

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Desenvolvimento do sistema de armazenamento para o *Powertrain* de um veículo elétrico

Luís Miguel de Oliveira Maia

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Adriano da Silva Carvalho

23 de Julho de 2019

Resumo

O principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento do sistema de armazenamento para o powertrain de um veículo elétrico baseado numa arquitetura híbrida, com controlo do sistema e gestão da autonomia.

Inicialmente é apresentado o estudo realizado sobre o estado da arte dos veículos híbridos elétricos atualmente em comercialização e desenvolvimento, e dos vários conceitos associados a este conceito, como são os conversores, os sistemas de armazenamento de energia, e metodologias de controlo e gestão.

Após esta fase, foram decididos os componentes e métodos que seriam utilizados, sendo estes sujeitos a testes, quer a nível computacional, quer a nível prático.

Durante a fase das simulações do sistema a desenvolver são apresentados os resultados obtidos no decorrer do seu desenvolvimento, com um crescente aumento de complexidade.

Finalizada a fase de testes em ambiente computacional, foi desenvolvido e montado um protótipo em pequena escala (a nível laboratorial).

De seguida são validadas as metodologias de controlo analisadas, quer a nível teórico, quer em simulações, quer através da realização de testes no protótipo físico.

Após esta validação são retiradas todas as conclusões possíveis acerca dos resultados obtidos.

Abstract

The main objective of this dissertation is the development of the powertrain system for an electric vehicle based on a hybrid architecture, with system control and autonomy management.

Initially, the study carried out on the state of the art of hybrid electric vehicles currently in commercialization and development, and the various concepts associated with this, such as converters, energy storage systems, and control and management methodologies are presented.

After this phase, the components and methods that would be used were decided, being these tested both at the computational level and at the practical level.

During the simulations phase of the system to be developed are presented the results obtained during its development, with an increasing increase of complexity.

After the phase of testing in a computational environment, a prototype was developed and assembled on a small scale (at laboratory level).

Then, the control methodologies analyzed are validated, both theoretically and in simulations, or through physical prototype tests.

After this validation, all possible conclusions about the results are obtained.

Agradecimentos

Esta dissertação é um marco nestes meus 24 anos de vida e é resultado de um longo processo de aprendizagem junto de imensas pessoas que me foram dando imenso conhecimento e vontade para dar sempre o meu melhor. Este percurso não foi um mar de rosas, mas uma sucessão de acontecimentos que me fizeram sentir das mais diversas formas, desde o choro após aquele exame que correu menos bem até aquela nota que não estava à espera, mas que acabou por recompensar todo o esforço. Todas estas coisas acabaram por acontecer com o um propósito e fizeram-me crescer imenso.

Não querendo reduzir os agradecimentos a um conjunto de pessoas específico porque facilmente me esqueceria de alguém, e agradecendo a todos aqueles que por mim passaram e afirmando que todos apareceram na minha vida com um propósito, existem nomes que não posso deixar de referir.

Quero agradecer:

Aos meus pais, que são responsáveis por tudo aquilo que pude ter e viver até agora, nunca me faltaram com nada, não porque me tenham dado sempre o que queria, mas por me terem dado tudo aquilo que podiam e me terem inculcado valores muito importantes, dos quais nunca, mas mesmo nunca vou abdicar.

Ao meu irmão, que sei que nunca sairá do meu lado e que sabe que também não sairei do seu, que há uns anos dizia que não queria ser um "Engenheirinho como o irmão", mas que agora tudo indica que, e espero que se confirme, acabará por seguir as minhas pisadas.

À minha namorada que me acompanhou ao longo deste processo, e acredito que continuará a acompanhar, que nunca deixou de me apoiar, que me ouviu falar de cenas muito estranhas, mas que esteve sempre presente, e que sabemos que estamos, e estaremos sempre um para o outro.

Aos meus avós, às minhas tias e aos meus tios, e a todos os restantes familiares que sempre me apoiaram e quiseram o melhor para mim.

Aos meus amigos, que sabem que por eles faço tudo o que posso e peço desculpa por os ter deixado um pouco de parte nesta fase, mas os dias só têm 24 horas e foi imensa coisa para conciliar.

Ao meu orientador, professor Adriano da Silva Carvalho por todo o apoio que me deu ao longo do tempo, desde as primeiras aulas de ACCM, com um método de ensino inovador nesta faculdade, o "*active learning*" que ao início foi estranho, mas depois se tornou uma ótima ferramenta que me incentivou a estar um passo à frente e a querer saber algo mais.

E a todos aqueles que fui conhecendo ao longo do tempo, nas escolas por onde passei, nos escuteiros, na FEUP, por toda a parte. Aqueles que acabaram por se tornar algo mais, espero continuar a conhecê-los, cada vez mais e melhor, e espero que, tal como eles me fazem, também deixe a minha marca e os faça crescer dando o melhor de mim.

Acabados os agradecimentos, não posso deixar de comentar que adorava que o meu avô e a minha bisavó pudessem assistir a este momento, algo que não é possível, mas que acredito que os deixaria cheios de orgulho.

Para terminar, um muito obrigado a Todos!

Luís Miguel de Oliveira Maia

*“Não havendo sábios conselhos, o povo cai,
mas na multidão de conselhos há sabedoria.”*

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Abreviaturas e Símbolos	xv
1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivos	6
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Introdução	7
2.2 Arquitetura híbrida	7
2.2.1 Perspetiva histórica, técnica e tecnológica	8
2.2.2 Sistema de propulsão	19
2.2.3 Sistema de geração de energia	20
2.2.4 Sistema de armazenamento de energia	28
2.2.5 Barramento DC	50
2.2.6 Conversão de níveis de tensão	52
2.2.7 Conversores DC/DC	59
2.2.8 Conversores AC/DC	65
3 Caracterização do problema	75
3.1 Definição do problema	75
3.2 Solução proposta	76
4 Metodologia e Plano de trabalho	79
4.1 Metodologia de abordagem	79
4.2 Tecnologias e ferramentas a usar	79
4.3 Identificação de tarefas com objetivos	80
5 Desenvolvimento do projeto	83
5.1 Introdução	83
5.2 Caracterização do sistema	83
5.3 Sistema de geração de energia elétrica	84
5.3.1 Modelação das células de combustível	85
5.4 Sistema de armazenamento de energia elétrica	87

5.4.1	Modelação das baterias	88
5.4.2	Modelação dos supercondensadores	89
5.5	Conversor DC/DC	90
5.6	Barramento DC	91
5.7	Carga	91
5.8	Controlo	92
5.9	Sistema desenvolvido em ambiente computacional	93
5.10	Sistema desenvolvido em ambiente laboratorial	103
6	Conclusão e Trabalho Futuro	109
6.1	Conclusão	109
6.2	Trabalho Futuro	111
A	Características de autocarros disponíveis em mercado	113
B	Resultados dos testes em malha aberta (conversor da bateria)	115
C	Resultados dos testes em malha aberta (conversor dos supercondensadores)	119
D	Valores de <i>deadtime</i>	123
	Referências	125

Lista de Figuras

1.1	Emissões totais de CO_2 por fonte	1
2.1	<i>Toyota Prius</i> , primeiro veículo híbrido vendido em massa	9
2.2	Arquitetura híbrida do tipo série	9
2.3	<i>Opel Ampera</i>	11
2.4	<i>Chevrolet Volt</i>	11
2.5	Arquitetura híbrida do tipo paralelo	12
2.6	<i>Honda Insight</i>	13
2.7	Arquitetura híbrida do tipo split	14
2.8	<i>Toyota Prius</i>	16
2.9	<i>Lexus RX400h</i>	16
2.10	<i>Hyunday Tucson</i>	18
2.11	<i>Toyota Mirai</i>	18
2.12	<i>Honda Clarity</i>	18
2.13	Arquitetura híbrida do tipo série com recurso a células de combustível	19
2.14	Sistema de propulsão de um HEV série	20
2.15	Princípio de funcionamento de uma célula de combustível	21
2.16	Tensão e potência em função da corrente numa célula de combustível	22
2.17	Modelo dinâmico de uma célula de combustível	28
2.18	Modelos de baterias (a) Modelo elétrico baseado em <i>Thevenin</i> (b) Modelo elétrico baseado na impedância (c) Modelo elétrico baseado na duração	44
2.19	Modelo RC de um supercondensador	47
2.20	Modelo de <i>Zubieta</i> e <i>Nobert</i> de um supercondensador	48
2.21	Modelo dinâmico de um supercondensador	48
2.22	Conversor Buck Boost Bidirecional	62
2.23	Conversor Buck Boost Bidirecional em Cascata	62
2.24	Conversor Cuk Bidirecional	63
2.25	Conversor em Meia-Ponte Não Isolado Bidirecional	63
2.26	Conversor Ressonante Bidirecional	64
2.27	Retificador de Onda Completa	68
2.28	Conversor Controlado em Meia Ponte	69
2.29	Conversor Controlado em Ponte Completa	70
2.30	Conversor NPC Controlado Multinível	71
2.31	Conversor MMC Controlado Multinível	72
3.1	Modelo representativo do sistema a desenvolver	76
5.1	Modelo representativo do sistema a desenvolver e respetivos subssistemas	83
5.2	Modelo elétrico de uma célula de combustível	86

5.3	Modelo elétrico de um <i>pack</i> de células de combustível	87
5.4	Modelo elétrico da bateria utilizado em simulação	89
5.5	Modelo elétrico dos supercondensadores utilizado em simulação	90
5.6	Esquema do sistema de controlo desenvolvido	93
5.7	Tensão do <i>pack</i> de células de combustível	94
5.8	Relação V-I da célula de combustível simulada	94
5.9	Relação P-I da célula de combustível simulada	94
5.10	Tensão da bateria	95
5.11	Tensão dos supercondensadores	95
5.12	Conversor DC/DC desenvolvido	96
5.13	Corrente na carga (cima) e tensão no barramento DC (baixo) para o controlo por histerése	97
5.14	Corrente na carga (cima) e tensão no barramento DC (baixo) por controlo PI	98
5.15	Carga imposta ao sistema simulado	98
5.16	Tensão do barramento no sistema simulado	99
5.17	Correntes das diferentes fontes no sistema simulado	99
5.18	Esquema do mecanismo de PLL desenvolvido em <i>MatLab/Simulink</i>	101
5.19	Resultado obtido para o mecanismo de PLL fornecido pelo <i>software</i>	101
5.20	Resultado obtido para o mecanismo de PLL desenvolvido em <i>MatLab/Simulink</i>	102
5.21	Esquema do mecanismo de PLL desenvolvidos em PSIM	102
5.22	Resultado obtido para o mecanismo de PLL desenvolvido em PSIM	103
5.23	Sistema a desenvolver	104
5.24	Sistema desenvolvido	106
B.1	Ganho em função do <i>duty-cycle</i> com $V_{in}=12V$	115
B.2	Ganho em função do <i>duty-cycle</i> com $V_{in}=24V$	116
B.3	Ganho em função do <i>duty-cycle</i> com $V_{in}=60V$	117
C.1	Ganho em função do <i>duty-cycle</i> com $V_{in}=12V$	119
C.2	Ganho em função do <i>duty-cycle</i> com $V_{in}=24V$	120
C.3	Ganho em função do <i>duty-cycle</i> com $V_{in}=60V$	121

Lista de Tabelas

2.1	Características dos veículos híbridos do tipo série considerados	11
2.2	Características do veículo híbrido do tipo paralelo considerado	14
2.3	Características dos veículos híbridos do tipo split considerados	16
A.1	Características dos autocarros elétricos considerados	113
B.1	Resultados obtidos para $V_{in} = 12V$	115
B.2	Resultados obtidos para $V_{in} = 24V$	116
B.3	Resultados obtidos para $V_{in} = 60V$	117
C.1	Resultados obtidos para $V_{in} = 12V$	119
C.2	Resultados obtidos para $V_{in} = 24V$	120
C.3	Resultados obtidos para $V_{in} = 60V$	121
D.1	Resultados obtidos para $V_{in} = 20V$	123
D.2	Resultados obtidos para $V_{in} = 40V$	123
D.3	Resultados obtidos para $V_{in} = 60V$	123

Abreviaturas e Símbolos

AC	Alternating Current
AFC	Alkaline Fuel Cell
APU	Auxiliary Power Unit
Cd	Cádmio
CHB	Cascaded H-bridge Converter
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Dióxido de Carbono
CS	Control Strategy
DC	Direct Current
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DOD	Depth of Discharge
ECE	External Combustion Engine
ECU	Electronic Control Unit
EM	Electric motor
EMI	ElectroMagnetic Interference
EPLL	Enhanced PLL
ESR	Equivalent Series Resistance
EV	Electric Vehicle
FC	Fuel Cell
FCC	Flying Capacitor Converter
FCV	Fuel Cell Vehicle
FM	Frequency Modulation
G2V	Grid to Vehicle
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HVDC	High Voltage Direct Current
IAHE	International Association of Hydrogen Energy
ICE	Internal Combustion Engine
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
KOH	Hidróxido de Potássio
kWh	kiloWatt Hour
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MIEEC	Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
MMC	Modular Multilevel Converter
MPM	Multiple Pulse Modulation

MSPWM	Modified Sinusoidal Pulse Width Modulation
$NaNi(Cl)_2$	Cloreto de Níquel-Sódio
NaS	Sulfureto de sódio
NASA	National Aeronautics and Space Administration
$Ni(OH)_2$	Hidróxido de Níquel
NPC	Neutral Point Clamped
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell ou Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PLL	Phase Locked Loop
PPS	Peaking Power Source
PWM	Pulse Width Modulation
QPLL	Quadrature PLL
RC	Resistência-Condensador
SEAI	Sistemas de Engenharia - Automação e Instrumentação
SLI	Starting, Lightning, and Ignition systems
SOC	State Of Charge
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SOGI	Second Order Generalized Integrator
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
SRF	Synchronous Reference Frame
STEP	Société de Taxis Elektrificados de Paris
THD	Total Harmonic Distortion
UE	União Europeia
V2G	Vehicle To Grid
ZCS	Zero-Current Switching
ZVS	Zero-Voltage Switching

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e motivação

Perante o atual consumo de combustíveis fósseis, existem estudos que estimam que os mesmos se podem esgotar dentro de aproximadamente 50 anos, sendo que, é também estimado que as necessidades de produção de energia aumentem a um ritmo médio de 2% ao ano [1].

Associado a este consumo está a emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera, que contribui para o aquecimento global, deteriorando as condições de vida no planeta. Considerando apenas as emissões de CO_2 , percebe-se que os ICEV são responsáveis por 11% dessas mesmas emissões [2], e tendo em conta o seu rendimento de aproximadamente 25%, pois existem vários meios de dissipação da potência produzida pela combustão do combustível fóssil em causa (Figura 1.1) [3].

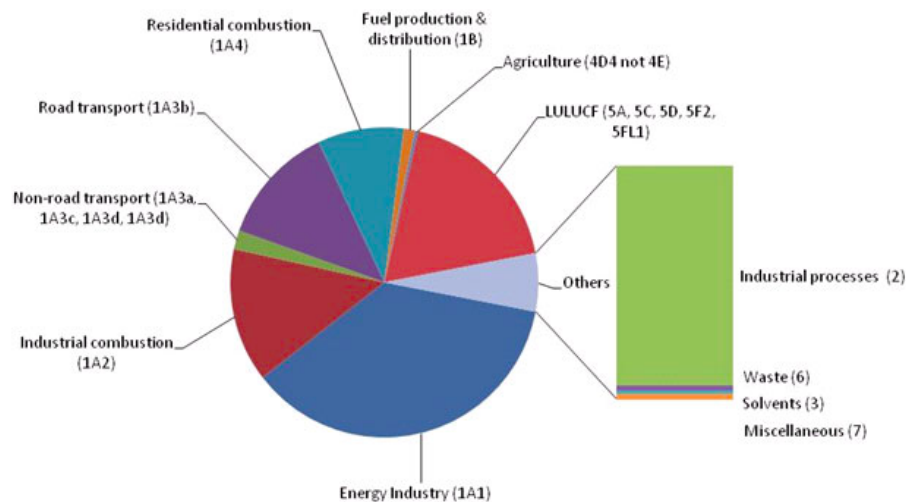


Figura 1.1: Emissões totais de CO_2 por fonte [4]

Entre eles, são de salientar os gases de escapes (sob a forma de calor), com uma taxa de 40%, o líquido refrigerador, associado a 30% das perdas, e os atritos, com os restantes 5% [3]. Tendo em conta estes vários fatores, houve a necessidade de procurar alternativas aos habituais ICEV que,

segundo dados de 2015 e relativos à UE, correspondem a 96,8% dos veículos de passageiros em circulação [5], sendo de notar que diante do escândalo “*Dieselgate*” [6] e do contínuo aumento dos preços dos combustíveis [7], a tendência é para o crescimento do mercado de veículos com fontes de energia alternativas, comprovada por dados de 2016 e 2017, também na União Europeia, com quotas de mercado de 4,2 e 5,8%, respetivamente [8].

Como tal, estão a ser desenvolvidos diferentes métodos de propulsão com recurso a fontes de energia alternativas, sendo que, neste momento, a opção mais consensual é a tecnologia híbrida, ou seja, um sistema que recorre a duas ou mais fontes de energia, sucedendo que, atualmente, a combinação mais usual é a da junção de um motor de combustão a uma fonte elétrica de potência secundária como, baterias, células de combustível, ou super-condensadores [9]. Este conceito, contudo, não é nada recente, já que uma patente foi registada em 1905, onde se propunha a utilização de um motor elétrico, alimentado por baterias, de forma a aumentar a aceleração de ICEV [3]. Através desta hibridização, motor a combustão conjugado com um motor elétrico, ocorre um aumento da eficiência do sistema para valores entre os 30 e 40%, garantindo desta maneira, uma redução das emissões poluentes e um aumento da economia de combustível [9]. A solução híbrida continua a ser a mais utilizada e desenvolvida uma vez que combina as melhores características de cada um dos sistemas implementado. No caso da componente elétrica, esta é capaz de fornecer binário de forma mais rápida mesmo em situações de baixa velocidade [7], permite a regeneração de energia nos momentos de desaceleração [7], e evita a utilização do motor de combustão em circunstâncias de baixa velocidade [10]. Considerando todas estas vantagens levanta-se a questão do porquê de não se utilizar somente a componente elétrica. Com a tecnologia atual no que às baterias diz respeito, apesar destas apresentarem grande capacidade de armazenamento de energia, não são capazes de a fornecer em curtos espaços de tempo, o que em põe em causa a estabilidade do sistema em situações de alteração de binário necessário, já no caso dos super-condensadores, estes apresentam baixa capacidade de armazenamento, sendo no entanto capazes de libertar e armazenar grandes quantidades de energia em poucos instantes [11].

Perante uma substituição de todos os veículos em circulação por veículos elétricos, e considerando o mercado automóvel atual e previsto, as reservas naturais de Lítio esgotavam-se em 5 anos, o que comprometeria a manutenção da produção da tipologia de baterias mais adequada à mobilidade elétrica, já inserida no mercado, e, durante este período, a questão da dependência de países produtores de combustíveis seria alterada para dependência de países produtores de Lítio, sendo que o um dos principais produtores mundiais é a China. Um estudo realizado pela *Toyota* concluiu que os HEVs necessitam de um terço do Lítio utilizado nos EVs para percorrer a mesma distância com uma taxa nula de emissões, e que os híbridos operam nessas condições durante 30% dos percursos e 50% do tempo [12]. Neste momento começam a surgir novas propostas, como é o caso das células de combustível, que apresentam uma constante de tempo muito elevada, prejudicando dessa forma a performance do veículo [1].

Com base nesta proposta foi criada a denominada “*International Association of Hydrogen Energy*”, cujo principal objetivo é o de tornar o hidrogénio como a principal fonte de energia para as mais variadas atividades desenvolvidas pelo ser humano no seu quotidiano, alcançando

ainda, para além deste objetivo, a designação de energia limpa e abundante [13]. Esta associação é constituída quer por engenheiros e professores das mais diversas áreas, quer por empresas multinacionais, casos da *Toyota* e da *Audi*, por exemplo, ou que pretendam desenvolver sistemas relacionados com a utilização do hidrogénio como fonte energética [14].

Neste âmbito, a STEP pretende acrescentar aos 100 veículos movidos a hidrogénio, atualmente em circulação na cidade de Paris, outros 500, numa *joint-venture* entre a empresa produtora desses veículos, a *Toyota* (com o seu primeiro veículo propulsionado por hidrogénio, o *Mirai*), a empresa responsável pela montagem da estrutura e pelo fornecimento de hidrogénio, a *Air-Liquide*, e a empresa encarregada pela certificação energética, a *Idex*. Pretendem que este acréscimo seja realizado até ao final de 2020, totalizando 600 veículos deste género em circulação, e até aos Jogos Olímpicos de Paris, em 2024, propõem-se a trocar todos os táxis da cidade para veículos que circulem sem a emissão de qualquer gás com efeitos nocivos para a atmosfera [15].

Atualmente, o governo japonês encontra-se num processo de mudança, no que às fontes de energia utilizadas diz respeito, trocando os atuais combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás que necessitam de ser importados, pelo hidrogénio. Outra questão que fez com que o governo japonês tomasse esta decisão foi o desastre nuclear de *Fukushima*, que desencadeou um processo de desnuclearização do sistema energético desse país. Para tal está a realizar parcerias com inúmeras empresas, investindo valores avultados na pesquisa e implementação de sistemas que recorram, e permite o recurso, a esta fonte de energia. A parceria de maior importância é a realizada com a *Toyota*, sendo que esta empresa já efetua estudos nesta área há mais de 25 anos, pretende reduzir em 90% as emissões realizadas pelos seus novos veículos até 2050 (em comparação com 2010), lançou no mercado o primeiro veículo movido a hidrogénio, produzido em larga escala, e já apresentou um protótipo de um camião com recurso a células de combustível [16]. Uma cooperação entre a fabricante de camiões americana *Kenworth* e a *Toyota* teve como resultado a produção de 10 camiões elétricos a *fuel cells*, capazes de rebocar 36 toneladas, elevando a capacidade de carga já alcançada pela *Hino*, empresa que representa a *Toyota* no mercado de camiões e autocarros a nível mundial [17]. Outra iniciativa com o objetivo de alcançar as "zero-emissions" nas suas instalações até 2025, foi a instalação de um aparelho (designado de "*Simple.Fuel.*"), capaz de gerar e distribuir hidrogénio, na fábrica da *Toyota* de *Motomachi*, utilizado para a propulsão das 8 empilhadoras lá presentes [18]. Uma das formas de divulgação desta iniciativa é através da apresentação de uma "*hydrogen society*" durante os Jogos Olímpicos de 2020, que decorrerão em Tóquio. A cidade anfitriã pretende ter ao seu dispor 100 autocarros e 40000 veículos que recorram ao hidrogénio como fonte de energia durante os jogos, número que estima subir aos 100000 durante os próximos seis anos. Estes valores são bastante ambiciosos uma vez que, atualmente circulam em todo o mundo 11000 FCEVs, valor bastante inferior ao previsto pelo governo japonês para o próximo ano, e ainda mais quando comparado com os 5 milhões de EVs existentes em todo o mundo [19].

Ainda no contexto asiático, a China, o maior mercado automóvel a nível mundial, vai promover o desenvolvimento da indústria de veículos elétricos com recurso a hidrogénio como combustível. Esta ideia surge em conjunto com a emancipação dos veículos puramente elétricos, optando

entre as duas topologias em função da distância a percorrer, sendo que os veículos que recorrem a células de combustível possuem maior autonomia. Com o objetivo de impulsionar este desenvolvimento em torno da tecnologia das células de combustível a hidrogénio foi criado um instituto de pesquisa conjunto entre a *Toyota* e a Universidade de *Tsinghua* [20]. Também como forma de aumentar o número de veículos livres de emissões a circular em 30 cidades chinesas, o governo desse país pretende acrescentar 30000 veículos não poluentes por ano, a partir de 2019 até 2025, totalizando 100000 veículos movidos a hidrogénio e com destaque para o transporte público [21].

A nível europeu foi assinado um Memorando de Entendimento entre a *Michelin* e a *Faurecia*, empresas líderes em pneus e mobilidade sustentável, e tecnologia automóvel, respetivamente. Ambas as companhias já estudavam, a nível individual, as células de combustível a hidrogénio, mas desta forma unem esforços, através da *Symbio* para a produção e comercialização de sistemas de células de combustível de hidrogénio para automóveis ligeiros, camiões e outras aplicações. Recentemente, a União Europeia distinguiu a tecnologia das células de combustível como 1 dos 6 Projetos de Interesse Comum mais importantes da Europa [22].

Também num contexto europeu, foi estabelecida uma parceria entre a *Bosch*, multinacional alemã do ramo da engenharia e da eletrónica, e a *PowerCell*, empresa sueca ligada ao estudo e desenvolvimento de sistemas de células de combustível, com o objetivo de produzir estes dispositivos de forma massiva. Para que sejam cumpridos as reduções das emissões de dióxido de carbono, 15 e 30% até 2025 e 2030, respetivamente, é necessário reduzir o custo de produção e aumentar a produção de células de combustível, uma vez que não emitem gases nocivos enquanto produzem energia [23].

Uma nova forma de produção de hidrogénio está, também a ser desenvolvida pela *Toyota* e pelo *Differ* (Instituto Holandês de Investigação Energética). Esta cooperação permitiu desenvolver um dispositivo capaz de obter hidrogénio a partir do ar atmosférico. O dispositivo corresponde a uma célula foto eletroquímica em estado sólido capaz de produzir hidrogénio, a partir do vapor de água existente no ar atmosférico, com um rendimento de 70% [24].

A revista *Natura Energy* publicou uma investigação realizada por *Gunther Glenk* e *Stefan Reichelstein*, que concluiu que o hidrogénio produzido com recurso a fontes renováveis de energia já é competitivo em termos de custos, sendo que se prevê uma redução contínua do preço associado à produção de hidrogénio. Nesta publicação foram abordados quatro métodos de produção de hidrogénio, com baixos níveis de carbono, sendo eles o recurso a um combustível fóssil, a eletrólise da água, e como métodos mais recentes tem-se a divisão termoquímica da água, e a fotossíntese artificial [25].

O estado da Califórnia, no contexto americano, é a região com maior número de veículos a células de combustível a nível global e, como tal iniciou em 2010 um programa de financiamento para a construção de uma rede de postos de abastecimento de hidrogénio. Além do investimento para a construção das infraestruturas, o estado também financia os custos iniciais de operação e venda. Estes fundos permitem às empresas, a gestão do risco de investimento e a geração de confiança num mercado que, na altura, possuía um volume reduzido de veículos em circulação e cujo caminho para o um negócio viável parecia distante. Com este programa, entre junho de 2010

e julho de 2018 foram construídas 35 estações de abastecimentos, 29 encontram-se financiadas, ou em construção, e já circulam 5000 FCEVs nas estradas californianas. Até ao ano de 2025, o Estado espera ter uma rede com 200 postos de abastecimento, elevando para 1000 até 2030 e, nesta altura, atingir a marca de 1 milhão de veículos movidos a hidrogénio [26].

Convenções recentes têm concluído que a questão da mobilidade no futuro tem de ser discutida, a curto prazo, de forma a permitir o desenvolvimento e uma transição entre os atuais combustíveis (que se estão a esgotar), e o principal candidato, o hidrogénio, que foi assim designado por algumas multinacionais como a *Repsol*, a *Honda*, e a *Total* [27]. Outras parcerias importantes foram realizadas com empresas reconhecidas internacionalmente, como a *Honda*, a *Toshiba*, a *Nissan*, a *Kawasaki*, entre outras [16].

A opção por um sistema híbrido, que conjuga motor a combustão com motor elétrico, melhora a performance no arranque e a baixas velocidades e, pelo menos, mantém a performance do veículo nos restantes regimes de funcionamento, mesmo que seja implementado um sistema com potência global inferior que, por isso, garante a redução das emissões, uma otimização do dimensionamento do motor a combustão (e, consequentemente, um aumento da eficiência do mesmo) [7]. Com base nestes prós e contras percebe-se que a total eletrificação dos veículos ainda requer bastante desenvolvimento e estudo, uma vez que ainda existem lacunas importantes por colmatar, como é o caso da perda de performance e de autonomia, entendendo-se, também, o porquê da supremacia das topologias híbridas, já que estas assumem as mais valias de cada fonte de energia adotada. De maneira que seja possível o desenvolvimento de arquiteturas híbridas, em que as duas fontes de energia são livres de emissões de gases de efeito de estufa, é indispensável que a performance e o custo destes veículos seja competitivo com os atuais HEV e ICEV. Para que a performance possa ser equiparada é necessário que o sistema seja capaz de reagir a alterações de regimes de funcionamento de forma eficaz, ou seja, que a sua resposta dinâmica seja equivalente à resposta de um motor de combustão interna. Hoje em dia estão a ocorrer desenvolvimentos a este respeito, com grandes progressos no estudo de baterias capazes de armazenar grandes quantidades de energia e libertar picos de potência em mudanças bruscas de regime (por exemplo, o desenvolvimento de uma bateria que combina uma bateria de chumbo com um super condensador, sem necessidade de controlo extra [28]).

Todos estes desenvolvimentos em torno da mobilidade não estão, apenas associados às questões ambientais, de limitação de recursos e da eletrificação da mesma, mas também se relacionam com dois conceitos emancipados recentemente, o de *smart city* e o de condução autónoma. A definição de *smart city* ainda é um pouco ambígua, existindo várias perspetivas, mas que se baseiam na sua essência no mesmo, na inclusão da tecnologia nos mais variados aspetos e situações. Esta nova ideologia também envolve a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos, sendo que uma das vertentes adotadas é a mobilidade autónoma, que associada à eletrificação do mercado automóvel e com o apoio e envolvimento político das cidades permitirá uma redução de 85% no que às emissões diz respeito, uma diminuição da área reservada para estacionamento de 54%, e por último, mas de todo não menos importante, prevê-se um abaixamento de 87% no número de acidentes [29]. Estas alterações não serão alcançadas apenas com o envolvimento das instituições

governamentais e dos fabricantes automóveis, mas da sociedade em geral uma vez que implica a implementação de inúmeros novos conceitos, como a partilha do automóvel em caso de rotas coincidentes, a emancipação de outros, como são os casos das plataformas *online* prestadoras de serviços personalizados de transporte (Uber, Cabify, entre outras), e também uma alteração de mentalidade por parte da população em relação à aquisição e manutenção de veículo próprio [30], à opção pela utilização dos transportes públicos e plataformas referidas anteriormente, e à aceitação dos conceitos de condução autónoma e de partilha de viagens. Por parte das instituições governamentais seria necessário um investimento no ramo dos transportes públicos, promovendo a aquisição de veículos menos poluentes e autónomos, e o aumento dos incentivos para a utilização dos mesmos. Perante a diminuição do número de veículos próprios, será fundamental a manutenção de frotas de veículos de aluguer temporário que garantam as necessidades da população [29].

Com base nestes progressos surge a possibilidade de implementação de um sistema que associe um motor elétrico a uma célula de combustível. Uma vez que a célula de combustível apresenta uma constante de tempo muito elevada, esta seria utilizada como fonte de potência constante, ficando a outra fonte de potência elétrica responsável pelo fornecimento/armazenamento do diferencial entre a potência de tração necessária e a disponibilizada, de valor, aproximadamente constante, pela fonte primária.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento do sistema de armazenamento para o *powertrain* de um veículo elétrico baseado numa arquitetura híbrida, com controlo do sistema e gestão da autonomia.

Para que este objetivo seja atingido existem alguns sub-objetivos que necessitam de ser cumpridos, sendo eles, o estudo do estado da arte e a análise de arquiteturas híbridas (com uma fonte a fornecer potência constante e outra a fornecer/armazenar o diferencial para a primeira), o desenvolvimento de algoritmos, de supervisão e controlo da operação do sistema, e de gestão de energia.

De forma a cumprir todos estes objetivos existe a necessidade de estabelecer uma metodologia, e um plano de trabalho, e estipular prazos e datas para cada ponto, através de um cronograma.

Após a execução destes pontos é essencial a realização de testes e validações do sistema desenvolvido, e a escrita da dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Neste capítulo são abordados todos os assuntos necessários para o desenvolvimento de um sistema de armazenamento para o *powertrain* para um veículo elétrico, analisando, para tal diferentes metodologias, topologias e arquiteturas já desenvolvidas e implementadas anteriormente.

Em primeiro lugar são referidos alguns dados históricos, que fundamentam a necessidade de aplicação de arquiteturas híbridas em veículos, e revelam a antiguidade do estudo e existência deste conceito.

Após esta abordagem inicial, apresentam-se diferentes topologias já utilizadas, destacando as vantagens, e as desvantagens de cada uma delas. Com base nestes dados é adotada uma arquitetura para um estudo mais detalhado, sendo realizado, para esta, um estudo do mercado e uma análise conceptual mais específica e aprofundada.

2.2 Arquitetura híbrida

Um veículo híbrido consiste num veículo que recorre a duas ou mais fontes distintas de potência, sendo a conjugação motor de combustão interna associado a um motor elétrico, a mais usual e desenvolvida [31]. Existem inúmeras opções de escolha para serem utilizadas, quer como fonte primária, quer secundária.

Como fontes primárias de energia são de destacar os combustíveis fósseis, como a gasolina, o gasóleo, o GPL (sigla portuguesa, ou LPG na inglesa), o GNL (ou LNG) e o GNC (ou CNG), e combustíveis alternativos como o *Biodiesel*, conseguido através do aproveitamento de óleos vegetais, ou gorduras animais, o etanol, obtido a partir de cereais como a cevada, o trigo, ou o milho, e o hidrogénio [32] [33]. Tendo em consideração as diferentes fontes de energia abordadas, existem diferentes tipos de dispositivos capazes de transformar essa energia química contida nesses elementos noutro tipo de energia, mecânica ou elétrica em função do caso em concreto. Como exemplos desses dispositivos têm-se os motores de combustão externa (ECE) [34], praticamente inexistentes atualmente, os de combustão interna (ICE), tipologia mais usual [35], e os Wankel (ou

rotativos) [36], que transformam energia química em mecânica, e as células de combustível [36] que transformam energia química em elétrica. No caso das fontes secundárias pode-se recorrer a baterias [37], supercondensadores [38], e volantes de inércia [39].

2.2.1 Perspetiva histórica, técnica e tecnológica

Este conceito não é, de todo, recente, sendo que os primeiros protótipos e testes foram realizados no final do século XIX. Nesta altura, os desenvolvimentos verificados, em relação às arquiteturas híbridas, tinham como principal objetivo colmatar as principais lacunas encontradas nos veículos elétricos, como autonomia limitada, baixa eficiência das baterias, e dificuldades de carregamento [40].

Nestes primeiros protótipos desenvolvidos, o motor de combustão interna funcionava como motor auxiliar, uma vez que, à época, os motores elétricos estavam mais desenvolvidos [41]. O ICE apresentava, ainda outra questão ao nível do arranque, já que este tinha de ser realizado de forma manual, o que impunha um grande esforço, sendo por tal uma tarefa árdua [42]. No entanto, com o aparecimento do motor de arranque elétrico, no início do século XX [43], e graças à elevada autonomia proporcionada pelos combustíveis fósseis, devido à sua alta densidade energética, os conceitos de EV e de HEV quase desapareceram [40].

Outra limitação que se opunha ao desenvolvimento deste tipo de veículo era a falta de capacidade de controlo na integração das duas fontes de potência, pois, à época ainda não se tinham desenvolvido as tecnologias necessárias para a implementação de controlo eletrónico [44].

Já nos anos setenta, o conceito de HEV volta a suscitar interesse devido à crise dos combustíveis, e aos efeitos da queima dos mesmos, não só para produção de energia elétrica, mas também como fonte de energia nos meios de transportes. Também nesta altura, com o aumento do número de veículos em circulação, tornou-se evidente outro problema associado aos ICEV, a poluição sonora em ambiente urbano. Durante esta década foram desenvolvidos diversos protótipos de base híbrida e programas governamentais de incentivo à investigação nesta área. Contudo, todas estas iniciativas foram em vão, uma vez que concluíram, no final da década de setenta que os EV e HEV não tinham possibilidades de competir com os ICEV [40].

Desencadeado pelos avanços tecnológicos alcançados nos primórdios dos anos noventa, as configurações híbridas voltaram a ser consideradas como uma hipótese alternativa aos poluentes, e concorrentes veículos a combustão. Esta evolução permitiu complementar as ideias concebidas na década de setenta, associando-lhes um controlo melhorado que permitia uma integração mais adequada das duas fontes de energia. Estes desenvolvimentos culminaram com o lançamento, no mercado japonês do *Toyota Prius* (Figura 2.1), o primeiro HEV produzido em massa [42]. Esta combinação será abordada de forma mais aprofundada na secção 2.2. Outra tecnologia que está em desenvolvimento atualmente, são os designados FCVs. Estes veículos recorrem a células de combustível para gerar eletricidade a partir de hidrogénio. Assim como na combinação típica, os sistemas baseados em FCs podem gerar eletricidade para propulsionar o veículo, ou então para ser armazenada em baterias ou supercondensadores [46]. Na secção 2.2 serão detalhadas as principais características destes sistemas.



Figura 2.1: *Toyota Prius*, primeiro veículo híbrido vendido em massa [45]

Em todas as associações utilizadas em HEVs existem limitações características, como é o caso do custo adicional, devido à introdução de EMs, sistemas de armazenamento de energia, e conversores de potência. Os HEVs são um tipo de veículos que pode assumir variadas configurações, de acordo com as funções que cada um dos motores assume [46].

Começando pela configuração série (Figura 2.2), esta caracteriza-se pela adição de um ICE a um EV convencional, sendo a potência gerada pelo mesmo transmitida a um gerador, que pode recarregar as baterias ou alimentar o EM de forma a propulsionar o veículo. Esta energia elétrica gerada pelo sistema ICE associado ao gerador é, normalmente retificada de forma a permitir a conexão ao barramento DC do sistema de propulsão, e a interconexão entre as duas fontes de potência. Nesta arquitetura existe, apenas um trajeto de fluxo de potência entre as unidades motrizes e as rodas, uma vez que o ICE tem, somente a função de gerar energia para o gerador, nunca alimentando, diretamente as rodas. Esta associação foi desenvolvida com o intuito de atenuar uma das falhas relacionadas com os EVs, a autonomia [46].

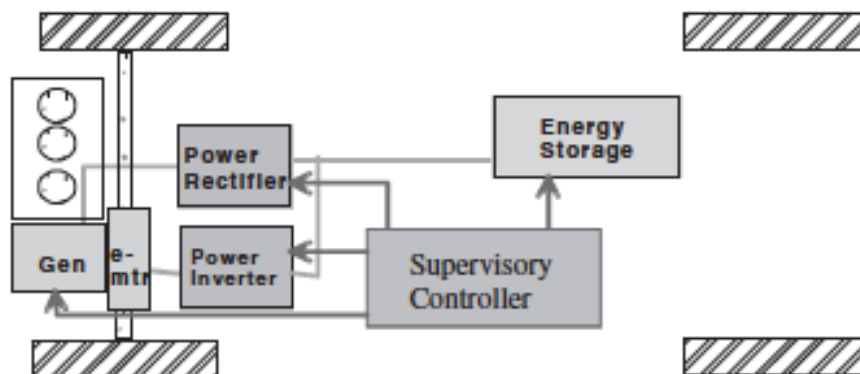


Figura 2.2: Arquitetura híbrida do tipo série [46]

Nesta topologia existem sete modos de funcionamento possíveis [46]:

- Modo elétrico: O ICE é desligado e o veículo é propulsionado, unicamente pelo EM com energia proveniente das baterias;
- Modo a combustão: A potência utilizada pelo veículo é fornecida, de forma exclusiva pelo ICE;
- Modo híbrido: O veículo é propulsionado quer pelo ICE, quer pelo EM;
- Modo ICE e carregamento: O ICE fornece energia para a deslocação do veículo e para carregamento das baterias, fazendo com que a máquina elétrica atue como gerador;
- Modo de travagem regenerativa: Ambos os motores são desligados, sendo que a máquina elétrica atua como gerador, carregando as baterias com parte da energia cinética do veículo;
- Modo de carregamento de baterias: A máquina elétrica atua como gerador, carregando as baterias, não havendo utilização de energia para propulsionar o veículo;
- Modo de carregamento híbrido: Ambos os motores atuam como geradores, carregando as baterias.

Com base nos modos de operação expostos anteriormente pode-se concluir que, uma boa gestão dos mesmos por parte da ECU garante um aumento da autonomia deste tipo de veículos em relação aos EV puros, e a manutenção, da mesma comparativamente aos convencionais ICEV. Como vantagens, este sistema apresenta a capacidade de se desacoplar das rodas motrizes, permitindo que opere em qualquer ponto da curva característica velocidade-potência, os EM operam a velocidades elevadas, o que implica que a transmissão necessita de menos engrenagens, é mais leve, e apresenta menor custo, pode ser utilizado um EM por roda, que pode originar complicações em termos de controlo de tração e estabilidade, e os sistemas de controlo são simples. Neste tipo de implementação, a energia do ICE é convertida duas vezes, aumentando as perdas, necessita de um gerador, que tem a si associado um custo e peso, o EM tem de ser de grande dimensão já que é a única forma direta de impelir o veículo, e pode não ser possível o *downsizing* do ICE, para as situações em que não exista carga nas baterias [44].

Esta configuração é a mais eficiente quando se trata de situações de *stop-and-go*, momentos em que os motores de combustão são ineficientes. O controlador é capaz, nestas situações de optar por propulsionar o veículo com recurso, apenas ao motor elétrico com a energia proveniente das baterias, aproveitando a elevada eficiência dos mesmos nestas situações [47].

No que diz respeito ao motor de combustão, este é, tipicamente mais pequeno do que nas configurações paralelo, já que, apenas é utilizado para procuras mais elevadas de potência [47].

O conjunto de baterias é, normalmente de maior dimensão do que na configuração paralela pois tem de fornecer as necessidades restante de potência [47].

Perante estas duas últimas características, e a questão do gerador adicionam custos ao veículo, fazendo dos veículos híbridos do tipo série mais caros que os paralelos [47].

Como exemplos de veículos, presentes no mercado, tem-se o *Opel Ampera* e o *Chevrolet Volt*, que podem ser visualizados nas figuras 2.3 e 2.4, juntamente com as suas características técnicas [48].



Figura 2.3: *Opel Ampera* [49]



Figura 2.4: *Chevrolet Volt* [50]

Brand	Chevrolet	Opel
Model	Volt	Ampera
Engine	1.4 (84 Hp) Plug-in Hybrid	1.4 (150 Hp) Hybrid
Power	84 hp	150 hp
Maximum speed		161 km/h
Acceleration 0 - 100 km/h		10 sec
Fuel tank volume	35.2 l	35 l
Coupe type	Hatchback	Hatchback
Drag coefficient	0.28	
Minimum volume of Luggage	300 l	310 l
Battery capacity	17.1 kWh	16 kWh
All-electric range	61 km	40-80 km
Electric motor power	149 hp	150 hp
Electric motor Torque	368 Nm	370 Nm
ICE power	84 hp/4800 rpm.	86 hp/4800 rpm.
Engine displacement	1398 cm ³	1398 cm ³
Maximum engine speed	4800 rpm.	
Fuel Type	Hybrid - petrol / electricity	Hybrid - petrol / electricity
Drive wheel	Front wheel drive	Front wheel drive
Combined fuel consumption	6.3 l/100 km.	3.8 l/100 km.
Emission standard		EURO V
Kerb Weight		2135 kg.

Tabela 2.1: Características dos veículos híbridos do tipo série considerados

Outra configuração possível é a paralela (Figura 2.5). Neste caso, o ICE e o EM podem ser utilizados em conjunto ou em separado, de acordo com o binário requisitado pelo veículo e com as definições da CS. Uma arquitetura híbrida do tipo paralelo implica que existem dois trajetos

possíveis para que a potência seja transferida para as rodas de tração, um que conecta o motor de combustão, e outro que liga as unidades de armazenamento de energia às rodas. De forma a realizar este acoplamento, normalmente são utilizadas caixas de velocidades com embraiagens controladas automaticamente. Esta configuração é a mais comum entre os HEVs disponíveis no mercado. Existem duas abordagens possíveis para este tipo de configuração, *side-mounted*, ou *in-line* [46].

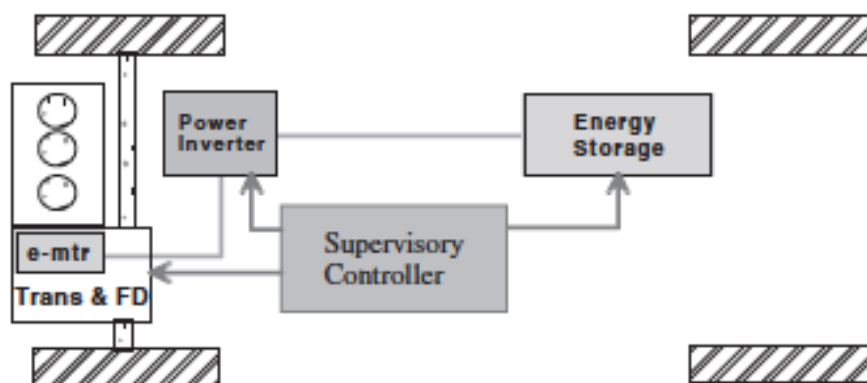


Figura 2.5: Arquitetura híbrida do tipo paralelo [46]

Tal como no caso anterior, os sistemas baseados nesta abordagem também possuem modos de operação característicos [46]:

- Modo elétrico: O veículo é propulsionado, unicamente pela energia proveniente das baterias, a baixas velocidades;
- Modo a combustão: A potência utilizada pelo veículo é fornecida, de forma exclusiva pelo ICE;
- Modo híbrido: O veículo é propulsionado quer pelo ICE, quer pelo EM;
- Modo ICE e carregamento: O ICE fornece energia para a deslocação do veículo e para carregamento das baterias, fazendo com que a máquina elétrica atue como gerador;
- Modo de travagem regenerativa: Ambos os motores são desligados, sendo que a máquina elétrica atua como gerador, carregando as baterias com parte da energia cinética do veículo;
- Modo de carregamento de baterias: A máquina elétrica atua como gerador, carregando as baterias, não havendo utilização de energia para propulsionar o veículo.

Mais uma vez, a correta gestão por parte da ECU, destes modos garante uma otimização da energia armazenada nas baterias, melhorando a autonomia e o desempenho do sistema, em função do regime de funcionamento [46].

Como características favoráveis desta abordagem podem ser consideradas, a capacidade de escolha independente entre as duas fontes de energia, e a possibilidade de *downsizing* de ambos

os motores, uma vez que as suas características de binário são conjugadas na caixa de velocidades [46].

Como o motor está, diretamente conectado às rodas, as perdas associadas à conversão da energia mecânica em energia elétrica, e de volta em mecânica são evitadas, aumentando a eficiência destes veículos em regime de auto estrada [47].

Esta configuração, também beneficia do facto de ter um motor elétrico e baterias em regimes de *stop-and-go*, mas de forma menos expressiva que no caso série [47].

A configuração paralela é muito utilizada porque a sua arquitetura é muito semelhante à convencional. A integração do motor/gerador no sistema de transmissão do veículo implica consideráveis custos, tempo e re-projeto [46]. No entanto, o controlo torna-se mais complexo, quando comparado com o caso anterior [44].

Como exemplo de veículo, presente no mercado, tem-se o *Honda Insight*, que pode ser visualizado na Figura 2.6, juntamente com as suas características técnicas [51].



Figura 2.6: *Honda Insight* [52]

Brand	Honda
Model	Insight
Modification (Engine)	1.0i 12V (76Hp)
Power	76Hp/5700rpm
Maximum speed	177 km/h
Acceleration 0 - 100 km/h	14.2
Fuel tank volume	40 l
Coupe type	Coupe
Drag coefficient	
Minimum volume of Luggage (trunk)	140 l
Battery capacity	17.1 kWh

All-electric range	61 km
Electric motor power	149 hp
Electric motor Torque	368 Nm
ICE power	76Hp/5700rpm
Engine displacement	995 cm ³
Maximum engine speed	4800 rpm.
Fuel Type	Hybrid - petrol / electricity
Drive wheel	Front wheel drive
Fuel consumption (economy) - combined	3.4 l/100 km.
Emission standard	
Kerb Weight	835 kg
Max. weight	1040 kg

Tabela 2.2: Características do veículo híbrido do tipo paralelo considerado

Outra abordagem possível é designada por *power split architecture* ou arquitetura combinada (Figura 2.7), pois corresponde a uma combinação entre as topologias série e paralelo [46].

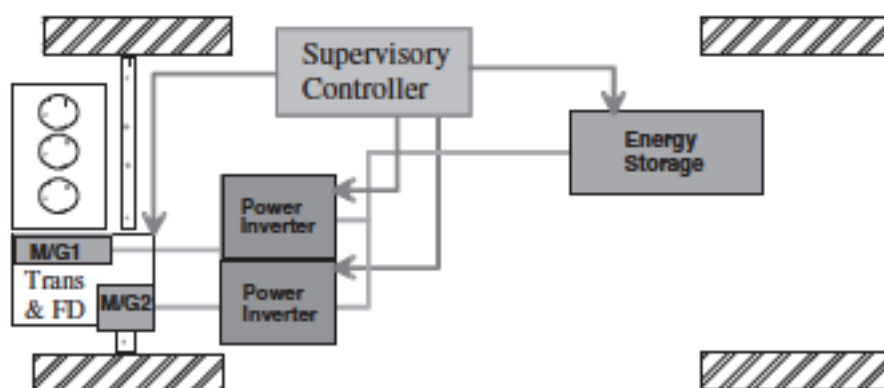


Figura 2.7: Arquitetura híbrida do tipo split [46]

O seu princípio de funcionamento gira em torno de uma transmissão planetária e de dois conjuntos motor/gerador. Uma transmissão planetária consiste numa engrenagem solar (Sol), componente central da transmissão, nas engrenagens satélite, que giram em torno do Sol, e na engrenagem anelar, que é responsável pelo acoplamento ao eixo de suporte. Este tipo de engrenagem atua como caixa de redução, ou seja, a partir da elevada velocidade do motor é capaz de gerar um binário elevado, através de uma redução de velocidade, sendo considerada a forma mais compacta de o fazer [53].

Esta configuração combina as duas apresentadas anteriormente, ou seja é capaz de colocar o motor principal em conexão direta com as rodas motrizes (configuração paralela), ou então desconectá-lo por completo, permitindo que o motor elétrico alimente, de forma independente as rodas (configuração série). Com estas possibilidades de, apenas motor principal, ou motor elétrico, ou uma combinação de ambos, o sistema é capaz de os colocar a operar no ponto de

maior eficiência em mais ocasiões. A baixas velocidades, o sistema recorre à topologia série, enquanto que a velocidades mais elevadas utiliza a paralela, pois a série torna-se menos eficiente [47].

Associado a esta configuração está um custo superior provocado pela inclusão de um gerador, um conjunto de baterias maior, e maiores necessidades de capacidade de computação. Comparando com as topologias série, e paralelo verifica-se que tem melhor desempenho e utiliza menos combustível [47].

Em termos de modos de operação, esta topologia é caracterizada por [46]:

- Modo elétrico: O veículo é propulsionado, unicamente pela energia proveniente das baterias, a baixas velocidades;
- Modo a combustão: A potência utilizada pelo veículo é fornecida, de forma exclusiva pelo ICE;
- Modo híbrido: O veículo é propulsionado quer pelo ICE, quer pelo EM;
- Modo ICE e carregamento: O ICE fornece energia para a deslocação do veículo e para carregamento das baterias, fazendo com que a máquina elétrica atue como gerador;
- Modo de travagem regenerativa: Ambos os motores são desligados, sendo que a máquina elétrica atua como gerador, carregando as baterias com parte da energia cinética do veículo;
- Modo de carregamento de baterias: O ICE propuliona o veículo e a máquina elétrica carrega as baterias, recorrendo para tal, a energia proveniente do ICE;
- Modo de carregamento híbrido: Ambos os motores atuam como geradores, carregando as baterias.

Tal como ao nível da implementação, no que diz respeito às vantagens desta abordagem, também conjuga as dos sistemas série e paralelo, destacando-se a existência de um trajeto mecânico direto para a potência gerada pelo ICE, importante em regimes estacionários de funcionamento, e um trajeto eletromecânico para variações de condições de operação, sendo que, desta forma permite uma melhoria da eficiência do sistema [44]. Como exemplos de veículos, presentes no mercado, tem-se o *Toyota Prius* e o *Lexus RX400h*, que podem ser visualizados nas Figuras 2.8 e 2.9, juntamente com as suas características técnicas [54].



Figura 2.8: Toyota Prius [55]



Figura 2.9: Lexus RX400h [56]

Brand	Toyota	Lexus
Model	Prius	RX
Modification (Engine)	1.5 16V (70Hp)	400h 4WD (270 Hp)
Power	70Hp/4500rpm	270 hp/5600rpm
Maximum speed	160 km/h	200 km/h
Acceleration 0 - 100 km/h	13.4	7.6
Fuel tank volume	50 l	65 l
Coupe type	sedan	Off-road vehicle
Drag coefficient		
Minimum volume of Luggage (trunk)	390 l	349 l
Battery capacity	17.1 kWh	
All-electric range	61 km	
Electric motor power	149 hp	
Electric motor Torque	368 Nm	
ICE power	76Hp/5700rpm	
Engine displacement	1497 cm3	3311 cm3
Maximum engine speed	4800 rpm.	
Fuel Type	Hybrid - petrol / electricity	Hybrid - petrol / electricity
Drive wheel	Front wheel drive	All wheel drive
Fuel consumption (economy) - combined	5.1 l/100 km.	8.1 l/100 km.
Emission standard		
Kerb Weight	1250 kg	2000 kg
Max. weight	1645 kg	2505 kg

Tabela 2.3: Características dos veículos híbridos do tipo split considerados

Ao longo dos anos foram desenvolvidas e implementadas inúmeras arquiteturas híbridas, sendo que estas recorrem a várias fontes de energia, destacando os motores de combustão interna, motores elétricos, células de combustível, e até força humana [57].

De seguida são descritos, de forma detalhada as combinações híbridas mais utilizadas atualmente, motor de combustão interna associado a baterias, e baterias e células de combustível.

Começando pela agregação mais usual, é de salientar que o funcionamento conjunto permite tirar partido das vantagens de cada um dos tipos de motores aplicados, sendo de evidenciar o binário disponibilizado pelos motores elétricos, mesmo em regimes de baixa velocidade, e a capacidade de manutenção de velocidade, no caso dos motores de combustão interna, em regimes médio-altos de velocidade [58]. Esta abordagem permite uma otimização das dimensões dos motores a implementar, mantendo os níveis de desempenho apresentados pelos principais concorrentes que recorrem a, apenas uma fonte de potência de tração. Partindo desta constatação, compreende-se a razão pela qual, atualmente os fabricantes automóveis estão a esforçar-se para desenvolver veículos que adotam estas topologias, uma vez que esta otimização de dimensionamento permite a redução de emissão de gases de efeito de estufa, que é um dos principais problemas associados aos veículos motorizados que geram potência a partir da combustão de combustíveis fósseis [59]. Esta combinação é capaz de fornecer elevadas potências com tempos de resposta reduzidos, graças à adição da componente elétrica ao motor de combustão. Além destas questões, os HEVs possuem elevada autonomia e facilidade de abastecimento, sendo estas vantagens provenientes do sistema convencional de combustão [60]. Como em todas as situações, existem, também desvantagens associadas aos HEVs, das quais se destacam [61]:

- Manutenção da dependência de combustíveis fósseis;
- Complexidade na gestão de fontes de energia múltiplas;
- Dimensionamento e gestão das unidades de armazenamento.

Agora será abordada a topologia, por muitos designada como a mais promissora, aquela que combina células de combustível com sistemas de armazenamento de potência, pois é uma das que mais reduz a emissão de gases de efeito de estufa, sendo esta uma das principais preocupações atuais.

Durante a primeira metade do séc. XIX foram desenvolvidas as primeiras células de combustível a hidrogénio. Devido à necessidade de aperfeiçoamento das mesmas e de estudos mais aprofundados ao nível da eletricidade, apenas nos anos trinta do século passado é que foram concebidas com sucesso. Já nos anos cinquenta, as FCs foram utilizadas como fonte de energia no projeto *Apollo* da NASA. No final dos anos 60, a GM desenvolveu uma carrinha, para ser utilizada nas suas instalações, com recurso a FCs para produção energética. Recentemente foram lançados no mercado vários automóveis baseados em células de combustível, como são os casos do *Hyundai Tucson*, o *Toyota Mirai* e o *Honda Clarity* (Figuras 2.10, 2.11, e 2.12) [62]. As FCs operam de forma mais eficiente perante condições de estabilidade de condições de funcionamento, ou seja, carga (preferencialmente parcial), velocidade, e binário constantes [66]. Com o objetivo de melhorar o regime dinâmico deste tipo de abordagem podem ser utilizadas FCs e baterias, ou supercondensadores, otimizando as alterações de pontos de funcionamento, e as situações de arranque [66]. O princípio de geração de energia elétrica em que as FCs se baseiam requer baixas



Figura 2.10: *Hyundai Tucson* [63]



Figura 2.11: *Toyota Mirai* [64] [65]



Figura 2.12: *Honda Clarity*

temperaturas, e utiliza como combustível hidrogénio. Como as FCs se apoiam em reações químicas para operar, não recorrendo à combustão, não emitem gases de efeito de estufa e o seu único produto secundário é água [66]. Comparando esta combinação com a apresentada na secção 2.2, esta apresenta um acréscimo inferior de massa ao veículo, é de menor dimensão, tem um menor custo associado à compra do veículo e ao seu ciclo de vida, e o seu recarregamento é bastante mais rápido [66] [62] [67]. Dado que as células de combustível não apresentam peças móveis nem formas irregulares, o seu processo de fabrico pode ser aperfeiçoado, reduzindo, dessa forma, os custos de fabrico e aumentando a fiabilidade das mesmas [66]. Por outro lado, a utilização de hidrogénio como combustível coloca algumas questões, em relação à sua produção, transporte e armazenamento. Estas dificuldades associadas à gestão do combustível impõem algumas restrições iniciais à aceitação, por parte do mercado deste tipo de veículos, visto que as infraestruturas de reabastecimento estão disponíveis num número reduzido [67]. Assim como foi referido anteriormente, as FCs necessitam de ser refinadas, de forma a melhorar a sua fiabilidade e duração, não comprometendo a viabilidade desta combinação. Atualmente estão a ser realizados elevados investimentos no desenvolvimento das células de combustível, com o objetivo de as tornar competitivas com os sistemas mais convencionais de propulsão, híbridos ou não. As FCs mais adequadas para aplicações automóveis são as do tipo *Proton Exchange Membrane* (PEMFC) e *Solid Oxide Fuel Cells* (SOFC). De momento, as FC do tipo PEM estão numa posição mais favorável para se tornarem no componente ideal para substituir os sistemas híbridos convencionais e os convencionais ICEV. As razões que justificam esta posição são exploradas na secção 2.2.3.2. Ultimamente colocou-se, também a hipótese da utilização de células de combustível como fontes de energia *on-board*, atuando como unidades auxiliares de potência para os mais variados dispositivos existentes num veículo. As células de combustível mais adequadas para esta função, neste momento são as SOFC, sendo os motivos para tal apresentadas na secção 2.2.3.3.

Nesta abordagem é usual optar pela configuração série (Figura 2.13), ou seja apenas o EM transmite potência de tração para as rodas, sendo as FCs encarregadas de fornecer a potência constante associada a um determinado ponto de funcionamento, e as baterias, ou supercondensadores responsáveis pelos períodos transitórios entre pontos de operação. Os elementos incumbidos de assumir os regimes transitórios são designados por *Peaking Power Sources* (PPSs) [66].

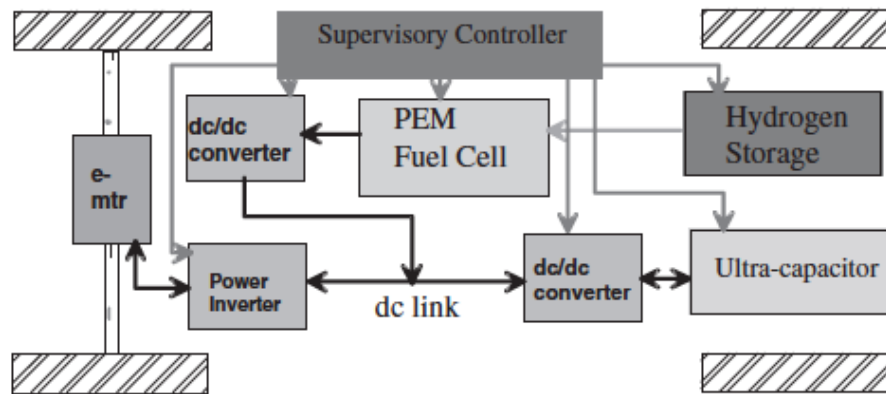


Figura 2.13: Arquitetura híbrida do tipo série com recurso a células de combustível [46]

De uma forma mais específica para esta configuração baseada em células de combustível, são de seguida enumerados os modos de funcionamento a si associados [46]:

- Modo a hidrogénio: No caso da potência de tração necessária ser inferior ao ponto ótimo de operação das FCs e a PPS esteja totalmente carregada, o sistema a hidrogénio encarrega-se de propulsar o veículo;
- Modo híbrido: No caso da potência de tração imposta pela carga ser superior à capacidade de entrega, no ponto de funcionamento ótimo, das FCs, estas são colocados a operar nesse ponto, enquanto que a PPS fica responsável pelo fornecimento do diferencial;
- Modo de carregamento da PPS: No caso da PPS não se encontrar totalmente carregada, e a procura de potência de tração ser inferior à máxima potência que o sistema de FCs pode entregar, este é colocado a operar nesse ponto de máxima potência, sendo que o diferencial é utilizado para recarregar a PPS.

2.2.2 Sistema de propulsão

Iniciando pela abordagem mais antiga, aquela que recorre a um ICE e a sistemas de armazenamento de energia, e assumindo uma configuração do tipo série, sabe-se que esta tem a necessidade de utilização de uma unidade de potência auxiliar que permita o carregamento das baterias. Na Figura 2.14 é possível verificar os diferentes subsistemas implementados num *powertrain* de um HEV do tipo série, sendo de evidenciar os seguintes:

- Sistema de geração de energia;
- Sistema de armazenamento de energia;
- Conversores DC/DC;
- Conversores AC/DC;
- Interface e sistema de controlo.

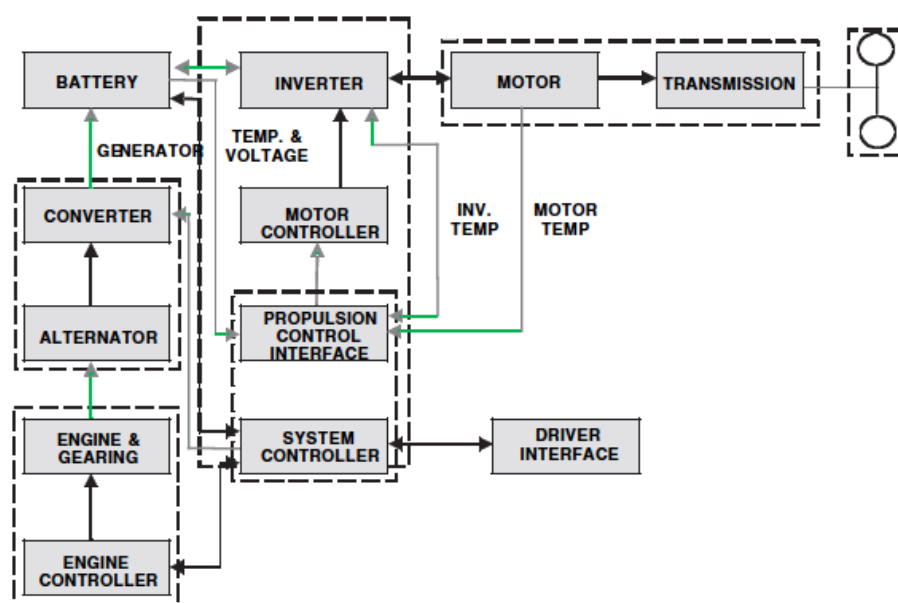


Figura 2.14: Sistema de propulsão de um HEV série [46]

De seguida são referidos os estados de desenvolvimento de cada um dos sistemas referidos anteriormente. Para tal, são descritas as diferentes possibilidades, e as suas vantagens e desvantagens.

2.2.3 Sistema de geração de energia

O subsistema de geração está encarregue de alimentar o sistema de propulsão e de fornecer energia ao sistema de armazenamento do veículo em questão.

Neste caso, a energia será gerada com recurso a células de combustível, que serão detalhadamente descritas na secção seguinte.

2.2.3.1 Células de combustível

Uma célula de combustível é um dispositivo eletroquímico capaz de produzir energia elétrica a partir de hidrogénio e oxigénio [68].

Todas as células de combustível possuem dois elétrodos, locais onde ocorrem as reações químicas associadas ao seu funcionamento, um eletrólito, responsável pelo fluxo de partículas carregadas entre elétrodos, e um catalisador, que acelera as reações [69].

Os combustíveis utilizados são armazenados em depósitos pressurizados, no caso do hidrogénio e recolhidos ao ar atmosféricos, no caso do oxigénio. Uma vez que esta é uma reação que ocorre sem combustão, não existe a emissão de gases de efeito de estufa, e o único subproduto gerado é água pura [68].

A tensão produzida por cada célula é da ordem dos 0,6 a 0,8V, isto é, no caso de necessidade de valores superiores utiliza-se um conjunto de dispositivos em série. Por vezes, o processo reativo que se desenrola nas FCs é descrita como a reação inversa à eletrólise da água, processo de oxidação-redução a partir do qual se obtém hidrogénio e oxigénio, no estado gasoso [68]. Esta

reação (Figura 2.15) é desencadeada pela injeção de hidrogénio no ânodo da célula, onde estes átomos são ionizados, originando iões positivos de hidrogénio e eletrões. Estes eletrões ao percorrerem os fios elétricos, geram um fluxo de cargas negativas que geram corrente para alimentar uma determinada carga. O oxigénio é injetado no cátodo, onde se combina com os eletrões provenientes dos átomos de hidrogénio. Em alguns tipos de células, os iões de hidrogénio percorrem o eletrólito e reagem no cátodo com o oxigénio, noutros o oxigénio, após se combinar com os eletrões flui pelo eletrólito e reage com os iões de hidrogénio no ânodo, sendo que, em ambos os casos, ocorre a formação de água. Em ambas as possibilidades, o papel do eletrólito é fundamental, uma vez que este deve ser bastante seletivo em relação aos iões que permite que fluam por si, pois a passagem de alguma impureza pode provocar a interrupção da reação, prejudicando o funcionamento da célula [69].

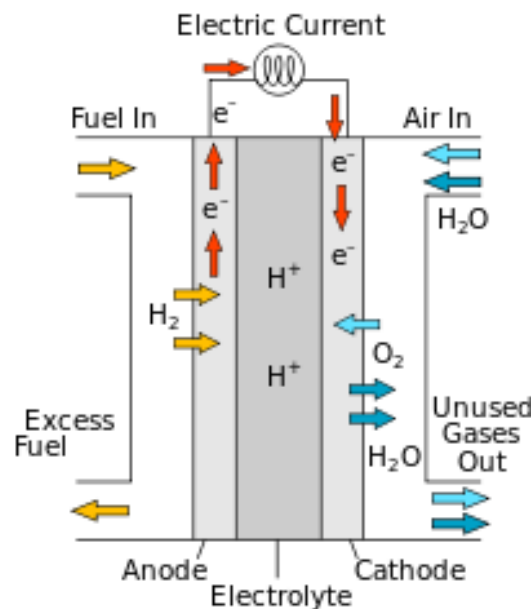


Figura 2.15: Princípio de funcionamento de uma célula de combustível [70]

O hidrogénio que é utilizado como combustível é o elemento mais simples que existe, e é, também o mais abundante no universo. Tendo em consideração a sua abundância e a sua qualidade como combustível, seria de esperar que este fosse uma fonte infindável de energia com um custo reduzido associado, mas, normalmente o hidrogénio está ligado a outros elementos, e o processo de separação necessita de energia. Um dos métodos que, atualmente está a ser desenvolvido extrai o hidrogénio de hidrocarbonetos, como o gás natural, segundo um processo designado por reforma, que consiste na vaporização de hidrocarbonetos com vapor de água [71] [68].

Outra característica que limita a utilidade do hidrogénio é o armazenamento, pois tem de ser acondicionado sobre elevada pressão, implicando a utilização de reservatórios pesados [68].

Abordando as limitações destes dispositivos num contexto geral, estas envolvem tempos de inicialização elevados, potência de saída baixa, resposta dinâmica lenta, capacidades de carga pobres, largura de banda de potência reduzida, ciclo de serviço curto e custo elevado. Tal como

ocorre nas baterias, as células de combustível degradam-se com o tempo, e vão perdendo eficiência de forma gradual [68].

As células de combustível, apenas capazes de produzir valores de potência inferior a 1kW são, normalmente não pressurizadas e, apenas utilizam uma ventoinha para facilitar o fornecimento de oxigénio. Já no que diz respeito as células de combustível habilitadas a produzir valores de potência superiores torna-se necessária a inclusão de um compressor no sistema, que diminui a eficiência do mesmo, e pode torná-lo barulhento [68].

Estes dispositivos possuem um valor de resistência interna, relativamente elevado, o que justifica a queda de tensão acentuada quando são colocadas a alimentar uma carga [68]. Na Figura 2.16 é possível analisar a tensão e a potência, ambas em função da corrente disponibilizada pela célula.

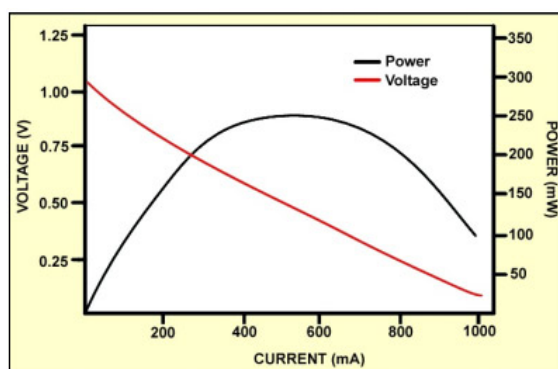


Figura 2.16: Tensão e potência em função da corrente numa célula de combustível [68]

Com base na informação presente na Figura 2.16 é possível concluir que o valor da tensão, em circuito aberto de uma célula de combustível é próximo de 1V. Quando a célula de combustível é colocado a alimentar uma carga, o valor da tensão sofre uma queda acentuada, situação que advém do elevado valor da resistência interna destes dispositivos, tal como foi referido anteriormente. Outra situação que se pode deduzir a partir da Figura 2.16 é que as células de combustível operam a uma taxa de eficiência máxima, quando o fator de carga é próximo de 30%. Esta questão, e a lenta resposta a regimes dinâmicos colocam as células de combustível aptas para operar como fontes constantes de energia, ou então como forma de carregamento das baterias, não podendo ser utilizadas como fontes únicas, como era esperado no início do seu desenvolvimento [68].

De seguida serão apresentadas diferentes tipos de células de combustível.

2.2.3.2 Membrana de Troca de Protões

As células de combustível que recorrem a membranas de troca de protões, também designadas por PEMFC utilizam um eletrólito polimérico, sob a forma de uma folha permeável fina e são um dos tipos de FCs mais estudados e aplicados (veículos, geração portátil de potência) atualmente [68] [69].

O eletrólito implementado neste tipo de células é sólido e flexível, o que garante que não ocorrem fugas nem quebras [69].

As vantagens deste tipo de células de combustível são [68]:

- Facilidade de inicialização a temperaturas normais;
- Capacidade de operação a temperaturas, relativamente baixas (50 a 100°C);
- Reduzida dimensão;
- Elevada eficiência (35 a 60%);

Em relação à facilidade de inicialização a temperaturas normais, esta é uma enorme vantagem em relação a outros tipos de células, no entanto apresentam baixo desempenho durante esta mesma fase. Estas células apresentam reduzida dimensão, pois possuem uma elevada densidade energética. Em termos de eficiência, os valores alcançados por este tipo de células pode ser considerado elevado, quando comparado com os convencionais ICEV, nos quais ronda os 25 a 30% [68].

No entanto existem alguns contras associados a este tipo de FC [68]:

- Necessidade de utilização de hidrogénio puro como combustível;
- Necessidade de sistema de controlo de humidade e aquecimento;
- Elevado custo.

Para que se consiga inicializar estas células é necessário, que as mesmas tenham os elétrodos humedecidos, dentro de uma determinada gama, daí a necessidade de implementação de um sistema de controlo de humidade. Como a formação de gelo pode causar danos nas células, impõem-se a utilização de um sistema de supervisão que verifique a temperatura e o estado das células, e, caso necessário proceda ao seu aquecimento. O custo elevado associado a estas células é justificado pela utilização de elementos raros, como a platina na cobertura dos elétrodos, de forma a otimizar a reação [68].

2.2.3.3 Óxido Sólido

As FCs de óxido sólido, ou SOFC estão a ser alvo de renovada atenção, devido a novidades introduzidas ao nível do material da célula e do *design* do conjunto de células. Com a atualização do material (nova geração de composto cerâmico) utilizado na construção destas células foi possível baixar a temperatura de funcionamento, para os 500 a 600°C, permitindo, desta forma o uso de aço convencional, no lugar de compostos cerâmicos caros [68]. Habitualmente era utilizado um composto cerâmico de um óxido metálico como eletrólito, e, este caso as temperaturas de operação eram na ordem dos 1000°C [69].

A potência gerada por este género de células de combustível pode atingir os 100kW [69].

Esta topologia assume como pontos a seu favor [68]:

- Possibilidade de utilização de diferentes combustíveis (por exemplo, gás natural);

- Elevada eficiência (60%).

Não existe a necessidade de recurso a hidrogénio puro, pois a temperatura de operação deste tipo de células permite o processo de reforma, sendo capaz de produzir hidrogénio a partir de hidrocarbonetos, ou compostos orgânicos. Mais uma vez, a eficiência é considerada elevada quando comparada com a dos ICEV, e mesmo em relação aos outros tipos de células [68].

Contudo [68]:

- Necessidade de utilização de materiais exóticos;
- Elevado custo;
- Danos causados pela elevada temperatura;
- Longo processo de inicialização;
- Reduzida longevidade.

A questão do elevado custo advém dos materiais necessários para a construção destas células. As elevadas temperaturas de operação deste género de células provocam corrosão ao nível dos elétrodos, o que vai provocando uma diminuição do desempenho, e, inevitavelmente de eficiência [68].

As SOFCs são utilizadas em unidades de geração de energia [68].

2.2.3.4 Alcalina

As células de combustível alcalinas, ou AFC são bastante utilizadas nas áreas do transporte, militar, e espacial [68].

A eficiência destas células é de, aproximadamente, 70%, e a sua temperatura de operação é entre os 150 e os 200°C. Já no que diz respeito à potência destas células, estas são capazes de produzir entre os 300W os 5kW [69].

Estas aplicações tiram partido das seguintes características [68]:

- Reduzido custo;
- Gestão de humidade simples;
- Elevada eficiência.

No entanto [68]:

- Grande dimensão;
- Necessidade de utilização de hidrogénio e oxigénio puros;
- Dependência da qualidade atmosférica.

Quando comparadas com outros tipos de células, estas apresentam uma dimensão superior, o que coloca em causa a sua aplicabilidade em veículos de transporte para o público em geral. A presença de impurezas nos combustíveis utilizados põe em causa a eficiência destas células, e até a concentração de dióxido de carbono numa cidade poluída pode contaminá-las [68].

2.2.3.5 Metanol Direto

O conceito de célula de combustível portátil está a ganhar força e estão a ser realizados diversos estudos para o seu desenvolvimento. A topologia mais promissora é a de metanol direto, ou DMFC, que utiliza como combustível, não hidrogénio, mas sim metanol líquido [68].

Em relação a estas células é de salientar [68]:

- Reduzido custo;
- Conveniência de utilização;
- Sem necessidade de hidrogénio pressurizado;
- Operação contínua.

Dado que estas células utilizam metanol como combustível, não existe a necessidade de utilização de hidrogénio, o que evita o acréscimo de peso imposto pelo habitual depósito, e as questões de segurança relacionadas com o acondicionamento deste gás [68].

Mas, por outro lado [68]:

- Toxicidade e inflamabilidade do combustível utilizado;
- Baixa longevidade;
- Resposta lenta;
- Baixa eficiência (20%).

O transporte deste tipo de dispositivos portáteis pode ser complicado, já que existem restrições no que à quantidade de metanol, que se pode transportar diz respeito. A dinâmica destas células é lenta, o que implica que são mais apropriadas para aplicações com regimes, praticamente constantes. Em termos de eficiência, e por ainda estarem em desenvolvimento, estas células apresentam um valor de 20%, o que consegue ser inferior à dos ICEV [68].

Este tipo de células pode vir a ser utilizado em computadores portáteis, comunicações sem fios, e noutras aplicações que necessitem de mobilidade, portabilidade, ou mesmo estacionárias [68].

2.2.3.6 Ácido fosfórico

As células de combustível de ácido fosfórico, ou PAFC utilizam esse composto como eletrólito. A eficiência destas células varia entre os 40 e os 80%, e operam a temperaturas entre os 150 e

os 200°C. A potência gerada por estas células alcança valores na ordem dos 200kW, tendo já sido testadas unidades de 11MW [69].

Associadas a estas células estão as seguintes vantagens [68] [69]:

- Tolerância à presença de impurezas nos combustíveis utilizados (por exemplo, até 1,5% de monóxido de carbono);
- Capacidade de co-geração.

Já que estas células toleram a presença de impurezas nos combustíveis utilizados, a gama disponível é alargada [69].

Mas, por outro lado [68] [69]:

- Necessidade de utilização de materiais exóticos;
- Resistência a ácidos corrosivos;
- Vida de serviço limitada.

Estas células utilizam como catalisador a platina, ou seja ocorre um aumento do custo associado às mesmas [69].

Por ser utilizado ácido fosfórico como eletrólito é necessário que o encapsulamento deste género de células seja realizado em materiais que lhe resistam [69].

2.2.3.7 Modelação

As células de combustível, elementos produtores de energia elétrica a partir da energia química contida no hidrogénio e no oxigénio, possuem modelos elétricos equivalentes que permitem representar o comportamento das mesmas de forma apropriada. Existem vários modelos equivalentes disponíveis na literatura [72] [73] [74] [75] [76], sendo que de seguida serão abordados 2 que foram desenvolvidos e testados especificamente para o tipo de células a utilizar nesta dissertação, as PEMFC [72] [73].

O primeiro modelo, e o mais simples, é designado de modelo estático de uma PEMFC que se baseia numa série de Equações, que são abordadas de seguida. Este modelo, apenas representa um ponto de funcionamento específico. uma vez que tem como variáveis de entrada valores específicos da situação em causa, como são os casos da corrente fornecida pela célula, da pressão dos gases utilizados como combustível, e da temperatura a que a célula está a operar [72] [73].

A base concetual deste modelo é a equação de *Nernst*, que define o potencial eletroquímico máximo que a célula em causa seria capaz de produzir, em condições ideais de produção e funcionamento, e é apresentada de seguida [72] [73].

$$E_{Nernst} = 1,229 - 0,85 * 10^{-3} * (T - 298,15) + 4,3085 * 10^{-5} * T * (\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} * \ln(P_{O_2}))$$

Na Equação anterior, T representa a temperatura de operação da célula em graus K, e P_{H_2} e P_{O_2} representam as pressões parciais de H_2 e O_2 , em atm [72] [73].

Como as células de combustível apresentam resistências e capacidades parasitas que diminuem o valor da tensão por si disponibilizada e são responsáveis por perdas, existe a necessidade de as modelar. Estas perdas são divididas em 3 componentes, de ativação, óhmicas, e de concentração [72] [73].

Iniciando o estudo das perdas pelas denominadas de ativação, as mesmas dependem da temperatura das células (T), da concentração de O_2 dissolvido na superfície do cátodo (CO_2 , em mol/dm^3), da corrente fornecida pela célula (I, em A) e de 4 coeficientes paramétricos (ξ_{1-4}), fundamentados em fenómenos cinéticos, termodinâmicos, e eletroquímicos [72] [73].

$$\eta_{act} = \xi_1 + \xi_2 * T + \xi_3 * T * \ln(CO_2) + \xi_4 * T * \ln(I)$$

Em relação às perdas óhmicas sabe-se que estão relacionadas com a resistência interna provocada pelos eléctrodos e placas coletoras, e pela resistência provocada pela transferência de prótons através da membrana (R_c) e de eletrões pelos eléctrodos (R_m). O valor das perdas óhmicas é diretamente proporcional ao valor da corrente fornecida pela célula de combustível.

$$\eta_{ohm} = I * (R_m + R_c)$$

As últimas perdas a abordar são as de concentração e têm em consideração a variabilidade das pressões parciais dos gases utilizados como combustível e dependem de um fator paramétrico B (em V), dependente da célula em uso, e das densidades de corrente, em questão e máxima (J e J_{max} , respetivamente) [72] [73].

$$\eta_{conv} = -B * \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right)$$

Já tendo sido abordadas todos os géneros de perdas considerados no modelo estático, tem-se que a tensão numa célula de combustível é dada por [72] [73]:

$$V_{cell} = E_{cell} - (\eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conv})$$

É habitual, os sistemas que recorrem a células de combustível como fonte de energia elétrica necessitem de valores mais elevados de tensão do que aquele que uma única célula consegue gerar (normalmente entre 1 e 1,5V), portanto são utilizadas *stacks* de células em série e paralelo, de forma a serem atingidos os valores de tensão e corrente desejados [72] [73].

Este modelo permite a análise dos sistemas em regime estacionário, quer em termos de evolução temporal, quer em termos de condições de funcionamento, não permitindo verificar o comportamento das células de combustível em situações de arranque [72] [73].

O outro modelo a analisar é o dinâmico e tem, novamente, em consideração as perdas abordadas no modelo estático e entre a membrana e o cátodo são formadas duas camadas carregadas (e de sinal oposto) cujo comportamento pode ser equiparado a um condensador. Com isto, este modelo é constituído por R_{ohm} , R_{act} , R_{conv} , C_{dc} , e uma fonte DC de valor E_{Nernst} [72], e pode ser

revisto na Figura 2.17.

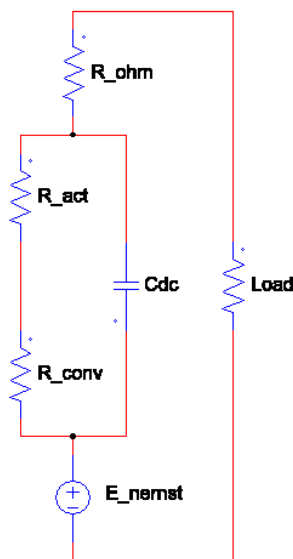


Figura 2.17: Modelo dinâmico de uma célula de combustível

O valor das resistências é calculado com base nos cálculos realizados para o modelo estático, considerando a queda de tensão provocada por cada uma das perdas e a corrente considerada, e recorrendo à Lei de *Ohm*, obtêm-se os valores desejados [72].

A capacidade C_{dc} é responsável por representar a resposta dinâmica das células de combustível, e considerando 1s como tempo de resposta médio de uma PEMFC [77] e o cálculo dessa capacidade como referido em [78], o seu valor pode ser obtido.

$$C_{dc} = \frac{\tau}{R_{ohm}}$$

O modelo obtido é capaz de representar a resposta dinâmica de primeira ordem evidenciada pelas células de combustível, conseguida pela introdução da capacidade abordada anteriormente, já possibilitando a análise da fase de arranque destes componentes [77].

2.2.3.8 Conclusão

Considerando o estudo realizado em relação aos vários tipos de células de combustível disponíveis no mercado é possível concluir que aquelas que estão mais desenvolvidas, e são mais apropriadas para aplicação em veículos elétricos são as PEMFC. Tal opção deve-se à sua elevada eficiência quer por comparação com os motores de combustão, quer com os restantes tipos de células, à facilidade de inicialização, e ao volume reduzido que ocupam.

2.2.4 Sistema de armazenamento de energia

Ao subsistema de armazenamento de energia estão associados dispositivos capazes de recolher a potência gerada pelo sistema e de fornecer, essa mesma potência quando necessária. Estes

dispositivos são designados por baterias e podem ser classificados como chumbo-ácido, níquel-cádmio (*Ni-Cd*), hidreto de metal-níquel (*NiMH*), sulfureto de sódio (*NaS*), cloreto de níquel-sódio (*NaNi(Cl)₂*), íões de lítio (*Li-ion*), lítio-polímero, e baterias sólidas (como exemplo são apresentadas as baterias de sulfeto de metal de lítio).

2.2.4.1 Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de Chumbo-Ácido foram o primeiro tipo de dispositivos recarregáveis de armazenamento de energia a ser desenvolvido.

Como elétrodo é utilizado o chumbo (negativo), óxido de chumbo (positivo), e o eletrólito é ácido sulfúrico diluído [1]. Esta categoria de baterias impôs-se de tal formano mercado que, mesmo após cento e cinquenta anos continuam a representar uma quota significativa no mesmo, aproximadamente 30% [79].

Algumas das razões para tamanho sucesso são expostas de seguida [80] [81]:

- Baixo custo;
- Simplicidade de fabrico;
- Sustentabilidade, devido à possibilidade de reciclar a maior parte dos seus componentes;
- Tecnologia conhecida, amadurecida e fiável;
- Nível de auto-descarga semelhante aos mais baixos, entre os vários sistemas de baterias recarregáveis;
- Capacidade de taxas de descarga elevadas (valores moderados a elevados de corrente).

Contudo, existem sempre limitações [80] [81]:

- Baixa densidade energética (20 a 50Wh/Kg);
- Não existe a possibilidade de ser armazenada descarregada;
- Número limitado de descargas totais;
- Toxicidade de alguns componentes como o chumbo e o eletrólito utilizado;
- Restrições em relação ao seu transporte, devido à possibilidade de ocorrência de derrames de ácido para o meio ambiente;
- Possibilidade de sobreaquecimento em caso de carregamento impróprio.

Estas baterias são utilizadas no ramo automóvel, nos sistemas de ignição, iluminação e arranque (SLI), como fontes de segurança para servidores, computadores pessoais, telemóveis, entre outros [82].

Dadas as suas características, estas baterias não são colocadas como hipótese de armazenamento em EVs, pois ocupariam um enorme volume e representariam um acréscimo inconcebível de massa ao veículo [46].

Existe uma vertente deste género de baterias, designada de *Deep-Cycle* que são, atualmente aplicados em vários veículos elétricos [46]. Estas são constituídas por placas de chumbo, concebidas para descargas profundas, e possuem uma expectativa de vida de 400 a 800 ciclos de carga e descarga. Alguns dos fabricantes que se empenharam no desenvolvimento deste tipo de baterias foram *Trojan*, *U.S. Battery*, *Alco*, *Deka*, *Exide*, e *GNB* [46].

Foi desenvolvido pela *Electrosource* uma bateria de chumbo-ácido capaz de propulsionar um veículo ao longo de, aproximadamente 175km, intitulada de *Horizon*. A construção deste tipo de baterias recorre a um processo de extrusão de chumbo patenteado, que garante maior capacidade de potência, ciclo de vida mais longo, descarga profunda sem degradação, carregamento rápido, e energia específica elevada. Estas baterias são seladas e não necessitam de manutenção [46].

2.2.4.2 Baterias de Níquel-Cádmio

As baterias de níquel-cádmio foram desenvolvidas no final do século XIX. Estas utilizam hidróxido de níquel ($Ni(OH)_2$) como cátodo, cádmio (Cd) como ânodo, e uma solução de hidróxido de potássio (KOH) é utilizada como eletrólito [83].

Estas células tornaram-se mais utilizadas a partir do momento em que foi criado um sistema de recombinação [84] cuja função é recombinar os gases resultantes da reação química, garantindo desta forma que os mesmos não são libertados para a atmosfera e que não ocorrem perdas tão acentuadas de eletrólito [85]. Este tipo de sistema de armazenamento permitiu um aumento do número de dispositivos portáteis [83]. Atualmente representam uma parcela reduzida do mercado de baterias (2%) [79].

Algumas características favoráveis das baterias de níquel-cádmio são apresentadas de seguida [83] [86]:

- Baixa resistência interna;
- Possibilidade de elevadas taxas de carregamento e descarregamento (1C ou superior);
- Característica de descarga constante (declínio abrupto no final de ciclo);
- Tolerância a descargas completas;
- Larga gama de temperaturas de operação;
- Número de ciclos de vida elevado (1000 ciclos);
- Processo de carregamento rápido sem deterioração das células (desde 0,5C até valores superiores a 1C);
- Possibilidade de armazenamento quer carregada, quer não;

- Baixo custo associado ao eletrólito.

Por outro lado [83] [86]:

- Suscetibilidade para o efeito de memória;
- Propensão para ocorrência de danos em caso de sobrecarregamento;
- Baixa tensão por célula (1,2V por célula);
- Elevado custo do material utilizado como ânodo (Cd);
- Elevada toxicidade provocada pela utilização do cádmio (metal pesado).

As aplicações onde recorrem a baterias de níquel-cádmio vão desde pequenos aparelhos portáteis, até baterias do ramo da aviação [87]. Existem algumas companhias europeias e japonesas que recorrem a estas baterias para os seus veículos elétricos [46].

2.2.4.3 Baterias de Hidreto de Metal-Níquel

Estas baterias estão intimamente ligadas com as de níquel-cádmio, sendo que diferem, apenas no material utilizado no ânodo. O tóxico cádmio é, então substituído por um hidreto metálico, reduzindo de forma substancial o impacto ambiental desta tipologia.

Esta categoria de sistemas de armazenamento foi patenteada durante os anos oitenta e, apesar de ser um conceito desenvolvido recentemente, já é possível conceber sistemas com valores, suficientemente elevados de tensão que permitem a sua aplicação no setor automóvel [88] [89]. Atualmente assumem uma posição minoritária no mercado, assumindo uma cotação de, apenas 3% [79], com tendência para diminuir.

Este tipo de sistema de armazenamento possui vários benefícios, como [88] [86]:

- Elevada densidade energética (60 a 120Wh/Kg);
- Reduzida impedância interna;
- Número de ciclos de vida elevado (300 a 500 ciclos);
- Tolerância a sobre, cargas e descargas;
- Característica de descarga constante (declínio abrupto no final de ciclo);
- Larga gama de temperaturas de operação;
- Carregamento rápido (0,5 a 1C);
- Possibilidade de recondicionamento.

Como inconvenientes assumem [88] [86]:

- Taxa de auto-descarga elevada;

- Suscetibilidade para o efeito de memória;
- Deterioração após longos períodos de armazenamento;
- Baixa tensão por célula (1,2V por célula);
- Baixa disponibilidade de alguns componentes.

Este tipo de sistema de armazenamento é utilizado em situações que necessitam de elevada potência [87].

2.2.4.4 Baterias de Sulfureto de Sódio

As baterias de sulfureto de sódio foram desenvolvidas pela *Ford Motor Company* e possuem um alcance, em torno de 240km [46].

Os elétrodos negativos destas baterias são construídos em sódio, enquanto que os positivos são de enxofre fundido [46]. De forma a manter o enxofre no estado líquido é necessário que a temperatura da bateria se mantenha entre os 300 e os 350°C [46]. O custo destas baterias é, por enquanto elevado, esperando-se uma diminuição abrupta do mesmo, uma vez que os materiais utilizados são abundantes e de baixo custo [46].

Como ponto favorável há que destacar [90] [91]:

- Custo reduzido dos materiais utilizados;
- Número elevado de ciclos de carga e descarga (3000 ciclos, ou 8 anos);
- Flexibilidade de operação;
- Elevada densidade de energia (90 a 120Wh/Kg);
- Elevada eficiência energética;
- Insensibilidade as condições ambientais.

Por outro lado, é necessário ter em conta:

- Elevada temperatura de funcionamento (270 a 350°C);
- Elevado custo de produção;
- Necessidade diária de carregamento.

As altas temperaturas necessárias para a sua correta operação colocam alguns entraves ao nível da segurança [46]. Já em relação ao carregamento diário obrigatório, este é imposto pela necessidade de manutenção dos elétrodos fundidos [46].

2.2.4.5 Baterias de cloreto de níquel-sódio

Desenvolvidas pela *AEG Anglo Batteries GmbH*, as baterias de cloreto de níquel-sódio operam a uma temperatura de 300°C, sendo declarado pelo fabricante que são seguras em caso de acidente, e que se mantêm funcionais mesmo em caso de danos numa das células [46].

O seu arrefecimento e aquecimento não as danifica, mas abaixo de 270°C não é possível retirar corrente das mesmas [46]. Estas questões de temperatura são colocadas e impostas de forma a beneficiar da melhor difusividade dos reagentes sólidos no cátodo e a condutividade superior do eletrólito sólido [92].

Estas baterias apresentam como vantagens os seguintes tópicos [92]:

- Não existe a necessidade de manutenção da temperatura no caso de inoperação;
- Elevada esperança de vida (aproximadamente, 15 anos);
- Não existe a necessidade de manutenção;
- Os produtos utilizados no seu fabrico são altamente recicláveis.

Contudo, assumem [46]:

- Elevado custo de produção;
- Temperatura mínima de operação.

As baterias de cloreto de níquel-sódio estão a ser testadas pela *BMW* e pela *Mercedes-Benz*, nos seus veículos elétricos [46].

2.2.4.6 Baterias de Iões de Lítio

As baterias de iões de lítio, ou *Li-ion* estão em desenvolvimento desde o início do século XX, sendo que, apenas nos anos setenta é que foi possível colocar no mercado o primeiro sistema deste tipo.

A entrada em mercado foi demorada devido à instabilidade do lítio metálico utilizado no ânodo, e como célula não recarregável [93]. As primeiras células de iões de lítio foram lançadas em 1991 pela *Sony* e a *Asahi Kasei* [94]. Nos tempos mais recentes, as baterias de *Li-ion* assumiram uma posição de destaque no mercado mundial, representando, aproximadamente 40% das vendas [79].

De seguida são apresentados alguns pontos a favor deste tipo de baterias [95] [96]:

- Elevada densidade energética (70 a 260Wh/Kg, dependendo da tecnologia específica);
- Taxa de auto-descarga reduzida;
- Elevada taxa de descarga (1 a 25C, em função da tipologia considerada);
- Reduzida manutenção;

- Elevada tensão por célula (3,6V por célula);
- Pouco nocivas para o ambiente.

A elevada densidade energética deste tipo de baterias garante o espaço ocupado pelas mesmas nos veículos é reduzido, permitindo a manutenção do espaço disponível no interior dos veículos, quando comparado com as tipologias mais convencionais, e um acréscimo menos notório de massa ao veículo, já que são necessárias menos células para obter os mesmo parâmetros [95].

Comparando a taxa de auto-descarga destas baterias com as que recorrem a Níquel, o valor é inferior a metade [95].

A taxa de descarga assume valores superiores a 1C, ou seja abrange valores que são capazes de garantir a manutenção da resposta dinâmica do sistema, quando comparado com os sistemas de propulsão convencionais [96].

Estas baterias necessitam de pouca manutenção para operarem nas melhores condições, uma vez que não são necessárias descargas periódicas, e não existe suscetibilidade ao efeito de memória [95].

A tensão disponibilizada por cada célula das baterias de iões de lítio é de 3,6V, sendo este um valor que permite a utilização de, apenas uma célula em certas aplicações [96].

Este tipo de baterias quando são descartadas provocam danos reduzidos no ambiente, fator a ter em conta na atualidade [96].

Em relação a este tipo de baterias são colocadas algumas questões, como por exemplo [95] [46]:

- Necessidade de implementação de um circuito de proteção para manutenção da tensão e corrente, em valores seguros;
- Suscetibilidade para o efeito do envelhecimento;
- Restrições em relação ao seu transporte;
- Necessidade de implementação de um circuito de ventilação;
- Elevado custo de produção;
- Necessidade de desenvolvimento.

O circuito de proteção implementado mantém os níveis de tensão e corrente destas células dentro de valores seguros pré-determinados [95].

A questão do envelhecimento está relacionada com a maioria das baterias de iões de lítio, sendo que ainda não existem desenvolvimentos divulgados pelos diferentes fabricantes [95]. Mesmo não estando em utilização nota-se o efeito do envelhecimento, sendo que, neste caso, se as mesmas forem armazenadas num local frio e possuírem uma carga de 40%, esse efeito é atenuado [95].

No que toca ao transporte destas células, o mesmo é regulado quando se tratam de grandes quantidades, não se aplicando a situações de uso pessoal [95].

Existe a necessidade de implementação de um circuito de ventilação, pois a temperatura das células deve ser controlada [95].

O custo de produção destas baterias é, aproximadamente 40% superior às de Níquel-Cádmio [95].

Esta topologia de baterias ainda se encontra num estado imaturo de desenvolvimento, sendo que estão a ser realizados inúmeros estudos, que têm gerado varias inovações, quer novos metais, quer novos químicos [95].

As baterias de íões de lítio são utilizadas em inúmeros dispositivos portáteis, como telemóveis, relógios, *pacemakers*, entre outros [82]. Graças à sua elevada densidade energética, que resulta em peso reduzido, também são utilizados nos ramos militar e aeroespacial [87].

2.2.4.7 Baterias de lítio-polímero

Este tipo de baterias sustenta-se na tecnologia de película fina, sendo o custo associado às mesmas superior ao das habituais chumbo-ácido (cerca de 20%), mas capazes de fornecer o dobro da energia [46]. Para além destes atributos, estas baterias têm uma vida útil de, aproximadamente 80000km, operam a uma temperatura entre 65 e 120°C, podem ser rapidamente carregadas, e no caso de sobrecarga podem ser provocados danos nas células [46]. Mas, acima de tudo, o que torna esta tecnologia, por enquanto inviável é o dimensionamento para a gama de potências dos EV [46].

2.2.4.8 Baterias sólidas

As baterias de estado sólido são a tecnologia mais recente neste campo.

Baseiam-se na utilização de elétrodos e eletrólitos no estado sólido, sendo que alguns dos materiais propostos são cerâmicas, vidros e sulfureto de lítio. Ao aplicar os materiais no estado sólido ocorre a resolução de alguns problemas associados aos sistemas convencionais. Alguns desses problemas são a alta inflamabilidade, decomposição eletrolítica a elevadas tensões, formação de fluoreto de hidrogénio, e o risco de fugas.

Apesar de ser uma tecnologia em constante desenvolvimento, em relação à qual estão a ser realizados inúmeros estudos e avultados investimentos, já lhe são reconhecidas várias vantagens [97] [98] [99] [100] [101]:

- Elevada densidade energética;
- Possibilidade de carregamento rápido;
- Elevada duração;
- Tolerância a elevadas temperaturas;
- Utilização de materiais tóxicos, ou perigosos é evitada;
- Elevada segurança;

- Tamanho reduzido;
- Possibilidade de operação com valores de tensão mais elevados;
- Longo tempo de vida.

Por se tratar de um conceito ainda muito recente existem algumas questões e problemáticas por resolver [102] [99]:

- Necessidade de implementação de um circuito de proteção para manutenção da tensão e corrente, em valores seguros;
- Dificuldade de operação a baixas temperaturas;
- Risco de quebra devido à estrutura rígida imposta pela exclusiva utilização de materiais no estado sólido;
- Processo de fabrico pouco desenvolvido;
- Elevado custo.

Prevê-se que as baterias de estado sólido venham a ser utilizados em *Smart Homes*, veículos elétricos, dispositivos médicos e logísticos, entre outros [103].

2.2.4.9 Baterias de sulfeto de metal de lítio

As baterias de sulfeto de metal de lítio são um tipo de baterias que operam a temperaturas elevadas [46].

Estes sistemas oferecem algumas características a considerar [46] [104]:

- Elevada potência específica (300Wh/Kg);
- Elevada taxa de carga;
- Elevado número de ciclos de carga e descarga (2500 ciclos);
- Reduzida dimensão;
- Reduzido peso;
- Reduzido custo por kWh.

2.2.4.10 Baterias de lítio-ar

As baterias lítio-ar são um tipo de baterias que utilizam lítio como ânodo, e ar como cátodo.

Estes sistemas oferecem algumas características de interesse [104]:

- Elevada potência específica (13kWh/Kg, sendo este valor, por enquanto teórico);

- Reduzida dimensão;
- Reduzido peso.

Por outro lado:

- Reduzido valor de ciclos de funcionamento (50 ciclos, em condições de laboratório);
- Reduzida taxa de descarga, e dependente da temperatura;
- Necessidade de desenvolvimento.

Este género de baterias ainda se encontra numa fase muito prematura, sendo que os protótipos desenvolvidos, ainda são instáveis, o que justifica o número reduzido de ciclos de vida que são capazes de alcançar, mesmo em condições excecionais de laboratório.

2.2.4.11 Supercondensadores

Os supercondensadores são dispositivos constituídos por dois elétrodos separados por uma membrana porosa, sendo, normalmente de carvão ativado imerso numa solução eletrolítica [105].

O seu processo de desenvolvimento já se iniciou nos anos cinquenta, mas foi nos últimos que foram alcançados grandes avanços em torno desta tecnologia.

A principal vantagem que estes dispositivos têm em relação à baterias é a rápida carga e descarga, sendo esta propriedade proporcionada pela forma de armazenamento de energia em que se baseiam. Estes armazenam energia num campo magnético, enquanto que as baterias se sustentam em reações químicas [106].

Para além da questão da rapidez de carga e descargas existem outras questões favoráveis à utilização de supercondensadores em detrimento das baterias [106]:

- Tempo de vida elevado;
- Larga gama de temperaturas de operação;
- Número de ciclos de vida elevados;
- Reduzidos custos de manutenção;
- Elevada densidade de potência;
- Capacidade de fornecimento de potência de forma muito rápida;
- Não existe a necessidade de recurso a metais tóxicos ou químicos prejudiciais.

Como inconveniente é, apenas colocado um ponto:

- Baixa densidade de energia.

Atualmente, este tipo de equipamento de armazenamento de energia é utilizado em dispositivos portáteis, sistemas fotovoltaicos, eólicos, de travagem regenerativa, de *backup* em caso de falhas de potência [107], e representa menos de 1% do mercado mundial de dispositivos de armazenamento [79].

2.2.4.12 Sistema de gestão de baterias

Um BMS é um sistema eletrônico que gere uma bateria recarregável, e que pode ser desenvolvido usando uma variedade de blocos funcionais e técnicas de projeto [108].

Estes sistemas tem várias funções, como [108]:

- Monitorização: o BMS deve monitorizar o estado da bateria com base em diversos parâmetros do sistema físico, como a tensão, a temperatura, o estado de carga (SOC) ou a profundidade de descarga (DOD), o estado de saúde (SOH), o estado da potência (SOP), o fluxo de refrigerante, e a corrente;
- Recuperação de energia: o BMS deve controlar o carregamento das baterias com recurso à energia recuperada nas travagens;
- Computação: com base nos itens anteriores, o BMS deve ser capaz de calcular alguns, entre os quais, a máxima corrente de carga (CCL), a máxima corrente de descarga (DCL), a energia fornecida após carregamento, a carga entregue ou armazenada, a energia total fornecida, o tempo total de operação, e o número total de ciclos;
- Comunicação: o BMS deve ser capaz de comunicar com os componentes, ou dispositivos que lhe fornecem informação, e com *hardware* de nível superior, que permite a um utilizador aceder a toda a informação, quer recolhida, quer calculada pelo sistema. Esta comunicação pode ser realizada através do recurso a comunicações série, comunicações CAN, barramento DC, ou diferentes tipos de comunicações *wireless*;
- Proteção: o BMS deve garantir que o sistema de baterias opera dentro da área segura de funcionamento, sendo que para tal deve ser capaz de evitar situações de sobre-correntes, sobre-tensões, sub-tensões, sobre-temperaturas, sub-temperaturas, sobre-pressões, e correntes de fugas. Esta prevenção é possível através do uso de interruptores que abram, no caso da bateria começar a operar fora da sua zona segura, verificar se os dispositivos que estão conectados à baterias se podem desconectar da mesma, controlar ativamente os dispositivos, como radiadores, ventoinhas, ar condicionado, ou líquido refrigerante;
- Conexão da bateria à carga: o BMS também pode incluir um sistema que permita um pré-carregamento das baterias, que implica a conexão a diferentes cargas de forma a eliminar as enormes correntes de entrada para os condensadores das cargas;
- Otimização: o BMS deve assegurar, de forma ativa que todas as células são mantidas à mesma tensão, ou SOC através de balanceamento, com o objetivo de maximizar a capacidade das baterias, e prevenir situações locais de sub e sobre-carga.

Associadas ao BMS existem várias topologias, que variam em complexidade e desempenho, e que podem ser associadas a três categorias [109]:

- Centralizados: um único controlador conectado às células da bateria através de fios elétricos. Estes sistemas são os mais baratos, menos expansíveis, e utilizam uma grande quantidade de fios;
- Distribuídos: existe um controlador associado a cada célula, conectados por um único fio elétrico. Estes sistemas são os mais caros, mais simples de instalar, e permitem a instalação mais clara;
- Modulares: alguns controladores, cada um dedicado a um certo número de células, existindo comunicação entre os diferentes controladores. Estes sistemas podem ser considerados como a topologia que oferece um compromisso entre as características, e os problemas das topologias anteriores.

Tal como foi referido anteriormente, a otimização é uma das funções do BMS, e deve garantir que todas as células se mantêm à mesma tensão, de forma a maximizar a capacidade da bateria [108]. Para que esta função seja realizada da forma mais eficaz, o BMS recorre a métodos de balanceamento, que serão abordados na secção seguinte.

2.2.4.13 Sistema de balanceamento de baterias

Os sistemas de armazenamento utilizados nos EVs, e nos HEVs são compostos por *strings* de células em série, com o objetivo de alcançar os níveis de tensão utilizados nos sistemas de propulsão destes veículos, e por conjuntos deste género em paralelo, de forma a atingir os níveis de corrente necessários. Com o recurso a séries de células dá-se o aumento, na mesma proporção da taxa de falha [110].

As tolerâncias admitidas durante o processo de fabrico, a distribuição desigual de temperatura, e as diferentes características de envelhecimento podem provocar uma situação de *overstress* numa célula específica da série em questão, podendo levar à falha prematura dessa mesma célula [110].

No processo de carregamento, caso exista uma célula degradada com a sua capacidade diminuída, existe a possibilidade de, após atingir o nível de carga completa, seja sujeita a uma sobrecarga até o processo de carregamento das restantes células ser dado como concluído. Durante esta situação, a célula fica sujeita a temperaturas e pressões elevadas, o que pode causar danos na mesma [110].

Durante o processo de descarga, a célula com menor capacidade terá a maior DOD, logo maior propensão à falha, que as restantes.

Todas estas questões em relação ao equilíbrio de carga entre as diferentes células são de grande importância pois devem, todas ser consideradas para que se possa garantir que o sistema de armazenamento desenvolvido é seguro e viável, e que corresponde a uma boa relação preço/qualidade para o sistema como um todo, garantindo uma autonomia e um custo aceitáveis quando comparado com os restantes produtos disponíveis em mercado [111]. Os sistemas de balanceamento de baterias podem ser caracterizados em duas categorias distintas [110]:

- Métodos passivos: estes métodos baseiam o balanceamento na remoção do excesso de carga das células carregadas, através de elementos passivos, como resistências, dissipando essa energia sob a forma de calor até que as tensões se nivelem;
- Métodos ativos: estes métodos apoiam-se na transferência de carga das células mais carregadas, para as menos, garantindo o equilíbrio de tensões entre as diferentes células do sistema.

Os métodos passivos mais usuais são aqueles que recorrem a resistências como elementos de dissipação de energia, sendo que dissipam sobre esse componente a energia em excesso presente nas células mais carregadas, até que estas apresentem o nível das menos carregadas [112]. Como exemplos desta tipologia de método de balanceamento tem-se [112]:

- Método de resistências fixas: ocorre uma descarga contínua da corrente em todas as células limitando, desta forma a tensão de cada uma delas, quando é realizado o correto dimensionamento das resistências. Este método, apenas pode ser utilizado em baterias de chumbo-ácido ou níquel, uma vez que são as únicas que não ficam danificadas permanentemente, aquando de sobrecargas;
- Método de resistências comutadas: é removida a energia em excesso das células mais carregadas, através da utilização de *relays* e interruptores. Ainda dentro desta categoria, existem dois modos de funcionamento possíveis:
 - Contínuo: o mesmo sinal de On/Off comanda todos os *relays* e interruptores;
 - De deteção: através da monitorização dos valores de tensão das diferentes células, os desequilíbrios são detetados e um mecanismo de controlo é responsável por decidir quais células vão ser descarregadas, ativando a resistência a si associada.

Este método pode ser aplicado em baterias de iões de lítio.

No que diz respeito aos métodos de balanceamento designados de ativos, aqueles que são mais utilizados realizam a transferência de carga através de condensadores (também conhecido por *Charge Shuttling*), ou através de transformadores, sendo que ambas as situações apresentam várias variantes [112]. Iniciando pelos métodos que recorrem a condensadores, tem-se [112]:

- Condensadores comutados: tal como no método das resistências comutadas, nos momentos em que são detetados desequilíbrios entre os valores de tensão das diferentes células, são ligados os interruptores de forma a transferirem a carga das células mais carregadas para as menos. Este método só apresenta 2 estados, logo o seu controlo é simples, mas, como contrapartida, o tempo necessário para atingir o equilíbrio é elevado;
- Condensador comutado único: derivação do método anterior, mas com recurso a, apenas 1 condensador. A transferência de carga entre a célula mais carregada e a menos ocorre através da configuração adequada dos interruptores, permitindo a conexão entre as células em causa;

- Condensadores de dupla hierarquia: derivação do primeiro método, mas com recursos a duas camadas de condensadores. Novamente, é realizada a combinação adequada para a ligação entre as células (mais e menos carregadas), e a utilização de duas camadas, também denominadas de "hierarquias", de condensadores permite a redução do tempo necessário para o equilíbrio para 25% do tempo apresentado pelo primeiro método.

São apresentados de seguida os métodos baseados em transformadores [112].

- Transformador comutado: este método apresenta 2 tipologias de circuito:
 - Bateria para célula (*Pack-to-cell*): através da configuração correta de interruptores, a energia da bateria é transferida para as células menos carregadas através do transformador comutado;
 - Célula para bateria (*Cell-to-pack*): a transferência de energia é realizada das células mais carregadas para a bateria.
- Transformadores com múltiplos enrolamentos: 1 único enrolamento primário e múltiplos enrolamentos, em função do número de células (1 enrolamento por célula), sendo que existem as seguintes configurações:
 - De retorno (*Flyback*): quando é ligado o interruptor do lado do primário é armazenada alguma energia no transformador, que é transferida para os enrolamentos secundários no momento em que o interruptor é desligado. Esta energia é injetada, na sua maioria, nas células menos carregadas, pois apresentam menor reatância;
 - Direto (*Forward*): a energia é transferida das células mais carregadas para as menos através do transformador e dos díodos em anti-paralelo dos interruptores, no momento em que é detetado um desequilíbrio entre os valores de tensão das células.
- Transformadores múltiplos: neste caso existe 1 transformador por cada célula, existindo um controlo mais específico da tensão de cada uma das células em função dos valores recolhidos e analisados.

Para além dos métodos apresentados anteriormente, existem outros baseados em conversores que, apesar de apresentarem tempos para o equilíbrio satisfatórios, o seu custo é elevado e o controlo é complexo, em bobines que apresentam, também, tempos satisfatórios para atingirem o equilíbrio, mas o sistema de controlo associado é de maior complexidade, quando comparado com os métodos descritos de forma mais detalhada [112].

2.2.4.14 Sistema de carregamento de baterias

Os EVs e os HEVs recorrem à energia armazenada em baterias para se propulsionarem. Essa energia pode ser proveniente da queima de combustíveis fósseis, da energia regenerada a partir da travagem, entre outras, e também da rede elétrica. Esta conexão à rede pode assumir vários papéis, desde o carregamento das baterias, como foi referido anteriormente, até à injeção de potência na

rede para suporte da mesma, ou balanceamento de cargas, sendo que agora se coloca a hipótese de recurso à energia armazenada nos EVs em situações de catástrofes naturais [113].

Quando se aborda a questão da interface com a rede é necessário garantir, que essa conexão não compromete a qualidade da potência transmitida na rede, e que o fator de potência é, suficientemente elevado de forma a maximizar a potência ativa disponível nas tomadas convencionais. O mercado de veículos que recorrem a fontes alternativas de energia está em constante crescimento, com destaque para aqueles baseiam a sua propulsão em energia elétrica, ou seja esta questão da interface com a rede elétrica está a ser bastante abordada para que sejam estabelecidas regras, ou *standards* que limitem a injeção de harmónicos e de corrente DC, na rede [114].

Após esta contextualização em relação ao carregamento das baterias de alguns veículos, é necessário tratar o dispositivo responsável por tal tarefa, os carregadores. Segundo a sua localização no sistema, estes dispositivos podem ser classificados em duas classes [115]:

- *On-board*: estes sistemas permitem o carregamento dos veículos em qualquer situação em que haja uma fonte de potência adequada disponível, sendo que o carregador está incluído no sistema do veículo. Por restrições de custo, massa, e espaço, normalmente estes sistemas, apenas garantem potência de nível um;
- *Off-board*: o sistema de conversão de energia está inserido na estação de carregamento. Neste caso, já podem estar envolvidas potências de níveis um, dois, ou três, e envolvem componentes e custos extra, estando sujeitos a atos de vandalismo e desordem, quando associados a ambientes urbanos.

Em função do nível de potência, os carregadores podem ser diferenciados em três categorias [115]:

- Tipo 1: trata-se do nível baixo de potência, até 3,7kW, sendo, também intitulado de potência normal, ou carregamento lento. É utilizado em aplicações domésticas, ou estacionamento de longa duração, e não necessita de infraestruturas adicionais. É expectável que os sistemas deste nível passem a estar integrados no próprio veículo;
- Tipo 2: valores de potência entre os 3,7 e os 22kW, e é utilizado em sistemas públicos e privados. Estes sistemas são, também apelidados de potência média, ou carregamento rápido;
- Tipo 3: denominado de potência elevada, ou carregamento muito rápido, têm a si associados valores de potência superiores a 22kW, e são utilizados em sistemas públicos de carregamento de EVs.

Associados a estes dispositivos estão os seguintes modos de carregamento [116]:

- Modo 1: é capaz de fornecer corrente AC até um valor máximo de 16A, por fase, ou seja potências entre os 3,7 e os 11kW. Corresponde a um carregamento lento, não impondo a necessidade de utilização de conectores especiais, bastando os conectores convencionais. Como proteções é necessário recorrer a uma ligação à Terra, para controlar as correntes de fugas, e disjuntores;

- Modo 2: está apto para fornecer correntes AC até 32A, por fase, ou potências entre os 3,7 e os 22kW. Tal como no modo anterior, é necessária uma conexão à Terra, e disjuntores, não necessita de conectores especiais, e é uma forma de carregamento lenta;
- Modo 3: para se utilizar este modo de carregamento é necessário um conector especial, designado por SAVE, e o carregamento pode ser lento, ou rápido, em função do conector utilizado, mono, ou trifásico. Os níveis de corrente, também estão dependentes do conector aplicado;
- Modo 4: Bem como o modo anterior, existe a necessidade de utilização de um conector especial. O carregamento é realizado em DC, estando a corrente relacionada com o carregador em questão.

Apesar de ainda se tratarem de versões preliminares, e suscetíveis de alteração, já existem algumas normas, ou diretrizes a cumprir por parte destes sistemas. Em relação aos modos 2, 3, e 4 colocam-se os seguintes requisitos [117]:

- Verificação da correta conexão do veículo;
- Contínua verificação da conexão à Terra;
- Energização e desenergização do sistema;
- Seleção da taxa de carregamento.

Outra característica que permite identificar os carregadores é o número de direções que o fluxo de potência pode assumir.

A primeira opção abordada são os carregados unidirecionais, que são aqueles que permitem o carregamento das baterias, mas não a injeção de potência na rede. Hoje em dia, o esquema mais utilizado corresponde a uma ponte de díodos, juntamente com um filtro, e conversores DC/DC, sendo que são implementadas numa única etapa de forma a reduzir custos, massa, volume, e perdas. Neste tipo de carregadores existe a possibilidade de incluir isolamento galvânico, através da inclusão de um transformador. Estes carregadores não necessitam de mecanismos de controlo complexos, sendo que, desta forma são capazes de concorrer com os bidirecionais, abordados de seguida, pois evitam preocupações relacionadas com custos, desempenho, e segurança [115].

Os carregadores bidirecionais possuem, normalmente duas fases, uma correspondente a um conversor AC/DC, que garante o fator de potência, e outra associada a um conversor DC/DC, que regula a corrente da bateria. Tal como no caso anterior, existem configurações que colocam a possibilidade de isolar, ou não os dois níveis de tensão. O fluxo bidirecional de potência é uma característica importante neste contexto pelas funções que pode desempenhar, tendo estas sido enumeradas anteriormente. No entanto, esta característica deve ser capaz de ultrapassar a questão da degradação das baterias, provocada pelos sucessivos ciclos de carregamento, ou descarga, o custo adicional associado aos componentes adicionais necessários, os problemas relacionados

com medições, e as atualizações necessárias para o sistema de distribuição. Os mecanismos utilizados para a determinação do SOC devem ser fiáveis ao ponto de informarem o condutor sobre a autonomia, ou alcance disponível. A opção pela bidirecionalidade impõe, também alguns condicionamentos ao nível da segurança, como é o caso do *anti-islanding* [115].

Relacionando o tipo de carregador com a uni, ou bidirecionalidade de fluxo de potência verifica-se que os carregadores unidirecionais podem assumir toda a gama de potências, estando associados aos três tipos de carregadores. Já no que diz respeito aos carregadores bidirecionais, estes estão associados ao tipo 2, uma vez que o tipo 1 impõe limites de custos, e de potência reduzidos, e é crucial que maximize a flexibilidade do sistema. No tipo 3, o conceito de fluxo de potência no sentido inverso entra, imediatamente em conflito com a ideia de tempo de conexão mínimo, e taxa de entrega de energia por unidade de tempo máxima [115].

2.2.4.15 Modelação

De forma a permitir a simulação, da forma mais realista possível, é necessário considerar um modelo equivalente para a bateria utilizada na prática, sendo que, de seguida são apresentadas algumas possibilidades de modelos eléctricos (Figura 2.18).

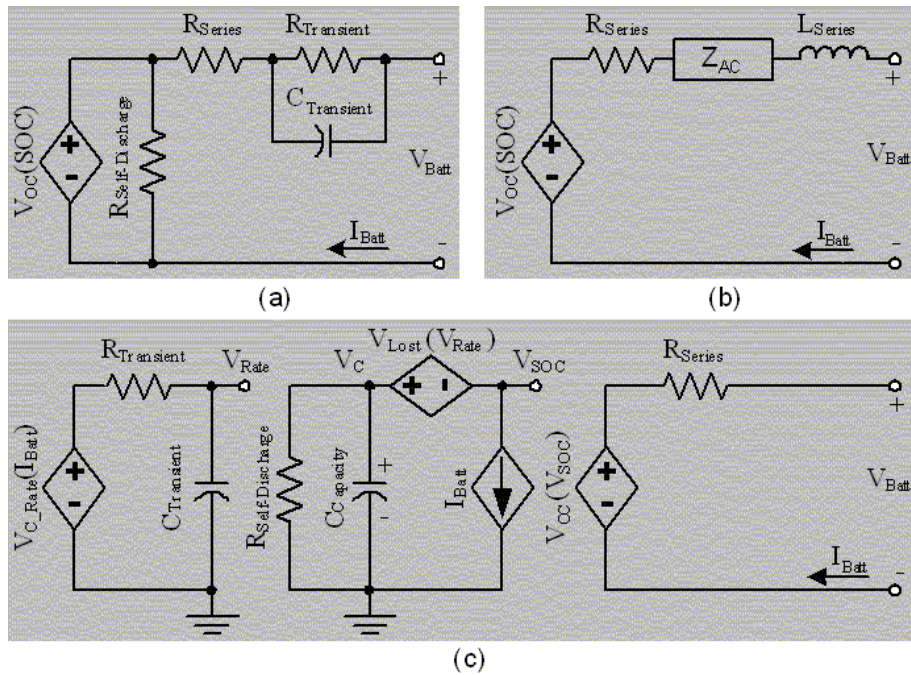


Figura 2.18: Modelos de baterias (a) Modelo eléctrico baseado em Thevenin (b) Modelo eléctrico baseado na impedância (c) Modelo eléctrico baseado na duração [118]

Um dos modelos para a representação de uma bateria é o modelo baseado em *Thevenin*, que prevê a resposta a eventos com carga variável, para um SOC específico, assumindo $V_{OC}(V_{SOC})$ como constante. Esta última situação impede a análise de variações da tensão da bateria em regime estacionário, e da duração da mesma [118].

Outra representação possível é o modelo baseado na impedância equivalente em AC. Este modelo é indicado para uma análise no domínio das frequências, sendo que Z_{AC} permite a análise de todo o espectro de impedâncias. O processo de cálculo de Z_{AC} é difícil, complexo, e não intuitivo. Este esquema equivalente de uma bateria, apenas funciona para um conjunto SOC-temperatura específico, e não permite a previsão da resposta DC, nem da duração da mesma [118].

Existe outra possibilidade, designada por modelo baseado na duração da bateria, que é capaz de simular a duração da bateria, e a resposta DC para cargas constantes [118].

Uma vez que nenhum dos modelos apresentados anteriormente é capaz de simular todas as situações fundamentais do funcionamento de uma bateria, é proposto na literatura, por *Chen e Mora*, um modelo que conjuga os três anteriores, de maneira a apresentar um comportamento mais completo e próximo da realidade. Tal como no modelo baseado na duração da bateria, este recorre a uma fonte de corrente controlado pela corrente disponibilizada pela bateria (I_{Batt}), e a um condensador ($C_{Capacity}$) que permitem simular a capacidade da bateria, ou o SOC. De forma a simular os regimes transitórios são utilizados dois ramos RC paralelo, intitulados de Transient_s (*short*) e Transient_l (*long*). As designações *short* e *long* estão relacionadas com a grandeza das constantes de tempo associadas a cada um dos ramos RC. O valor de V_{OC} é calculado com base em V_{SOC} , ou seja em função de SOC [118].

Existem algumas características associadas à operação de uma bateria que é importante ter em consideração aquando da simulação e teste das mesmas.

Começando por abordar a capacidade utilizável, esta pode ser analisada através da descarga, a partir de um SOC fixo, até um outro valor de carga final, e também é apelidada de energia extraída. Verifica-se que a capacidade utilizável diminui com o aumento do número de ciclos, a corrente de descarga, o tempo de armazenamento, e com a diminuição da temperatura. Este aspeto pode ser modelado por $C_{capacity}$, $R_{selfdischarge}$, e uma série equivalente de R_{series} , $R_{transient_s}$, e $R_{transient_l}$. O condensador, abordado anteriormente, $C_{capacity}$, é responsável por representar a carga total armazenada na bateria, ou seja o SOC, e o seu valor pode ser calculado através da Equação seguinte [118]:

$$C_{capacity} = 3600 * Capacity * f_1(cycle) * f_2(temp)$$

Na Equação anterior, a componente Capacity corresponde à capacidade nominal da bateria, em Ahr, e as componentes $f_1(cycle)$ e $f_2(temp)$ são fatores de correção, em função do número de ciclos e da temperatura, respetivamente. $C_{capacity}$ não varia com a variação da corrente, o que é aceitável para a capacidade total da bateria, pois a energia é conservada. A tensão V_{SOC} assume valores entre 0 e 1V, sempre que representa quantitativamente, em percentagem, o SOC da bateria em questão. A variação da capacidade utilizável, em função de I_{batt} , deve-se a diferentes valores de SOC no final da descarga, para diferentes correntes, devido a diferentes quedas de tensão na resistência interna da bateria, e o mesmo valor de tensão final de descarga. Durante o carregamento e a descarga, a fonte de corrente controlado por I_{batt} é usada para carregar, e descarregar $C_{capacity}$, de tal forma que o SOC irá variar dinamicamente. A duração da bateria é obtida quando a tensão da bateria atinge a tensão final de descarga. $R_{selfdischarge}$ é usada para caracterizar a auto-descarga

de energia, aquando do armazenamento prolongado da bateria. É função do SOC, da temperatura, e do número de ciclos, e como simplificação é aceite que seja estabelecida como uma resistência de elevado valor, ou que seja mesmo ignorada. A capacidade utilizável descrece muito lentamente com o tempo, quando a bateria é armazenada sem qualquer tipo de carga a si conectada [118].

No que diz respeito à tensão em circuito aberto da bateria, esta varia com o SOC. A fonte de tensão controlada por $V_{OC}(V_{SOC})$ representa a relação não linear entre V_{OC} e o SOC, sendo que esta relação é crítica para o modelo. O valor deste aspeto é medido, normalmente, em regime estacionário, aos terminais da bateria para vários SOC, o que faz com que este possa ser um processo demorado [118].

A última questão a abordar é a resposta transitória, que é modelada pela malha R_{series} , $R_{transient_s}$, $R_{transient_l}$, $C_{transient_s}$, e $C_{transient_l}$. A resistência *series* representa a queda de tensão instantânea na resposta ao degrau. Como tal, o seu valor é obtido a partir dos valores de tensão, antes e, imediatamente após, a desconexão da carga do circuito, e a corrente que estava a ser consumida pelo circuito, ou seja:

$$R_{series} = \frac{V_1 - V_0}{I_0}$$

Onde V_1 , V_0 e I_0 representam a tensão após a desconexão, a tensão e a corrente antes da desconexão da carga, respetivamente.

As duas malhas RC, *short* e *long*, representam as constantes de tempo curtas e longas, respetivamente [118].

Para que seja possível a modelação de uma bateria, segundo este modelo, é necessário realizar uma série de testes que permitem calcular, ou extrair os valores necessários dos diferentes componentes. Para tal é preciso estipular os valores das correntes pulsadas que serão utilizadas nas descargas, devendo estar devidamente espaçadas entre si, ter em conta, por questões de segurança, os valores da corrente de carregamento, da tensão constante, das correntes de fim de carga e de descarga, e a tensão final de descarga. Com base na equação que permite o cálculo de $C_{capacity}$, e considerando as características da bateria a utilizar, deve-se obter o valor dessa mesma capacidade. As diferentes variáveis, quando são analisadas para todo o espectro de SOC, assumem forma exponencial, e são aproximadas pela Equação seguinte [118]:

$$ae^{bx} + ce^{dx}$$

Com os parâmetros retiradas da Equação anterior é possível calcular os valores das resistências e dos condensadores responsáveis por representar as constantes de tempo do sistema de armazenamento. Tais cálculos são executados com base nas seguintes Equações [118]:

$$R_{transient_s} = \frac{a}{I}$$

$$C_{transient_s} = \frac{1}{R_{transient_s} b}$$

$$R_{transient_l} = \frac{c}{I}$$

$$C_{transient_l} = \frac{1}{R_{transient_l} d}$$

Outro elemento do sistema, responsável pelo armazenamento de energia, que é necessário modelar são os supercondensadores. Para tal, e com base em [119], verifica-se que existem vários modelos elétricos para estes componentes.

A primeira abordagem é a do modelo RC (Figura 2.19), que consiste numa série de um condensador e uma resistência, designada por ESR. Este modelo é indicado para estudar o comportamento energético e a capacidade de armazenamento dos supercondensadores, ou seja, está apto para analisar as cargas e descargas dos mesmos. Este modelo não tem em consideração a variação da tensão, o que não garante um comportamento fidedigno para baixos valores de tensão [119].

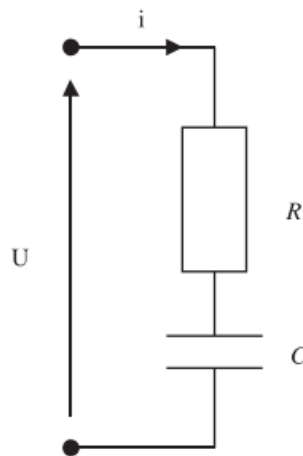


Figura 2.19: Modelo RC de um supercondensador [119]

A segunda hipótese, disponibilizada em [119], é a de múltiplos ramos RC em paralelo, também designado por "*Zubieta and Bonert model*" (Figura 2.20), cada um com a sua constante temporal e representando desta forma, os fenómenos físicos que ocorrem ao nível interno. Tal como no caso anterior, o primeiro ramo é responsável pela representação do fenómeno de carga e descarga dos supercondensadores, mas recorre a um paralelo de 2 condensadores, 1 independente da tensão e outro dependente da mesma. A constante de tempo associada a este ramo é de, aproximadamente, 1s. O segundo ramo representa a redistribuição da carga após uma carga, ou descarga, quando a corrente se iguala a 0. Neste caso, a constante temporal já se encontra na escala de alguns minutos. O terceiro ramo está relacionado com o fenómeno de auto-descarga, que ocorre naturalmente com o tempo, como corrente de fugas, sendo este um processo lento, ou demorado. Esta característica é simulada por um conjunto RC série e a constante de tempo a si associada é de vários minutos. Este modelo é utilizado, normalmente, em sistemas de gestão energética [119].

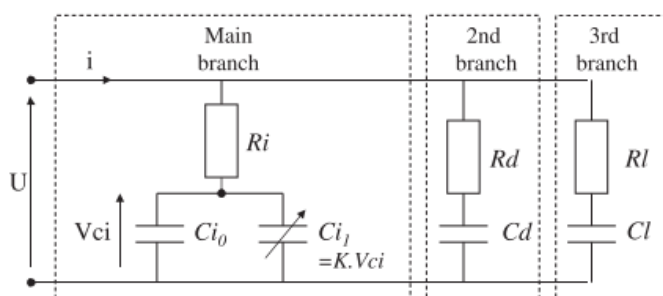


Figura 2.20: Modelo de Zubieta e Nobert de um supercondensador [119]

O terceiro caso estudado é o modelo dinâmico de representação de supercondensadores (Figura 2.21) que tem em consideração comportamentos relacionados com a estrutura física destes componentes. Ao contrário dos casos anteriores, este modelo não se baseia, apenas em ramos RC. É constituído por uma indutância, representativa do comportamento indutivo observado a elevadas frequências, uma resistência com a função de modelar a resistência de contacto nos coletores de corrente e as resistências do eléctrodo e do eletrólito, e um conjunto de ramos RC paralelo que representam a transferência de carga e a capacidade de dupla camada. Dada a sua complexidade, este modelo é capaz de modelar um supercondensador numa gama alargada de frequências e pode ser utilizado na análise do comportamento transitório destes mesmos componentes [119].

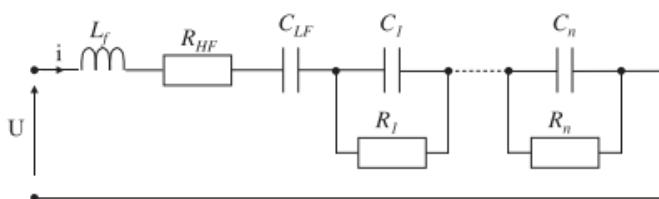


Figura 2.21: Modelo dinâmico de um supercondensador [119]

Na literatura são apresentados outros modelos [120] [121] [122] [119], com outros tipos de aplicações e considerações, sendo que estes são os que mais se aproximam dos efeitos a considerar no decorrer do desenvolvimento desta dissertação.

2.2.4.16 Conclusão

Com base no estudo realizado sobre os vários sistemas de armazenamento, desde os vários tipos baterias até aos supercondensadores, foi possível verificar que as baterias de iões de lítio são as que melhor se posicionam para o tipo de sistema a desenvolver no decorrer desta dissertação. De forma a garantir que a escolha do tipo de bateria a aplicar no sistema é o mais apropriado possível, é necessário considerar as seguintes características [123] [124]:

- Segurança;
- Energia específica;

- Potência específica;
- Desempenho;
- Vida útil;
- Tempo de carga;
- Taxa de auto-descarga;
- Custo.

A segurança é um aspeto muito importante no processo de escolha do tipo de bateria a aplicar no veículo elétrico. Qualquer incidente que ocorra relacionado com o sistema de armazenamento, e que seja mediatizado pela comunicação social pode pôr em causa a aceitação deste tipo de veículo, por parte do público em geral. A principal preocupação, em termos de segurança é o desrespeito da gama de temperaturas a que as células podem operar. Como foi referido anteriormente, existe a necessidade de implementação de um circuito de controlo da temperatura da células que tem como objetivo a redução, ou eliminação do risco de incumprimento desses limites. As baterias, também têm manter as condições de segurança perante situações de inutilização, ou de idade avançada [123] [124].

A energia específica é, por vezes designada por capacidade, ou densidade energética e representa a quantidade de energia que uma bateria é capaz de conter em função da sua massa. A energia disponibilizada por volume pelos combustíveis fósseis é muito superior à das baterias, o que apesar da enorme diferença de eficiência entre os dois sistemas, implica uma quantidade de baterias, em massa muito superior aos sistemas convencionais [123] [124].

A potência específica refere-se à capacidade de entrega de elevados valores de corrente perante a procura, o que, em sistemas de propulsão se demonstra pela capacidade de aceleração. No caso de um motor elétrico com a mesma potência que um motor de combustão interna, o elétrico possui uma melhor razão binário-potência [123] [124].

O desempenho corresponde à habilidade para operar a elevadas, ou reduzidas temperaturas. Ao contrário dos motores de combustão interna que são capazes de operar numa gama alargada de temperaturas, as baterias são sensíveis a este fator, o que implica um sistema de controlo do mesmo [123] [124].

A vida útil inclui, tanto o número de ciclos, como o tempo de funcionamento. A perda de capacidade, com o decorrer dos anos é uma questão importante, principalmente em climas quentes. Como forma de resolução deste problema, os fabricantes deste tipo de automóveis costumam sobre-dimensionar o sistema de armazenamento, de forma a compensar esta degradação [123] [124].

O tempo de carga é um fator importante, quando se aborda o tema da mobilidade elétrica, visto que os veículos convencionais (designados por ICEVs) são reabastecidos numa questão de minutos, implicando, desta forma um tempo de carregamento curto, de modo a tornar os veículos elétricos competitivos, mesmo em longas distâncias. Todas as baterias deste género podem ser

carregadas de forma, razoavelmente rápida, aceitando uma questão de horas como um tempo suportável [123] [124].

A taxa de auto-descarga das baterias de íons de lítio é reduzida, independentemente do tipo específico. O envelhecimento, perante a utilização em condições de temperatura elevada aumenta a taxa de auto-descarga de uma, ou mais células provocando problemas de gestão [123] [124].

O custo dos diferentes tipos de baterias varia, fundamentalmente em função do composto utilizado nos elétrodos. Além do custo da própria bateria, existem outros encargos a si associados como o circuito de proteção, o circuito de controlo e gestão, e a garantia. Apesar do custo associado a cada tipo de baterias variar, a sua aplicação em veículos implica, sempre um aumento considerável do preço do mesmo [123] [124].

Com o objetivo de garantir que as baterias operam na sua zona segura de funcionamento pode ser implementado um sistema de gestão de baterias, ou BMS.

2.2.5 Barramento DC

O barramento DC é o componente responsável por transmitir a potência entre as fontes, primária e secundária, e o acionador do motor, que opera em AC e está incumbido de produzir uma tensão variável, com frequência, também ela variável, amostrando a tensão DC proveniente do barramento. Esta parte do sistema não é só responsável pela transmissão de potência, mas também pela interconexão entre as duas fontes, privilegiando cada uma delas, em função do ponto e modo de funcionamento em que o sistema se encontra. A potência é transportada em DC, uma vez que tem, a si associadas, perdas inferiores às verificadas no transporte AC pois, este último permite o fluxo quer de potência ativa, quer também de potência reativa. O transporte em DC impõe um custo inferior no que às cablagens diz respeito, porque o transporte é realizado num valor de tensão superior, quanto comparado com o equivalente AC, o que implica calores de correntes inferiores, que permitem a utilização de cabos com menor secção. Nos sistemas DC não existe a necessidade de sincronização entre as fontes de potência, apenas precisa de uma linha de transmissão, ao contrário dos sistemas AC, que podem impor três linhas de transmissão (uma por fase), e não está presente o efeito pelicular, que aumenta a resistência aparente dos condutores, sendo este aumento provocado pela diminuição da área efetiva de condução e pela tendência que a corrente eletromagnética tem para fluir na direção da superfície do condutor. Este efeito é proporcional à intensidade de corrente e aumenta com o aumento da frequência, o que justifica a diminuição das perdas, quando o transporte de potência é realizado em corrente contínua [125].

Feita a análise dos prós e contras entre a transmissão de potência em DC e em AC, e concluindo que a mesma deve ser realizada em DC, é necessário determinar qual o valor de tensão utilizado. Atualmente, é usual a transmissão de potência com recurso a um barramento DC de alta tensão, por motivos que serão abordados seguidamente. A alta tensão, em DC, corresponde a valores entre 60 e 1500V e, em AC, entre 30 a 1000V. A utilização de valores nestas ordens de grandeza põe em causa a segurança, estando esses componentes devidamente sinalizados[117].

Com base nos *standards* europeus, e considerando o carregamento rápido das baterias (com uma capacidade de carregamento máxima de 22kW), este recorre a AC para transmissão de potência, e opera a uma tensão de 400V, num sistema trifásico [114]. A tensão do barramento (V_{DC}) é calculada com base na tensão composta AC (tensão linha-linha, ou V_{LL}), no índice de modulação (m), e na razão entre o valor de pico da tensão composta AC e o correspondente valor DC. Tal cálculo é realizado através da seguinte Equação [126]:

$$V_{DC} = \frac{2\sqrt{2}V_{LL}}{\sqrt{3}m}$$

Assumindo o índice de modulação como unitário, e a tensão linha-linha como 400V, obtém-se um valor para o barramento de, aproximadamente 650V. Para os sistemas que envolvem potências mais elevadas, como é o caso do sistema a desenvolver, a tensão do barramento costuma estar entre os 450 e os 800V [117]. Normalmente, o valor escolhido para a tensão do barramento não corresponde exatamente ao valor obtido pela Equação anterior, uma vez que os conversores associados a esta transformação não operam, constantemente, com índice de modulação unitário, sendo que este depende da razão entre as amplitudes das ondas moduladora (de amplitude M), e a portadora (de amplitude A)[126] [127].

$$m = \frac{M}{A}$$

Por se tratar da principal fonte de potência de todo o sistema a desenvolver, existe a necessidade de controlar e estabilizar o valor da sua tensão, para que possa servir de referência para os subsistemas que a si recorrem. Uma vez que o barramento de corrente contínua deste sistema pode ser alimentado a partir de quatro fontes distintas de potência (baterias, supercondensadores, rede elétrica, e o motor/gerador), e esse fluxo de potência pode ocorrer em ambas as direções, existe a necessidade de controlar a tensão desse barramento, mantendo-a constante, mesmo perante perturbações, ou alterações de modo/ponto de funcionamento. Esta questão de conjugar as quatro fontes de potência põe em evidência os modos de funcionamento referidos na secção 2.2.1 para uma arquitetura híbrida do tipo série com recurso a células de combustível, e o modo de recuperação de energia nos momentos de travagem.

Nos primeiros dois modos de funcionamento (hidrogénio e híbrido), o fluxo de potência dá-se, unicamente, das fontes de potência para o barramento DC. No terceiro modo (carregamento da PPS), o fluxo de potência dá-se da fonte de potência primárias para o motor/gerador e para a fonte secundária, permitindo o carregamento das baterias. No quarto modo (travagem regenerativa), o fluxo de potência ocorre do motor/gerador para a fonte de potência secundária, carregando-a.

Em termos de corrente, aos barramentos em corrente contínua costumam estar associados valores na ordem dos 280 a 550A, em função da tensão, e potência estipuladas em projeto. Os valores de corrente apresentados anteriormente estão associados a veículos ligeiros de elevado desempenho, no caso de veículos comerciais, ou autocarros, a corrente pode atingir valores de 400A, em DC [117].

Com base nos valores de tensão e corrente expostos anteriormente é possível concluir que no

caso dos veículos comerciais, ou autocarros estão envolvidas potência até 320kW, pois:

$$P_{DC} = U_{DC} * I_{DC}$$

O desempenho elétrico pode ser elevado através da utilização de valores de corrente e tensão superiores. O uso de correntes mais elevadas tem de ser determinado durante o projeto do sistema, uma vez que implica a utilização de cabos, conectores e módulos de potência com maiores secções. Como a corrente está limitada, por questões físicas, ao valor de 250A, o aumento de desempenho pode ser obtido com um incremento do valor de tensão estipulado [117].

2.2.6 Conversão de níveis de tensão

Os dispositivos responsáveis pela conversão de níveis de tensão baseiam a sua operação na comutação de semicondutores, de forma a minimizar as perdas, enquanto alteram a tensão de saída.

Com a utilização destes dispositivos, é possível o controlo de algumas variáveis do sistema, como o binário e a velocidade das máquinas elétricas, ou a tensão DC de saída do conversor.

O processo de comutação e a corrente, a ser comutada, geram perdas térmicas que devem ser dissipadas. Estas perdas estão relacionadas com algumas características dos semicondutores utilizados, entre elas as perdas de comutação e da resistência *on-state*, relacionadas com a corrente [128].

Em relação à comutação, é necessário determinar a sua frequência, tendo em ideia que o recurso a frequências mais elevadas permite a redução dos componentes indutivos passivos a utilizar, das perdas associadas ao motor, e dos ruídos emitidos [128].

De entre os vários semicondutores disponíveis, *IGBTs*, *Mosfets* e *SiC diodes*, normalmente a escolha recai pelos *IGBTs*, quando se desenvolvem sistemas que envolvam tensões superiores a 200V. Como tal, no caso do *powertrain* de um veículo elétrico, com tensões na ordem dos 450 a 800V, a opção pelos *IGBTs* mantém-se [128].

O aumento da tensão do barramento implica uma redução da corrente, de forma a manter a potência de saída, e permite a máxima transferência de potência na tensão de pico [128].

Por outro lado, a redução da tensão DC do barramento reduz, proporcionalmente, a potência transmissível e aumenta o custo por kW [128].

De forma a reduzir a potência reativa em circulação nos sistemas de conversão, é usual utilizar condensadores, que estão disponíveis numa alargada gama, permitindo uma boa otimização para o nível de tensão em questão [128].

2.2.6.1 Perdas

As perdas consideradas no desenvolvimento de um conversor de potência são as que estão associadas aos comutadores (semicondutores como *IGBTs* e díodos) e aos componentes passivos (condensadores e bobinas) [128].

A eficiência de um conversor é calculada tendo em conta a potência de entrada e o total de perdas associadas ao mesmo [128].

Ou seja [128]:

$$\eta = \frac{P_{input_power} - \Sigma Losses}{P_{input_power}}$$

As perdas relacionadas com a condução de corrente por parte dos *IGBTs* são obtidas por [128]:

$$P_{IGBT_cond} = V_{CEO} < I_{IGBT} > + r_{CE} I_{IGBT_rms}^2$$

Onde V_{CEO} e r_{CE} são características do semiconductor, que são obtidas na *datasheet* do mesmo, e $< I_{IGBT} >$ e I_{IGBT_rms} representam as correntes, média e eficaz respetivamente, que percorrem o comutador [128].

Abordando agora a comutação destes dispositivos, as perdas relacionadas com esta atuação são dadas por [128]:

$$P_{IGBT_switch} = (E_{on} + E_{off}) * f_s$$

Onde s_s representa a frequência de comutação, e E_{on} e E_{off} representam a energia dissipada em cada comutação do dispositivo [128].

As perdas associadas à comutação dos díodos são [128]:

$$P_{D_cond} = V_{FO} < I_D > + r_F I_{D_rms}^2$$

Onde V_{FO} e r_F são características do semiconductor, que são obtidas na *datasheet* do mesmo, e $< I_D >$ e I_{D_rms} representam as correntes, média e eficaz respetivamente, que percorrem o comutador [128].

Já em relação à comutação, tem-se que [128]:

$$P_{D_switch} = E_{rr} * f_s$$

Onde s_s representa a frequência de comutação, e E_{rr} representa a energia de recuperação [128].

A energia de recuperação é função da tensão, da corrente, das resistências, de *turn-on* e *turn-off*, e de condições de teste específicas, sendo que pode ser aproximada pela seguinte Equação [128]:

$$P_{D_switch} = \frac{V_D}{V_{CC}} E_{rr}(I_D) * f_s$$

Para o cálculo das perdas relacionadas com um condensador é necessário recorrer à resistência equivalente do mesmo, r_C , geralmente dada na *datasheet*, e são obtidas através de [128]:

$$P_{Capacitor} = r_C I_{C_rms}^2$$

Onde r_C é a resistência equivalente do condensador, e I_{C_rms} representa a corrente eficaz que percorre o mesmo [128].

Abordando o outro elemento passivo implementado nestes dispositivos, as bobinas, estas têm a si associadas dois tipos de perdas, as do ferro, e as do cobre [128].

As perdas do ferro são perdas de energia que ocorrem em transformadores elétricos e em bobinas, que utilizam núcleos magnéticos. Estão associadas a vários fenómenos que envolvam campos magnéticos flutuantes, tais como as correntes de *Foucault* (designação dada à corrente elétrica induzida num material condutor, quando sujeito a um campo magnético variável devido à Lei de indução de *Faraday*) e fenómenos histeréticos (evolução de uma variável, em função de outra, está associada a duas curvas distintas, dependendo da direção dessa evolução, ou seja, é a dependência do estado do sistema na sua história) [128].

A maior parte da energia é libertada como calor, podendo também, alguma ser libertada como ruído. São estimadas com base em dados fornecidos pelo fabricante, e podem, também ser designados por perdas do núcleo [128].

Estas podem ser estimadas por [128]:

$$P_{L_{ore}} = W_{ore} P_{core}$$

Onde W_{core} é a massa do núcleo magnético, e P_{core} corresponde às perdas do núcleo por kg, sendo esta dado obtido nas informações do fabricante [128].

As perdas do cobre, ou perdas de condução estão associadas à resistência equivalente da bobina, r_L , e são obtidas por [128]:

$$P_{L_{opper}} = r_L I_{L,ms}^2$$

Onde r_L é a resistência equivalente da bobina, e $I_{L,ms}$ representa a corrente eficaz que percorre a mesma [128].

A frequência de amostragem determina a dimensão da bobina e do condensador a utilizar [128].

Uma frequência de amostragem superior permite a utilização de uma bobina de menor dimensão, para os mesmos parâmetros de projeto, mas por outro lado provoca o aumento das perdas de comutação no circuito [128].

Existem alguns fatores a ter em conta no momento da escolha desta variável de projeto, como as perdas de comutação, o ruído, e as cargas a alimentar [128].

Em relação às perdas de comutação, estas aumentam em proporção direta com a frequência de amostragem [128].

No que diz respeito às cargas a alimentar, as mesmas devem ser capazes de filtrar as componentes harmónicas de baixa frequência. A carga a alimentar por parte destes sistemas será um motor elétrico, cujo esquema equivalente corresponde a uma carga RL. A questão da filtragem é alcançada através de um consenso entre a frequência de comutação e as cargas a alimentar, de forma a eliminar os tais harmónicos. Esta filtragem é conseguida pelas características, resistiva e indutiva, da carga a alimentar, que permite a atuação como se de um filtro passa-alto de primeira ordem se tratasse [128].

O ruído é sempre produzido à frequência de comutação, ou seja, no caso desta se encontrar na gama de frequências audíveis por parte do ser humano, é possível que cause perturbações aos utilizadores do veículo. Como o sistema a desenvolver é para utilização direta de quantidades elevadas de pessoas, motoristas e passageiros, este é um fator a ter em consideração, pois pode pôr em causa o conforto e a aceitação deste género de veículos, e a atenção, no caso dos motoristas, devido às perturbações que podem causar [128].

2.2.6.2 Frequência de comutação

Como foi referido na secção 2.2.6.1, a frequência de comutação é uma variável de projeto que vai influenciar várias questões do conversor desenvolvido, como os semicondutores a escolher, as perdas associadas à comutação, e a dimensão dos elementos capazes de armazenar energia (bobina e condensador) [128].

Dada a sua influência, é de enorme importância a escolha apropriada da frequência de comutação, sendo que existem algumas considerações a ter [129]:

- Eficiência: quanto maior for a frequência de comutação escolhida, menor será a eficiência máxima que se pode atingir para o conversor a desenvolver;
- Corrente de saída: é maximizada, para a eficiência máxima, para cargas de baixo valor no caso de frequências baixas, e de elevado valor nas altas frequências;
- *Ripple*: evolui de forma inversamente proporcional com a frequência de comutação;
- Velocidade de resposta: aumento de forma diretamente proporcional com o aumento da frequência, diminuindo o tempo de resposta.

2.2.6.3 Isolamento galvânico

O isolamento galvânico corresponde à situação em que o circuito de saída está, fisicamente e eletricamente, isolado do de entrada [130]. Outra definição possível é a de que o isolamento galvânico representa a separação entre vários sistemas elétricos, de tal forma que não exista fluxo direto de corrente entre esses mesmo sistemas, e podem assumir diferentes potenciais de referência [131]. O isolamento elétrico é alcançado através da utilização de um transformador, enquanto que o isolamento físico implica que ambos os circuitos não apresentam conexões, com recurso a condutores elétricos, entre si [131]. Esta questão do isolamento é colocada, normalmente quando o sistema a desenvolver envolve pontos de elevação, ou redução da tensão, sendo que, também pode ser necessário em aplicações em que tal não ocorra, e, neste caso basta colocar um transformador, em série, com uma razão de número de espiras de 1:1 [131]. Com a crescente tendência para introdução dos EVs e dos PHEVs no quotidiano, a sua interface com a rede elétrica já é considerada durante o desenvolvimento dos mesmos, e já estão a ser desenvolvidas normas e *standards* que determinam algumas características, e condições para a realização dessa mesma conexão. Como exemplos de algumas dessas normas, e seu contexto tem-se:

- IEC 61851-1: requisitos gerais para carregamento condutivo;
- IEC TC69: requisitos para as infraestruturas de carregamento de veículos;
- IEC SC23H: requisitos acessórios para as infraestruturas de carregamento de veículos;
- IEC 61851-23 e 24: requisitos para o carregamento DC;
- IEC 62196-4, 5 e 6: requisitos acessórios para o carregamento DC;
- IEC 62752: requisitos para os dispositivos ICCB de modo 2;
- IEC 61980: requisitos para o carregamento *wireless*.

Por se tratarem de conceitos que só nos tempos mais recentes começaram a ser emancipados e popularizados, grande parte dos requisitos estabelecidos nestas normas encontram-se disponíveis para atualização, e melhoria.

Os veículos elétricos apresentam vários sistemas onde por ser vantajoso, ou necessário recorrer ao isolamento galvânico, ou por questões de seguranças, ou então porque cada dispositivo regula a sua própria potência. Alguns exemplos desses sistemas são o sistema de armazenamento de energia (baterias), ou os conversores DC/DC, ou AC/DC. Por norma, os conversores não isolados apresentam alguns pontos a seu favor, como é o caso da estrutura simples, eficiência e fiabilidade elevadas, e custo, massa e tamanho reduzidos. Por outro lado, existem normas que impõem o isolamento entre níveis distintos de tensão, ou seja, existe a necessidade de incluir um transformador, num determinado local do circuito, que garante esse isolamento. A inclusão deste componente corresponde a um acréscimo no custo do sistema, maioritariamente justificado pelos materiais magnéticos exigidos, sendo que este efeito pode ser atenuado pelo aumento da frequência de comutação dos *switches* dos conversores, pois permite uma redução do volume, e da quantidade de material magnético necessário. Com isto, apesar do isolamento galvânico ser uma opção benéfica, por questões de segurança, acaba por ser posto de parte por representar um adicional custo, volume, massa, e EMI, e a indutância de fugas, associada ao transformador leva a *stresses* de elevada tensão nos díodos e *switches* do conversor, devido às interferências provocadas pela própria indutância de fugas, e pela capacitância de saída do transístor e do díodo [132].

2.2.6.4 Conclusão

Após a análise e estudo do isolamento galvânico associado a conversores, e dos seus prós e contras foi possível concluir que a sua implementação introduz custos adicionais e diminui o espaço disponível no interior do veículo, e que, apesar das questões relacionadas com a segurança, esta característica não será considerada no desenvolvimento deste projeto.

2.2.6.5 Controlo

O controlador do conversor, com base em valores de saída e através de uma malha de realimentação, ou *feedback* gere os tempos de condução dos *switching devices* presentes no mesmo,

sendo que, para tal gera um sinal que é injetado na *gate* desses mesmos dispositivos e permite a obtenção dos valores desejados na saída [133].

O sinal injetado é obtido por comparação entre duas formas de onda e corresponde a um conjunto de impulsos com largura variável, o que permite o controlo do valor de saída do conversor [133].

2.2.6.6 Modulação de Impulso Único

Neste tipo de modulação, a tensão de saída do conversor é controlada em função da largura do pulso gerado. O pulso é gerado a cada meio ciclo, e possui largura constante [133].

Os sinais de comando são gerados, comparando uma onda de referência (ou moduladora) retangular com uma onda triangular (portadora), sendo que a primeira determina a frequência fundamental da tensão de saída, e a segunda, a frequência de comutação dos interruptores [133].

A razão entre as ondas utilizadas na geração dos sinais de comando é denominada de índice de modulação e permite determinar o valor eficaz da tensão obtida na saída do conversor [133].

Esta técnica de modulação apresenta como vantagens [133]:

- Simplicidade;
- Número reduzido de comutações.

E como desvantagem [133]:

- Elevado conteúdo harmónico (THD).

2.2.6.7 Modulação de Impulsos Múltiplos

A técnica de Modulação de Impulsos Múltiplos, ou MPM pode ser considerada como um desenvolvimento da apresentada em 2.2.6.6, pois, com a intenção de reduzir o conteúdo harmónico na tensão de saída do conversor, utiliza múltiplos impulso por semiciclo dessa mesma tensão de saída [133].

Os sinais de comando são gerados por comparação entre um sinal DC de referência, sendo que a tensão de saída apresenta frequência igual à da portadora [133].

O número de pulsos por semiciclo é dado por $\frac{f_{out}}{2f_{portadora}}$. Tal como na situação anterior, a largura do impulso é constante e o valor da tensão de saída é função dessa mesma largura [133].

Como pontos a seu favor, esta técnica de modulação possui [133]:

- Redução da THD;

Esta questão da diminuição da distorção harmónica é verdadeira, quando se tem como referência a técnica de modulação de pulso único. Há ainda que mencionar que esta diminuição ocorre nos harmónicos de menor ordem, havendo uma evolução no outro sentido para os de ordem superior. Esta situação da distorção harmónica de ordem superior é de simples resolução através da implementação de um filtro passa-baixo, uma vez que este conteúdo harmónico está suficientemente distante para que a sua eliminação afete o sinal fundamental [133].

Continuando a comparação, também existem situações que pioram, como [133]:

- Aumento das perdas de comutação.

Uma vez que existe um aumento do número de pulsos por semi período, ocorre, conseqüentemente um aumento das comutações realizadas, que se traduz num aumento das perdas associadas a essas comutações [133].

2.2.6.8 Modulação Sinusoidal por Largura de Impulsos

A técnica de modulação designada por Modulação por Largura de Impulsos Sinusoidal, ou SPWM é do tipo "*carrier-based*" e baseia a sua operação na comparação entre uma onda portadora, de forma triangular, de amplitude e frequência fixas, e uma, ou três ondas sinusoidais, denominadas moduladoras, (em função do tipo de sistema, se é monofásico, ou trifásico), sendo que, neste último caso se encontram desfasadas de 120° entre si [133].

Neste tipo de modulação, ao contrário dos anteriores, a largura dos impulsos vai variando ao longo do tempo, no mesmo ciclo de operação. Tal largura é função da proporção entre as amplitudes da portadora e da moduladora. O número de impulsos por ciclo de funcionamento está intimamente relacionado com a frequência da onda triangular, utilizada como portadora. Quando se aumenta a frequência desta onda, ocorre um aumento do número de impulsos por ciclo de operação, o que se traduz na introdução de conteúdo harmónico em frequências elevadas, que pode ser facilmente, e de forma pouco custosa ser filtrado [133].

A(s) onda(s) moduladora(s) determina(m) a amplitude e a frequência do sinal de saída [133].

Como pontos a favor desta técnica de modulação há que considerar [133]:

- Redução da THD;
- Aumento da ordem do conteúdo harmónico na tensão de saída.

Por comparação com as técnicas anteriores, dá-se a continuação da diminuição da THD, que estando associado a um deslocamento dos harmónicos para ordens superiores permite a implementação de filtros de menor dimensão e custo [133].

Este método de controlo de comutação apresenta como desvantagens [133]:

- Aproveitamento da tensão do barramento;
- Pulsos curtos;
- Aumento das perdas de comutação.

Em relação ao aproveitamento da tensão do barramento, esta técnica, apenas permite obter à saída do conversor um valor de tensão correspondente a $\frac{\sqrt{3}}{2}$ da tensão de entrada [133].

Nos momentos em que a(s) onda(s) moduladora(s) se aproxima(m) do valor máxima da portador dá-se a ocorrência de sucessivos pulsos de largura reduzida, que pode não garantir tempo suficiente para que as comutações ocorram de forma correta, podendo provocar curto-circuitos,

ou situações anómalas ao bom funcionamento do conversor. Em comparação com os tipos de modulação apresentados anteriormente, este impõe um número superior de impulsos por ciclo, traduzindo-se num aumento das comutações, e respetivas perdas associadas [133].

2.2.6.9 Modulação Sinusoidal por Largura de Impulsos Modificada

A Modulação por Largura de Impulsos Sinusoidal Modificada, ou MSPWM pode ser assumida como uma expansão da usual SPWM, com o intuito de combater a questão da geração de impulsos curtos nas zonas em que a(s) onda(s) moduladora(s) se aproximam dos máximos, e mínimos da portadora [133].

A proposta de resolução consiste na manutenção da onda portadora, apenas nos períodos de transição entre picos, o que garante um impulso de grande largura, na zona onde, anteriormente existiam inúmeros impulsos de largura reduzida [133].

No que diz respeito às vantagens associadas a este tipo de modulação tem-se [133]:

- Redução da THD;
- Redução das perdas de comutação.

Por oposição [133]:

- Necessidade de sincronização.

Uma vez que a onda portadora, apenas é usada para comparação nas zonas de transição entre picos da(s) onda(s) moduladora(s), é crucial que haja uma sincronização entre ambas, garantindo que o controlo é realizado de forma correta [133].

2.2.6.10 Conclusão

Tendo em conta as várias opções estudadas para o controlo dos conversores utilizados no sistema do veículo elétrico, percebeu-se que a mais viável será a modulação sinusoidal por largura de impulsos. Esta opção pela SPWM pode ser justificada pela redução da THD e pelo aumento da ordem do conteúdo harmónico na tensão de saída, que torna a filtragem dos mesmos mais simples e menos custosa.

2.2.7 Conversores DC/DC

Os sistemas designados por reguladores ou controladores assumem como principal função a alteração de um valor de tensão DC de entrada num outro, superior ou inferior de saída. Tendo isto em conta, existem duas categorias principais de conversores DC/DC no que à comutação do *switch* diz respeito, sendo elas:

- Reguladores lineares de tensão;
- Conversores *switching*.

Os reguladores lineares são reguladores de tensão simples, muito utilizados em dispositivos eletrônicos. Estes, apenas funcionam como abaixadores de tensão, sendo que a regulação é alcançada através do controlo de um componente linear [134] [135].

Apesar destes dispositivos apresentarem algumas vantagens, como [134]:

- Simplicidade;
- Baixo custo;
- Rápida resposta a variações do valor de tensão de entrada;
- Resposta rápida a variações do valor de tensão na carga;
- Inexistência de ruído associado à comutação;

Apresentam algumas questões que condicionam a sua aplicabilidade atualmente:

- Baixa eficiência;
- Elevada geração de calor.

A baixa eficiência deve-se à linearidade de funcionamento do componente de controlo, implicando que a queda de tensão associada a este vai influenciar diretamente a eficiência do sistema em geral. Tal ineficiência, também é justificada pela enorme quantidade de energia que pode ser dissipada no componente [135].

Abordando agora os conversores *switching*, estes recorrem a um elemento de comutação que pulsa a tensão da fonte de alimentação, transmitindo potência à carga no estado ON do *switch*, e não absorvendo potência da fonte no estado OFF. A rápida comutação entre estados, ON e OFF, com recurso a PWM permite um fornecimento eficiente de tensão para a carga e menor geração de calor, visto que o *switching device* é colocado a operar ou em modo de saturação (estado ON) ou em *cut-off* (estado OFF) [135]. No modo de saturação, o *switch* atua como um curto circuito apresentado uma queda de tensão de muito baixo valor, enquanto que no modo de *cut-off* se assemelha a um circuito aberto, não permitindo a circulação de corrente [136].

2.2.7.1 Topologias

Os conversores DC/DC podem ser, inicialmente divididos em isolados e não isolados, caracterizados pela presença, ou não de um elemento que imponha uma separação entre a entrada e a saída do conversor [137]. Este isolamento pode ser necessário por questões de segurança, sendo, em certas aplicações de presença obrigatória [137]. Associado a esta questão, também é de realçar a sua fiabilidade e flexibilidade, apesar de se tornarem equipamentos mais custosos e complexos.

Outra caracterização possível deste tipo de sistema eletrónico é em relação ao fluxo de potência através do mesmo. No caso de se tratarem de conversores unidirecionais, o fluxo de potência só ocorre num sentido, ou seja da fonte de potência para a carga, sendo um exemplo desta situação

o sistema de fornecimento de energia para as habitações. Por outro lado, no caso de se implementarem conversores bidirecionais, estes permitem não só que, tal como no caso anterior a potência flua da fonte para a carga, mas também no sentido oposto [138].

Esta última abordagem concede a possibilidade de, em sistemas de geração distribuídos, ou em veículos elétricos com travagem regenerativa armazenar ou fornecer energia, em função das condições de operação em cada instante [138].

Visto que o conversor DC/DC será incorporado num veículo elétrico, este terá de operar com valores de potência elevados, sendo que possíveis abaixamentos de tensão provocam o aumento dos valores de corrente, causando agitação térmica e elétrica que resulta no aumento das perdas e, consequente diminuição da eficiência [139]. No caso de ocorrência de variações substanciais na variedade de valores de tensão de entrada, isto causaria agitação na tensão e na corrente, e seria necessário considerar essa variação aquando do desenvolvimento do conversor [138].

A presença de componentes parasitas causa ruído parasita, que causa EMI, regulamentada por normas, e impondo a necessidade de sensorização [139]. Nas situações de travagem existe uma quantidade enorme de energia cinética que está a ser desperdiçada como calor, nos discos e pastilhas de travão por exemplo, sendo que a mesma pode ser aproveitada para o carregamento das baterias, através do recurso à bidirecionalidade do conversor implementado [139].

A utilização de conversores DC/DC bidirecionais apresenta algumas vantagens, quando aplicados a EVs [139]:

- Elevada eficiência;
- Tamanho compacto e menos volumoso;
- Menor EMI;
- Menores *ripples* de corrente de entrada e saída;
- Controlo do fluxo de potência.

Tendo as características e vantagens, apresentadas anteriormente em conta, existem várias abordagens possíveis [139]:

- Conversor *Buck Boost*;
- Conversor *Buck Boost* em cascata;
- Conversor *Cuk*;
- Conversor em Meia-ponte;
- Conversor Ressonante série.

2.2.7.2 Conversor Buck Boost

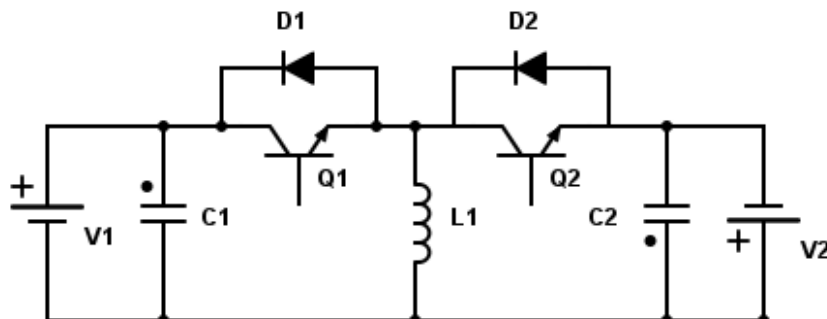


Figura 2.22: Conversor Buck Boost Bidirecional

A configuração *Buck Boost* original não possui a característica da bidirecionalidade do fluxo de potência, sendo que, para tal seja possível é necessário recorrer a *switches* com díodos em anti-paralelo, no lugar dos habituais díodos da configuração básica (Figura 2.22) [139]. Estes conversores são capazes de elevar e diminuir o valor da tensão de entrada, em função do *duty-cycle*, sendo esta tensão de saída de polaridade invertida [46].

2.2.7.3 Conversor Buck Boost em cascata

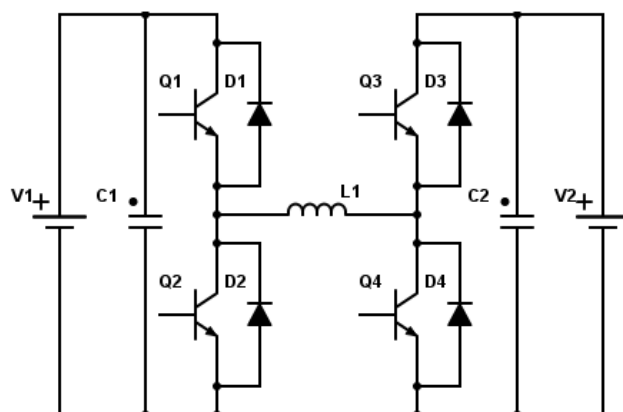


Figura 2.23: Conversor Buck Boost Bidirecional em Cascata

Esta topologia consiste num conversor *Buck Boost* seguido de um *Buck* bidirecional (Figura 2.23). A combinação de *switches* e direção da corrente permite que a tensão de saída alcance valores superiores, ou inferiores à de entrada [139].

2.2.7.4 Conversor *Cuk*

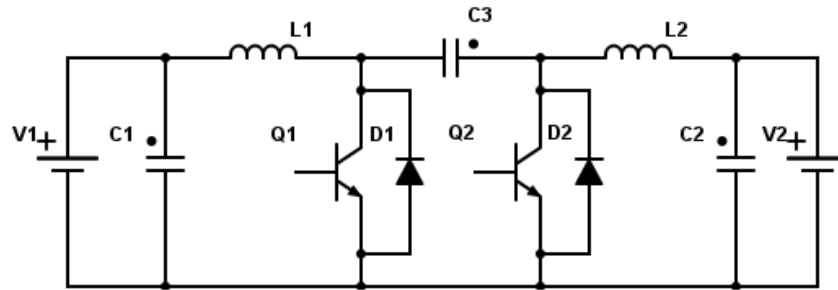


Figura 2.24: Conversor Cuk Bidirecional

O conversor *Cuk* (Figura 2.24) considerado baseia-se na topologia *Cuk* básica, mas, novamente com a substituição dos díodos por *switches* com díodos em anti-paralelo [139]. Esta abordagem recorre a vários condensadores com a função de armazenamento de energia [139].

Tal como na topologia *Buck Boost*, esta pode elevar, ou reduzir o nível de tensão de entrada, mas com a polaridade oposta [139]. Uma vantagem deste tipo de conversores é que as correntes, de entrada e saída são, praticamente livres de *ripple*, eliminando, ou reduzindo a necessidade de implementação de filtros quer de entrada, quer de saída [46]. Por outro lado, o condensador que é colocado em série tem de lidar com elevadas correntes, o conversor necessita de mais componentes, o seu controlo é mais complexo e são colocadas algumas questões em relação a patentes [46].

2.2.7.5 Conversor em Meia-ponte

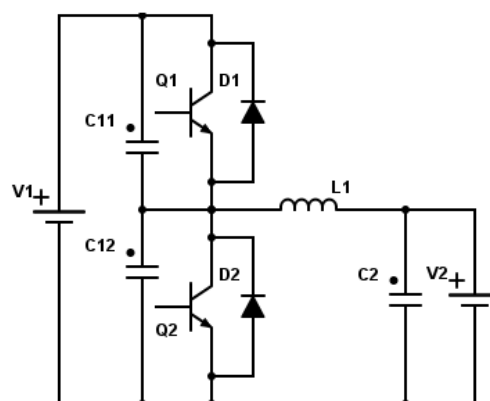


Figura 2.25: Conversor em Meia-Ponte Não Isolado Bidirecional

Os conversores *Half Bridge*, ou meia-ponte (Figura 2.25), utilizam o ponto médio de um banco de condensadores como ponto neutro [46]. Tal como na topologia em ponte completa, a comutação

é realizada a tensão nula, característica designada por ZVS, ou *soft-switching* alcançada através da utilização de condensadores *snubber* sem perdas. Esta característica de comutação só é possível numa gama estreita de condições de carga [140].

A presença de um transformador cria um isolamento galvânico entre as zonas de alta e baixa tensão [140]. Esta topologia apresenta um número reduzido de elementos ativos, e o ZVS é alcançado sem adição de qualquer componente. No entanto, nesta topologia de conversão, os *switches* estão sujeitos ao dobro da corrente para a mesma potência de saída, quando comparado com a ponte-completa e a *push-pull* [46]. Em aplicações que envolvam tensões elevadas não é recomendada a aplicação deste tipo de conversores, uma vez que implicam a utilização de *switching devices* com tensão de bloqueio superior, aumentando as perdas, e condensadores com *ratings* de corrente superiores [140]. Podem, também ser necessários circuitos de balanceamento da tensão aos terminais dos condensadores [140].

Nos momentos de comutação é necessário incluir *deadtimes*, de forma a garantir que não ocorrem situações de curto-circuito, que provocam o envelhecimento e degradação dos componentes, diminuindo o seu tempo útil de vida [46].

Estes conversores são, normalmente aplicados em sistemas de acionamento DC, de tração elétrica, de travagem regenerativa, de geração de potência *on-board*, de recarregamento de baterias, em sensores, controladores e atuadores, em dispositivos de entretenimento, e em equipamentos de segurança [132].

2.2.7.6 Conversor Ressonante série

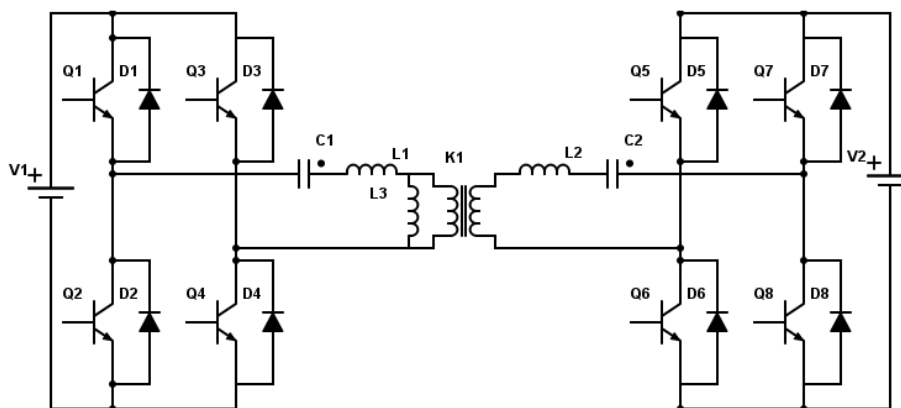


Figura 2.26: Conversor Ressonante Bidirecional

Considerando os conversores baseados em fenómenos de ressonância (Figura 2.26), estes permitem expandir a capacidade de *soft-switching* da topologia apresentada anteriormente a uma gama mais alargada de carga [141] [142]. Este tipo de conversores conecta os dois níveis de tensão através de um transformador, garantindo, dessa forma o isolamento entre esses mesmos dois níveis [141] [142]. Associado a este transformador está uma rede simétrica ressonante que permite uma transferência eficiente de energia entre as bobinas, primária e secundária [141] [142], e duas

pontes completas, responsáveis pela conversão/retificação da corrente, em função do sentido do fluxo de potência [141].

A saída destes conversores é regulada por modulação de frequência (FM), o que os permite comutar em situações de corrente, ou tensão nula (ZCS ou ZVS), reduzindo, ou mesmo eliminando as perdas de comutação. Esta redução, ou eliminação das perdas de comutação permite a utilização de frequências de comutação superiores, o que permite a redução da dimensão dos componentes magnéticos e de filtragem. Os níveis de frequência, aplicados à comutação dos *switches* nesta topologia, podem criar situações de elevada EMI, que deve ser analisada e condicionada [46].

2.2.7.7 Conclusão

Os conversores aplicados em veículos elétricos devem ter em conta os seguintes fatores:

- Massa reduzida;
- Eficiência elevada;
- EMI reduzida;
- *Ripple* de corrente reduzido;
- Capacidade de elevação;
- Capacidade de controlo do fluxo de potência perante uma larga variação da tensão de entrada.

Tendo em consideração as diversas topologias apresentadas, os argumentos a si associados, e os fatores apresentados anteriormente foi possível concluir que a que mais se apropriava para esta aplicação seria a de meia-ponte, já que permite o fluxo bidirecional de potência, a comutação é realizada a tensão nula, o controlo é simples, e é uma das topologias mais utilizadas, como pode ser verificado em [132].

2.2.8 Conversores AC/DC

Perante o desenvolvimento atual dos PHEV, cuja principal vantagem em relação aos tradicionais HEV é a possibilidade de carregamento a partir de rede de distribuição, existe a necessidade de criar uma interface entre o EV e a rede, de forma que este carregamento não ponha em causa a integridade dessa mesma rede de distribuição através da injeção de harmónicos na mesma [115].

Como tal é necessário recorrer a conversores que permitam a criação dessa interface entre o veículo e a rede. Os conversores AC/DC são circuitos que, a partir de uma fonte de corrente alternada são capazes de gerar, após filtragem um sinal DC de saída [115]. Existem inúmeras topologias disponíveis relacionadas com esta transformação, sendo que todas utilizam os mesmos elementos base, podendo ter um, ou vários andares de conversão [143].

A inclusão destes componentes pode ser realizada de duas formas [115]:

- *on-board*: o sistema de conversão de energia está inserido no próprio veículo, e pode ser dos tipos:
 - Condutivo: usa contacto direto entre o EV e a rede, através de um conector ligado a uma tomada convencional;
 - Indutivo: a transferência de potência é realizada com base em fenómenos eletromagnéticos, tornando-se um método mais cómodo para o utilizador, já que não tem de realizar qualquer conexão física, e pode ser considerado isolado. Esta forma de carregamento está, atualmente a ser alvo de elevado investimento, não apresentando, ainda a eficiência do método condutivo, implica uma maior área de instalação, e maiores custos.
- *off-board*: o sistema de conversão de energia está inserido na estação de carregamento.

Tal como no caso dos conversores DC/DC, também nos AC/DC existe a questão do fluxo de potência, podendo ser uni, ou bidireccional. Ambas as situações garantem que o EV recebe energia proveniente da rede, no entanto, apenas a segunda permite o fluxo de potência no sentido oposto. O fluxo de potência das baterias para a rede permite que, as mesmas atuem como sistema de armazenamento da rede, com as funções de compensação de potência reativa, estabilização de potência, e balanceamento de carga [144]. Os conversores bidirecionais, para além de permitirem o fluxo de potência de e para a rede, também garantem a estabilização da potência [115].

No que diz respeito aos modos de funcionamento de conversores AC/DC, estes baseiam-se na direção do fluxo de potência, e são caracterizados por [115]:

- G2V: modo de funcionamento que tem como objetivo o carregamento das baterias do EV. Nesta situação, o conversor atua como retificador, fornecendo potência DC às baterias, a partir da AC da rede. A tensão nas baterias pode ser controlada através do *duty-cycle* imposto aos diferentes *switches*;
- V2G: nestas circunstâncias o conversor atua como inversor, permitindo a injeção de potência na rede (em corrente alternada), gerada a partir da energia armazenada nas baterias (em corrente contínua).

Apesar dos sistemas bidirecionais serem a tecnologia mais recente e promissora pelas razões enumeradas anteriormente, ainda existem detalhes que mantêm os sistemas unidirecionais nos veículos comercializados atualmente, como a simplificação das questões relacionadas com a interconexão, requisitos de *hardware* inferiores, a redução da degradação das baterias, do custo, do peso, do volume, e das perdas [115].

Os sistemas unidirecionais, normalmente são constituídos por uma ponte de díodos, um filtro, e um conversor DC/DC [115].

Outra característica a considerar aquando do desenvolvimento dos retificadores é a possibilidade, ou não de controlar a comutação dos *switching devices* utilizados [115].

A presença deste elemento nos sistemas de tração deste tipo de veículos assumiria as funções de [115]:

- Injeção de potência na rede;
- Carregamento de baterias.

Em relação à injeção de potência na rede seria com o objetivo de compensação de energia reativa, ou então, no futuro para venda de energia à rede. Para que esta injeção de potência seja realizada da forma mais segura e menos comprometedora da estabilidade da rede é necessária a implementação de um sistema de PLL, sistema este capaz de detetar a fase da tensão da rede com base em duas componentes ortogonais dessa mesma tensão. O recurso a mecanismos de sincronização e detecção de elementos fundamentais da rede é necessário, de forma a cumprir com os *standards* internacionais e aumentar o desempenho das cadeias de conversores. Estes métodos de detecção de fase podem ser aplicados quer a sistemas monofásicos, quer trifásicos. A aplicação em sistemas monofásicos é de maior dificuldade uma vez que estes possuem menos informação. De forma a obter as duas componentes ortogonais abordadas anteriormente podem ser utilizadas duas técnicas, uma mais simples, que cria uma forma de onda virtual com base na tensão da rede atrasada de noventa graus, ou então através da transformada dq [145]. Os quatro principais mecanismos de PLL são:

- SRF-PLL: mecanismo baseado num sistema bifásico ortogonal obtido através do desfaseamento de noventa graus na tensão medida e que gera, na sua saída, os valores de pico e do ângulo de fase da tensão de entrada;
- SOGI-PLL: este método também se baseia na criação de um sistema bifásico virtual, mas a sua sintonização é dependente da frequência de ressonância do mecanismo, e tem como saída duas ondas sinusoidais, uma com a mesma fase e magnitude, que a tensão de entrada, e outra desfasada de noventa graus;
- EPLL: algoritmo de PLL apoiado num filtro não-linear adaptado à frequência fundamental da rede, que estima o sinal harmónico, a componente fundamental sincronizada, a amplitude, o ângulo de fase, e a frequência;
- QPLL: este mecanismo considera a soma de duas componentes em quadratura e variações de frequência e fase para recriar a componente fundamental da rede.

Já no que diz respeito à carga das baterias, a mesma seria realizada até um valor estabelecido, não necessariamente o valor máximo das baterias, uma vez que esse carregamento será realizado pelas células de combustível durante a deslocação do veículo [115].

Como tal, de seguida são apresentadas diversas topologias, iniciando-se pelas mais simples, ou seja as não controladas [115]. Em todas as topologias será apresentada uma Figura representativa do modo de funcionamento, sendo que, por uma questão de simplicidade se ilustra a opção monofásica.

2.2.8.1 Retificador de onda completa

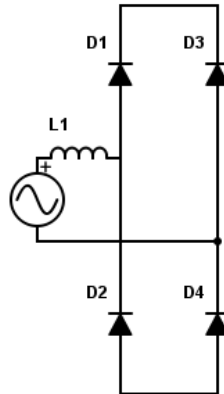


Figura 2.27: Retificador de Onda Completa

Os retificadores de onda completa (Figura 2.27) são dispositivos que sustentam a sua operação numa ponte de díodos. Uma vez que os díodos são componentes elétricos que, apenas permitem o fluxo de corrente quando a tensão no ânodo é superior à do cátodo, esta topologia de retificação é não controlada. Já que esta abordagem não recorre a componentes controláveis, e os componentes utilizados, apenas conduzem numa direção, o fluxo de potência só pode ocorrer da rede para as baterias (fluxo unidirecional de potência G2V) [115].

Este tipo de conversores não controlados podem ser utilizados quer em sistema monofásicos, quer em trifásicos, sendo que apresentam como pontos favoráveis as seguintes características [115]:

- Reduzido número de semicondutores;
- Simplicidade do circuito.

Como principais contras, estes conversores assumem [115]:

- Não possibilidade de controlo;
- Fluxo unidirecional de potência.

2.2.8.2 Conversor Controlado em Meia Ponte

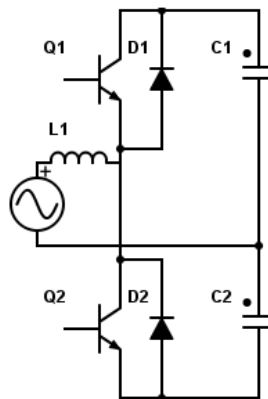


Figura 2.28: Conversor Controlado em Meia Ponte

O retificador em meia ponte (Figura 2.28) recorre a dois condensadores, que dividem a tensão do barramento entre si, e dois pares transistor-díodo em anti-paralelo [146].

A utilização de transístores permite o controlo dos períodos de condução dos mesmos, através do sinal de comando imposto na *gate* e garante, também a bidirecionalidade do fluxo de potência (G2V e V2G). Nestes sistemas existe a necessidade de inclusão de *deadtimes* nos sinais de comando dos transístores, de forma a garantir que não são colocados os dois *switches* a conduzir no mesmo instante [146].

Uma vez que existem, apenas dois valores de saída, $+V_{DC}$ e $-V_{DC}$, impõe-se a necessidade de recurso a um tipo de modulação bipolar [146].

Tal como na topologia apresentada anteriormente, existem retificadores em meia ponte para sistemas mono e trifásicos [146], sendo que a grande diferença entre ambos está relacionada com o número de componentes utilizados [115].

Como vantagens, esta topologia assume [115]:

- Fluxo bidirecional de potência;
- Simplicidade do circuito;
- Reduzido número de componentes.

Por outro lado [115]:

- Elevado *stress* imposto aos semicondutores;
- Produção de harmónicos;
- Necessidade de implementação de filtro.

Uma vez que esta topologia gera um sinal DC com elevado conteúdo harmónico, obriga à inclusão de um filtro que condicione esse mesmo sinal de saída [115]. A introdução desse filtro traduz-se num aumento dos custos associados ao desenvolvimento deste tipo de conversores.

2.2.8.3 Conversor Controlado em Ponte Completa

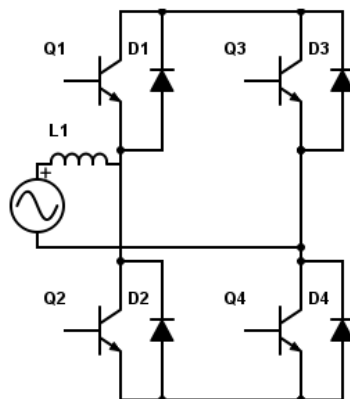


Figura 2.29: Conversor Controlado em Ponte Completa

Tal como a topologia anterior, os retificadores em ponte completa (Figura 2.29) utilizam como interruptores os pares transistor-díodo em anti-paralelo [115].

Novamente pela possibilidade de controlo da condução dos interruptores, o fluxo de potência pode-se dar em dois sentidos, G2V e V2G [115].

Esta topologia, comparando com a de meia ponte, por um lado possui mais componentes, impondo uma metodologia de controlo mais complexa, mas por outro, graças a esse aumento ocorre uma diminuição do *stress* ao nível dos mesmos [115].

Assim como nos conversores em meia ponte, a tensão de saída deste tipo de conversores necessita de ser condicionada por um filtro, uma vez que existe conteúdo harmónico associado à mesma [115].

Existem conversores que se baseiam nesta ideia para sistemas mono e trifásicos, sendo a escolha realizada de acordo com os parâmetros do sistema, como a potência envolvida [115].

Resumindo as principais características associadas a este tipo de conversores, este assume como pontos vantajosos [115]:

- Fluxo bidirecional de potência;
- Simplicidade do circuito;
- Reduzido número de componentes.

Contudo [115]:

- Elevado *stress* imposto aos semicondutores;
- Produção de harmónicos;
- Necessidade de implementação de filtro.

2.2.8.4 Conversor Controlado Multinível

Existem vários tipos de conversores multinível, entre eles, os NPC, os FCC, os CHB, e atualmente os MMC. De seguida são abordados os NPC e os MMC, dada a quantidade de aplicações em que são utilizados [147].

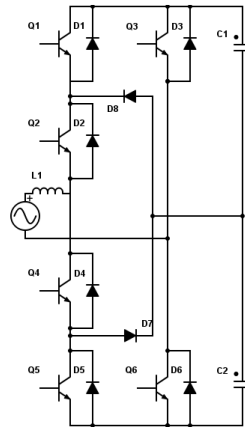


Figura 2.30: Conversor NPC Controlado Multinível

Os conversores multinível do tipo NPC, representado na Figura 2.30, foram os primeiros deste tipo a serem desenvolvidos, durante vários anos foram os mais utilizados nas mais diversas aplicações industriais, e são capazes de gerar quatro valores distintos de tensão DC, $+V_{DC}$, $\frac{+V_{DC}}{2}$, $\frac{-V_{DC}}{2}$, e $-V_{DC}$ [115].

Esta topologia também opera de forma controlada, já que como nos retificadores de meia ponte e ponte completa, utiliza pares transistor-díodo em anti-paralelo [115].

Através do uso de dois díodos extra, esta categoria garante dois níveis adicionais de tensão DC de saída, permitindo variações mais suaves de tensão e corrente nos semicondutores, ou seja, diminuindo o *stress* associado aos mesmos [115].

Da mesma maneira que as topologias anteriores podiam ser utilizadas em sistemas mono e trifásicos, esta não é exceção, sendo a escolha realizada de acordo com a potência, o custo, e os demais requisitos do sistema a desenvolver [115].

Passando a listar as vantagens deste género de conversores [115]:

- Fluxo bidirecional de potência;
- Simplicidade do circuito.

E as desvantagens [115]:

- Elevado *stress* imposto aos semicondutores;
- Produção de harmónicos;
- Necessidade de implementação de filtro.

Como se verifica, os problemas associados a esta topologia são equivalentes aos das apresentadas anteriormente, mas com menor significância. Logo, apesar da manutenção dos mesmos problemas, estes são mais facilmente solucionados, como no caso do filtro a implementar, que poderá ser de menor dimensão, traduzindo-se num menor custo associado [115].

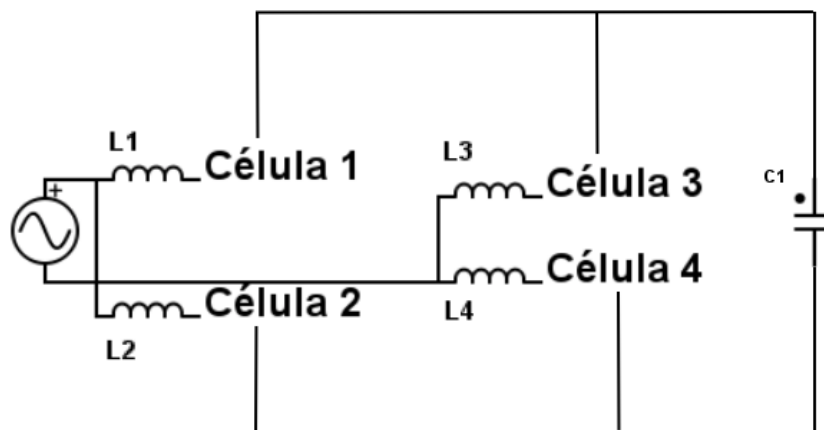


Figura 2.31: Conversor MMC Controlado Multinível

Atualmente os conversores multinível mais utilizados são tipo MMC (Figura 2.31), que se baseiam em 2 braços conectados por duas indutâncias com a função de *buffer*. Cada braço é composto por um conjunto de células individuais em série, de forma a atingir os valores de tensão desejados. Cada uma destas células pode ser do tipo ponte-completa, *flying capacitor*, ou mesmo NPC [148].

A topologia MMC apresenta como vantagens particulares [148]:

- Elevada qualidade das ondas de saída;
- Elevada escalabilidade e modularidade.

Como desvantagens apresenta [148]:

- Estrutura complexa dada a quantidade elevada de sinais de comando necessários;
- Quantidade elevada de informação a cada período de amostragem;
- Necessidade de balanceamento do *floating capacitor*;
- Necessidade de consideração das correntes circulantes.

Este tipo de conversores é utilizado em sistemas de transmissão de potência em DC (HVDC) por longas distâncias *on-shore*, ou integração submarina de sistemas de energia eólica *off-shore* e para interligar duas redes AC.

2.2.8.5 Conclusão

De acordo com a pesquisa realizada foi possível entender que a topologia mais aceita, e mais indicada para aplicação em veículos elétricos é a de conversor controlado em ponte completa. A opção por esta topologia é sustentada pela possibilidade de controle da tensão de saída, a bidirecionalidade de fluxo de potência, e o número relativamente reduzido de componentes necessários.

Capítulo 3

Caracterização do problema

3.1 Definição do problema

Com base no estudo realizado foi possível evidenciar que o nível atual de emissões de gases de efeito de estufa não é de todo sustentável, estando mesmo a atingir valores que podem comprometer as condições de habitabilidade do planeta Terra.

Uma quota significativa das emissões deste género de gases é atribuída aos veículos que recorrem a motores de combustão interna e, como tal a pesquisa realizada, também permitiu evidenciar que, atualmente estão a ser realizados avultados investimentos e diversos estudos em relação a fontes alternativas de potência para propulsão dos veículos. Diversas abordagens têm sido introduzidas no mercado, mas existem sempre questões que condicionam a substituição total dos habituais ICEV, como a autonomia, eficiência das baterias aplicadas, e, claro o custo adicional.

Estas topologias baseiam a sua operação na utilização de uma fonte primária, ou constante de potência, que garante o funcionamento em regimes estacionários do sistema, e uma fonte secundária, que colmate as necessidades repentinas, de forma que a resposta dinâmica alcançada por este género de veículos possa ser equiparada aos tradicionais ICEV, sendo que esta é uma necessidade que se impõe ao sistema a desenvolver no recorrer desta dissertação. Outra situação a ter em consideração é a autonomia do sistema desenvolvido, que é, atualmente o principal entrave à adoção destas topologias alternativas em veículos. Como tal existe a necessidade de estudo das diversas tecnologias de armazenamento e gestão de energia que se encontram disponíveis no mercado, e considerar parâmetros comparativos entre as mesmas, como densidade de energia, custo, ou peso, entre outros. De modo a garantir a competitividade destes veículos no mercado, também é necessário dar importância ao custo dos mesmos.

Perante estas considerações, nesta dissertação será proposta um topologia que está, atualmente em desenvolvimento e que recorre a células de combustível para produção de energia elétrica. Tal proposta corresponde ao desenvolvimento do sistema de armazenamento para o *powertrain* de um veículo híbrido elétrico, com controlo do sistema e gestão de autonomia, e que utilize células de combustível como fonte de energia para a propulsão do veículo.

3.2 Solução proposta

A presente dissertação apresenta como principal objetivo o desenvolvimento do sistema de armazenamento para o *powertrain* de um veículo elétrico, com controlo do sistema e gestão da autonomia.

Este sistema consiste numa arquitetura híbrida, com um mecanismo de produção de energia elétrica, no caso células de combustível, que serão responsáveis pelo carregamento das baterias do veículo, e 2 sistemas de armazenamento, baterias (de iões de lítio) e supercondensadores neste caso, a fornecerem a energia necessária para colmatar o pedido de binário por parte do utilizador. O subsistema que recorre às baterias terá a funcionalidade de garantir o fornecimento, em regime contínuo, de energia, enquanto que aquele que utiliza os supercondensadores terá de ser capaz de providenciar energia nos momentos em que se altere o ponto de funcionamento, ou seja em regimes transitórios pois têm uma capacidade de entrega de energia muito superior à das baterias.

As células de combustível, ou FCs são capazes de produzir eletricidade a partir de hidrogénio, e serão utilizadas como fonte de energia para o carregamento do sistema de armazenamento do sistema desenvolvido.

O sistema desenvolvido deve ter capacidade de controlo da operação do sistema, de gestão de energia, com o objetivo de otimizar a autonomia do veículo, sendo que para tal deve estar apto para supervisionar as diferentes variáveis de controlo do sistema.

Na Figura 3.1 é apresentado um esquema representativo do sistema a desenvolver.

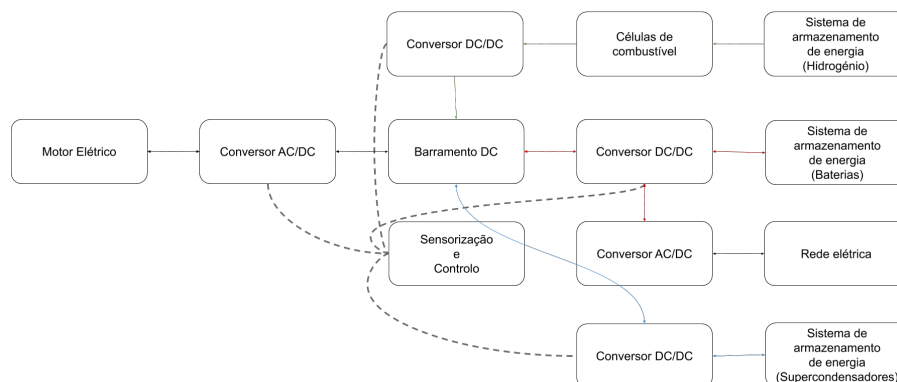


Figura 3.1: Modelo representativo do sistema a desenvolver

No esquema apresentado estão assinalados os fluxos de energia (a cheio) e os sinais de sensorização e controlo (a tracejado). Também se pode verificar a uni, ou bidirecionalidade dos fluxos de energia através das setas representativas da direção da mesma.

Iniciando a explicação do sistema a desenvolver pelo subsistema das células de combustível, estas serão do tipo PEMFC, uma vez que são das mais desenvolvidas e eficientes, são facilmente inicializadas e ocupam um volume reduzido. Para o seu funcionamento utilizam, como combustível, hidrogénio retirado do respetivo tanque de armazenamento. A energia elétrica produzida por estes dispositivos é então utilizada por um conversor DC/DC do tipo *Boost*.

Para os conversores responsáveis pela transformação da energia dos sistemas de armazenamento, quer as baterias quer os supercondensadores, a topologia adotada é do tipo *Buck Boost*, uma vez que permite uma gama alargada de valores de tensão de saída e o seu controlo pode ser considerado simples. A tensão gerada neste conversor é então injetada no barramento DC do sistema.

Abordando agora a questão do pré-carregamento das baterias, este é realizado a partir da rede elétrica através de um conversor AC/DC do tipo controlado em ponte completa. Este tipo de conversores é capaz de operar com o fluxo de potência em ambos os sentidos, o que para além de garantir o carregamento das baterias, permite, também a injeção de potência na rede. Esta topologia foi escolhida pois permite o controlo da tensão de saída, é composta por um número reduzido de componentes e, tal como referido anteriormente, permite o fluxo bidirecional de potência.

Tratando o sistema de armazenamento de energia elétrica, optou-se por baterias de iões de lítio, pois apresentam elevada densidade energética e taxa de descarga. A energia armazenada nestes componentes é então elevada no conversor DC/DC, semelhante ao apresentado anteriormente, de forma a poder ser injetada no barramento. O sistema de travagem regenerativa, e graças à bidirecionalidade do fluxo de potência dos conversores selecionados, permite o aproveitamento da energia cinética do veículo nos momentos de abrandamento.

A partir do barramento DC do veículo é recolhida a energia que irá alimentar o motor elétrico. Para tal recorre-se a um conversor AC/DC que realiza a inversão/retificação da energia. Este conversor é semelhante ao utilizado na interface entre o veículo e a rede elétrica.

Todos os conversores implementados são controlados, implicando, então a geração de sinais de comando para os seus *switching devices*. Tal geração é realizada no bloco de comando, que se baseia em malhas de realimentação para compreender o estado do sistema com base nos valores recolhidos dos vários sensores, de tensão, corrente, entre outros, introduzidos nos diferentes subsistemas. Os sinais de comando são obtidos por um processo de modulação sinusoidal por largura de impulsos, já que apresentam uma distorção harmónica total inferior às outras abordagens possíveis, e os harmónicos incluídos na tensão de saída são de elevada ordem, facilitando a sua filtragem.

Capítulo 4

Metodologia e Plano de trabalho

4.1 Metodologia de abordagem

O sistema a desenvolver pode ser considerado complexo. Como tal, existe a necessidade de o quebrar em subsistemas, de menor complexidade e mais fácil análise. Ainda em relação aos subsistemas considerados, a estes estão associadas tarefas específicas que possibilitam o seu desenvolvimento.

De maneira a garantir que todas as tarefas são encerradas, apenas quando todos os objetivos específicos da mesma se concretizarem, serão estabelecidos testes e formas de verificação e validação das mesmas.

Após validação e verificação de cada subsistema como um sistema independente e isolado é necessário iniciar um processo de integração de todos os subsistemas, sendo que, para tal serão tidas em atenção as relações existentes entre eles, como por exemplo saídas e entradas físicas.

Este processo de evolução no desenvolvimento do *powertrain* será utilizado nas duas vertentes deste estudo, ou seja nos sistemas desenvolvidos em contexto de simulação e nos desenvolvidos em ambiente laboratorial.

4.2 Tecnologias e ferramentas a usar

O desenvolvimento desta dissertação será, inicialmente realizado com base em simulações de computador, e de seguida será implementado um sistema equivalente em pequena escala, de forma a validar e verificar a implementação desenvolvida

Como *softwares* de simulação serão utilizados o MatLab/*Simulink*, ferramenta de modelação, simulação e análise de sistemas dinâmicos desenvolvida pela *MathWorks* e o PSIM, desenvolvido para eletrónica de potência, acionamento de motores e aplicações de conversão de energia.

Em termos de tecnologias, serão utilizadas células de combustível, baterias (de iões de lítio), super-condensadores e componentes eletrónicos para diversas montagens, como será o caso dos conversores, para além de todos os materiais e instrumentos típicos de um laboratório de eletrónica.

4.3 Identificação de tarefas com objetivos

Com a intenção de atingir todos os objetivos propostos na secção 1.2 é necessária cumprir as seguintes tarefas:

1. Relatório de progresso
 - (a) Estudo do problema em causa;
 - (b) Elaboração de relatório de progresso.
2. Relatório final
 - (a) Estudo do estado da arte;
 - (b) Elaboração de relatório final.
3. Conceção de uma arquitetura híbrida, com uma fonte a fornecer potência constante e uma segunda a fornecer/armazenar o diferencial da primeira para a potência de tração
 - (a) Estudo e análise de diferentes arquiteturas;
 - (b) Estabelecimento da arquitetura híbrida a implementar;
 - (c) Estudo das células de combustível e seu comportamento;
 - (d) Estudo dos conversores DC/DC *Buck Boost*;
 - (e) Projeto do conversor DC/DC;
 - (f) Simulação do conversor DC/DC;
 - (g) Implementação do conversor DC/DC;
 - (h) Teste do conversor DC/DC;
 - (i) Estudo das baterias de iões de lítio e seu comportamento;
 - (j) Estudo dos conversores AC/DC controlados em ponte completa;
4. Desenvolvimento de um algoritmo de supervisão e controlo da operação do sistema
 - (a) Estudo e análise do sistema a controlar;
 - (b) Projeto de um algoritmo de supervisão e controlo da operação do sistema;
 - (c) Teste em simulação do algoritmo desenvolvido;
 - (d) Teste em contexto real do algoritmo desenvolvido.
5. Desenvolvimento de um algoritmo de gestão de energia
 - (a) Estudo e análise de mecanismos de gestão de energia;
 - (b) Projeto de um algoritmo de gestão de energia;
 - (c) Teste em simulação do algoritmo desenvolvido;

(d) Teste em contexto real do algoritmo desenvolvido.

6. Teste e validação do sistema

(a) Integração dos diferentes subsistemas;

(b) Teste dos sistemas integrados;

(c) Teste do sistema.

7. Escrita da dissertação

(a) Escrita da dissertação.

Capítulo 5

Desenvolvimento do projeto

5.1 Introdução

O desenvolvimento do sistema de armazenamento para o *powertrain* de um veículo elétrico (Figura 5.1) está dividido em várias etapas, tal como é referido em 4. Tal sucessão de etapas foi idealizada com base na concetualização do sistema, que pode ser consultado na imagem seguinte, e cuja descrição detalhada foi realizada em 3. Na Figura 5.1 estão identificados os vários subsistemas que serão abordados nas secções seguintes. Durante este processo de desenvolvimento

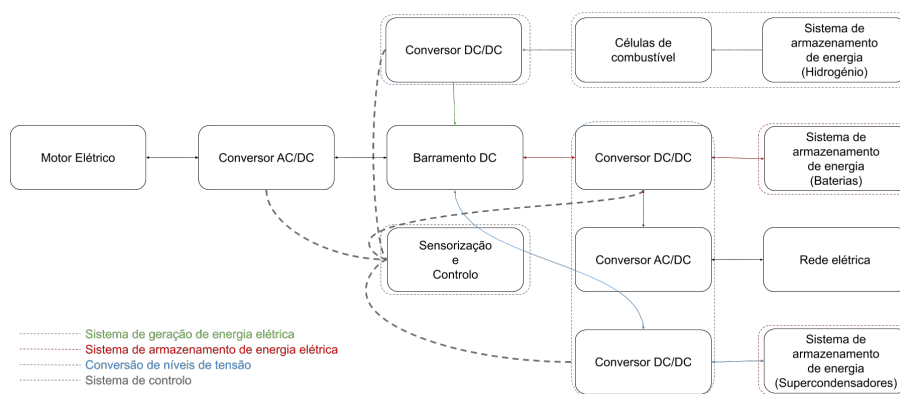


Figura 5.1: Modelo representativo do sistema a desenvolver e respetivos subsistemas

vai ser necessário estipular alguns parâmetros para dimensionamento de componentes, e analisar exemplos já existentes no mercado, de forma a compreender as gamas de valores que algumas das características deste tipo de veículos assumem.

5.2 Caracterização do sistema

Para que o sistema a desenvolver possa ser dimensionado é necessária estipular, determinar e listar uma série de parâmetros chave.

Alguns desses parâmetros já foram sendo referidos ao longo das secções anteriores, como são os casos da tensão estipulado para o barramento de corrente contínua, com uma valor de 700V, mas que na prática será de 400V, pois foi o valor utilizado no desenvolvimento do sistema que servirá de base, e a energia armazenada seria de 250kWh, sendo que o *pack* de células disponível no laboratório possui uma capacidade de armazenamento de 3kWh.

Uma vez que o conjunto de células apresenta uma capacidade de descarga de 30Ah a 1C, ou seja é capaz de disponibilizar 30A durante o período de uma hora [149], a corrente nominal, I_{nom} , será de 30A.

Utilizando como base os valores do autocarro *Caetano e City Gold* disponibilizados no Anexo A, percebe-se que a proporção entre as potências, nominal e máxima, é de $\frac{3}{5}$, sendo essa a constante aplicada aos valores do sistema a desenvolver.

Portanto, os parâmetros para o sistema a desenvolver podem ser revistos de seguida.

$$P_{nom} = 12kW$$

$$V_{DC} = 400V$$

$$I_{nom} = 30A$$

$$P_{max} = 20kW$$

$$I_{max} = 50A$$

5.3 Sistema de geração de energia elétrica

O sistema de geração de energia elétrica é responsável pela transformação de energia química em energia elétrica, utilizando, para tal, células de combustível.

Com base na literatura referida na secção 2.2.3.7 foi possível deduzir alguns valores característicos das PEMFC, sendo os mesmo apresentados de seguida:

- Potencial eletroquímico máximo: 1,229V;
- Corrente: 0,7A;
- Área: $4cm^2$;
- Temperatura: 298,15K;
- Pressão de P_{H_2} : 0,01atm;
- Pressão de P_{O_2} : 0,02atm;
- ξ_1 : -0,948;
- ξ_2 : $0,00286 + 0.002 * \ln(A) + 4,3 * 10^{-5} * \ln(C_{H_2})$;

- ξ_3 : $7,6 * 10^{-5}$;
- ξ_4 : $1,93 * 10^{-4}$;
- R_m : $0,126\Omega$;
- R_c : $0,0003\Omega$;
- B : $0,016V$;
- J : $0,0496A/cm^2$;
- J_{lim} : $0,0496A/cm^2$.

5.3.1 Modelação das células de combustível

Após o estudo realizado sobre células de combustível e seus circuitos elétricos equivalentes, na secção 2.2.3.7, é possível concluir que aquela que melhor se adequa ao sistema a desenvolver é o dinâmico, pois permite a simulação e análise dos instantes iniciais de funcionamento, ou arranque, e a reação a alterações de ponto de operação.

Segundo as Equações disponibilizadas na secção 2.2.3.7 e na literatura aí referida, os diferentes parâmetros do modelo equivalente podem ser definidos. Tal como referido anteriormente, ambos os modelos necessitam de uma série de cálculos base que dizem respeito ao regime final atingido pelas células de combustível e modelam os fenómenos cinéticos, termodinâmicos, e eletroquímicos também a si associados.

Com tudo isto em atenção e com os valores referidos na secção 5.3, foram realizados os cálculos necessários e foram alcançados os seguintes resultados.

- E_{Nernst} : $1,14V$;
- Perdas de ativação: $0,014V$;
- Perdas óhmicas: $0,094V$;
- Perdas de concentração: $0,045V$;
- Tensão da célula: $1,01V$.

A partir destes valores é possível calcular os diferentes componentes do modelo equivalente, sendo esses valores apresentados de seguida.

- R_{ohm} : $0,13\Omega$;
- R_{act} : $0,02\Omega$;
- R_{con} : $0,04\Omega$;
- C_{dc} : $2,5F$;

O modelo equivalente para uma célula única pode ser revisto na Figura 5.2.

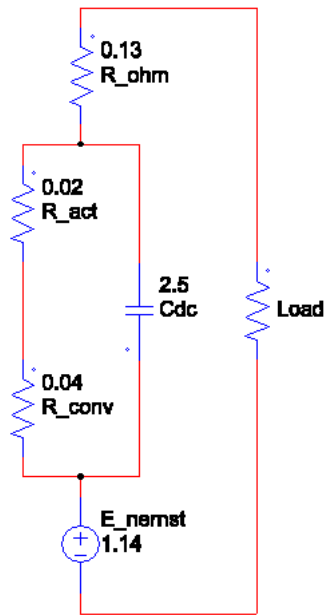


Figura 5.2: Modelo elétrico de uma célula de combustível

O sistema que as células de combustível devem fornecer apresenta um nível de potência bastante superior à desenvolvida por uma única célula, logo é necessário recorrer a uma combinação de séries e paralelos de células, de tal forma que se alcancem os valores de tensão e corrente desejados. Como se deseja que o valor de entrada para o conversor DC/DC desenvolvido seja em torno de 100V, o número de células colocadas em série seria de 87 células por *string*, e de forma a atingir valores de corrente na ordem de grandeza do restante sistema, seriam colocadas 86 *strings* em paralelo. Para esta configuração, os parâmetros do modelo foram recalculados e são apresentados de seguida.

- E_{Nernst} : 99,6V;
- R_{ohm} : 0,14Ω;
- R_{act} : 0,02Ω;
- R_{con} : 0,04Ω;
- C_{dc} : 0,989F;

O modelo produzido para representar o *pack* de células pode ser visualizado na Figura 5.3.

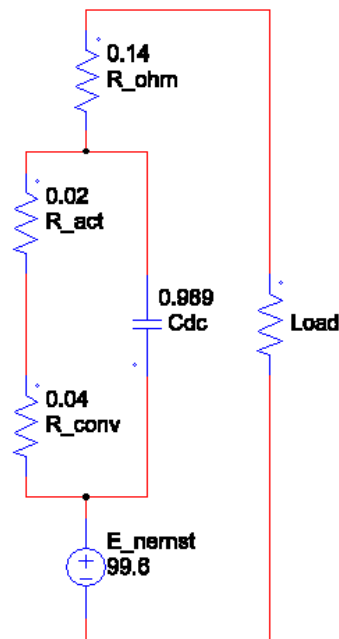


Figura 5.3: Modelo elétrico de um *pack* de células de combustível

5.4 Sistema de armazenamento de energia elétrica

O sistema de armazenamento de energia elétrica é responsável por fornecer e recolher energia, em função do modo de funcionamento em que o *powertrain* do veículo se encontra.

De acordo com as informações recolhidas de três fabricantes de autocarros elétricos (disponível no Anexo A) foi possível concluir que a capacidade de armazenamento energético varia bastante, dependendo do fabricante, e do modelo em questão [150] [151] [152]. Como tal, foi estabelecida uma capacidade de armazenamento de 250kWh, pois corresponde a um valor típico deste tipo de sistemas.

Para a realização de testes e validação de resultados será desenvolvido um sistema à escala, sendo que para tal se recorrerá a um conjunto de células disponível no laboratório, com as seguintes características [153]:

- Tensão nominal: 100V;
- Carga elétrica: 30Ah a 1C;
- Energia: 3kWh.

Dado que o sistema desenvolvido recorre a duas fontes distintas de energia para alimentar o barramento DC, para além do conjunto de células foram utilizados supercondensadores. Os supercondensadores utilizados possuem as seguintes características, disponibilizadas na sua *datasheet* [154]:

- Tensão nominal: 2,7V;

- Capacidade mínima: 3000F;
- Capacidade máxima: 3600F;
- ESR nominal: 0,29mΩ;
- Energia armazenada: 3,04kWh;
- Potência específica: 5,5kW/kg.

Uma vez que se deseja alcançar um valor de tensão superior ao de um supercondensador individual, foi montada uma série de 30, sendo que desta forma apresentavam as seguintes características, de acordo com as fórmulas disponibilizadas em [120]:

- Tensão nominal: 81V;
- Capacidade mínima: 100F;
- Capacidade máxima: 120F;
- ESR nominal: 8,7mΩ.

5.4.1 Modelação das baterias

Tendo em consideração os modelos equivalentes estudados e disponibilizados na secção 2.2.4.15 e os fatores e condições que cada um deles tem em conta é possível concluir que, para o caso basta recorrer ao modelo baseado em *Thevenin*, uma vez que o principal objetivo desta dissertação é a análise do comportamento do sistema em regimes transitórios, perante alterações de carga ou momentos de inicialização do sistema.

Para o cálculo dos diferentes componentes do modelo equivalente é necessária, tal como foi referido na secção 2.2.4.15, a realização de um teste com sucessivas cargas e descargas da bateria. Com base nos dados obtidos no teste realizado no 1º semestre do ano letivo de 2018/2019 é possível concluir que os parâmetros, R_{series} , $R_{transient}$, e $C_{transient}$, que permitem caracterizar a bateria disponibilizada assumem os seguintes valores:

$$R_{series} = 0,02\Omega$$

$$R_{transient} = 0,352\Omega$$

$$C_{transient} = 530F$$

O modelo obtido pode ser visualizado na Figura 5.4.

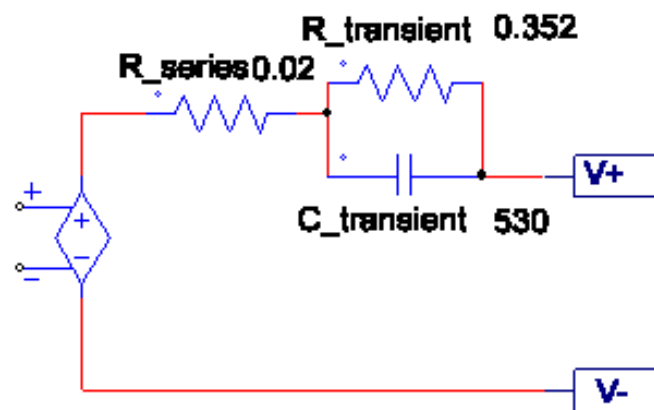


Figura 5.4: Modelo elétrico da bateria utilizado em simulação

5.4.2 Modelação dos supercondensadores

Tal como a modelação das baterias, a dos supercondensadores também foi abordada na secção 2.2.4.15 e considerando as diversas aplicações que cada um dos modelos estudados possuem, foi possível verificar que, para este caso, o modelo RC é suficientemente eficaz na demonstração do comportamento destes elementos do circuito nos momentos entre pontos de funcionamento do sistema.

Este modelo simples para a representação de supercondensadores baseia o seu dimensionamento em valores característicos destes elementos que são disponibilizados na *datasheet* dos mesmos e na resistência e capacidade equivalentes da série de 30 supercondensadores. Com isto, e considerando os valores enunciados na secção 2.2.4.15, é possível chegar aos seguintes valores para a modelação dos componentes em causa:

- Resistência: $8,7\text{m}\Omega$;
- Capacidade: 100F .

O modelo dos supercondensadores utilizado em simulação pode ser revisto na Figura 5.5.

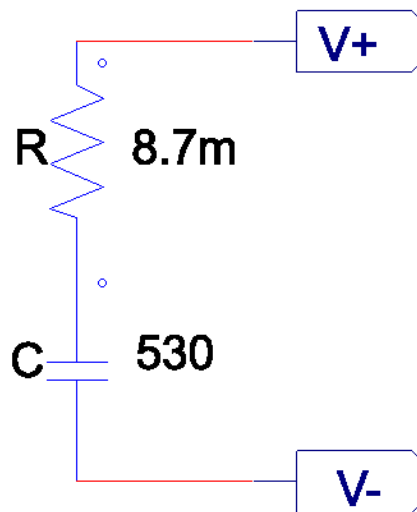


Figura 5.5: Modelo elétrico dos supercondensadores utilizado em simulação

5.5 Conversor DC/DC

O conversor DC/DC responsável pela elevação de tensão das células de combustível não tem necessidade de permitir a bidirecionalidade do fluxo de potência, ou seja, apenas tem de ser capaz de elevar a tensão gerada para o nível do barramento. Para a execução de tal tarefa basta implementar um conversor *Boost* simples, cujo dimensionamento foi realizado e se obteve os seguintes resultados [155].

$$L_{FC} = 50\mu H$$

$$C_{FC} = 75\mu F$$

Os conversores DC/DC responsáveis pela conversão entre os níveis de tensão dos 2 sistemas de armazenamento (baterias e supercondensadores) e do barramento são do tipo meia-ponte e impõem a necessidade de um controlo da tensão do barramento, de forma a manter a estabilidade da mesma perante oscilações de carga, ou perturbações externas ao sistema.

Os conversores baseiam a sua operação na comutação de semicondutores e, como tal é necessária seleccionar os mesmos com certos critérios de maneira que suportem as condições impostas pelo sistema, quer em termos de tensão, quer de corrente. Abordando, então a escolha dos semicondutores a utilizar nos conversores a desenvolver, e de acordo com [156], entende-se que existem alguns critérios a seguir para que a integridade do sistema desenvolvido não seja posta em causa. Em termos de tensão é necessário avaliar os valores de V_{DS} e de V_{GS} presentes nas *datasheets* dos semicondutores e ambos devem valer, aproximadamente duas vezes a tensão máxima atingida no circuito. Já no caso da corrente, deve-se verificar o valor de I_D de forma que esta valha duas vezes o valor máximo de corrente detetado no circuito [156]. Considerando os valores mencionados na secção 5.2 é possível verificar que os valores mínimos admissíveis para às várias

características dos semicondutores são:

$$V_{DS} = 800V$$

$$V_{GS} = 800V$$

$$I_D = 100A$$

Para que o sistema opere em modo de condução contínua é necessário o dimensionamento dos elementos passivos (bobina e condensador) que constituem os conversores em causa, e para tal foram consideradas as equações disponibilizadas em [157]. Uma vez que a topologia de conversão escolhida permite que o mesmo opere como elevador, ou abaixador de tensão e bidirecionalidade do fluxo de potência, o dimensionamento tem de ser realizado de forma a garantir a operação apropriada em ambas as situações, ou seja os elementos serão sobredimensionados em pelo menos um dos modos de operação [157].

Com base em tais equações foram obtidos os seguintes valores para os elementos dos conversores a desenvolver:

$$L_{bateria} = 2mH$$

$$C_{bateria} = 188\mu F$$

$$L_{supercondensador} = 540\mu H$$

$$C_{supercondensador} = 188\mu F$$

5.6 Barramento DC

Para o dimensionamento do barramento DC, ou seja para se tomar a decisão sobre qual é o nível de tensão mais adequado para o sistema a desenvolver é necessário recorrer às Equações matemáticas enunciadas na secção 2.2.5 e é usual considerar uma margem de segurança, na ordem dos 5 a 10%, de forma a garantir a manutenção da integridade e estabilidade do barramento e sistemas a si associados. Logo, a tensão escolhida para o barramento será de 700V, pois, considerando as margens, acima apresentadas, a tensão deveria ser estipulada para um valor entre os 685 e os 715V.

5.7 Carga

No que diz respeito à carga imposta, a mesma deve simular as várias situações que o sistema terá de enfrentar, ou seja, de apresentar valores quer positivos, quer negativos de corrente, e oscilação desses mesmos valores, de forma a testar o comportamento do controlador em regime estacionário, ou transitório e situações de travagem regenerativa.

5.8 Controle

O controlador desenvolvido para o sistema baseia-se numa estratégia em cascata, onde os *loops* internos dependem de valores de referência calculados, e fornecidos pelos *loops* externos.

O *loop* externo, ou *loop* de tensão, é responsável por verificar e corrigir o valor da tensão no barramento, ajustando o valor de saída associado ao seu controlador PI. Para tal, este *loop* tem em consideração o valor da tensão atual do barramento, informação essa proveniente de um sensor de tensão, e um valor de referência pré-estabelecido aquando do dimensionamento do sistema. A saída do controlador PI deste *loop* será utilizada como referência para o *loop* interno abordado de seguida.

O *loop* interno, ou de corrente, tem em conta o valor atual da corrente na carga, oriundo de um sensor de corrente instalado para o efeito, e o valor de referência gerado anteriormente. Uma vez que se desejam controlar 3 conversores com base neste valor de referência, e que os 3 se devem complementar, de tal forma que 1 garanta a operação em regime estacionário, ou constantes de requisição de potência, e os outros 2 em regimes transitórios, ou de mudança no valor de potência necessária, são implementados, de forma paralela, 3 controladores PI. O conceito fundamental por detrás deste sistema de 3 controladores em paralelo é que a maioria da potência seja fornecida pelas células de combustível, pois é a fonte primária de energia do sistema, e é capaz de fornecer essa potência de uma forma consistente e prolongada no tempo, apresentando um tempo longo de adaptação a novas condições. Quando a energia gerada é superior à necessária para a deslocação do veículo, o diferencial é utilizado para carregar quer as baterias, quer os supercondensadores. A utilização da energia proveniente das baterias ocorre quando é necessária uma quantidade superior àquela que a fonte primária consegue fornecer. Os supercondensadores armazenam energia que será utilizada perante alterações abruptas da carga do sistema, pois apresentam uma capacidade de descarga energética superior aos 2 casos anteriores.

Para que este conceito se concretize na prática é necessário dimensionar os controladores com dinâmicas distintas, fazendo com que a reação a alterações de pontos de funcionamento seja mais rápida para os supercondensadores, fornecendo de forma quase imediata o diferencial causado, e evoluindo, enquanto acompanha, de forma inversamente proporcional, a adaptação do controlador associado às baterias. É de salientar que a situação de compensação do diferencial deve ocorrer tanto para momentos em que a quantidade de energia requisita aumenta, ou seja, momentos em que o utilizador solicita um maior binário em relação ao regime anterior, ou quando essa quantidade energética diminui, pois tem de existir um componente capaz de absorver esse diferencial, de tal forma que a tensão do barramento não seja afetada. Apesar da dinâmica do controlador dos supercondensadores ser superior à do controlador das baterias, que já é superior à do das células de combustível, todos eles são mais rápidos que o *loop* externo, já que este deve fornecer uma referência suficientemente estável, e constante, que permita a reação dos diferentes *loops* internos que em si se fundamentam.

Como já foi referido, os *loops* internos utilizam, como referência, o valor proveniente da *loop* externo, sendo a si associado o valor atual da corrente na carga. Portanto o sinal que é utilizado

apresenta oscilações, ou alterações em função do ponto, ou alteração de ponto de operação do sistema, e isto permite que através de uma filtragem se obtenham sinais adequados para cada um dos controladores. Se ao sinal original forem retiradas componentes de diferentes gamas de frequências, obtêm-se referências para cada um dos controladores, sendo que, para isso, é subtraído ao sinal original, esse sinal sujeito a um filtro passa-baixo. Filtrando o sinal com 3 frequências de corte distintas, alcançam-se, após subtração, as 3 referências necessárias para cada um. A essas referências de corrente são subtraídos os valores atuais de corrente que o sistema de fornecimento de energia em causa está a fornecer.

O esquema do sistema de controlo desenvolvido pode ser revisto na Figura 5.6.

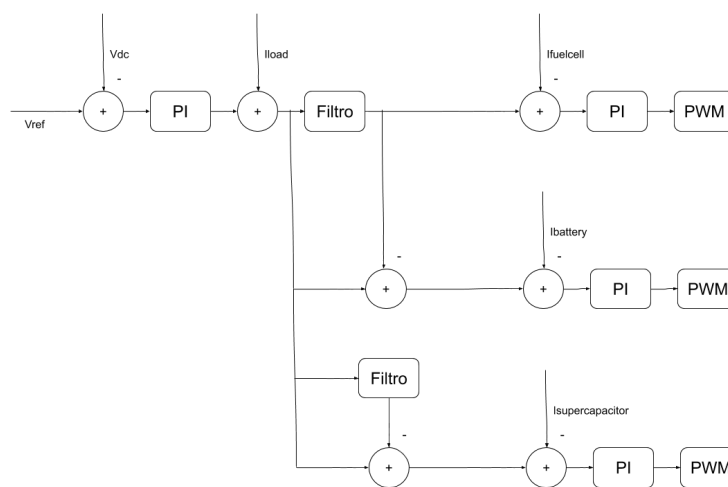


Figura 5.6: Esquema do sistema de controlo desenvolvido

5.9 Sistema desenvolvido em ambiente computacional

De forma a compreender o comportamento dos diferentes componentes e a operação do sistema como um todo foram desenvolvidos, em ambiente de simulação (PSIM e *MatLab/Simulink*), modelos cuja dinâmica pode ser equiparada aos sistemas reais.

O primeiro elemento do sistema cujo comportamento deve ser estudado é o *pack* de células de combustível. Este componente apresenta algumas curvas características que permitem averiguar a correspondência entre o componente real e o simulado.

Como foi referido na secção 5.3.1, as células de combustível apresentam uma resposta dinâmica com cerca de 1s de tempo de estabelecimento. Analisando o modelo desenvolvido e o resultado apresentado na Figura 5.7 é possível verificar que esse tempo de resposta foi alcançado.

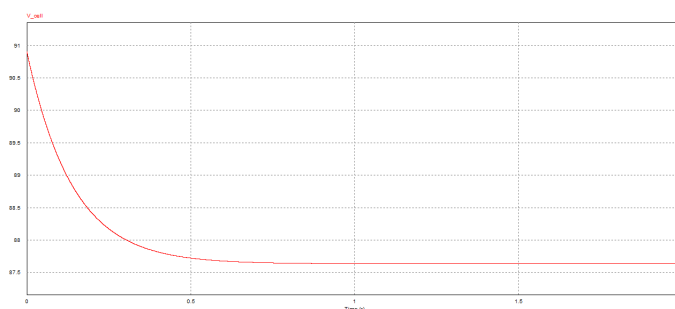


Figura 5.7: Tensão do *pack* de células de combustível

Comparando, agora, a relação Tensão-Corrente e Potência-Corrente reais evidenciadas na Figura 2.16 com as curvas obtidas no modelo (Figuras 5.8 e 5.9) é possível concluir que o modelo produzido reproduz de forma satisfatória o componente real.

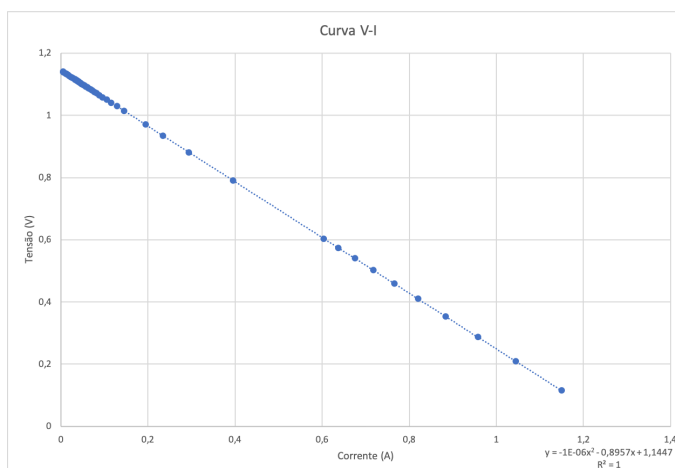


Figura 5.8: Relação V-I da célula de combustível simulada

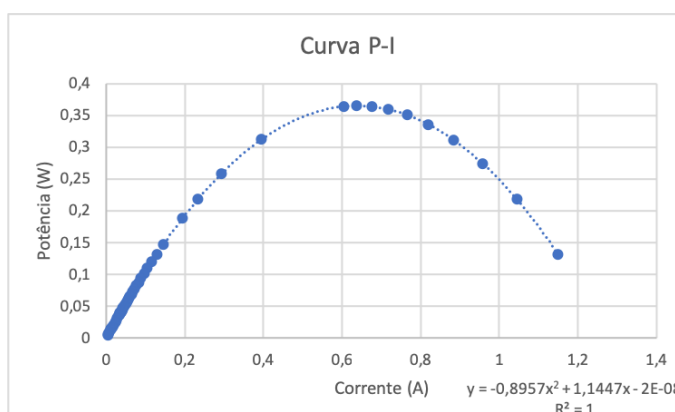


Figura 5.9: Relação P-I da célula de combustível simulada

Considerando o modelo equivalente desenvolvido para a bateria e a evolução temporal da sua tensão (Figura 5.10), impondo para tal uma carga constante de 30A (representada por uma fonte

controlada de corrente), valor nominal assumido para o sistema desenvolvido, é possível verificar que a mesma é capaz de disponibilizar toda a energia requerida pela carga desde os instantes iniciais, necessitando de um tempo de estabelecimento, na ordem dos 1000s, para alcançar o ponto de operação final, ou regime estacionário de funcionamento.

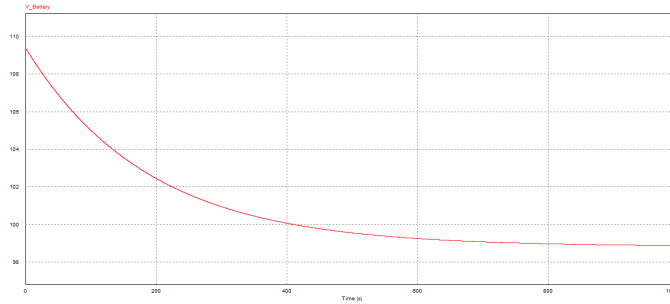


Figura 5.10: Tensão da bateria

Em relação ao comportamento dos supercondensadores, é perceptível que a tensão aos seus terminais vai diminuindo com a descarga provocada pela carga, e de uma forma proporcional ao valor da corrente por si disponibilizada, pois o valor da corrente fornecida por um condensador é função da derivada da tensão aos seus terminais, como demonstrado na Equação seguinte.

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt}$$

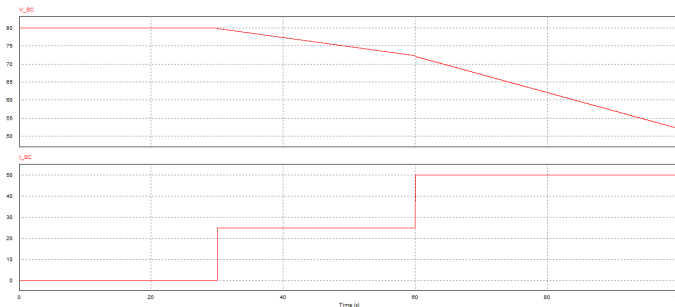


Figura 5.11: Tensão dos supercondensadores

O desenvolvimento deste conversor através de uma simulação computacional tem como objetivo a análise do seu comportamento e do desempenho de diferentes métodos e parâmetros de controlo. O conversor concebido foi dimensionado de forma a alcançar um ganho de 4, no que à tensão diz respeito, sendo que a fonte de potência de entrada apresenta uma tensão de 100V e é esperado à saída uma tensão de 400V, apesar de ter sido referido na secção 5.6 que a tensão do barramento seria de 700V. Esta situação foi assim considerada pois o sistema desenvolvido na prática, e detalhado na secção 5.10 desta dissertação, teve como base um sistema com essas características, e desta forma, as simulações estão o mais próximo possível da vertente real.

Em relação à frequência de comutação, foi escolhido um valor de 20kHz, frequência esta no limiar superior audível do ser humano [158] [159], minimizando o ruído associado aos conversores e, desta forma minimiza as perdas por comutação. Relativamente aos valores assumidos como aceitáveis para os ripples de corrente e tensão foram de 10% e 5%, respetivamente. Os valores de ripple são associados ao método de funcionamento do conversor e são limitados pelo correto dimensionamento de componentes passivos do sistema, bobina e condensador. Estes elementos garantem a estabilidade da tensão e da corrente, respetivamente, não permitindo variações notáveis nestas variáveis, o que seria incoerente com a continuidade da corrente.

O conversor desenvolvido pode ser visualizado na Figura 5.12.

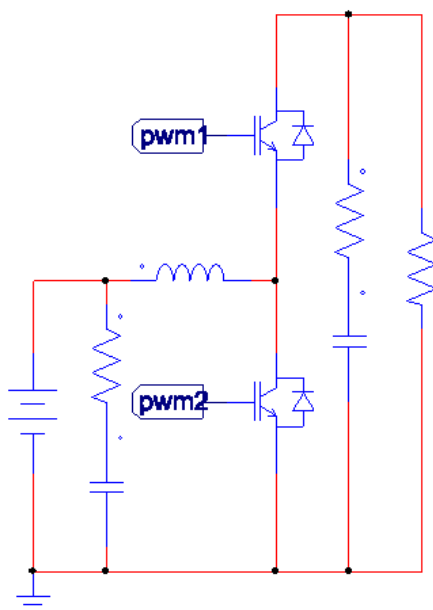


Figura 5.12: Conversor DC/DC desenvolvido

Tal como foi referido na contextualização teórica, para que seja possível adaptar o sistema a variações de carga, ou procura de potência, é necessário efetuar medições sistemáticas de algumas variáveis do sistema como as tensões da bateria e da carga, e as correntes nesses mesmos elementos. Ao nível da simulação, os valores obtidos para a corrente e tensão na bateria não serão considerados, uma vez que o *software* utilizado não considera a alteração do SOC. Por outro lado, os valores de tensão e corrente associados à carga, ou barramento DC são elementos fundamentais para o controlador do sistema, pois são estes que permitem averiguar a estabilidade e precisão do mesmo. Os diferentes tipos de controlo implementados foram elaborados com recurso a blocos operacionais do *software* utilizado, PSIM, ou em específico, através do uso do "C Block" que permite o desenvolvimento de código, em linguagem C, que pode, depois ser implementado em microcontroladores ao nível prático, com as devidas adaptações específicas. As abordagens realizadas inicialmente consideram, apenas a utilização de um conversor, ou seja abordam a questão do controlo para um ponto específico de operação, verificando o seu desempenho no arranque e a sua precisão e estabilidade após atingir o regime final. Como tal, foram desenvolvidos 2 métodos

de controlo que são abordados de seguida, através da análise de algumas variáveis do sistema que permite a análise do seu funcionamento.

Começando pela sistema de controlo mais simples, aquele baseado num mecanismo de histerese, obtiveram-se as formas de ondas apresentadas na Figura 5.13.

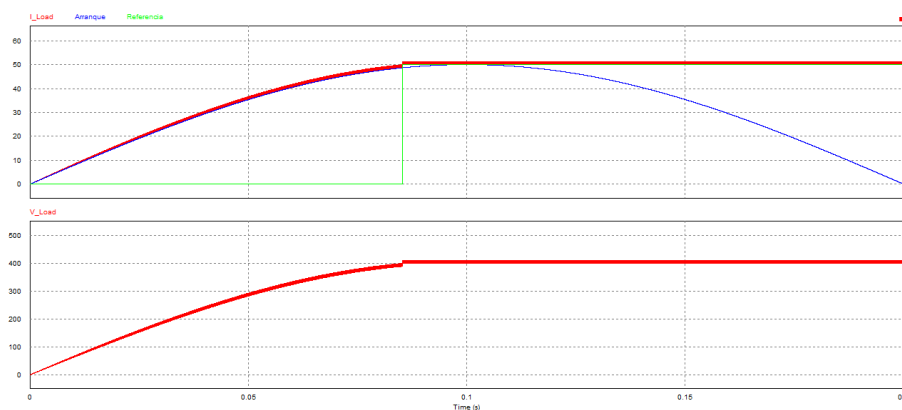


Figura 5.13: Corrente na carga (cima) e tensão no barramento DC (baixo) para o controlo por histerése

Analisando a figura 5.13 é, imediatamente, perceptível que o método de controlo desenvolvido é capaz de alcançar a estabilidade quer em termos de corrente, quer em termos de tensão. Para que o sistema histerético seja capaz de manter a sua operacionalidade, e tendo em consideração que o controlador foi desenvolvido em linguagem C, nos instantes até que o sistema atinja o valor de referência para a tensão no barramento é necessário que a corrente na carga seja comparada com uma forma de onda crescente, e não com uma constante, de forma que essa mesma corrente vá aumentando de valor. Como tal, até ao momento em que se atinge a tensão de referência do barramento, a corrente na carga é comparada com uma onda sinusoidal com valor de pico de 50A (valor máximo estipulado para o sistema), sendo que nesse instante o valor de corrente é guardado como referência e é tratado como tal a partir daí. Estabelecida a referência de corrente, o controlador é capaz de manter a corrente na carga entre os 49,9 e os 51,3A e a tensão no barramento entre os 400 e os 410V, cumprindo os ripples estipulados como aceitáveis. Dada a simplicidade do controlo por histerese, os resultados obtidos podem ser considerados como satisfatórios, até porque em relação à implementação num sistema físico, esta será de relativa simplicidade e com pouca exigência computacional.

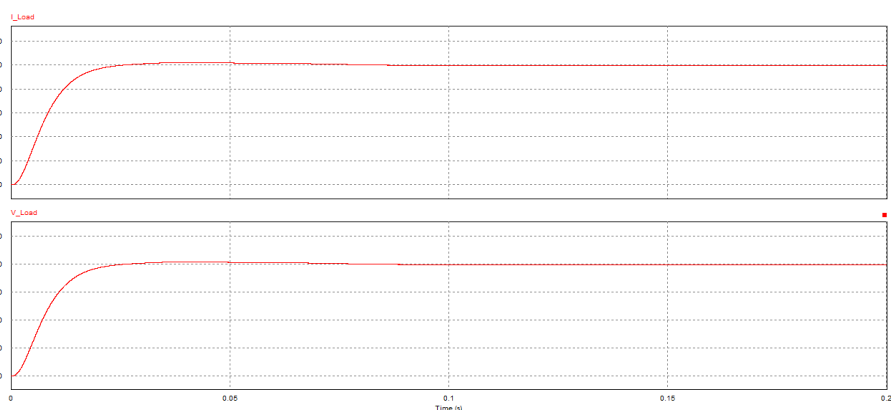


Figura 5.14: Corrente na carga (cima) e tensão no barramento DC (baixo) por controle PI

Através da análise da evolução da tensão no barramento (Figura 5.14 (imagem de cima)) é possível verificar que a mesma alcança um valor próximo da referência (398V para uma referência de 400V) com a ocorrência de um *overshoot* de 8V, ou seja apresenta um sub-amortecimento ligeiro, mas uma vez que se encontra dentro do *ripple* admissível não foi efetuado nenhum ajuste nos ganhos dos controladores desenvolvidos. Em termos de corrente é atingido um máximo de 51A, no momento do *overshoot* inicial, sendo que, após estabilizar, assume um valor em torno de 49,8A, cumprindo, também neste caso, o *ripple* admissível. No que diz respeito ao *duty-cycle*, o mesmo é inicializado em 0,75 pois, dessa forma garante o ganho ideal, de 4 vezes, ajustando-se a partir daí para o ponto ótimo de operação com base nas medições realizadas. Com base na análise realizada, e tendo em consideração a atual capacidade computacional e baixo custo a si associado, considera-se que os resultados obtidos são de elevada qualidade, pois o valor de referência é atingido rapidamente e, apenas com uma ligeira sobre-elongação, não ocorrendo picos nem oscilações que poderiam pôr em causa a integridade do sistema, no caso de uma aplicação prática.

Para a realização de testes no sistema que conjuga as 3 fontes de energia em paralelo foi utilizado como carga um paralelo de fontes controladas de corrente (Figura 5.15), com uma gama de valores suficientemente ampla de forma a contemplar os vários modos de funcionamento do sistema, alimentação do motor (corrente com valor positivo), com diferentes patamares de potência, e carregamento da bateria e dos supercondensadores (corrente com valor negativo).

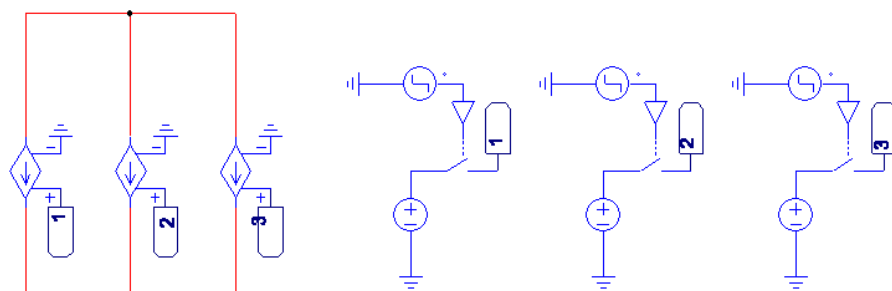


Figura 5.15: Carga imposta ao sistema simulado

Após o desenvolvimento e análise dos controladores para um conversor DC/DC do tipo meia-ponte, foi desenvolvido um método de controlo para a ligação em paralelo de 2 conversores deste género e 1 conversor *Boost*, com várias respostas dinâmicas, tal como foi referido na secção 5.8. Na montagem do sistema completo em ambiente computacional foram consideradas as resistências internas de cada um dos componentes em causa, recorrendo aos valores fornecidos pelos fabricantes nas respetivas *datasheets*, de forma a representar da forma mais realista o comportamento e perdas associadas a cada um deles. Através da implementação desse método de controlo foram obtidos os resultados que podem ser vistos nas Figuras 5.16 e 5.17.

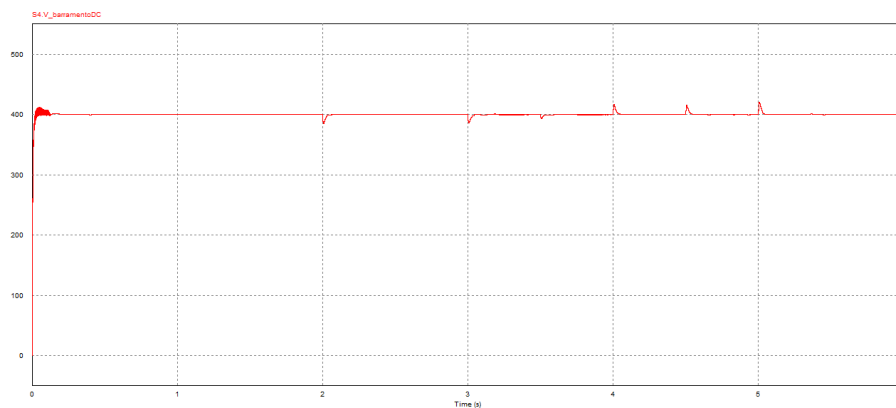


Figura 5.16: Tensão do barramento no sistema simulado

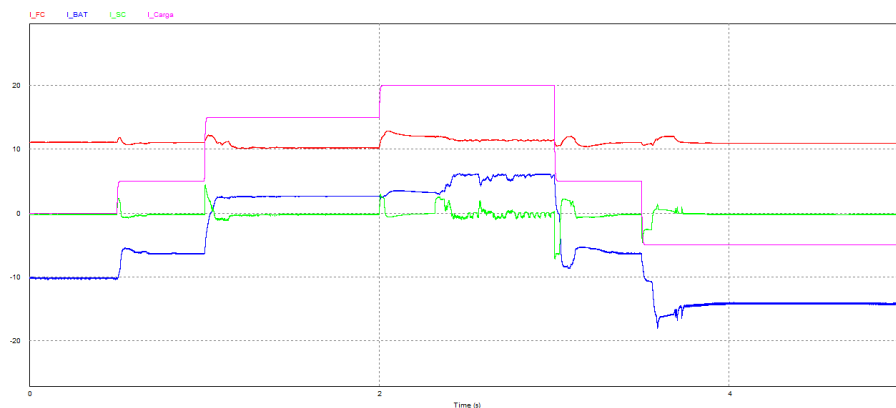


Figura 5.17: Correntes das diferentes fontes no sistema simulado

Começando por analisar a tensão no barramento DC (Figura 5.16) é possível verificar que após os primeiros instantes (cerca de 0,12s), o barramento estabiliza a sua tensão, próxima da referência, com variação máxima de $\pm 1V$. Nos momentos de alteração de carga ocorrem perturbações com uma amplitude inferior a 5%, já que o pico máximo atingido se encontra nos 417V, cumprindo desta forma o *ripple* admissível.

Analisando as correntes fornecidas, e consumidas pelos diferentes componentes do sistema verifica-se que, após um período inicial, onde são carregados os diferentes componentes que representam as respostas dinâmicas dos sistemas fornecedores de energia, as células de combustível

começam a operar no ponto de máxima potência, apesar de não existir carga conectada ao sistema, utilizando-a para o carregamento das baterias e dos supercondensadores, e o sistema estabiliza num ponto de funcionamento. Em $t=0,5s$ a carga começa a requisitar corrente ao sistema, com um valor inferior ao gerado pelas células de combustível, verificando-se que o ponto de funcionamento das mesmas se mantém, mas a corrente utilizada para o carregamento da bateria diminui no valor cedido para a carga. No instante $t=1s$, é requisitada mais corrente pela carga, que é imediatamente compensada pelos supercondensadores, seguidos da bateria em paralelo com as células de combustível, sendo que os primeiros decaem perante a adaptação do restante sistema. No instante $t=2s$ é elevado o valor de corrente consumida pela carga, verificando-se o mesmo comportamento por parte do sistema. A partir de $t=3s$ a corrente necessária diminui, e o diferencial entre a necessidade anterior e a atual é, inicialmente, absorvido pelos supercondensadores e de seguida pela bateria, mantendo a estabilidade de tensão no barramento. Em $t=3,5s$, a corrente toma um valor negativo, ou seja trata-se da representação de uma situação de travagem regenerativa, energia regenerada essa que deve ser armazenada no sistema de baterias, após uma absorção temporária por parte dos supercondensadores.

Logo, a partir das Figuras 5.16 e 5.17 é possível analisar o comportamento do sistema nos vários modos de funcionamento característicos dos FCEVs, apenas células de combustível, células de combustível em paralelo com a bateria e os supercondensadores, e travagem regenerativa.

Abordando a questão do carregamento das baterias, a partir da energia proveniente da rede, e a injeção de potência na rede, nos momentos em que a carga presente nas baterias não seja necessária e seja conveniente a sua introdução na rede, quer em termos económicos, quer em relação à estabilidade do sistema de distribuição de energia. Este é um assunto bastante estudado atualmente, e a hipótese da conversão AC/DC, e vice-versa, ocorrer num dispositivo externo ao veículo é cada vez mais posta como preferencial, não sendo abordada a totalidade dessa questão nesta dissertação. A conversão deve ser realizada de tal forma que a carga das baterias seja mantida dentro de valores seguros e a potência injetada na rede não comprometa a estabilidade, nem a qualidade da corrente na rede.

Como tal, nos momentos em que esteja a ser injetada potência na rede existe a necessidade de sincronizar a amplitude e a fase entre as potências (da rede e das baterias), perturbando, o menos possível, a potência da rede. Para que seja possível esta sincronização, é usual o recurso a um mecanismo de PLL que tem como principal função detetar a fase de um sinal, e permite, também calcular o valor de pico desse mesmo sinal.

Uma vez que o mecanismo de PLL é um assunto pouco abordado durante o decorrer do curso, foram desenvolvidos 3 destes mecanismos, de 3 formas distintas, duas em ambiente de *MatLab/Simulink* e outra em PSIM, uma com recurso ao bloco de PLL providenciado pela biblioteca do *MatLab* e outras duas através da construção de um sistema completo desde a raiz, nos 2 ambientes de simulação, sendo que os esquemas utilizados podem ser revistos na Figura 5.18.

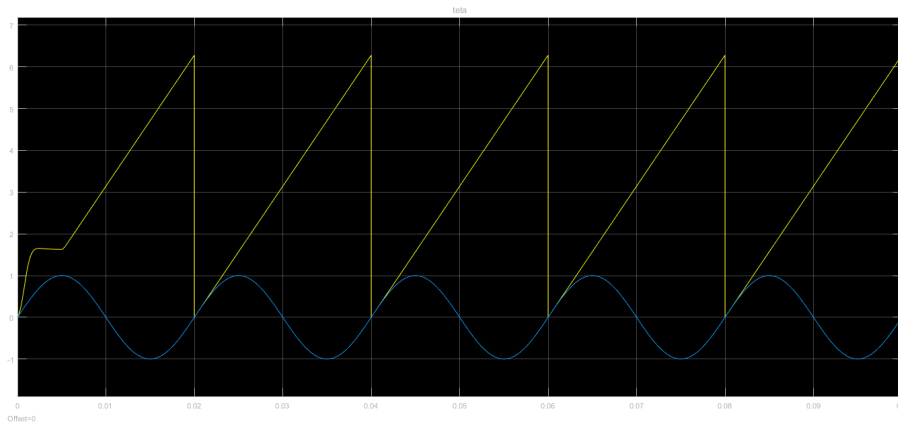


Figura 5.20: Resultado obtido para o mecanismo de PLL desenvolvido em *MatLab/Simulink*

Neste caso, mais próximo da realidade, é necessário criar uma forma de onda virtual desfasada de noventa graus da original, que simula duas componentes ortogonais no plano estacionário $\alpha\beta$. Estas duas componentes associadas à frequência angular da onda de entrada permitem a transformação para o referencial rotativo dq, que torna os sinais sinusoidais em valores contínuos e constantes no tempo. Por comparação com um valor *default* para a frequência (50Hz), após o recurso a um controlador PI, o sistema é capaz de fornecer o valor da frequência do sinal de entrada.

Verifica-se um erro de fase nos primeiros instantes, ou seja no período transitório (aproximadamente 0,005s), o sistema não é capaz de seguir a fase do sinal de entrada. Após esse período de inicialização e de sincronização entre os sinais de entrada (a ser analisado) e de saída (resultado da análise), o sistema é capaz de disponibilizar com precisão, na sua saída, a fase do sinal proveniente da rede.

A última abordagem realizada em torno do sistema de PLL foi realizada no *software* PSIM e teve como base o exemplo fornecido pelo mesmo (Figura 5.21).

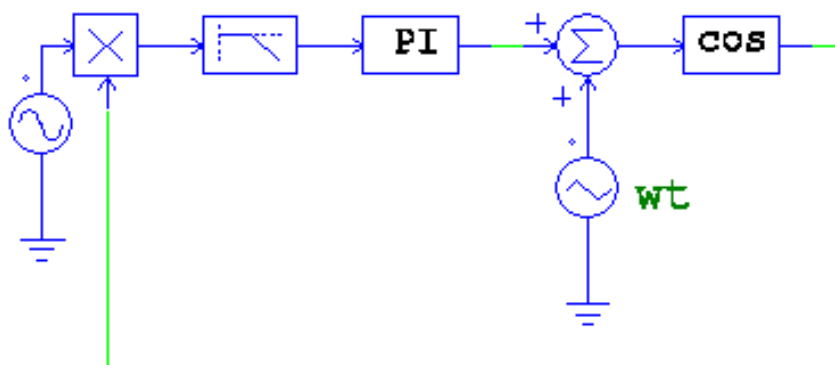


Figura 5.21: Esquema do mecanismo de PLL desenvolvidos em PSIM

Para que os resultados obtidos fossem satisfatórios foram necessárias algumas alterações, como são os casos da frequência de corte do filtro utilizado (20Hz) e o ganho e a constante de

tempo do controlador PI ($K=1$ e $T=0,01$).

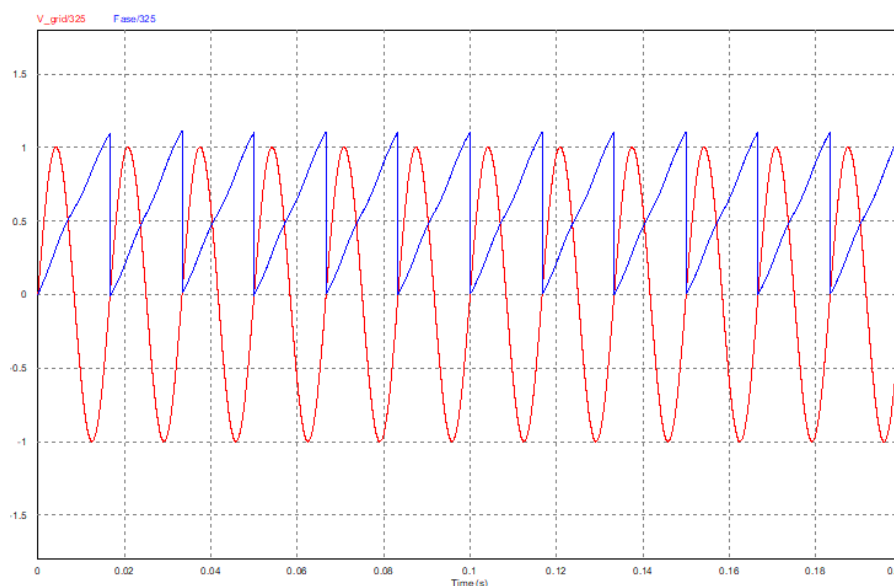


Figura 5.22: Resultado obtido para o mecanismo de PLL desenvolvido em PSIM

Analisando a Figura 5.22 é possível verificar que o mecanismo desenvolvido cumpre a sua função, acompanhado de forma adequada a fase da tensão que lhe é colocada como entrada. É, também possível visualizar que a evolução não é perfeitamente linear, ocorrendo uma pequena oscilação nos momentos em que a tensão de entrada cruza o valor 0, sendo que esta oscilação é provocada pela utilização da função cosseno no mecanismo de *feedback*.

5.10 Sistema desenvolvido em ambiente laboratorial

Após estudo, desenvolvimento, e análise de resultados de um sistema de armazenamento em ambiente computacional, foi utilizado, como base, um sistema produzido num projeto da unidade curricular de SEAI, pertencente ao MIEEC para a realização de testes.

Nesse projeto foi concetualizado, e montado um sistema de 2 conversores em paralelo, com recurso a duas fontes distintas de energia. Tal como no sistema a desenvolver nesta dissertação, uma fonte é responsável pelo fornecimento da energia em regime estacionário, ou seja um fornecimento com uma dinâmica lenta, e a outra fica encarregada de fornecer energia nos momentos em que os regimes de funcionamento se alteram e é necessária uma grande quantidade de energia num curto espaço temporal, de forma a garantir a manutenção da tensão do barramento e da corrente solicitada pela carga, e consequentemente da estabilidade do sistema.

O esquema do sistema a desenvolver pode ser revisto na Figura 5.23.

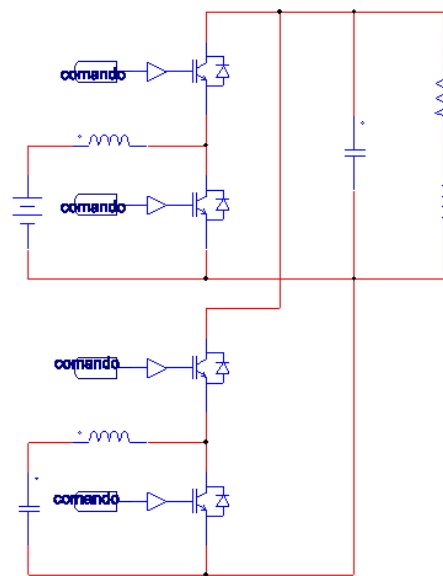


Figura 5.23: Sistema a desenvolver

Abordando o esquema anterior, em detrimento das baterias, um vez que as mesmas se encontravam indisponíveis, foi utilizada uma fonte de alimentação com uma gama de tensão dos 0 aos 60V, e uma corrente máxima de 3A.

No caso dos supercondensadores e tal como referido na secção 5.4.2, os mesmos foram montados em série (30 supercondensadores em série), tendo sido montada, em paralelo com cada um deles, uma resistência de 600Ω cujo objetivo é o de balancear a tensão de cada um dos supercondensadores, mantendo-a, aproximadamente igual entre eles. Este método de balanceamento é do tipo passivo e baseia a sua operação na dissipação de energia num elemento passivo. No caso, esses elementos passivos são as resistências colocadas em paralelo com os supercondensadores e por elas circula o excesso de carga presente nas células que se encontrem mais carregadas. Esta energia que é dissipada nas resistências é totalmente perdida, fazendo que este sistema também seja designado de método dissipativo. O facto da energia ser totalmente perdida também faz com que o rendimento do sistema diminua, mas este continua a ser um método bastante utilizado pois apresenta fiabilidade, simplicidade de implementação e custo reduzido [160] [161]. Para se proceder ao carregamento desta série de supercondensadores já tinha sido previamente montado um conjunto de resistências de potência de tal forma que fossem capazes de dissipar energia durante esse mesmo período.

No que se refere aos elementos indutivos utilizados, foram utilizados elementos com características diferentes para cada um dos conversores montados. No caso do conversor conectado às baterias, foi utilizada uma bobina de construção artesanal com uma indutância de, aproximadamente, 1,4mH. Para o conversor responsável pela elevação da tensão proveniente dos supercondensadores recorreu-se a uma série de 3 bobinas H1305-301, uma vez que estas apresentam, individualmente, uma indutância de $300\mu\text{H}$, com um decréscimo para os $250\mu\text{H}$, quando atravessadas por uma corrente de 30A, situação revelada e comprovada pela *datasheet* das mesmas [162].

Em termos de semicondutores foram utilizadas duas meias-pontes de *IGBT's*, uma por conversor, sendo que não havendo disponibilidade de duas iguais, foi utilizada uma SKM 100GB176D e uma Infineon FF100R12RT4. Ambos os modelos de semicondutores são sobredimensionados para o sistema desenvolvido, uma vez que apresentam características superiores às necessárias para o correto funcionamento do sistema, estipuladas na secção 5.5.

Associado a cada meia ponte foi colocado um condensador de $1\mu\text{F}$ e tensão nominal de 1000V (MKP C4BS [163]) com a funcionalidade de servir de apoio nos instantes de comutação, garantindo o fornecimento de energia mesmo durante os períodos de *deadtime* que são incluídos entre ativações e desativações de semicondutores para que não ocorram curto circuitos, ao se fechar o ramo completo. Este conceito é designado por *energy-dosing*, e é uma forma de controlar, de forma mais apertada, a transferência de energia e as limitações impostas pela possibilidade de ocorrência de curto-circuitos durante as comutações [164].

Como barramento DC foi utilizado um condensador de $100\mu\text{F}$ e tensão nominal de 500V (MKP C4AQ [165]).

Todos os condensadores utilizados no sistema possuem um valor reduzido de ESR ($3\text{m}\Omega$ no condensador do barramento e $3,7\text{m}\Omega$ nos das meias-pontes), garantindo um valor reduzido de perdas e melhorando a eficiência do conversor. Por esta característica ter sido considerado no projeto do sistema, toda a cablagem associada ao sistema completo foi reduzida, diminuindo a resistência total, consequentemente aumentando a eficiência, mas sem colocar a segurança e a integridade do sistema em causa.

A carga utilizada foi do tipo resistivo e correspondia a reóstatos ligados em série entre si, de forma a aumentar a resistência total, o que permite o aumento da corrente para o mesmo valor de tensão, e consequentemente, o aumento a potência envolvida.

Para permitir o controlo em malha fechada do sistema foram aplicados 2 sensores, 1 de corrente colocado de forma a efetuar a medição da corrente na carga e 1 de tensão a medir a tensão no condensador do barramento. Como sensor de corrente foi utilizado o LEM HY5-P, pois apresenta uma gama de medição entre os -15 e os +15A, e o seu valor de saída varia de forma, praticamente, linear com um erro inferior a 1% [166]. No caso do sensor de tensão foi utilizado o ACPL-C870 que apresenta ganho unitário entre a entrada e a saída, com erro inferior a 3% e a sua relação é, também, praticamente linear [167]. A questão da linearidade garante uma maior facilidade na calibração do sensor, pois desta forma reduz-se o erro aquando da transformação, do valor disponibilizado pelo sensor para o valor por si medido, no microcontrolador utilizado. Como microcontrolador foi utilizado o XMC 4500, pois apresenta 2 núcleos de processamento, que possibilitam a separação das tarefas de sensorização das de controlo, garantindo desta forma a estabilidade necessária no tempo de execução da componente de controlo [168].

Com base no sistema disponibilizado, e após ajustes e arranjos, foi montado o sistema desejado, que pode ser visualizado na Figura 5.24.

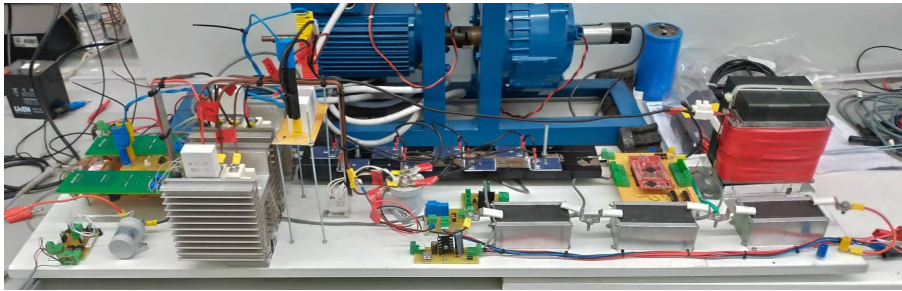


Figura 5.24: Sistema desenvolvido

Após a montagem do sistema concetualizado, foi estabelecido um conjunto de testes a realizar de forma a verificar todos os componentes e ligações, sem comprometer, nem pôr em risco a integridade do sistema.

Então, os testes para validação do sistema foram divididos em duas fases:

- Em malha aberta;
- Em malha fechada.

Os testes em malha aberta têm como principais objetivos a verificação da integridade do sistema, ao nível da montagem física realizada, e a análise do sistema em regimes estacionários de funcionamento.

Estes testes são realizados sem a utilização da informação proveniente dos sensores, ou seja, o sistema opera num ponto fixo de funcionamento.

Para tal será utilizado um sinal de comando para o comando das *gates* dos *IGBT's* dos conversores, com características semelhantes às ondas geradas pelo microcontrolador, isto é, com uma frequência de comutação de 20kHz (tal como foi utilizado nas simulações), valores de pico, mínimo e máximo, de 0 e 3,3V, respetivamente, e um valor de *duty-cycle* crescente, a iniciar em 0,2 e a terminar em 0,8 (valores limites do gerador de sinais utilizado), sendo que desta forma o ganho do conversor vai sendo aumentado. Como precaução, e com o objetivo de garantir a não ocorrência de um curto-circuito, os valores de *duty-cycle* utilizados eram da forma:

$$D(\%) - 2\%$$

$$(100 - D(\%)) - 2\%$$

Em relação à tensão de alimentação (tensão de entrada do conversor), esta vai sendo aumentada, aumentando também o nível de potência envolvido, de cada vez que for validado o nível antecedente.

No caso dos testes em malha fechada, a informação proveniente dos sensores já é utilizada para o controlo do sistema, sendo que o valor do *duty-cycle* vai sendo atualizado com base nessa mesma informação.

Inicialmente, a informação proveniente dos sensores será apenas recolhida, e o valor do *duty-cycle* será fixo, de maneira a verificar a correção geração dos sinais de comando por parte do sistema de controlo.

Após esta validação, o método de controlo desenvolvido será testado.

Tal como nos testes realizados em malha aberta, estes serão realizados com valores de tensão de entrada crescente, e os últimos testes a realizar devem considerar variações de carga, de forma a provar a entrada em operação do conversor com a dinâmica mais rápida.

Os resultados obtidos para os testes em malha aberta podem ser revistos nos Anexos B e C.

Em todas as imagens ilustrativas dos resultados podem ser vistos 2 conjuntos de pontos e duas linhas de tendência. Um dos conjuntos de pontos representa o ganho estipulado para cada valor de *duty-cycle* e a linha de tendência associada (representado a laranja), enquanto que o outro retrata o ganho obtido para cada valor de *duty-cycle* e a respetiva linha de tendência (representado a azul).

Tal como referido anteriormente, os testes foram realizados com valor crescente de *duty-cycle* e tensão de entrada, elevando, desta forma, a potência envolvida. Como os resultados obtidos para os diferentes valores de tensão de entrada são próximos entre si, as conclusões a retirar podem ser generalizadas.

Verifica-se que o ganho obtido segue a forma de evolução do ganho estipulado mas, sempre com um erro por defeito, ou seja, quando se compara o valor estipulado, calculado a partir da Equação seguinte, com o valor obtido, este último é sempre inferior. Esta situação é justificada pela admissão, no valor estipulado, de que os componentes utilizados são ideais, que as comutações ocorrem em tempo nulo e que não existe energia dissipada em nenhuma ocasião.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D}$$

Pelo contrário, na prática todos os componentes apresentam não idealidades, como os cabos elétricos apresentarem resistência, capacidade e indutância, os semicondutores possuírem resistência interna, valores de capacidade entre os seus terminais, e tempos de fecho e abertura não nulos. Estas não idealidades provocam quedas de tensão, que representam consumo de corrente e libertação de energia por efeito de *Joule*, por exemplo, e que fazem com que haja uma diminuição do ganho, em relação ao estipulado, diminuindo, também o rendimento dos sistemas. Para além destes fatores, uma vez que, por precaução, foram introduzidos valores de *deadtime* nas comutações, com o valor de 2%, são instantes em que não ocorre nem carregamento da bobine, nem fornecimento de energia para o condensador do barramento DC, reduzindo a quantidade de energia transferida entre a fonte e a carga.

Para verificar a influência dos *deadtimes* no ganho obtido nos conversores, e consequentemente no seu rendimento, foram realizados testes para 3 níveis de tensão distintos (20, 40, e 60V), com valores decrescentes de *deadtime*.

Considerando os resultados obtidos, e disponibilizados no Anexo D é possível verificar que quando se diminuem os valores de *deadtime* nos momentos de comutação dos semicondutores existe uma tendência para o aumento do ganho obtido, logo também um aumento do rendimento

do conversor. O rendimento foi calculado com base nos ganhos, obtido e estipulado, através da Equação seguinte.

Este aumento do ganho, e do rendimento, é justificado pelo maior intervalo de tempo que a bobine está a armazenar energia e pelo maior intervalo de tempo que a mesma está a fornecer essa energia para a carga, sendo que o circuito se encontra em momentos de carga da bobine, ou fornecimento da carga durante uma percentagem superior de tempo, ocorrendo uma transferência de energia mais eficiente entre a fonte e a carga. Quando se atinge o valor de 50% para o *duty-cycle*, ou seja comutação sem tempo de transição, verifica-se uma ligeira diminuição do rendimento que pode ser justificada por instantes em que ambos os semicondutores se encontram nos estados *On*, ou *Off*. Esta situação não é utilizada na prática, pois em aplicações de elevada potência torna-se particularmente perigosa a ocorrência de curto-circuitos que podem danificar o sistema, ou mesmo pôr em causa a segurança dos utilizadores.

Em geral, também se pode concluir que os conversores baseados em comutação apresentam valores de rendimentos superiores a 95%, chegando mesmo a atingir 98% no estudo realizado, o que os torna um excelente método para elevação de tensão e manutenção da estabilidade do barramento DC do sistema desenvolvido.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalho Futuro

6.1 Conclusão

A qualidade de vida na Terra, e mesmo a existência de muitas espécies, incluindo o ser humano, está a ser posta em causa pela emissão de gases de efeito de estufa, que nunca tinha atingido valores tão elevados.

Uma parte considerável dessas emissões é provocada pelo setor dos transportes, pois recorrem à combustão de combustíveis fósseis como fonte de energia para se deslocarem.

Com o atual crescimento do mercado dos veículos híbridos e elétricos, a crescente preocupação com as questões ambientais e a necessidade de uma mudança de mentalidade em relação ao conceito de transporte e deslocação por parte da população em geral, estão a ocorrer enormes avanços no âmbito da mobilidade com recurso a fontes alternativas de energia. A situação ainda coloca algumas hesitações no momento da opção por um veículo elétrico, apesar dos incentivos estaduais, por apresentarem uma autonomia inferior aos veículos convencionais e a fonte de energia elétrica, aquando do carregamento, ainda não ser totalmente proveniente de fontes renováveis. Em relação à mudança de mentalidade é necessário tempo para que a população se acostume a utilizar, maioritariamente, meios de transporte públicos, ou coletivos, diminuindo o impacto ambiental a si associado através da partilha do veículo. Esta situação mostra a importância do desenvolvimento de veículos com capacidade de transporte para grupos alargados de pessoas, como são os casos dos autocarros e dos comboios.

A entrada em mercado de alguns veículos a células de combustível e o crescente número de postos de abastecimento de hidrogénio fizeram com que a pesquisa e o desenvolvimento em torno destes componentes tomasse uma posição de destaque.

Foi possível verificar que os mais diversos componentes para a construção de um FCEV ou estão numa fase de rápido desenvolvimento, como são os casos dos sistemas de armazenamento de energia e as células de combustível, ou estão numa de maturidade tal que o seu funcionamento e comportamento já é praticamente conhecido, como é o caso dos conversores.

Especificando os componentes abordados nesta dissertação, verifica-se que as células de combustível, elementos geradores de energia elétrica, estão a ser alvo de avultados investimentos para

serem melhoradas e encontradas tipologias mais eficientes, de mais baixo custo e que assim permitam a redução do preço final apresentado ao consumidor aquando da sua produção em massa.

As baterias são um elemento importante no desenvolvimento de um EV pois são as responsáveis pelo armazenamento de energia para a propulsão do veículo e determinam a performance, pela taxa de descarga que permitem, e a autonomia, pela quantidade de energia que armazenam. Atualmente, as baterias de iões de lítio são as mais utilizadas, garantem uma boa relação custo-desempenho e estão ainda a ser realizados estudos para o amadurecimento desta tecnologia. Também estão a ser estudadas e desenvolvidas as baterias sólidas que apresentam elevada densidade energética e um longo tempo de vida, mas que ainda estão numa fase muito precoce de utilização dado o seu elevado custo e processo de fabrico pouco desenvolvido.

Os conversores são sistemas fundamentais para a adaptação dos níveis de tensão necessários para o funcionamento correto dos outros sistemas. Como tal, novas opções estão a surgir com melhor eficiência e capacidade de múltiplos valores de tensão de saída, como é o caso dos conversores multinível do tipo modular (MMC). Associado aos conversores têm-se os semicondutores, que também se encontram em contínuo desenvolvimento, principalmente os *IGBTs*, que são, cada vez mais, utilizados em situações que envolvem potências superiores.

Perante estes argumentos verifica-se que os EVs, e os sistemas que os constituem, estão a ser estudados e desenvolvidos como uma alternativa aos convencionais ICEVs e que já apresentam valores de performance, autonomia e custo apetecíveis para uma gama alargada de compradores. Particularmente, os FCEVs começam a apresentar-se como um ótima alternativa pois apresentam um sistema de geração de energia elétrica *on-board* com recurso a hidrogénio que não produz qualquer outro produto secundário além de água, anulando por completo a questão da emissão de substâncias nocivas para a atmosfera terrestre, e que permite atingir valores de autonomia equiparáveis aos ICEVs, e os sistemas de armazenamento, baterias e supercondensadores no caso estudado, são capazes de providenciar energia de uma forma tal, que o desempenho destes veículos é semelhante, e em alguns pontos superior, aos convencionais.

Abordando a questão do mecanismo de controlo desenvolvido, o mesmo foi capaz de cumprir todos os objetivos pré-estabelecidos, colocando as células de combustível a operar no seu ponto ótimo de funcionamento, e a gestão do fornecimento da energia para a carga a ser realizada de forma sequencial (supercondensadores nos primeiros instantes e bateria de seguida), garantindo, sempre o fornecimento da totalidade de corrente necessária sem que o valor da tensão do barramento DC sofresse perturbações superiores aos valores definidos como aceitáveis e determinados por *standards* internacionais. Também se verificou que o sistema elétrico e mecanismo de controlo desenvolvido foram capazes de representar, e controlar, os modos de funcionamento associados ao sistema de armazenamento para o *powertrain* de um veículo elétrico com recurso a células de combustível.

Considerando todos os tópicos mencionados nesta secção e o trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação é possível concluir que os FCEVs são uma tipologia de EVs a considerar, que até já se encontram em comercialização, e que o mecanismo de controlo desenvolvido, tal como os já aplicados nos veículos disponíveis em mercado, é capaz de gerir a energia gerada, armazenada, ou

fornecida pelos diferentes sistemas de tal forma que o desempenho e a autonomia destes veículos já não são desvantagens a si associadas, e a preocupação ambiental seria, praticamente, eliminada, pelo menos a associada ao setor dos transportes, dada a ausência de emissões.

6.2 Trabalho Futuro

Após a análise realizada na secção anterior entende-se que o mecanismo de controlo desenvolvido deve ser testado ao nível laboratorial, verificando o seu comportamento na prática.

Com base nesses testes, devem ser verificadas possíveis alterações nos valores dos ganhos dos controladores PI que possam melhorar o desempenho do sistema de controlo.

Como trabalho futuro podem ser idealizados, implementados e testados outros mecanismos de controlo de forma a procurar métodos que obtenham resultados melhores que os alcançados anteriormente.

Em relação aos componentes a utilizar no sistema de armazenamento para o *powertrain* de um veículo elétrico deve continuar a ser realizada uma contínua investigação sobre possíveis inovações realizadas nesse âmbito, pois a questão da mobilidade convencional e suas características fundamentais deve ser revista, substituindo-se por uma forma mais sustentável que cumpra os requisitos impostos pelo público em geral.

Anexo A

Características de autocarros disponíveis em mercado

Carroçaria	Caetano e.City Gold	Proterra XR	Mercedes Citaro
Velocidade máxima	70 km/h	105 km/h	
Baterias	de 85 kWh até 250 kWh	de 220 até 330 kWh	até 243 kWh
Autonomia	até 200 km	até 350 km	
Motor	Motor síncrono Potência nominal 160 Kw @ 1500 rpm Binário nominal 1500 Nm @ 210 A Binário máximo 2500 Nm @ 350 A Velocidade máxima 3500 rpm	2 Motores Potência nominal 190 kW	2 Motores Potência nominal 125 kW

Tabela A.1: Características dos autocarros elétricos considerados [150] [151] [152]

Anexo B

Resultados dos testes em malha aberta (conversor da bateria)

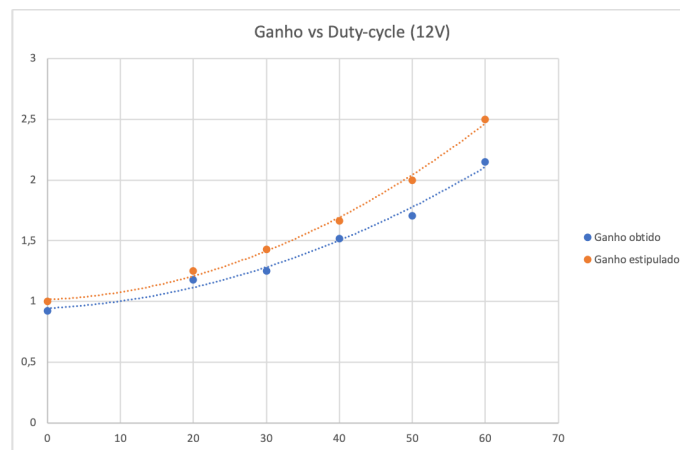


Figura B.1: Ganho em função do *duty-cycle* com $V_{in}=12V$

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}
20	11,9	14,04	1,25	1,18
30	11,9	14,89	1,43	1,25
40	11,9	18,08	1,67	1,52
50	11,9	20,30	2,00	1,71
60	11,9	25,59	2,50	2,15

Tabela B.1: Resultados obtidos para $V_{in} = 12V$

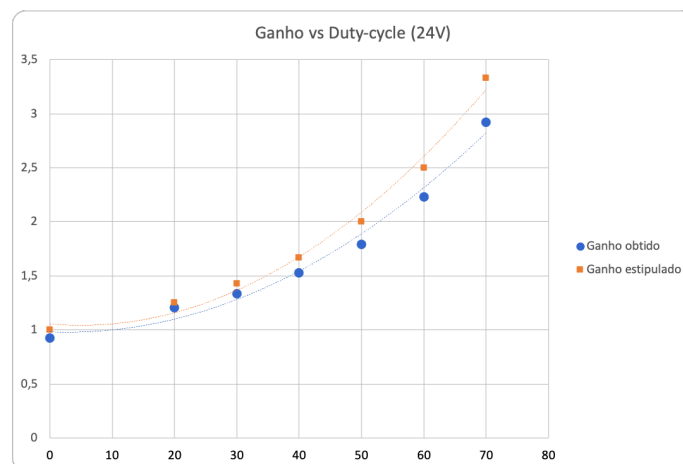


Figura B.2: Ganho em função do *duty-cycle* com $V_{in}=24V$

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}
20	23,3	28,04	1,25	1,20
30	23,2	30,93	1,43	1,33
40	23,2	35,48	1,67	1,53
50	23,0	41,26	2,00	1,79
60	23,0	51,36	2,50	2,23
70	23,1	67,54	3,33	2,92

Tabela B.2: Resultados obtidos para $V_{in} = 24V$

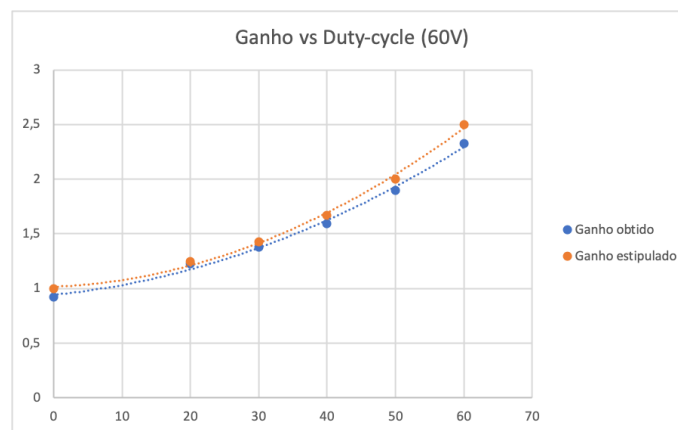


Figura B.3: Ganho em função do *duty-cycle* com $V_{in}=60V$

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}
20	60,7	74,27	1,25	1,22
30	60,7	83,54	1,43	1,38
40	60,6	96,61	1,67	1,59
50	60,4	114,45	2,00	1,89
60	54,9	127,64	2,50	2,32

Tabela B.3: Resultados obtidos para $V_{in} = 60V$

Anexo C

Resultados dos testes em malha aberta (conversor dos supercondensadores)

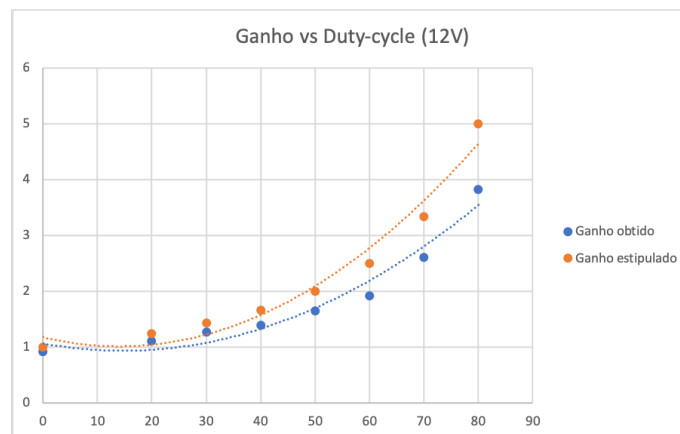
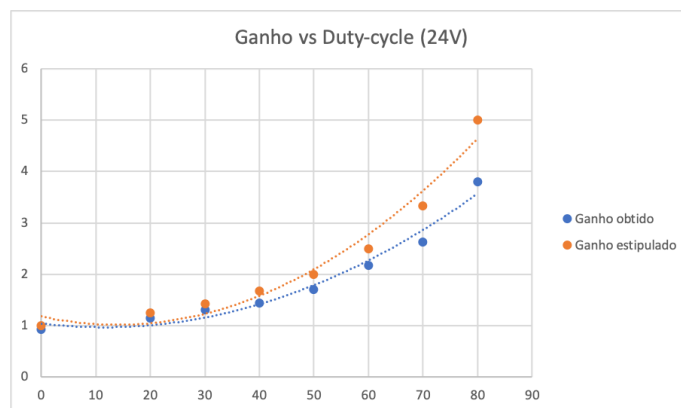


Figura C.1: Ganho em função do *duty-cycle* com $V_{in}=12V$

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}
20	12,0	13,27	1,25	1,11
30	12,0	15,24	1,43	1,27
40	12,0	16,68	1,67	1,39
50	12,0	19,75	2,00	1,65
60	12,0	23,06	2,50	1,92
70	12,0	31,26	3,33	2,60
80	12,0	45,90	5,00	3,82

Tabela C.1: Resultados obtidos para $V_{in} = 12V$

Figura C.2: Ganho em função do *duty-cycle* com $V_{in}=24V$

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}
20	23,7	26,98	1,25	1,14
30	23,7	31,03	1,43	1,31
40	23,7	33,97	1,67	1,43
50	23,7	40,29	2,00	1,70
60	23,7	51,56	2,50	2,18
70	23,7	62,10	3,33	2,62
80	23,7	90,22	5,00	3,81

Tabela C.2: Resultados obtidos para $V_{in} = 24V$

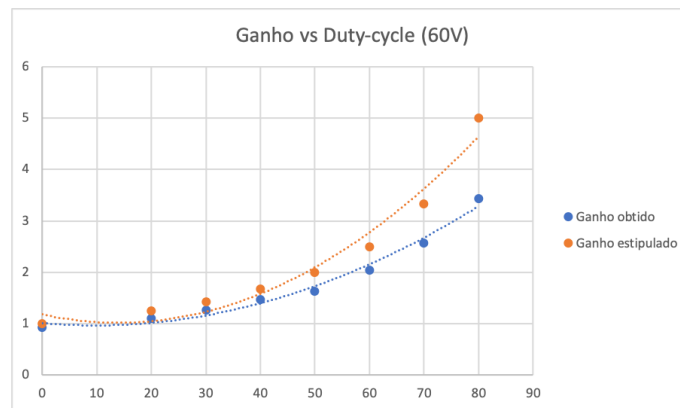


Figura C.3: Ganho em função do *duty-cycle* com $V_{in}=60V$

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}
20	60,6	67,11	1,25	1,11
30	60,7	76,44	1,43	1,26
40	60,7	88,69	1,67	1,46
50	60,5	98,23	2,00	1,62
60	60,5	123,21	2,50	2,03
70	60,3	155,23	3,33	2,57
80	60,1	206,32	5,00	3,43

Tabela C.3: Resultados obtidos para $V_{in} = 60V$

Anexo D

Valores de *deadtime*

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}	$\eta(\%)$
48	20,0	36,5	1,92	1,83	95,3
49	20,0	37,3	1,96	1,87	95,4
50	19,9	37,5	2,00	1,88	94,0

Tabela D.1: Resultados obtidos para $V_{in} = 20V$

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}	$\eta(\%)$
48	39,4	73,4	1,92	1,86	96,8
49	39,3	75,1	1,96	1,91	97,4
50	38,4	74,5	2,00	1,94	97,0

Tabela D.2: Resultados obtidos para $V_{in} = 40V$

Duty-cycle (%)	$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	G_{est}	G_{obt}	$\eta(\%)$
48	60,1	113,8	1,92	1,89	98,4
49	60,1	115,8	1,96	1,93	98,5
50	60,0	117,7	2,00	1,96	98,0

Tabela D.3: Resultados obtidos para $V_{in} = 60V$

Referências

- [1] Alireza 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*, volume 59. IEEE, 2010. doi:10.1109/TVT.2010.2047877.
- [2] Olivier JGJ Bouwman AF van der Maas CWM Berdowski JJM Veldt C Bloos JPJ Visschedijk AJH Zandveld PYJ Haverlag JL. Description of edgar version 2.0: A set of global emission inventories of greenhouse gases and ozone-depleting substances for all anthropogenic and most natural sources on a per country basis and on 1 degree x 1 degree grid. Relatório técnico, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu RIVM, 1996.
- [3] K. T. Chau e C. C. Chan. *Emerging energy-efficient technologies for hybrid electric vehicles*. Tese de doutoramento, Research Grants Council, 2007. doi:10.1109/JPROC.2006.890114.
- [4] Carbon dioxide emissions per source. URL: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/img/part/results_v42_fig_2.jpg.
- [5] ACEA. Passenger Car Fleet by Fuel Type | ACEA - European Automobile Manufacturers' Association, 2016. URL: <http://www.acea.be/statistics/tag/category/passenger-car-fleet-by-fuel-type>.
- [6] Luc Bovens. The Ethics of Dieselgate. *Midwest Studies in Philosophy*, 40(1):262–283, 2016. doi:10.1111/misp.12060.
- [7] Jinming Liu e Huei Peng. *Jinming Liu_Modeling and control of a power-split hybrid vehicle_IEEE trans. Control Syst. Technol._Nov 2008.pdf*. Tese de doutoramento, Automotive Research Center of the University of Michigan, 2008.
- [8] Trends in fuel type of new cars between 2016 and 2017, by country | ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. URL: <https://www.acea.be/statistics/article/trends-in-fuel-type-of-new-cars-between-2016-and-2017-by-country>.
- [9] Srdjan M Lukic e Student Member. *Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations*. Tese de doutoramento, Illinois Institute of Technology, 2005.
- [10] Antonio Sciarretta. *Control of Electric Vehicles*. Tese de doutoramento, Institut Français du Pétrole (IFP), 2007. doi:10.1109/EE.1947.6443775.

- [11] Zahra Amjadi e Sheldon S. Williamson. *Power-electronics-based solutions for plug-in hybrid electric vehicle energy storage and management systems*. Tese de doutoramento, Department of Electrical and Computer Engineering, Concordia University, Montreal, 2010. doi:10.1109/TIE.2009.2032195.
- [12] Esqueça os elétricos, o futuro são os híbridos - Targa 67. URL: <http://targa67.motor24.pt/esqueca-os-eletricos-futuro-sao-os-hibridos/?fbclid=IwAR3uxm{ }KNXV8CQpBgIrAkjM7dssaEL7{ }2xQRrM36bm8ge3dHfQVtvXXT{ }uA>.
- [13] International Association of hydrogen Energy - General. URL: <http://www.iahe.org/default.asp>.
- [14] International Association of hydrogen Energy - History. URL: <http://www.iahe.org/history.asp>.
- [15] Táxis a hidrogénio vão invadir Paris. URL: https://www.motor24.pt/motores/ecologia/taxis-a-hidrogenio-vao-invadir-paris/?utm_source=motor24.pt&utm_medium=recomendadas&utm_campaign=afterArticle&_ga=2.178771623.2050545914.1551269210-1041587693.1484308426&fbclid=IwAR0CEvfMH6UiwBbb44PjHK_P6Q0t7uz4mXS8.
- [16] How Toyota is helping Japan with its multibillion-dollar push to create a hydrogen-fueled society. URL: <https://www.cnbc.com/amp/2019/02/26/how-toyota-is-helping-japan-create-a-hydrogen-fueled-society.html?fbclid=IwAR1N8nH-ZiDnjfo0Idf5FKfcCusl5DR2t2o9KPPeEOFVpGZxSpnvlFW6xcY>.
- [17] Toyota produz 10 camiões que só emitem água quente – Observador. URL: <https://observador.pt/2019/04/27/toyota-produz-10-camioes-que-so-emitem-agua-quente/?fbclid=IwAR2-2sKMxkZXck-DPjfyIw6DXGSClVPtK5jBK5d503HXS-ast36syTLvfYhY>.
- [18] Fábrica da Toyota movida a...Hidrogénio - Turbo. URL: <https://www.turbo.pt/fabrica-da-toyota-movida-a-hidrogenio/?fbclid=IwAR1GHPXmYR3GhAoL0CUBiO4F32RVK1EFGBnVPkUf1RidMgtTmYXPdk2PUCw>.
- [19] Japan Sees Big Future in Hydrogen Cars. URL: <https://mobile.engineering.com/amp/18847.html?fbclid=IwAR3IhRYi3LzSTvek6RrQX1au0lyNCP8gAq-wPofAVbbeFMaaw3B6GB5RuHQ>.
- [20] Por que o carro movido a hidrogénio é a nova aposta da China? - 28/04/2019 - UOL Carros. URL: <https://carros.uol.com.br/noticias/reuters/2019/04/28/por-que-o-carro-movido-a-hidrogenio-e-a-nova-aposta-da-china.htm?fbclid=IwAR2FjABKi5b3Qjp3kbvUyCb36dUu9uhyoDLK4SADdECoxzut2BAmjAUz78g>.
- [21] Depois de incentivar os elétricos, China quer 100 mil carros abastecidos por hidrogénio nas ruas até 2025 - AUTO ESPORTE | Notícias. URL: https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2019/04/depois-de-incentivar-os-eletricos-china-quer-100-mil-carros-abastecidos-por-hidrogenio-ate-2025.html?fbclid=IwARlvouqOUy3Owpf3UaJ%5C_xfQimOaFRiK5bZo30kItJR2ay%5C_TaFgCEqxrOUs8.

- [22] Michelin une-se à Faurecia nas pilhas de combustível | Jornal das Oficinas. URL: https://www.jornaldasoficinas.com/pt/index.php/aftermarket/aftermarket-empresas/item/11630-michelin-une-se-a-faurecia-para-apostar-nas-pilhas-de-combustivel?fbclid=IwAR1xmXZtpqd8rd3YYmH5S3C8NGU_NMgin-6o1j65vT0x_XueUu5IwuvvgumI.
- [23] Exame Informática | Bosch e PowerCell juntam-se para produzir em massa células de combustível de hidrogénio. URL: http://exameinformatica.sapo.pt/mobilidade_inteligente/2019-04-29-Bosch-e-PowerCell-juntam-se-para-produzirem-em-massa-celulas-de-fbclid=IwAR2rRes0jX_-fq4it62lFKTKPZEv4yPXXaKJRTfsLPDiVTzlmgd_ZgjaFvE.
- [24] Produzir hidrogénio a partir do ar, o novo sistema da Toyota. URL: <https://www.portal-energia.com/hidrogenio-novo-sistema-toyota-14503/?fbclid=IwAR2XCfuA7-pl2nhyiz0Zvo4Fn5exxEYe2BY8kq6pSO75URVJBihKCXBauTE>.
- [25] O Hidrogénio renovável já é competitivo. URL: <https://www.portal-energia.com/hidrogenio-renovavel-145151/>.
- [26] The California Fuel Cell Partnership. Fuel cell revolution. *Family Court Review*, 2018. doi:10.1111/fcre.12351.
- [27] Hidrogénio aspira ser o combustível em um futuro não tão distante. URL: [https://olhardigital.com.br/carros-e-tecnologia/noticia/hidrogenio-aspira-ser-o-combustivel-em-um-futuro-nao-tao-distante/83204?fbclid=IwAR2T2{_\)Pr1pW5XehEUBWbWXcHhYcBjM1aW4UGTVrOG5sme8IGED1mwm0VJY](https://olhardigital.com.br/carros-e-tecnologia/noticia/hidrogenio-aspira-ser-o-combustivel-em-um-futuro-nao-tao-distante/83204?fbclid=IwAR2T2{_)Pr1pW5XehEUBWbWXcHhYcBjM1aW4UGTVrOG5sme8IGED1mwm0VJY).
- [28] L. T. Lam e R. Louey. *Development of ultra-battery for hybrid-electric vehicle applications*. Tese de doutoramento, CSIRO Energy Technology, Bayview Avenue, Clayton South, Vic. 3169, Australia, 2006. doi:10.1016/j.jpowsour.2006.03.022.
- [29] The Boston Consulting Group. O impacto da tecnologia no seguro automóvel: Espécie em vias de extinção? ou transformação? Relatório técnico, The Boston Consulting Group, 2017.
- [30] A mobilidade vai passar sempre pelo digital - Negócios Iniciativas - Jornal de Negócios. URL: <https://www.jornaldenegocios.pt/negocios-iniciativas/detalhe/a-mobilidade-vai-passar-sempre-pelo-digital>.
- [31] Advantages and Disadvantages of Hybrid Cars - Conserve Energy Future. URL: <https://www.conserve-energy-future.com/advantages-and-disadvantages-of-hybrid-cars.php>.
- [32] Alternative Energy Sources For Cars - Types and Advantages. URL: <https://alternativeenergysourcesv.com/alternative-energy-sources-for-cars/>.
- [33] Six alternative fuel sources for cars | LGM. URL: <https://www.lgm.ca/six-alternative-fuel-sources-for-cars/>.

- [34] External Combustion Engines | Applications, Advantages, Disadvantages. URL: <https://clubtechnical.com/external-combustion-engines>.
- [35] John B. Heywood. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, 1988.
- [36] Animated Engines - Wankel. URL: <http://www.animatedengines.com/wankel.html>.
- [37] Thomas P J Crompton. *Battery Reference Book*. Newnes, 2000. URL: <https://www.amazon.com/Battery-Reference-Book-Thomas-Crompton-ebook/dp/B0089EMB4?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=B0089EMB4>.
- [38] B. E. Conway. *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Springer, 1999. URL: <https://www.amazon.com/Electrochemical-Supercapacitors-Fundamentals-Technological-Applications/dp/0306457369?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0306457369>.
- [39] Electrical Engineers. Energy storage for power systems. *Choice Reviews Online*, 32(06):32–3333–32–3333, 2013. doi:10.5860/choice.32-3333.
- [40] Karl Georg Høyer. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, 16(2):63–71, 2008. doi:10.1016/j.jup.2007.11.001.
- [41] Yimin Gao Sebastien E. Gay Ali Emadi Mehrdad Ehsani, Anni Liu. *Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles*, volume 39. CRC PRESS, 2005.
- [42] History of Hybrid and Electric Vehicles from the First Cars until Today | Energetski portal Srbije. URL: <https://www.energetskiportal.rs/en/history-of-hybrid-and-electric-vehicles-from-the-first-cars-until-today/>.
- [43] What is a Starter Motor? - crankSHIFT. URL: http://www.crankshift.com/starter-motor/#History_of_the_Starter_Motor.
- [44] Tom Bradley Stanton e Ken. Hybrid electric vehicle Architectures. *Electric Vehicle Symposium 19 Proceedings*, páginas 91311–91311, 1994. URL: <https://www.google.com/patents/US5343970>.
- [45] evolution of toyota prius. URL: https://newsroom.toyota.co.jp/pages/prius20th/evolution/history/images/evolution_top_main_visual_pc.jpg.
- [46] *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives (Electrical and Computer Engineering)*. CRC Press, 2005. URL: <https://www.amazon.com/Handbook-Automotive-Electronics-Electrical-Engineering/dp/0824723619?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0824723619>.

- [47] Series vs Parallel vs Series/Parallel Drivetrains | Union of Concerned Scientists. URL: <https://www.ucsusa.org/clean-vehicles/electric-vehicles/series-vs-parallel-drivetrains#.XGCBIS2tHGI>.
- [48] Compare | Opel Ampera 1.4 (150 Hp) Hybrid | Chevrolet Volt 1.4 (84 Hp) Plug-in Hybrid. URL: <https://www.auto-data.net/en/compare?carId1=19559&carId2=31203&carId3=>.
- [49] OPEL_AMPERA_BLANC_GLACIER_SUMMIT_WHITE-555x258.png 555*258 píxeis. URL: https://www.lugenergy.pt/wp-content/uploads/OPEL_AMPERA_BLANC_GLACIER_SUMMIT_WHITE-555x258.png.
- [50] Chevrolet volt. URL: <https://www.cstatic-images.com/car-pictures/xl/USC40CHC311A021001.jpg>.
- [51] Compare | Honda Insight 1.0 i 12V (76 Hp). URL: <https://www.auto-data.net/en/compare?carId1=12361&carId2=&carId3=>.
- [52] Honda insight. URL: https://global.honda/content/dam/site/global/heritage/cq_img/timeline/products-history/automobile/Hybrid/1999Insight/01.jpg.
- [53] What is a planetary gearbox? URL: <https://www.apexdyna.nl/en/news/planetary-gearbox-introduction/>.
- [54] Compare | Toyota Prius 1.5 16V (70 Hp) | Lexus RX 400h 4WD (270 Hp). URL: <https://www.auto-data.net/en/compare?carId1=3553&carId2=5893&carId3=>.
- [55] Toyota prius. URL: https://www.toyota-global.com/m/showroom/toyota_design/award/prius_2nd_generation/images/01.jpg.
- [56] Lexus rx. URL: <https://s.aolcdn.com/commerce/autodata/images/60LEGEA1.jpg>.
- [57] Karin Jonasson. *Analysing Hybrid Drive System Topologies*. Tese de doutoramento, Lund University, 2002. URL: <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/5954222/587899.pdf>.
- [58] Mário A. Silva, Hugo Neves De Melo, João P. Trovão, Paulo G. Pereirinha, e Humberto M. Jorge. *World Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS 27), 2013 Barcelona, Spain, 17-20 Nov. 2013*. IEEE, Piscataway, NJ, 2013.
- [59] Baubek A A Dolgov. Environmental problems of the engine internal combustion. Relatório técnico. URL: http://www.culturaldiplomacy.org/academy/content/pdf/participant-papers/2012-04-emr/Environmental_problems_of_the_engine_internal_combustion_Dolgov.pdf.
- [60] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, e John M. Miller. *Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives*. Tese de doutoramento, Texas A&M University, 2007. doi:10.1109/JPROC.2007.892492.
- [61] Ahmet Teke Kamil Çagatay Bayındır, Mehmet Ali Gözükcük. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. 2010. arXiv:0974-5645, doi:10.1016/j.enconman.2010.09.028.

- [62] C C Chan. The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. URL: <https://www.eee.hku.hk/doc/ccchan/TheStateoftheArtofElectric,Hybrid,andFuelCellVehicles.pdf>, doi:10.1109/JPROC.2007.892489.
- [63] Hyundai tucson. URL: https://m.media-amazon.com/images/I/81wiwq8j0CL._UY560_.jpg.
- [64] Toyota mirai. URL: https://postmediadriving.files.wordpress.com/2015/11/toyota_mirai.png?w=800&h=520&crop=1.
- [65] Honda clarity. URL: <https://www.dublinhonda.com/wp-content/uploads/inventory-header-clarity.jpg>.
- [66] Bruno G Pollet, Iain Staffell, e Jin Lei Shang. Electrochimica Acta Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. *Electrochimica Acta*, 84:235–249, 2012. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.172>, doi:10.1016/j.electacta.2012.03.172.
- [67] C E Thomas. Fuel cell and battery electric vehicles compared. 2009. URL: https://ac.els-cdn.com/S0360319909008696/1-s2.0-S0360319909008696-main.pdf?_tid=39e6223c-dbf2-4580-b4c5-5ce10dfe48d7&acdnat=1547942545_08af5da9b7dbf0e80decb69b68a0b1e6, doi:10.1016/j.ijhydene.2009.06.003.
- [68] Fuel Cell Technology Information – Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/fuel_cell_technology.
- [69] A Basic Overview of Fuel Cell Technology. URL: <http://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm#q2>.
- [70] Fuel Cell Technology Principle. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Solid_oxide_fuel_cell.svg.
- [71] Reforma de Hidrocarbonetos a Vapor. URL: <https://pt.scribd.com/document/267812200/Reforma-de-Hidrocarbonetos-a-Vapor>.
- [72] N Benchouia, A E Hadjadj, A Derghal, L Khochemane, e B Mahmah. Modeling and validation of fuel cell PEMFC. *Revue des Energies Renouvelables*, 16:2–365, 2013. URL: https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v016_n2_texte_14.pdf.
- [73] Experimental Study and Modelling of a Fuel Cell PEMFC Fed Directly in Hydrogen / Oxygen. *Whcc 16*, (June):1–11, 2006. URL: <https://www.cder.dz/A2H2/Medias/Download/Proc%20PDF/posters/%5bGVI%5d%20Fuel%20cells,%20Internal%20combustion%20engines,%20heat%20&%20power/412.pdf>.
- [74] M Becherif, A Saadi, D Hissel, A Aboubou, e MY Ayad. Summary of the PEM Fuel Cell modeling. *Umc.Edu.Dz*, 6(November):1–6, 2010. URL: https://www.researchgate.net/publication/268438718_Summary_of_the_PEM_Fuel_Cell_modeling.
- [75] Kary Thanapalan, Jonathan Williams, Guoping Liu, e David Rees. *Modelling of a PEM fuel cell system*, volume 17. IFAC, 2008. URL: <http://dx.doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.00780>, doi:10.3182/20080706-5-KR-1001.1739.

- [76] R Seyezhai e B Mathur. Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of power sources*, 20(5):1–6, 2011. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775301007984>, doi:10.1149/1.1837667.
- [77] Jay Benziger, E. Chia, J. F. Moxley, e I. G. Kevrekidis. The dynamic response of PEM fuel cells to changes in load. *Chemical Engineering Science*, 60(6):1743–1759, 2005. URL: http://pemfc.princeton.edu/Documents/Publications/DynamicResponse_2004.pdf, doi:10.1016/j.ces.2004.10.033.
- [78] C.R. Bordallo, C. García, J. Brey, e J.M. Maza. Dynamic model and simulation of a PEM fuel cell for residential applications. 1(05):601–605, 2017. URL: <http://www.icrepq.com/icrepq07/345-bordallo.pdf>, doi:10.24084/repqj05.345.
- [79] Global Battery Markets Information – Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/global_battery_markets.
- [80] Lead-acid Rechargeable Battery Information - Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/archive/can_the_lead_acid_battery_compete_in_modern_times.
- [81] BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries – Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_214_summary_table_of_lead_based_batteries.
- [82] *Types of Batteries and Their Applications*. URL: <https://www.brighthubengineering.com/power-generation-distribution/123909-types-of-batteries-and-their-applications/>.
- [83] Nickel Cadmium NiCad Batteries. URL: <https://www.mpoweruk.com/nicad.htm>.
- [84] Nickel cadmium cell (NiCd) - RECHARGE Batteries > Recharge Batteries. URL: <https://www.rechargebatteries.org/about-batteries/technologies/nickel-cadmium-cell-nicd/>.
- [85] Electropaedia History of Science, Technology and Inventions. Key Scientists and Engineers and the Context and Explanations of their Contributions. URL: <https://www.mpoweruk.com/history.htm#recombinant>.
- [86] BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries – Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_215_summary_table_of_nickel_based_batteries.
- [87] Different Types of Batteries and their Applications. URL: <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-batteries>.
- [88] Nickel Metal Hydride NiMH Batteries. URL: <https://www.mpoweruk.com/nimh.htm>.
- [89] Nickel Metal Hydride (NiMH) Handbook and Application Manual. Relatório técnico. URL: http://data.energizer.com/pdfs/nickelmetalhydride_appman.pdf.
- [90] What is a Sodium Sulfur Battery? - UPS Battery Center. URL: <http://www.upsbatterycenter.com/blog/sodium-sulfur-battery/>.

- [91] BU-217: Summary Table of Alternate Batteries – Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_217_summary_table_of_alternate_batteries.
- [92] What is a Sodium-nickel chloride Na-NiCl₂ battery? - UPS Battery Center. URL: <https://www.upsbatterycenter.com/blog/sodium-nickel-chloride-na-nicl2-battery/>.
- [93] Lithium-ion Batteries Information - Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/archive/understanding_lithium_ion.
- [94] Asahi Kasei And Sony Commercialized The First Lithium-Ion Battery. URL: <http://www.kyria.co.uk/blog-the-25th-anniversary-of-the-lithium-ion-battery/>.
- [95] Advantages & Limitations of the Lithium-ion Battery - Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery.
- [96] BU-217: Summary Table of Alternate Batteries – Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_217_summary_table_{_}of_alternate_batteries.
- [97] Solid-State Batteries - MIT Technology Review. URL: <http://www2.technologyreview.com/news/423685/solid-state-batteries/>.
- [98] Toyota Working on Electric Cars That Charge in Minutes for 2022. URL: <https://www.popularmechanics.com/cars/hybrid-electric/news/a27468/toyota-solid-state-batteries-electric-cars-2022/>.
- [99] What is a solid-state battery and why is James Dyson so excited about it? | Alphr. URL: <https://www.alphr.com/science/1008867/solid-state-battery-dyson-toyota>.
- [100] Nancy J Dudney, William C West, e Jagjit Nanda. *Handbook of Solid State Batteries*, volume 6 de *Materials and Energy*. WORLD SCIENTIFIC, aug 2015. URL: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/9487>, doi:10.1142/9487.
- [101] American Chemical Society. *Chemical and engineering news : "news edition" of the American Chemical Society*, volume 95. The American Chemical Society, 2017. URL: <https://cen.acs.org/articles/95/i46/Solid-state-batteries-inch-way.html>.
- [102] Kevin S Jones, Nicholas G Rudawski, Isaiah Oladeji, Roland Pitts, e Richard Fox. The state of solid-state batteries. Relatório técnico 2. URL: <https://ceramics.org/tag/solid-state-batteries>.
- [103] Accelerated materials innovation. URL: https://www.ilika.com/images/uploads/general/Ilika_Stereax_FAQ-V1.01.pdf.
- [104] BU-217: Summary Table of Alternate Batteries – Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_217_summary_table_of_alternate_batteries.

- [105] Ultracapacitor and the Ultracapacitor Battery. URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/ultracapacitors.html>.
- [106] Ultracapacitors and supercapacitors | Skeleton Technologies. URL: <https://www.skeletontech.com/ultracapacitor-technology>.
- [107] Maxwell Technologies Ultracapacitors and Supercapacitors as a green, alternative energy resource. URL: <https://www.maxwell.com/products/ultracapacitors>.
- [108] Battery Management and Monitoring Systems BMS. URL: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm>.
- [109] Battery Management System, Electric Vehicle, Lifepo4, lithium ion. URL: <http://lianinno.com/battery-management-systems/>.
- [110] Cell Balancing and Battery Equalisation. URL: <https://www.mpoweruk.com/balancing.htm>.
- [111] Habiballah Rahimi-Eichi, Unnati Ojha, Federico Baronti, e Mo Yuen Chow. Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(2):4–16, 2013. doi:10.1109/MIE.2013.2250351.
- [112] Maria Silvina, Vieira Pereira, e R U A Castilho. CONVERSOR ELETRÔNICO COMUTADO PARA EQUILÍBRIO DO ESTADO DE CARGA EM CÉLULAS DE BATERIAS. (351):5–6, 2011.
- [113] Japan to harness power of electric-vehicle batteries in natural disasters — Quartz. URL: <https://tinyurl.com/yxlamjcl>.
- [114] Maria Carmen Falvo, Danilo Sbordon, I Safak Bayram, e Michael Devetsikiotis. *SPEEDAM 2014 : International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion : Ischia (Italy), 18th-20th June 2014*. IEEE, Piscataway, N.J, 2014. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6872107>.
- [115] Murat Yilmaz e Philip T. Krein. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5):2151–2169, 2013. doi:10.1109/TPEL.2012.2212917.
- [116] Charging modes (IEC-61851-1). URL: <http://circuitor.com/en/training/electric-vehicle/charging-modes-iec-61851-1>.
- [117] Leopold Kostal, Lenze Schmidhauser, Leoni Kabel, e Robert Bosch. Voltage Classes for Electric Mobility. Relatório técnico, ZVEI, 2013. URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/april/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility.pdf.
- [118] RinconMora_BatteryPerf_Fig1.gif. URL: https://m.eet.com/media/1053583/RinconMora_BatteryPerf_Fig1.gif.
- [119] V. V. Uchaikin, R. T. Sibatov, e S. A. Ambrozevich. Comment on "review of characterization methods for supercapacitor modelling". *Journal of Power Sources*, 307:112–113, 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.07.116>, doi:10.1016/j.jpowsour.2015.12.051.

- [120] A.B. Cultura e Z. M Salameh. Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application. (Cisia):876–882, 2015. doi:10.2991/cisia-15.2015.235.
- [121] Ganesh Madabattula e Sanjeev K Gupta. Modeling of Supercapacitor. Relatório técnico. URL: https://www.comsol.it/paper/download/152851/madabattula_paper.pdf.
- [122] Alin Grama, Lăcrimioara Grama, Dorin Petreuş, e Corneliu Rusu. Supercapacitor modelling using experimental measurements. *2009 International Symposium on Signals, Circuits and Systems, ISSCS 2009*, páginas 0–3, 2009. doi:10.1109/ISSCS.2009.5206168.
- [123] Battery Definitions – Battery University. URL: https://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions?fbclid=IwAR1w_cUpiaBrjNvHimZCDwRix2tI00cGZZ5KGhPlzmvFvRLBauePGL5aelig.
- [124] Energy Storage Definitions - PBES. URL: https://www.pbess.com/glossary/?fbclid=IwAR0pU3Gb5vtIKLOwU71MiQlq_dQ_6qaGPxoline44-Db0WDXBrMiJhliAuM.
- [125] Paulo Moisés Almeida da Costa. Efeito pelicular. URL: http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/paulomoises/Artigos_Máquinas/Efeito%20pelicular/skin.PDF.
- [126] B. Singh, A. Chandra, e K. Al-Haddad. *Power quality problems and mitigation techniques*. Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2015.
- [127] Modulation - Index. URL: https://www.tutorialspoint.com/communication/modulation_index.asp.
- [128] Steve Winder. *Power supplies for LED driving*. Elsevier/Newnes, Amsterdam Boston, 2008.
- [129] Circuit Design Guide for DC/DC Converters (2/10) How to select the Switching Frequency. URL: <https://www.torexsemi.com/technical-support/application-note/design-guide-for-dcdc-converter/selecting-switching-frequency/>.
- [130] Description of Galvanic Isolation. URL: <https://www.schneider-electric.co.in/en/faqs/FA157465/>.
- [131] Galvanic Isolation: Purpose and Methodologies. URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/galvanic-isolation-purpose-and-methodologies/>.
- [132] Dakshina M. Bellur e Marian K. Kazimierczuk. DC-DC converters for electric vehicle applications. *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, EEIC 2007*, páginas 286–293, 2007. doi:10.1109/EEIC.2007.4562633.
- [133] Muhammad H Rashid. *Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações*, 1999.
- [134] Introduction to Linear Voltage Regulators. URL: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/introduction-to-linear-voltage-regulators>.

- [135] Difference Between Linear Regulator and Switching Regulator | Electronics Basics | ROHM. URL: <https://www.rohm.com/electronics-basics/dc-dc-converters/linear-vs-switching-regulators>.
- [136] Transistors - learn.sparkfun.com. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/transistors/all#operation-modes>.
- [137] Non-Isolated DC-DC Converters. URL: <https://www.electronicdesign.com/power/non-isolated-dc-dc-converters>.
- [138] Weblet Importer. URL: <https://nptel.ac.in/courses/108103009/module4/lec11/1.html>.
- [139] Study of Bidirectional of DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicle Application. 2015. URL: <https://www.ijset.in/wp-content/uploads/2015/12/10.2348.ijset1115101.pdf>.
- [140] Topology and Application of Bidirectional Isolated DC-DC Converters. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=5944690>.
- [141] Fahad Khan, Yu Tang, e Gong Sicheng. A Bidirectional Resonant DC-DC Converter for Electrical Vehicle Charging/Discharging Systems. Relatório técnico 5, 2017. URL: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume177/number5/khan-2017-ijca-915756.pdf>.
- [142] Prof. Dr.-Ing. M. Henke. Analysis and design of resonant dc/dc converters for automotive applications. Relatório técnico. URL: <http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/15115/629237.pdf>.
- [143] AC-DC Converters. URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/connectivity/ac-dc-converters.html>.
- [144] IEEE Xplore Full-Text PDF:. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=7527038>.
- [145] A comparative analysis and implementation of various PLL techniques applied to single-phase grids. Relatório técnico. URL: <https://repositorio.inesctec.pt/bitstream/123456789/2160/1/PS-07184.pdf>.
- [146] Mithat C. Kisacikoglu, Burak Ozpineci, e Leon M. Tolbert. EV/PHEV bidirectional charger assessment for V2G reactive power operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(12):5717–5727, 2013. doi:10.1109/TPEL.2013.2251007.
- [147] Jose Rodríguez, Jose I Leon, Samir Kouro, Ramon Portillo, e Maria A M Prats. The Age of Multilevel Converters Arrives. (June):28–39, 2008. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=4544743>, doi:10.1109/MIE.2008.923519.
- [148] Abraham Marquez, Jose I. Leon, Sergio Vazquez, Leopoldo G. Franquelo, e Marcelo Perez. A comprehensive comparison of modulation methods for MMC converters. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017-Janua:4459–4464, 2017. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8216768>, doi:10.1109/IECON.2017.8216768.

- [149] MIT. A Guide to Understanding Battery Specifications MIT Electric Vehicle Team, December 2008. *Mit*, 282(2):549–554, 2009. URL: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf, doi:10.1007/s10967-009-0287-0.
- [150] e.City Gold | CaetanoBus. URL: <http://caetanobus.pt/pt/buses/e-city-gold/>.
- [151] CATALYST® : 35 FOOT BUS PERFORMANCE SPECIFICATIONS FC Series XR Series E2 Series. Relatório técnico. URL: <https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2018/05/Proterra-Catalyst-35-ft-spec-sheet-Sept-2018.pdf>.
- [152] The new eCitaro. Relatório técnico. URL: <https://www.mercedes-benz-bus.com/content/dam/mbo/markets/common/buy/services-online/download-technical-brochures/images/content/regular-service-buses/ecitaro/MB-EC-2-EN-1018.pdf>.
- [153] Relation between kWh and Ah ? | Tesla. URL: https://forums.tesla.com/en_AU/forum/forums/relation-between-kwh-and-ah.
- [154] PRODUCT SPECIFICATIONS FEATURES AND BENEFITS • DuraBlue™ Shock and Vibration Technology 1. Relatório técnico. URL: https://www.maxwell.com/images/documents/K2Series_DS_1015370_5_20141104.pdf.
- [155] Diy dc/dc boost calculator. URL: <https://learn.adafruit.com/diy-boost-calc/the-calculator>.
- [156] Circuit design guide for dc/dc converters (3/10) how to select the semiconductors. URL: <https://www.torexsemi.com/technical-support/application-note/design-guide-for-dcdc-converter/selecting-fet/>.
- [157] (PDF) Design of a Half-Bridge DC/DC Converter for Supercapacitor based Hybrid PV Storage System. URL: https://www.researchgate.net/publication/311913429_Design_of_a_Half-Bridge_DCDC_Converter_for_Supercapacitor_based_Hybrid_PV_Storage_System?fbclid=IwAR2zsbErOKnIe2yIMDxfPD3JN_WlDKViazsqWz_whoPVMICeFmEm_uVQ-IM.
- [158] Alex Pokryvailo. HV energy dosing dc-To-dc converter in PWM mode. *2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, IPMHVC 2016*, páginas 91–94, 2017. doi:10.1109/IPMHVC.2016.8012855.
- [159] CA (US) Jon C. Taenzer, Los Altos. WIDE AUDIO BANDWIDTH TRANSDUCTION METHOD AND DEVICE. 2003. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/1d/a9/78/49c296457cd1cd/US6631197.pdf>.
- [160] Rigvendra Kumar Vardhan, T Selvathai, Rajaseeli Reginald, e P Sivakumar. Modelling of Multi Inductor-based Balancing of Battery Pack for Electrical Mobility. 69(3):266–273, 2019.
- [161] Maria Silvina, Vieira Pereira, e R U A Castilho. CONVERSOR ELETRÔNICO COMUTADO PARA EQUILÍBRIO DO ESTADO DE CARGA EM CÉLULAS DE BATERIAS. (351):5–6, 2011.

- [162] Low Dc e E U Rohs. High Current Inductor. páginas 267–268. URL: <http://magnetic-components.mpsind.com/Asset/H1305-301{ }Datasheet.pdf>.
- [163] B O X Capacitors, Igbt Applications, e Technical Data. C4B C4Bs. URL: https://content.kemet.com/datasheets/F3303_C4B.pdf.
- [164] Alex Pokryvailo, Costel Carp, e Clifford Scapellati. High-power high-performance low-cost capacitor charger concept and implementation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(10 PART 1):2734–2745, 2010. doi:10.1109/TPS.2010.2051959.
- [165] Printed Circuit, Board Mount, e Power Film. 500 - 1 , 500 VDC , for DC Link (Automotive Grade). páginas 1–16, 2018. URL: http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/756/KEM_F3114_C4AQ.pdf.
- [166] Current Transducers HY 5 .. 25-P. URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/hy_5_25-p.pdf.
- [167] AVAGO Technologies. Precision Optically Isolated Voltage Sensor. (March):1–12, 2011. URL: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-3563EN>, doi:10.1186/1755-8166-7-33.
- [168] Infineon Technologies Ag. Microcontroller Series XMC4500. 2013. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-XMC4500-DS-v01_05-EN.pdf?fileId=5546d46254e133b40154e1b56cbe0123.