uma vez que este teste obriga o conversor a funcionar em modo elevador, é natural que a tensão dos supercondensadores diminua devido à extração de carga a que estão a ser sujeitos.

5.4 Conclusão

Os modelos utilizados para as baterias e supercondensadores foram validados no decorrer deste capítulo, em conjunto com o controlo associado. Os modelos utilizados, ainda que sejam uma simplificação de modelos mais reais, são capazes de reproduzir os principais fenómenos associados ao funcionamento das fontes de energia. Assim, a utilização destes modelos cumpre os requisitos para o desenvolvimento do projeto. Por outro lado, os conversores DC/DC utilizados, permitem controlar da forma pretendida o fluxo energético entre as fontes e o barramento CC.

Capítulo 6

Controlo do Sistema HEV

Neste capítulo é definida e testada a máquina de estados desenvolvida para o controlo de nível superior do HEV. Este controlo tem como objetivo analisar a informação de todo o veículo e decidir o que cada componente deve realizar. Assim, são aqui definidas e descritas as ações de cada componente em cada estado.

6.1 Introdução

O controlo do sistema é realizado recorrendo a uma máquina de estados. Esta estratégia incorpora os modos de operação com que o HEV se pode deparar ao longo de um percurso. A máquina de estados desenvolvida processa a informação que recebe pelas diversas fontes do veículo, bem como as necessidades energéticas e sinais do condutor.

Para uma melhor compreensão da estratégia adotada, é necessário entender todos os estados definidos, isto é, os possíveis modos de operação que o veículo tem e o que acontece em cada um deles.

Após a correta definição de cada estado, é necessário analisar quais as transições que podem ocorrer no funcionamento do veículo que possam originar uma transição de estado.

Por fim, é então necessário enviar a informação de interesse aos controladores de cada uma das fontes de energia utilizadas.

6.2 Estrutura do controlo do sistema

A estrutura do controlo é constituída por diferentes etapas. Numa fase inicial, são adquiridos os comandos dados pelo condutor do veículo, juntamente com a informação relevante das baterias, supercondensadores e motor de combustão interna. Após esta aquisição, é ainda calculada a potência exigida pelo condutor a partir dos sinais por ele enviados, como o pedal do acelerador ou travão.

Assim, os dados adquiridos são de seguida utilizados pela máquina de estados. Esta máquina de estados irá definir em que estado se encontra o veículo, retornando na sua saída as ações a

tomar por cada uma das fontes de energia utilizadas. A título de exemplo, caso a máquina esteja no estado Híbrido, deverá acontecer o seguinte: o motor de tração funciona como motor, as baterias descarregam de forma a alimentar o barramento CC, e o motor de combustão com o gerador acoplado fornecem corrente ao barramento CC.

6.2.1 Funcionalidades de cada estado

Nesta subsecção serão expostos os diferentes estados, juntamente com as suas funcionalidades.

1. **Ini** - Este modo de funcionamento corresponde ao veículo parado e desligado. Todas as fontes de energia disponíveis no veículo encontram-se desligadas.
2. **Stop** - Neste estado, o veículo encontra-se parado, mas com o sinal de *ligar* ativado. Todo o sistema está em modo de espera, sendo que haverá uma transição para o estado seguinte caso o sinal do acelerador seja ativado.
3. **Start** - Este modo corresponde a um estado de proteção. A título de exemplo, o veículo só se irá desligar quando as baterias estiverem totalmente carregadas, para que da próxima vez que o veículo ligar seja em modo modo elétrico.
4. **Electric** - O veículo encontra-se em circulação neste modo de funcionamento. O motor elétrico de tração está a ser alimentado pelas fontes de armazenamento de energia. Estas fontes de armazenado podem ser as baterias ou os supercondensadores, contudo nunca as duas fontes em simultâneo. A fonte prioritária para a alimentação da tração são os supercondensadores. No entanto quando o estado de carga dos supercondensadores chegar ao seu limite mínimo, as baterias passam a fornecer energia à tração.
5. **Hybrid** - O veículo em modo de funcionamento híbrido ocorre quando a potência necessária pela tração é superior à que as baterias podem entregar. Nesta situação, o sistema de tração recorre ao motor ICE e às baterias para responder às suas necessidades.
6. **ICE** - Esta situação ocorre quando as baterias tiverem um estado de carga inferior ao estado de carga mínimo estipulado, mesmo que os supercondensadores ainda tenham energia disponível. Desta forma, o motor de tração está a ser alimentado pelo ICE. Caso o ICE esteja a fornecer uma energia superior à exigida pela tração, a restante irá servir para o carregamento das baterias.
7. **Braking** - Este modo de operação ocorre quando o veículo trava ou desacelera. Neste caso o motor de tração funciona como gerador e a energia que recupera da desaceleração é entregue às fontes de armazenamento de energia. Inicialmente, esta energia vai para os supercondensadores, devido à sua capacidade de carga rápida. Quando os supercondensadores atingem o seu estado de carga máximo, são carregadas as baterias.
8. **Charge to turn off** - Neste estado o veículo encontra-se com velocidade nula. Esta situação poderá ser apenas uma breve paragem ou mesmo de fim do percurso. Neste modo o motor

de combustão carrega as baterias caso estas ainda não se encontrem no seu estado de carga máximo definido.

6.2.2 I/Os (*Inputs/Outputs*) e transições de estado

Já com os estados possíveis definidos são aqui delimitadas as saídas de cada estado de acordo com as suas descrições. Na tabela 6.1 estão ilustradas as saídas de cada estado do controlo do sistema. A ação 1 corresponde à entrega de energia à tração, a ação 2 à receção de energia da tração à fonte correspondente e, por fim, a ação 0 define que o conversor associado à fonte permanece desligado, isto é, sem receber nem enviar energia.

Tabela 6.1: Ações de cada estado da máquina de estados do controlo do veículo.

		Bat	SC	ICE	Motor Tração
Ini		0	0	0	0
Stop		0	0	0	0
Start		0	0	0	0
Elétrico	SC	0	1	0	1
	Bat	1	0	0	1
Híbrido		1	0	1	1
ICE	Tração	0	0	1	1
	Tração e carregamento	2	0	1	1
Travagem Regenerativa	SC	0	2	0	2
	Bat	2	0	0	2
	Wait	0	0	0	0
Paragem e carregamento		2	0	1	0

É agora necessário listar as transições de cada estado. Na tabela 6.2 estão representadas todas as transições do controlo dependendo, obviamente, das entradas da estratégia de controlo.

Tabela 6.2: Transições entre estados da máquina de estados do controlo do veículo.

Para De	Ini	Stop	Start	Elétrico	Híbrido	ICE	Travagem Regenerativa	Paragem e Carregamento
Ini	-	Trq == 0 & Igni == 1	-	-	-	-	-	-
Stop	Igni == 0	-	Trq > 0	-	-	-	-	-
Start	-	Trq==0& SOC_bat>= 60	-	Trq>0	-	-	-	SOC_bat<= 60 & Trq==0
Elétrico	-	-	-	-	Pneeded>Pbat	SOC_bat< 45	brake>0	speed==0
Híbrido	-	-	-	Pneeded<=Pbat & SOC_bat> 50	-	SOC_bat<45	brake>0	speed==0
ICE	-	-	-	SOC_bat>50	-	-	brake>0	speed==0
Travagem Regenerativa	-	-	-	(Pneeded<=Pbat & SOC_bat> 50 & brake <=0) !(SOC_sc>10 & brake <=0)	Pneeded>Pbat & brake<=0	-	-	speed==0
Paragem e Carregamento	-	-	SOC_bat>60 Trq>0	-	-	-	-	-

As entradas do controlo, tal como já referido, são provenientes do condutor e dos componentes do sistema HEV. Estão aqui numeradas as entradas definidas para o controlo:

- Pedal do acelerador (Trq)
- Botão *Start/Stop* (Igni)
- Estado de carga das baterias (SOC_bat)
- Estado de carga dos supercondensadores (SOC_sc)
- Quantidade de combustível/gasolina (fuel)
- Velocidade do veículo (speed)
- Pedal do travão (brake)
- Potência exigida pela tração ao barramento CC (Pneeded)
- Potência da bateria (Pbat)
- Potência que o motor de combustão fornece (Pice)

Para concluir a descrição do projeto do controlo global do veículo, resta apenas definir limites para algumas variáveis. Começando pelas baterias, é necessário limitar até onde estas podem ser carregadas e descarregadas, isto é, o seu estado de carga máximo e mínimo, de forma a maximizar o seu tempo de vida e otimizar o seu desempenho. Também para as baterias, é necessário limitar a corrente que estas podem entregar. Por outro lado, os supercondensadores necessitam também de ter o seu estado de carga máximo e mínimo limitados. Na tabela 6.3 estão definidos estes limites.

Tabela 6.3: Limitações de parâmetros dos componentes do sistema.

	SOC mínimo	SOC máximo	Corrente máxima
Baterias	45%	60%	2C
Supercondensadores	10%	90%	-

Com a definição de todos os estados e transições, juntamente com os limites de operação, reúne-se toda a informação necessária para a implementação da máquina de estados. Assim, a figura 6.1 ilustra a máquina de estados implementada em *MATLAB/Simulink*[®].

Uma vez definido o estado atual, a informação de interesse é enviada para os controladores dos conversores associados a cada fonte de energia.

Baterias A máquina de estados envia ao controlador do conversor associado às baterias um sinal com a informação se esta irá permanecer desligada ou se irá receber ou enviar energia. Como tal, o controlo das baterias desliga o carregamento ou descarga caso receba a ação 0, ativa o modo *boost* (enviar) caso receba a ação 1, e ativa o modo *buck* (receber) se a ação recebida for a ação 2.

Com esta informação, é agora necessário obter a corrente de referência, já explicada no capítulo 5. Esta corrente é calculada a partir da relação entre a potência necessária e a tensão do barramento CC, tendo também em conta que esta corrente estará limitada como indicado na tabela 6.3.

Supercondensadores Os supercondensadores são alvo de um controlo idêntico ao mencionado para as baterias. A partir da saída da máquina de estados, o controlador do conversor associado aos

6.3 Conclusão

Neste capítulo foram definidos os vários modos de operação que podem ocorrer no veículo em estudo, juntamente com os limites associados a cada fonte de armazenamento. Cada estado define um conjunto de comandos que são enviados aos diversos componentes do sistema. Todo o conjunto de estados e transições foram definidas de forma a que a utilização dos recursos energéticos disponíveis seja otimizada.

Capítulo 7

Resultados

Neste capítulo são expostos os resultados associados ao controlo do veículo. Os diferentes subsistemas são ligados e organizados como já foi anteriormente referido no decorrer deste documento.

Serão apresentados os resultados do controlo do sistema em regime estático, para que possam ser observados os comportamentos dos subsistemas durante um determinado modo de operação, e em regime dinâmico, onde existem transições entre os estados.

7.1 Introdução

Com os diversos componentes do sistema já implementados em software de simulação computacional, é necessário proceder à sua validação. Apesar de já terem sido observados os resultados mais importantes para cada subsistema, o sistema global com todos os seus elementos interligados devem também ser validado.

Esta análise é imprescindível para que se possam obter conclusões importantes sobre o funcionamento do sistema, servindo também de ferramenta de deteção de possíveis modos de funcionamento inesperados.

Numa análise inicial aos resultados, procedeu-se ao teste da máquina de estados simulando uma situação em que todas as suas entradas são adaptadas de acordo com o percurso estipulado para o teste. O teste consistiu no seguinte:

- O condutor liga o veículo a partir do botão *on/off* e aos 3 segundos pressiona o acelerador. Uma vez que as baterias e supercondensadores se encontram com o estado de carga superior ao mínimo exigido, o veículo deverá passar neste momento ao *modo elétrico*.
- Aos 50 segundos, o estado de carga dos supercondensadores chega ao seu limite inferior passando então as baterias a ser a fonte energética da tração.
- Aos 70 segundos, devido ao declive da estrada, o veículo necessita de uma potência superior à potência máxima que as baterias podem disponibilizar. Assim, o seu modo de operação é alterado para o *modo híbrido*.

- Posteriormente, aos 90 segundos, as baterias encontram-se com um estado de carga inferior ao mínimo. Assim, o modo de operação irá mudar para o *modo ICE*. A partir deste momento, o motor de combustão gera a potência que o motor de tração exige, e como tal toda a potência do ICE está a ser fornecida ao motor de tração.
- Aos 120 segundos, houve uma redução de potência necessária, passando o motor de combustão a carregar também as baterias com o excedente.
- Aos 150 segundos, o estado de carga de baterias encontra-se com um valor suficiente para o veículo operar no *modo elétrico*.
- Aos 300 segundos, o condutor trava o veículo e o modo de operação passa automaticamente para o *modo de travagem regenerativa - Braking*. São inicialmente carregados os supercondensadores. Após estes atingirem o seu estado de carga máximo, a carga passará a ser direcionada para as baterias.
- Aos 470 segundos a velocidade do veículo é nula, sendo ativado o modo *charge to turn off*. Este estado obriga o sistema a carregar as baterias até ao seu estado de carga máximo, com o motor de combustão.
- O teste termina aos 700 segundos, como o modo *Stop* ativo.

Nas figuras 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8 estão ilustrados os oito estados de operação para o teste descrito acima. O estado *Ini* apenas está ativo no início do teste, como ilustrado no gráfico da figura 7.1.

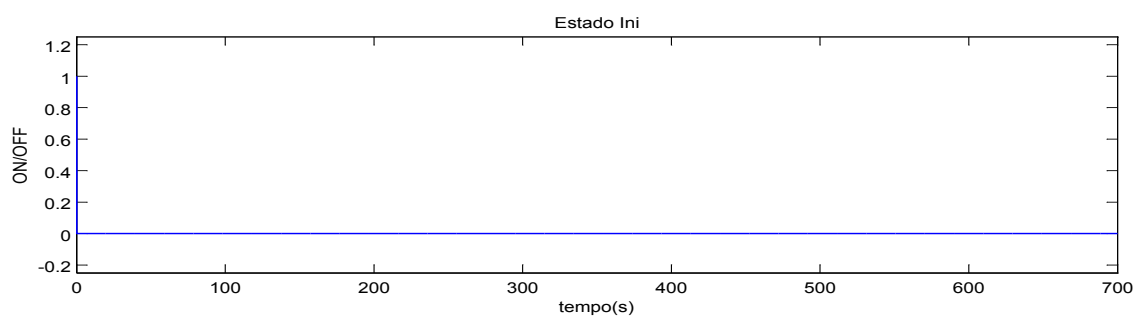


Figura 7.1: Estado do estado *Ini* da máquina de estados em MATLAB/Simulink®.

No gráfico da figura 7.2, representado pelo estado *Start*, verifica-se que este está ativo no início e perto do fim do teste. Esta ativação é confirmada pois neste estado o acelerador não está ativo e o veículo encontra-se parado.

No gráfico da figura 7.3, que representa o estado *Elétrico*, é visível que este tem integrado dois sub-estados. O nível 1 deste estado corresponde ao fornecimento de energia por parte dos supercondensadores, sendo o nível 2 por parte das baterias. Como descrito no teste, este estado teria que estar ativo a partir dos 3 aos 70 segundos e dos 150 aos 300 segundos, confirmando-se assim que os resultados vão de encontro ao esperado. Já no gráfico da figura 7.4 encontra-se

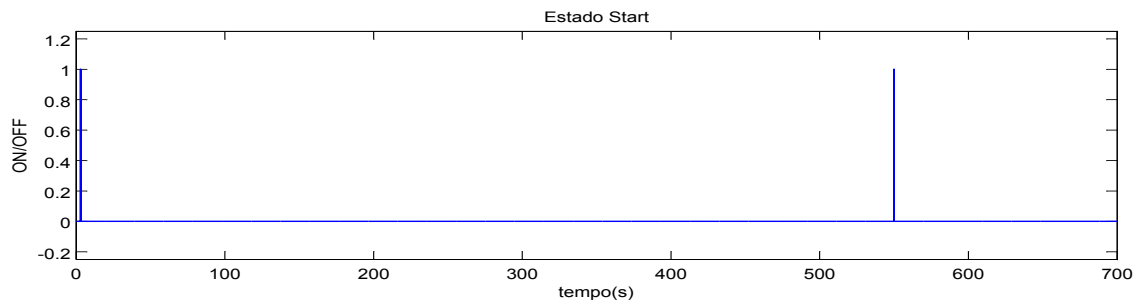


Figura 7.2: Estado do estados *Start* da máquina de estados em *MATLAB/Simulink*[®].

exposto o modo *Charge to turn off* que é ativo dos 470 aos 550 segundos. O estado desativa aos 550 segundos uma vez que as baterias já estão totalmente carregadas.

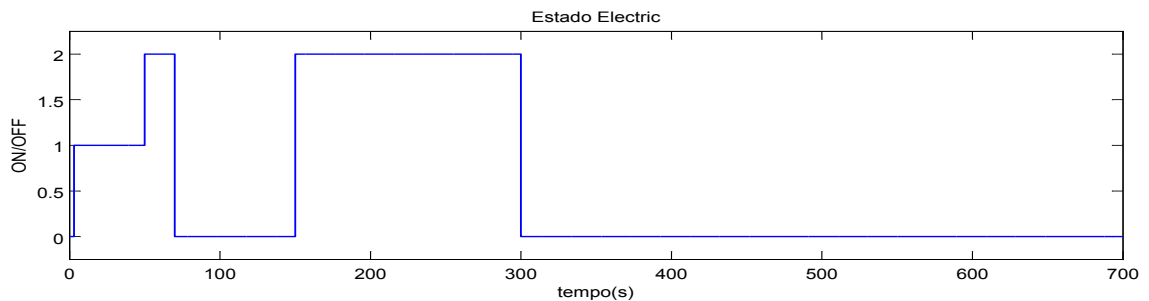


Figura 7.3: Estado do estado *Electric* da máquina de estados em *MATLAB/Simulink*[®].

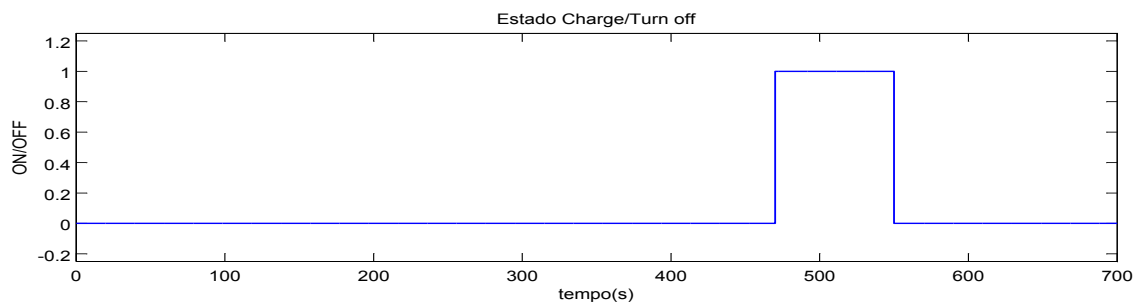


Figura 7.4: Estado do estado *Charge to turn off* da máquina de estados em *MATLAB/Simulink*[®].

No gráfico da figura 7.5, é representado o estado *Hybrid*. Tal como mencionado, este modo só estaria ativo dos 70 aos 90 segundos, o que é comprovado na figura. Já no gráfico da figura 7.6, correspondente ao modo *Braking*, que está ativo dos 300 aos 470 segundos. Neste modo, os supercondensadores são a fonte prioritária de carregamento e quando se encontram totalmente carregados, as baterias são carregadas, o que acontece a partir dos 360 segundos.

Nas figuras 7.7 e 7.8 estão expostos os gráficos do estado *ICE* e *Stop*, respetivamente. O estado *Stop* é ativo no início e no fim do percurso obrigatoriamente pois é o modo que limita o início ou fim de marcha a partir do sinal do acelerador. O estado *ICE* é ativo dos 90 aos 150 segundos uma vez que é a única fonte que consegue nesses instantes fornecer a energia necessária à tração.

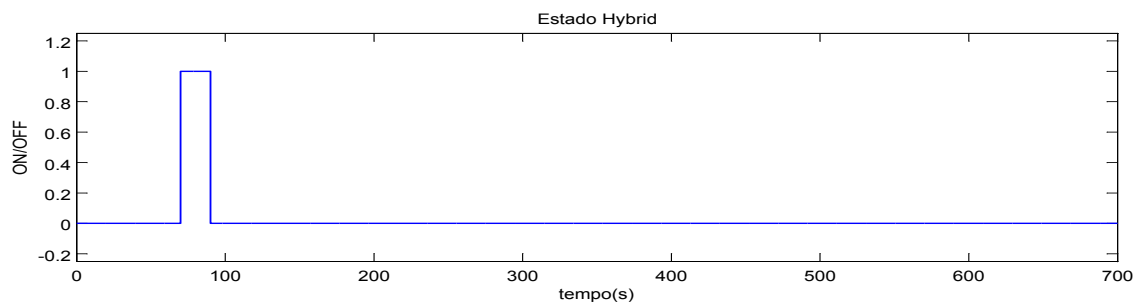


Figura 7.5: Estado dos estados *Hybrid* da máquina de estados em *MATLAB/Simulink*[®].

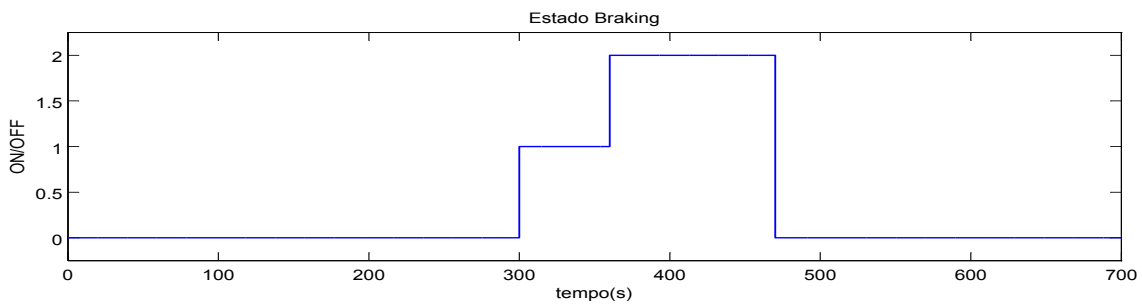


Figura 7.6: Estado do estado *Braking* da máquina de estados em *MATLAB/Simulink*[®].

Em parte do tempo da sua operação, devido à redução das necessidades de tração, o motor de combustão carrega as baterias para além de fornecer energia à tração.

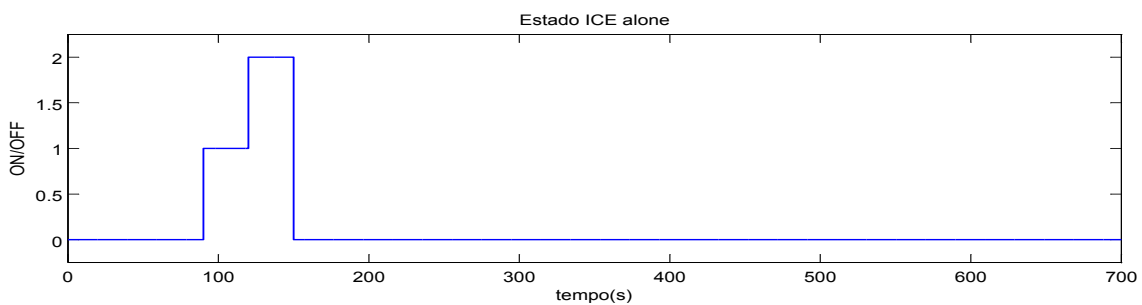


Figura 7.7: Estado do estado *ICE alone* da máquina de estados em *MATLAB/Simulink*[®].

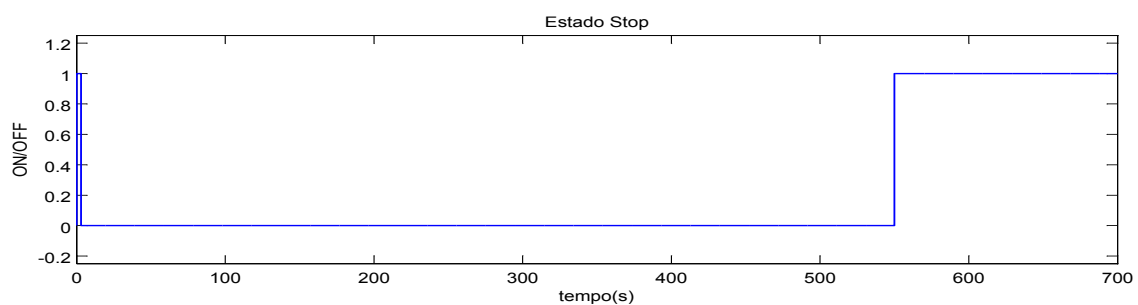


Figura 7.8: Estado do estado *Stop* da máquina de estados em *MATLAB/Simulink*[®].

Como se pode comparar e observar entre o teste exposto e os gráficos apresentados com os resultados, a máquina de estados funciona como o esperado. Como tal, a próxima etapa é a junção de todos os subsistemas do projeto num só elemento de forma a observar a interação entre todos os sistemas.

7.2 Resultados de análise estática do sistema

Os dois primeiros testes consistiram numa simulação do veículo em modo de operação Eléctrico. A potência exigida, pela tração às fontes, é constante de 3kW até aos 3 segundos, mudando neste instante para 4.5kW. O binário de referência do motor de tração é de 100Nm.

Na figura 7.9 estão representados os resultados no primeiro teste acima descrito. O sistema encontra-se com os supercondensadores com um estado de carga superior ao seu limite mínimo.

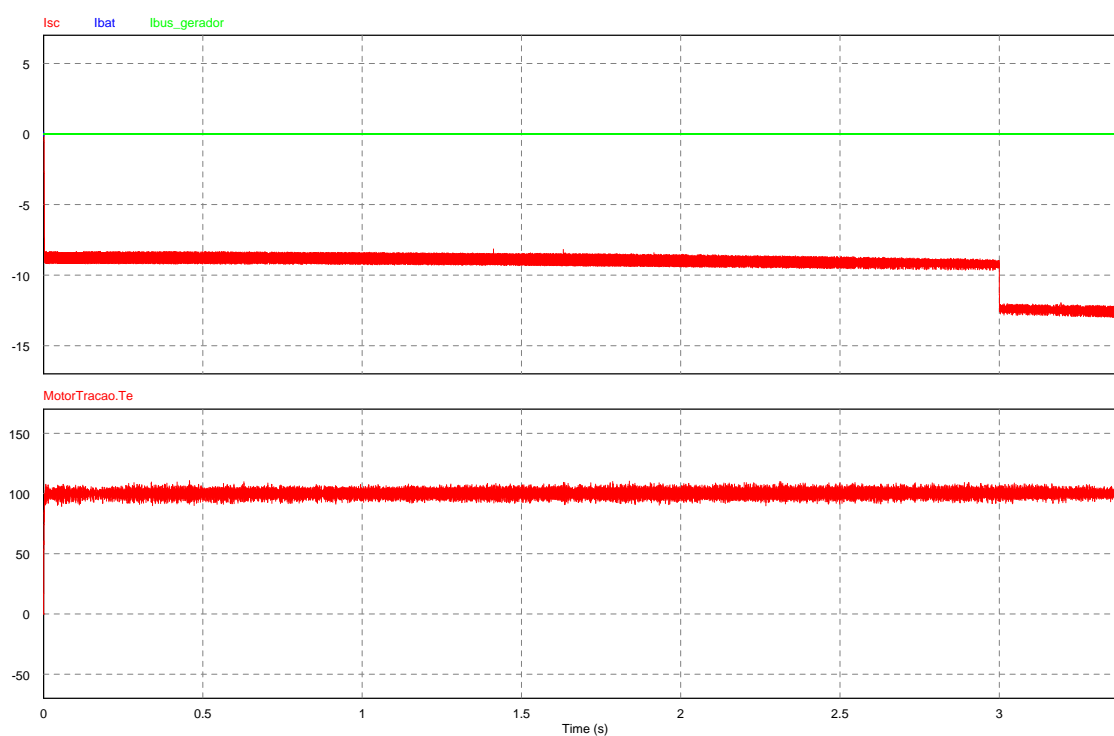


Figura 7.9: Resultados de uma simulação ao veículo em modo de operação Eléctrico com $SOC_{sc} > SOC_{scmin}$.

Pode-se observar que a fonte a que o sistema recorreu inicialmente foram os supercondensadores. As exigências foram todas satisfeitas por estas fontes, pois o seu estado de carga esteve sempre acima do limite mínimo. Assim, as restantes fontes mantiveram-se desligadas. O motor, ao ser alimentado pelos supercondensadores, atinge e mantém-se no binário de referência imposto.

A figura 7.10 apresenta os resultados do segundo teste já descrito. Nesta situação o estado de carga dos supercondensadores encontra-se abaixo dos seus limites mínimos, mas o estado de carga das baterias está acima do seu valor mínimo. Como tal, a fonte que irá realizar o fornecimento de corrente será as baterias.

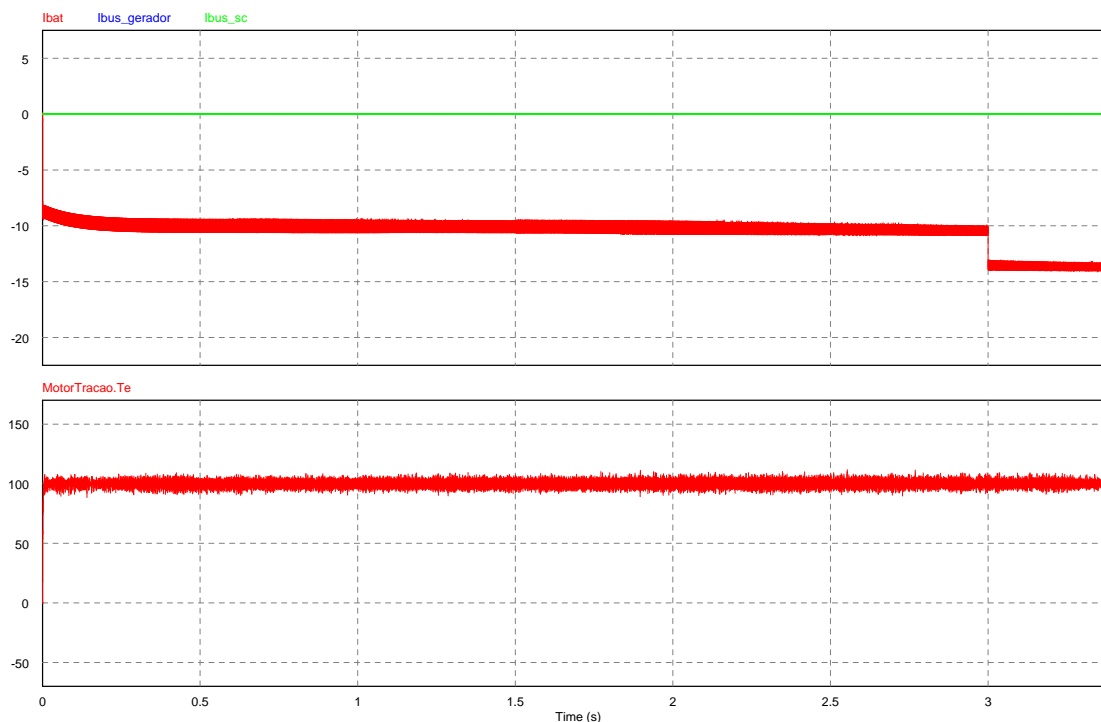


Figura 7.10: Resultados de uma simulação ao veículo em modo de operação Elétrico com $SOC_{sc} < SOC_{scmin}$ e $SOC_{bat} > SOC_{batmin}$.

Pela figura pode-se confirmar que foram as baterias a responder às exigências da tração. A corrente exigida às baterias, neste teste, é a mesma que no teste anterior, representado na figura 7.9. É notório que a resposta das baterias é mais lenta do que a dos supercondensadores, como já mencionado no decorrer do presente documento. O motor segue também o binário de referência como o esperado.

No teste seguinte foi realizada uma transição de estado, embora sempre em modo Elétrico. Exigiu-se ao sistema uma potência constante de 4,5kW. Aqui, tanto os supercondensadores como as baterias encontram-se com os seus estados de carga acima dos limites mínimos de cada um.

Devido aos SOC das duas fontes de armazenamento, baterias e supercondensadores, estar acima dos seus limites mínimos, o controlo ativa os supercondensadores como o esperado. Quando o SOC dos supercondensadores desce até ao seu limite mínimo, passam a ser utilizadas as baterias. A figura 7.11 apresenta os resultados deste teste, e pode-se comprovar no gráfico superior pela corrente a azul dos supercondensadores e da vermelha das baterias. Neste teste, é possível comprovar melhor a diferente resposta destas duas fontes, como já referido.

O teste proposto, com os resultados representados pela figura 7.12, baseou-se no modo Regeneração Energética. Nesta situação é simulada uma regeneração de energia em que a potência entregue é de 4,5kW e o binário de referência é de -100Nm. Como já descrito e explicado no capítulo 6, a primeira fonte a ser carregada pela regeneração são os supercondensadores.

Esta energia regenerada é entregue ao barramento CC com a ajuda do controlo do motor de tração, que nesta situação atua como gerador. Devido à tensão do barramento ser fixa e de 300V,

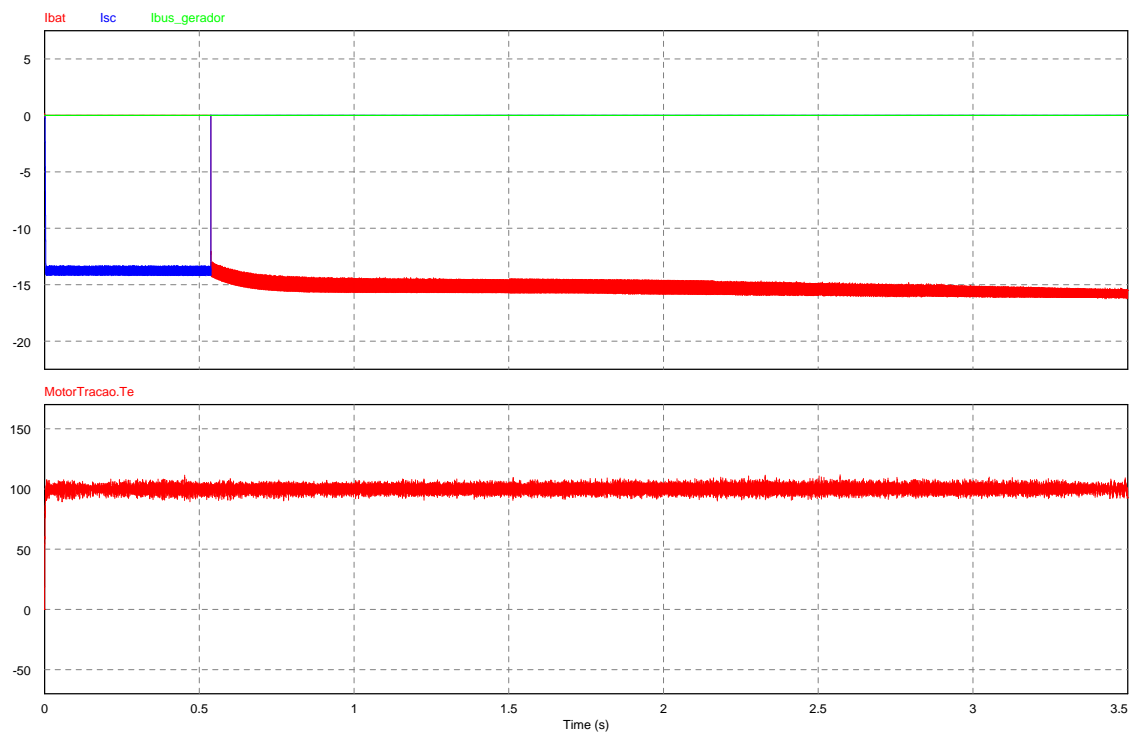


Figura 7.11: Resultados de uma simulação ao veículo em modo de operação Elétrico.

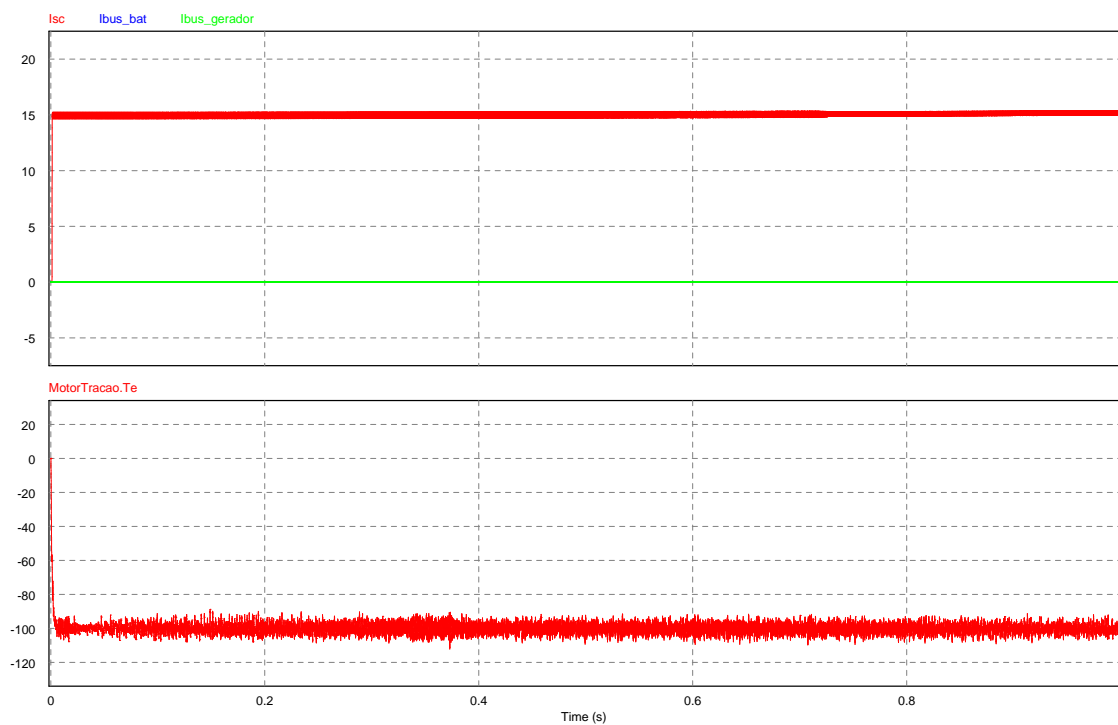


Figura 7.12: Resultados de uma simulação ao veículo em modo de operação Regeneração Energética.

a corrente de referência para os supercondensadores é definida e enviada para o controlo. No gráfico superior da figura pode-se observar que os supercondensadores encontram-se a receber energia com a corrente de referência definida pelo controlo.

7.3 Resultados de análise dinâmica do sistema

Após a análise de alguns dos diferentes estados, foram realizados testes às transições de estado com o objetivo de efetuar uma análise dinâmica ao sistema.

Assim, os resultados da figura 7.13 consistem numa transição entre os modos Elétrico e de Regeneração Energética. É então simulada uma situação de condução em que o veículo está em andamento e aos 1,5 segundos é realizada uma travagem. A potência na situação de tração e regeneração considerou-se igual e de valor 4,5kW. O binário de referência do motor é de 100Nm enquanto é realizada tração e de -100Nm quando o veículo se encontra em regeneração.

Na figura 7.13 encontram-se representados os resultados do presente teste. Pela curva da corrente das baterias, é observado que está a ser extraída corrente à fonte de acordo com a potência exigida e com a tensão do barramento CC. De facto, entre as baterias e os supercondensadores, só as primeiras possuem um estado de carga superior ao seu valor mínimo. Como descrito, aos 1,5 segundos o motor apresenta um binário negativo, funcionando a partir desse momento como gerador. A corrente das baterias são levadas a zero, pois a fonte prioritária de carregamento nesta situação são os supercondensadores devido ao seu SOC ser inferior ao SOC mínimo. Assim sendo, os supercondensadores são carregados com uma corrente que depende da tensão do barramento CC e da potência entregue pelo motor de tração.

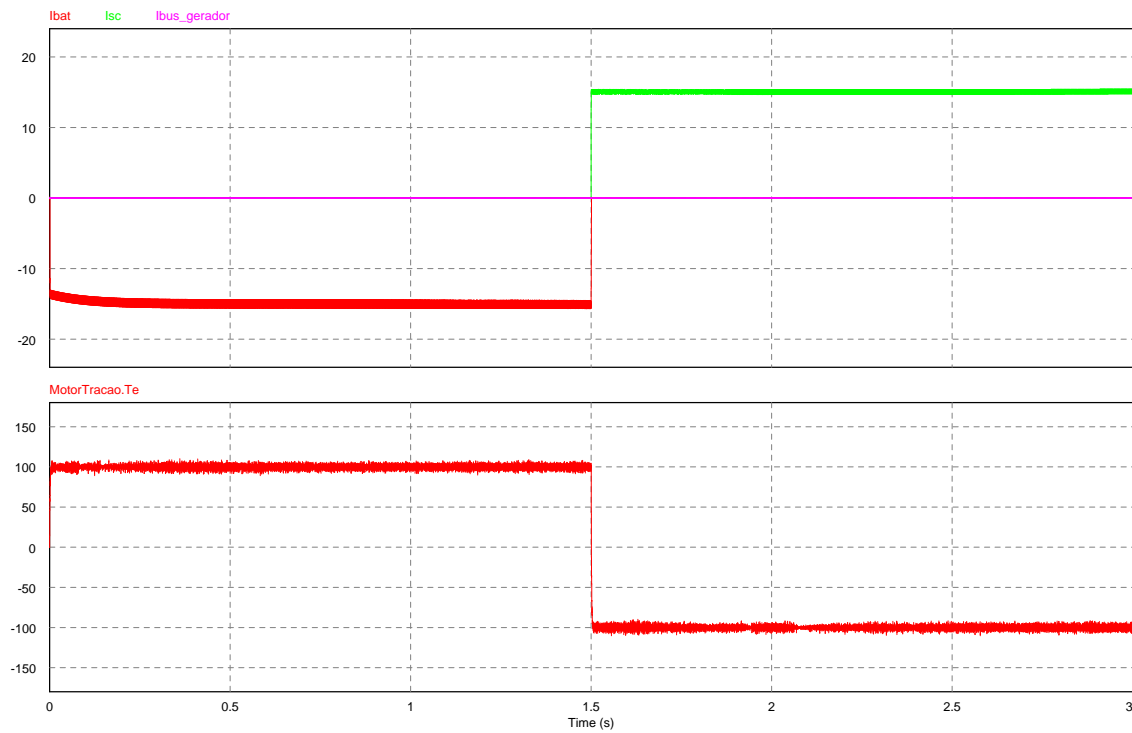


Figura 7.13: Resultados de uma simulação ao veículo com uma transição de modos de operação: Elétrico para Regeneração Energética.

7.4 Conclusão

Neste capítulo foram expostos os resultados associados ao controlo global de todo o sistema. Após um conjunto de análises estáticas e dinâmicas, foram validados os diferentes modos de operação e as transições definidas no decorrer deste documento.

Capítulo 8

Conclusão e trabalho futuro

8.1 Conclusões

Este documento abordou o estudo e desenvolvimento de um sistema de interface entre diferentes fontes de energia e o sistema associado à tração num veículo híbrido. Para que pudessem ser escolhidas as fontes energéticas a utilizar para o desenvolvimento do projeto, foi feito um estudo teórico das soluções mais comuns atualmente existentes. Ficou assim definido que o veículo híbrido com topologia em série recorre a baterias, supercondensadores e a um motor ICE em conjunto com um gerador para satisfazer as suas necessidades energéticas. Estas necessidades, por sua vez, levaram ao dimensionamento preciso dessas mesmas fontes. Assim, foram usadas 144 células de baterias de polímeros de lítio, 22 células de supercondensadores *bcap 3000* da *Maxwell*. O motor elétrico de tração e o gerador são EMRAX 228, uma máquina síncrona de ímanes permanentes. O motor de combustão utilizado foi o motor original do veículo alvo de estudo neste projeto, um *Smart ForTwo*.

Após a implementação em software de simulação do modelo das fontes, conversores e controlo associado, foram realizados testes para a validação de cada subsistema, para que pudesse ser validado o cumprimento dos requisitos do projeto.

Foi também realizado o controlo de nível superior em *MATLAB/Simulink*[®]. Para tal, foram primeiramente definidos os vários modos de operação que podem ocorrer num veículo. Posteriormente, e para controlar as funcionalidades de cada modo e as respetivas transições entre modos, foi formulada uma máquina de estados capaz de enviar informação para os controladores de cada subsistema.

Os resultados obtidos, não só dos subsistemas isolados, como também do controlo de nível superior, foram de encontro aos resultados inicialmente esperados. No entanto, e tratando-se de um sistema de elevada complexidade e com constantes de tempo muito distintas entre os seus diversos componentes, tornou-se difícil por limitações temporais testar de forma exaustiva uma série de possíveis situações de condução.

Do exposto considera-se que os objetivos propostos para esta dissertação foram cumpridos na sua totalidade.

8.2 Trabalho futuro

Nesta secção são indicadas algumas sugestões que podem levar a melhorias no projeto até aqui desenvolvido. De forma sumária, como sugestões de trabalho futuro, propõe-se o seguinte:

- Realização de testes com um maior tempo de simulação para uma melhor análise do comportamento do sistema, aumentando assim a fiabilidade do projeto.
- Realização de simulações com o percurso normalizado. Esta situação não foi possível devido às limitações computacionais deparadas ao longo da realização da dissertação.
- Melhoramentos no modelo do motor de combustão, tornando-o mais robusto. Seria de grande interesse obter o consumo instantâneo e uma maior amplitude de controlo do motor.
- Juntamente com o ponto anterior, seria de interesse desenvolver um METP.
- Otimizar o controlo de nível superior, aumentando a sua robustez e realizando também previsão futura.
- Realizar uma interface condutor/controlo de forma ao condutor confirmar se o carregamento das baterias, ao desligar o carro, possa ser feito.
- Projetar todas as proteções associadas aos circuitos de potência contra sobrecargas e picos de corrente.

Referências

- [1] J. Bauman e M. Kazerani. An analytical optimization method for improved fuel cell-battery-ultracapacitor powertrain. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Sept 2009.
- [2] A. Allegre, A. Bouscayrol, e R. Trigui. Influence of control strategies on battery/supercapacitor hybrid energy storage systems for traction applications. Em *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*, Sept 2009.
- [3] S. Lukic, J. Cao, R. Bansal, F. Rodriguez, e A. Emadi. Energy storage systems for automotive applications. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, June 2008.
- [4] M. Pagano e L. Piegari. Hybrid electrochemical power sources for onboard applications. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2007.
- [5] T. Park e T. Kim. Novel multi-mode single leg converter for hybrid electric vehicles. Em *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*.
- [6] L. Solero, A. Lidozzi, e J. Pomilio. Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles. Em *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE*, 2004.
- [7] M.-Y. Ayad, S. Pierfederici, S. Raël, e B. Davat. Voltage regulated hybrid dc power source using supercapacitors as energy storage device. *Energy Conversion and Management*, 2007.
- [8] G. Park, S. Lee, S. Jin, e S. Kwak. Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains. *Expert Systems with Applications*, 2014.
- [9] D. Rekioua, S. Bensmail, e N. Bettar. Development of hybrid photovoltaic-fuel cell system for stand-alone application. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [10] C. Chan. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proceedings of the IEEE*, Feb 2002.
- [11] M. Ehsani. *Modern Electric, Hybrid Electric, And Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, And Design*. Power Electronics and Applications Series. Taylor & Francis Group, 2005.
- [12] B. Wilamowski e J. Irwin (editors). *The Industrial Electronics Handbook. Second Edition. Power Electronics and Motor Drives*. CRC Press, 2011.
- [13] K. Bayindir, M. Gözükcük, e A. Teke. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 2011.
- [14] L. Cardoso. Desenvolvimento de 'range extender' para veículo eléctrico. Tese de mestrado, FEUP, 2011.

- [15] M. Zeraoulia, M. Benbouzid, e D. Diallo. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Nov 2006.
- [16] N. Hashemnia e B. Asaei. Comparative study of using different electric motors in the electric vehicles. Em *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on*, Sept 2008.
- [17] J. Soares. Traction Control for Hybrid Electric Vehicles, 2012.
- [18] D. Magalhães. Modelo de Baterias com Aplicação em Sistemas de Gestão de Baterias (BMS) de Veículos Elétricos (EVs), 2013.
- [19] J. Bauman e M. Kazerani. An improved powertrain topology for fuel cell-battery-ultracapacitor vehicles. Em *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, June 2008.
- [20] J. Bauman e M. Kazerani. A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, March 2008.
- [21] P. Garcia, L. M. Fernandez, J. P. Torreglosa, e F. Jurado. Comparative study of four control systems for a 400-kw fuel cell battery–powered tramway with two dc/dc converters. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2013.
- [22] M. Silva, J. Trovao, e P. Pereirinha. Implementation of a multiple input DC-DC converter for Electric Vehicle power system. Em *Energetics (IYCE), Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on*, July 2011.
- [23] P. Thounthong, S. Raël, e B. Davat. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 2009.
- [24] X. Zhang, C. Mi, A. Masrur, e D. Daniszewski. Wavelet-transform-based power management of hybrid vehicles with multiple on-board energy sources including fuel cell, battery and ultracapacitor. *Journal of Power Sources*, 2008.
- [25] A. Oukaour, M. Poulighen, B. Tala-Ighil, H. Gualous, E. Pigeon, O. Gehan, e B. Boudart. Supercapacitors aging diagnosis using least square algorithm. *Microelectronics Reliability*, 2013.
- [26] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, B. Davat, e M. Hinaje. Comparative Study of Fuel-Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, Oct 2009.
- [27] Amin, B.R. Trilaksono, A. Sasongko, A.S. Rohman, C.J. Dronkers, e R. Ortega. Model predictive control of hybrid fuel cell/battery/supercapacitor power sources. Em *System Engineering and Technology (ICSET), 2012 International Conference on*, Sept 2012.
- [28] H. Zhao e A. Burke. Fuel Cell Powered Vehicles Using Supercapacitors–Device Characteristics, Control Strategies, and Simulation Results. *Fuel Cells*, 2010.
- [29] N. Mohan, T. Undeland, e W.P. Robbins. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. Wiley, 1995.

- [30] O. Onar e A. Khaligh. Dynamic Modeling and Control of a Cascaded Active Battery/Ultra-Capacitor based Vehicular Power System. Em *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE*, Sept 2008.
- [31] A. Khaligh e Zhihao Li. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, July 2010.
- [32] K. Bayindir, M. Gözükcük, e A. Teke. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Conversion and Management*, 2011.
- [33] S. Soyulu, editor. *ELECTRIC VEHICLES - MODELLING AND SIMULATIONS*. Intech, 2011.
- [34] Technical characteristics: Smart - fortwo coupe - 0.6i (45 hp).
- [35] D. Crolla e B. Mashadi. *Vehicle Powertrain Systems: Integration and Optimization*. Wiley, 2011.
- [36] X. Wei. Modeling and control of a hybrid electric drivetrain for optimum fuel economy, performance and driveability, 2004.
- [37] S. Overington e S. Rajakaruna. High Efficiency Control of Internal Combustion Engines in Blended Charge Depletion/Charge Sustenance Strategies for Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2014.
- [38] L. Pereira. Sistema de Gestão de Baterias de Iões de Lítio Orientado ao Modelo da Bateria, 2013.
- [39] T. Kim e W. Qiao. A Hybrid Battery Model Capable of Capturing Dynamic Circuit Characteristics and Nonlinear Capacity Effects. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Dec 2011.
- [40] Miller JNJ P. Cedar MI Miller, J., Power McCleer Inc. Jackson MI McCleer, Patrick J., e Maxwell Technologies Inc. San Diego Cohen, M. MAXWELL TECHNOLOGIES WHITE PAPER: Energy Buffers.

Anexo A

Implementação em Software do Sistema Realizado

Na figura A.1 está representado o sistema global. Do lado esquerdo encontra-se o bloco que contém o motor de tração juntamente com o inversor e controlo associados. Já do lado direito de cima para baixo apresenta-se o bloco com gerador também com o conversor AC/DC e controlo associados, seguindo-se pelo bloco dos supercondensadores com o seu conversor DC/DC e controlo, e por fim o bloco das baterias também com o pack de baterias juntamente com o conversor DC/DC e controlo associados.

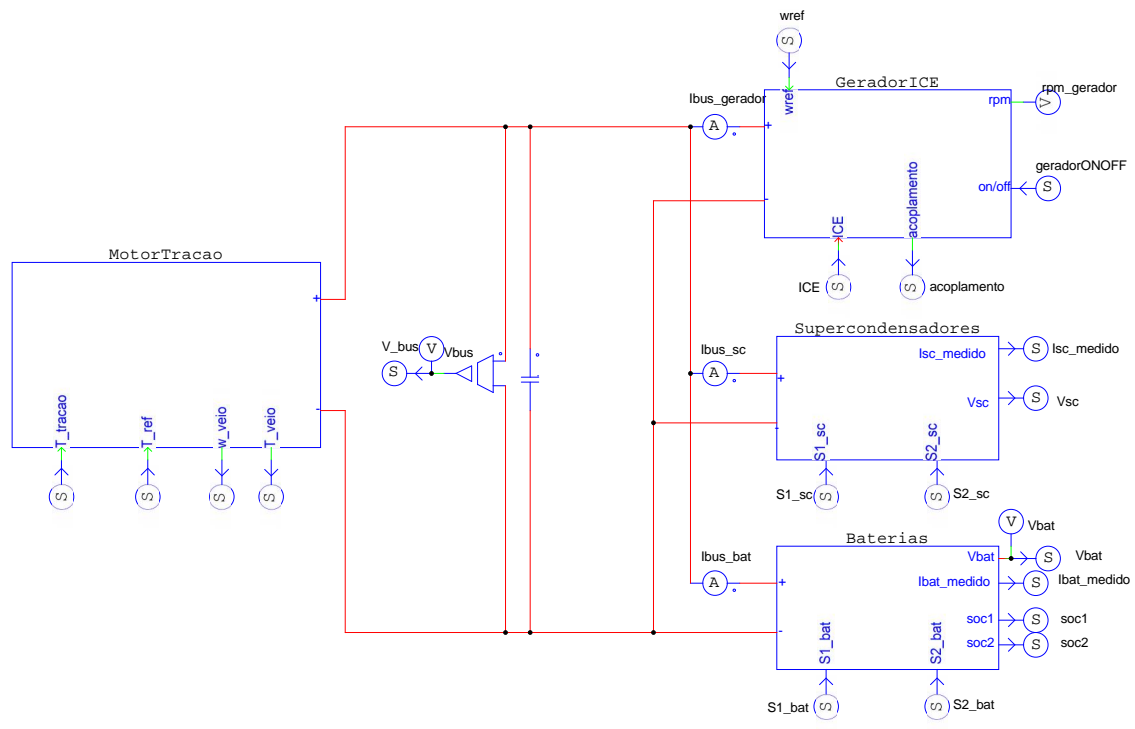


Figura A.1: Sistema total, sem controladores, realizado em *PSIM*[®].

A figura A.2 ilustra o gerador com o conversor e controlo associados. Este esquema eléctrico está dentro do bloco do gerador da figura A.1.

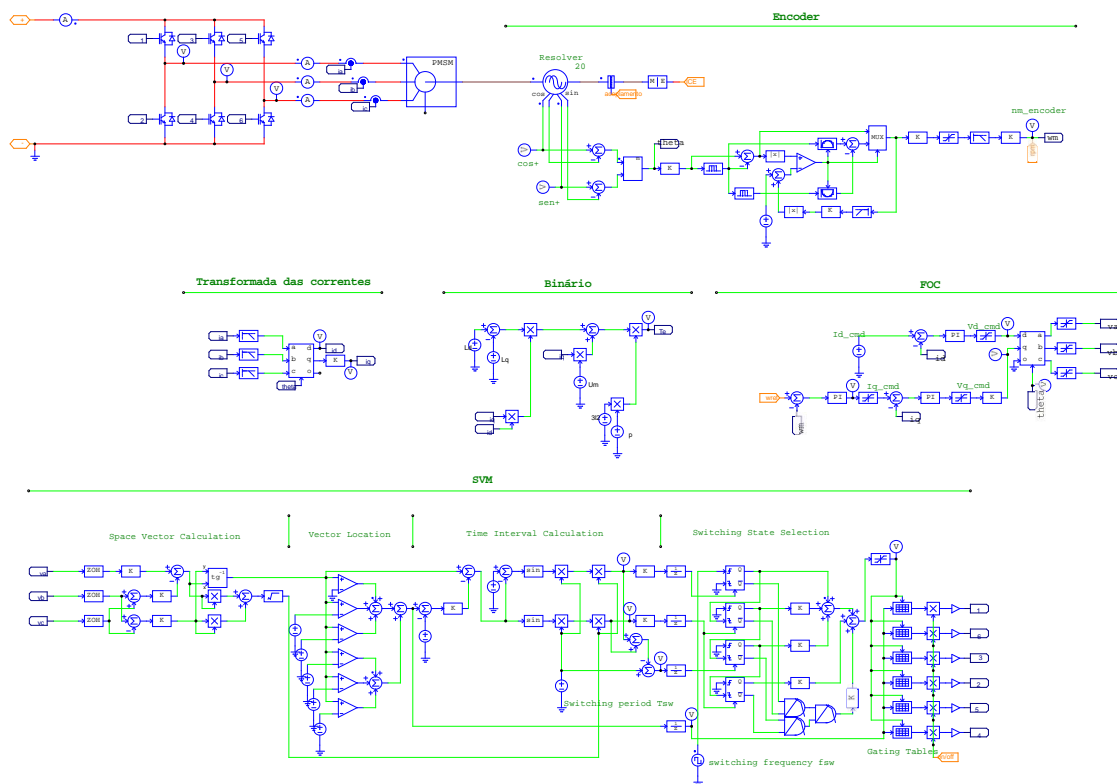


Figura A.2: Gerador, conversor e controlo associados realizado em PSIM[®].

A figura A.3 apresenta o conteúdo do bloco dos supercondensadores ilustrado na figura A.1. Aqui é apresentado o conversor DC/DC, os supercondensadores e a modulação PWM.

A figura A.4 ilustra as baterias, o conversor DC/DC e modulação PWM associadas. Todo este circuito está integrado dentro do bloco baterias da figura A.1.

Na figura A.5 está representado o motor de tração eléctrico bem como o seu inversor e controlo associados. Este circuito está contido no bloco motor de tração da figura A.1.

Posteriormente à apresentação do projeto implementado em PSIM[®], é exposto, de seguida, o restante controlo dos diversos conversores bem como o controlo do veículo e o motor de combustão interna implementado em MATLAB/Simulink[®] e a sua interligação com o PSIM[®].

Na figura A.6 está representado o motor de combustão interna bem como o sinal do acelerador que controla o mesmo. Foi necessário recorrer a atuadores de binário e sensor de velocidades para realizar a ligação com o gerador. Dentro do bloco ICE está o conteúdo da figura 4.5.

Na figura A.7 é representada a interligação entre o MATLAB/Simulink[®] e PSIM[®] bem como o tratamento dos dados adquiridos que seguiram posteriormente para o controlo do veículo.

Na figura A.8 é apresentada a dinâmica do veículo baseada no estudo feito no capítulo 3. A potência que é exigida ao motor é também uma entrada do controlador do veículo, como já mencionado no capítulo 6.

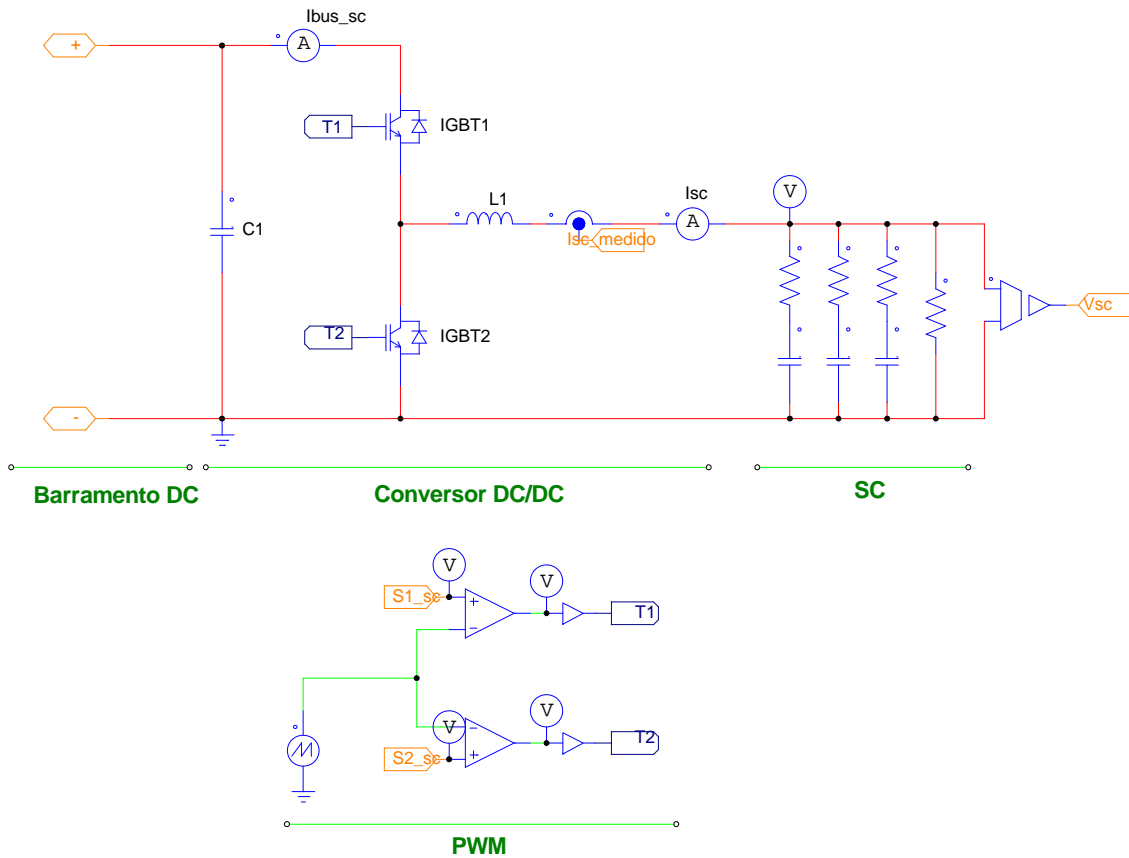


Figura A.3: Supercondensadores e controle PWM associados realizado em *PSIM*[®].

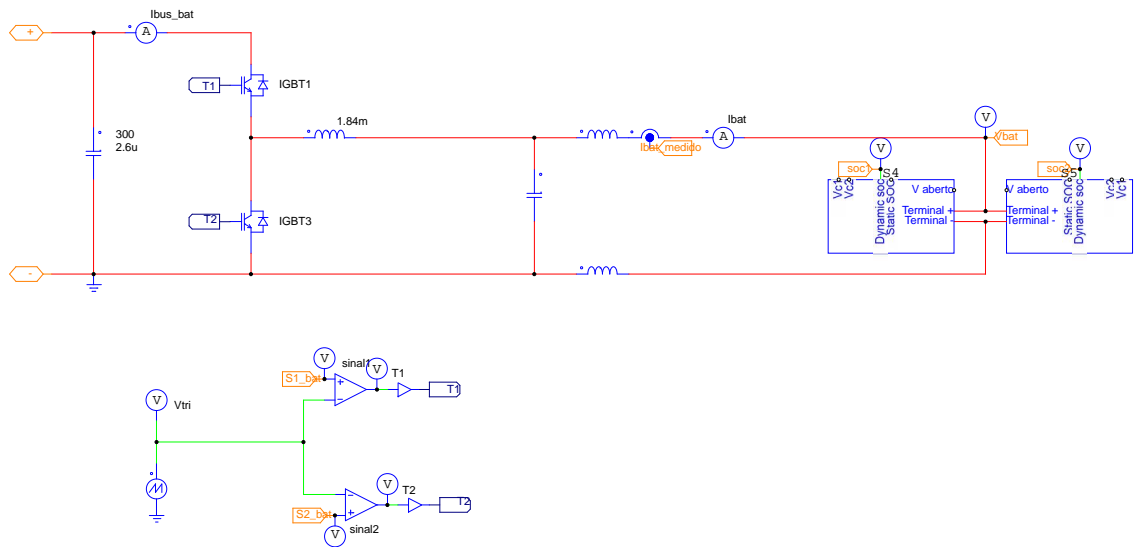


Figura A.4: Baterias e controle PWM associados realizado em *PSIM*[®].

Após a aquisição de todos os sinais necessários, estes são utilizados pelo controle do veículo, ilustrado num bloco na figura A.9.

A figura A.10 apresenta o bloco do controlador do conversor dos supercondensadores. São

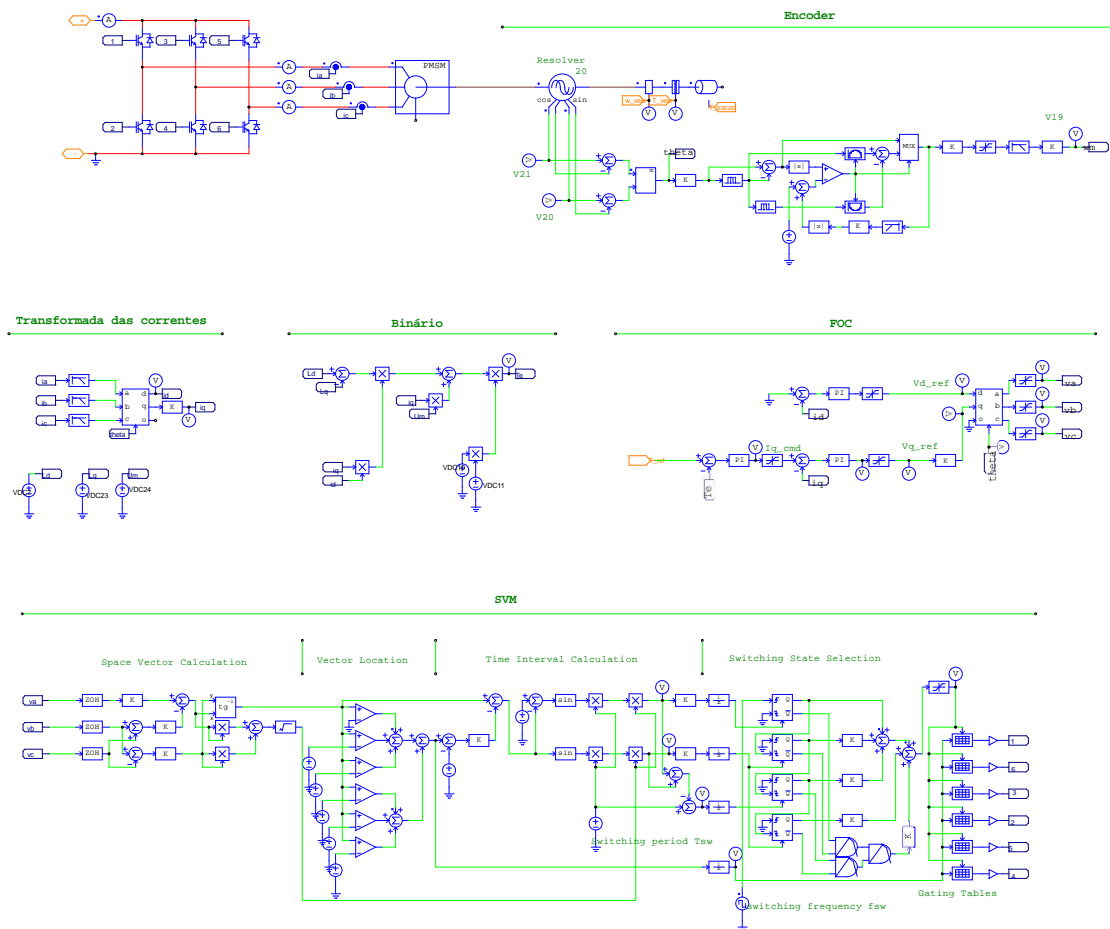


Figura A.5: Motor de tração, inversor e controlo associados realizado em *PSIM*[®].

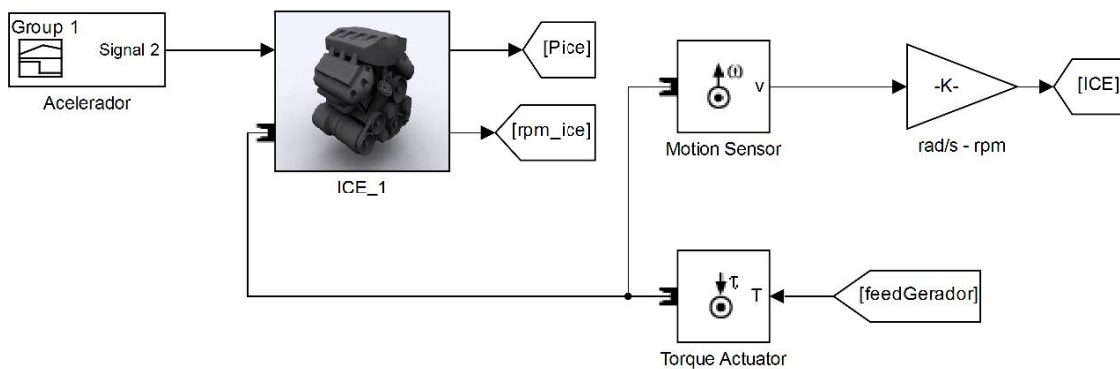


Figura A.6: Bloco do motor de combustão e interligação com o gerador, realizado em *MATLAB/Simulink*[®].

introduzidos os sinais do estado do controlador, corrente de referência e corrente medida nos supercondensadores. Estes sinais são os necessários para o controlo mencionado no capítulo 5.

Na figura A.11 é ilustrado o conteúdo do bloco apresentado na figura A.10. Aqui é definido o modo de operação do conversor dos supercondensadores e posteriormente realizado o controlo do respetivo modo. Os sinais de saída são os sinais para as *gates* dos interruptores do conversor

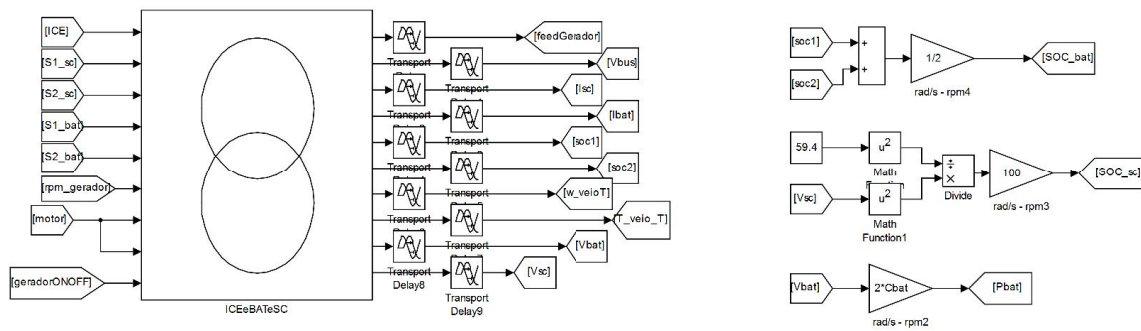


Figura A.7: Aquisição de sinais e interligação entre *MATLAB/Simulink*[®] e *PSIM*[®].

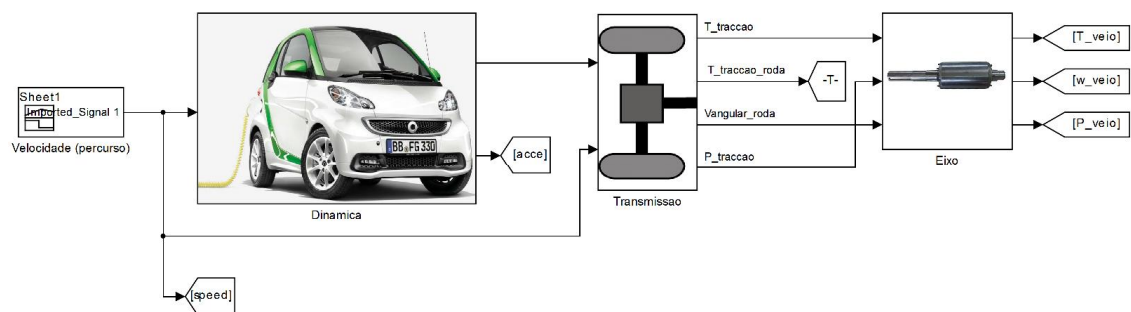


Figura A.8: Dinâmica do veículo em *MATLAB/Simulink*[®].

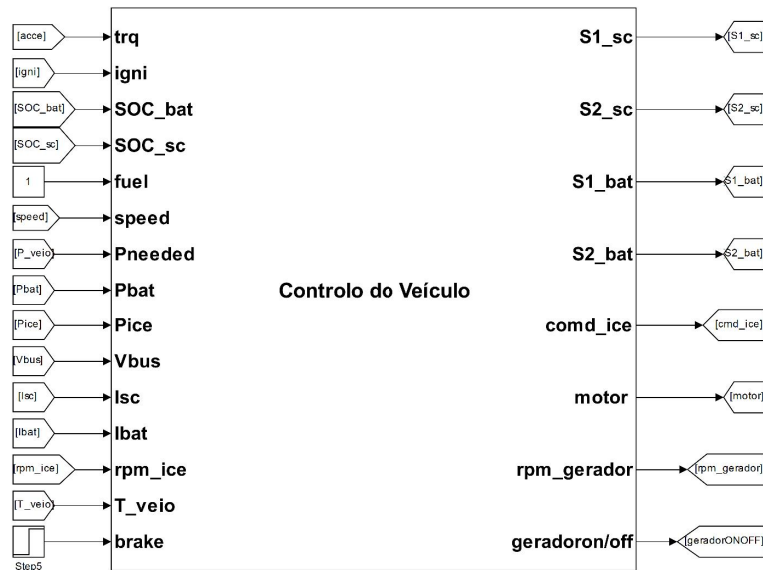


Figura A.9: Bloco do controle do veículo com as entradas e saídas mencionadas no capítulo 6, realizado em *MATLAB/Simulink*[®].

associado.

A figura A.12 apresenta o controle existente nos blocos de controle dos diferentes modos de controle do conversor. Este recebe a corrente medida nos supercondensadores e a corrente de referência e realiza o controle já referido e abordado no capítulo 5.

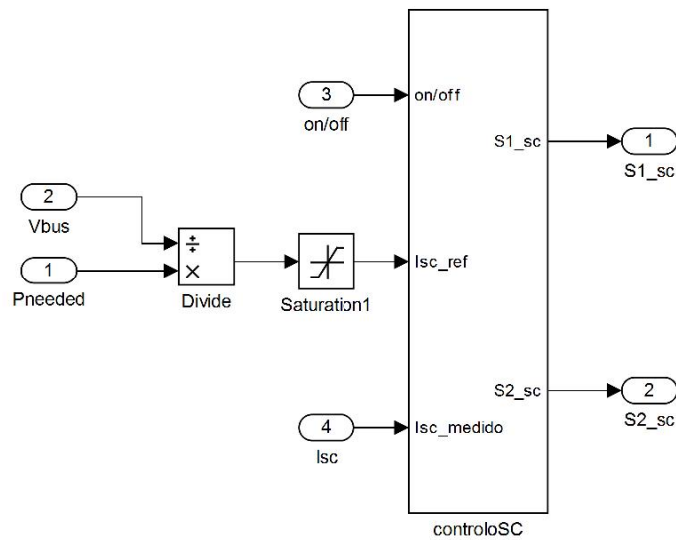


Figura A.10: Bloco de controle dos supercondensadores realizado em *MATLAB/Simulink*[®].

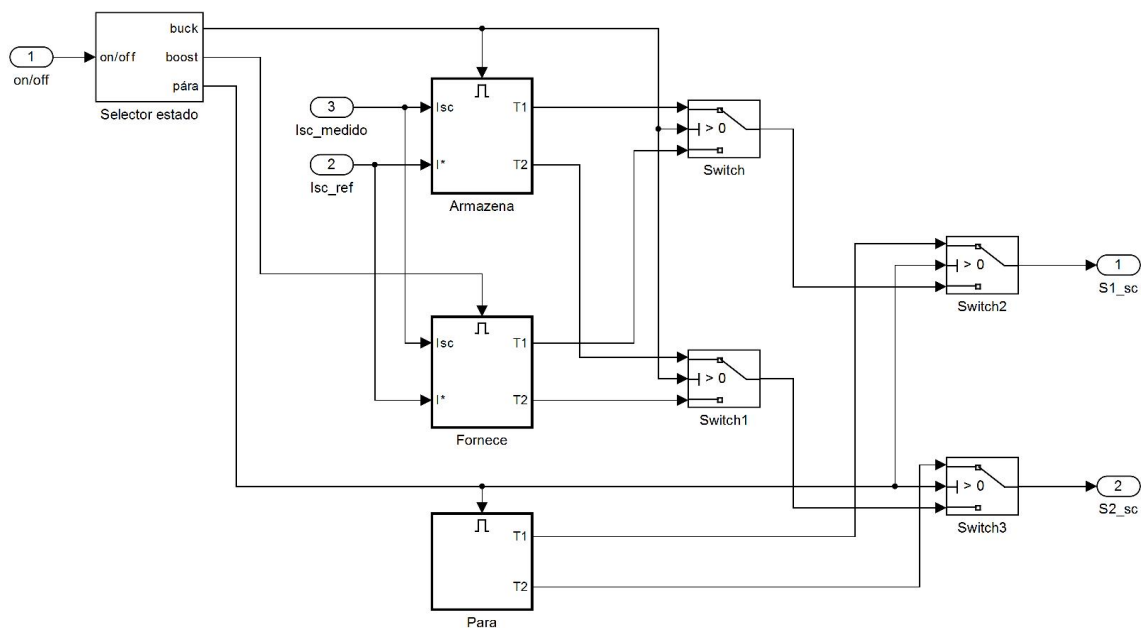


Figura A.11: Bloco de seleção e controladores de cada modo do conversor associado aos supercondensadores, realizado em *MATLAB/Simulink*[®].

A figura A.13 mostra o mesmo que a figura A.10 mas para as baterias. As entradas do bloco do controle são a corrente de referência e a corrente medida nas baterias bem como o controle do modo em que o conversor irá operar.

A figura A.14 apresenta o controle do conversor associado às baterias. Tal como mencionado para a figura A.11, existe um bloco que seleciona o modo a que o conversor irá operar e dependendo da sua ação o controle do respectivo modo irá gerar os sinais para as *gates* dos interruptores do conversor da bateria.

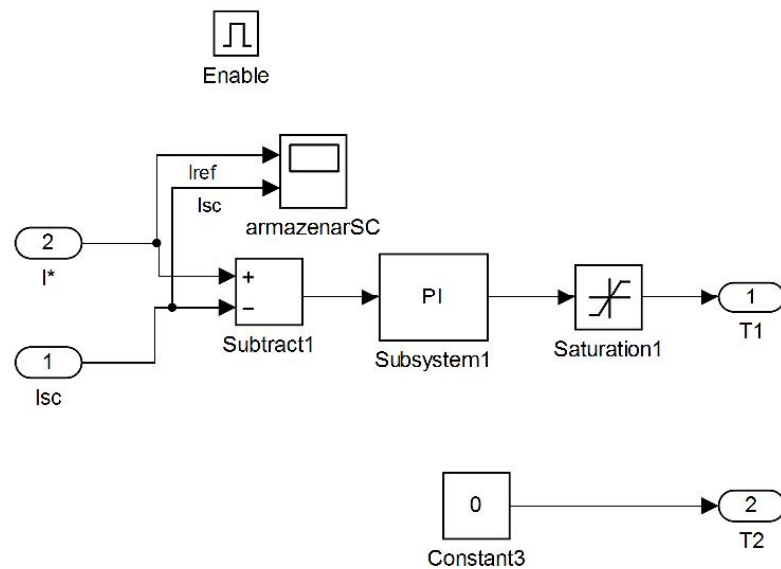


Figura A.12: Controlo dos supercondensadores em modo elevador em *MATLAB/Simulink*[®].

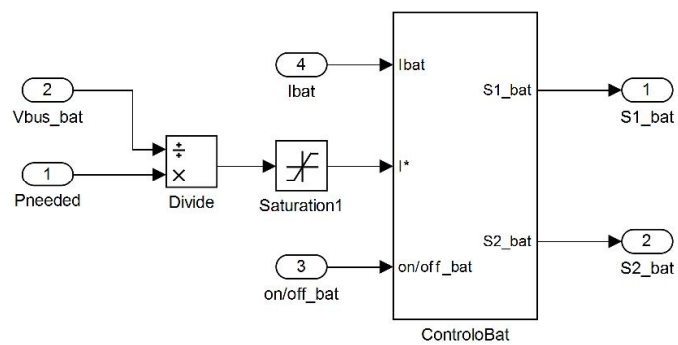


Figura A.13: Bloco de controlo das baterias realizado em *MATLAB/Simulink*[®].

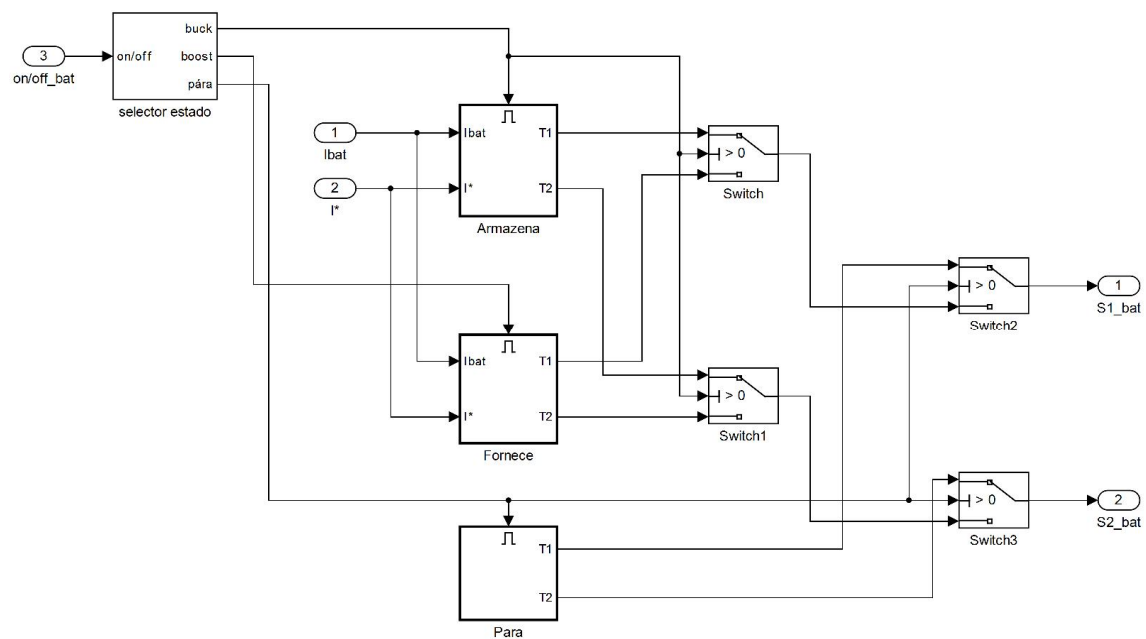


Figura A.14: Bloco de seleção e controladores de cada modo do conversor associado às baterias, realizado em *MATLAB/Simulink*[®].