



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Carregamento Wireless de Bicicletas Eléctricas**

**Arlindo Isaac Candongo Gole**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**  
(2º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

**Covilhã, Junho de 2018**



## **Dedicatória**

Aos meus sobrinhos Tiago, Carla, Carlinhos, Bilson e Jelson.



## Agradecimentos

À Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, pelos conhecimentos transmitidos.

À professora doutora Maria do Rosário Alves Calado e ao Engenheiro José Pombo pela orientação, ajuda, disponibilidade, paciência e partilha de conhecimentos.

A todos os professores do Departamento de Eletromecânica, em especial aos professores do curso de Engenharia Eletrotécnica e Computadores pelo ensino de qualidade, contribuindo para o enriquecimento dos meus conhecimentos.

Ao Rui Mendes pela ajuda e partilha de conhecimentos práticos nesta dissertação.

Às minhas irmãs pelo suporte, encorajamento e apoio moral, espiritual e financeiro prestados como sempre, nos bons e nos maus momentos da minha vida. Vocês são as minhas Heroínas.

António Manuel Castro Canhanza, só Deus sabe o quão grato estou pela grande ajuda que me tens dado ao longo deste período da minha vida, e não só. Deus te guarde.

Domingos Paciência Viye obrigado pelos valores que me foste transmitindo ao longo dos gloriosos dias da Mocidade e não só. Obrigado ainda pela orientação e força. Quando eu crescer, quero ser como tu.

Bruno Silva, obrigado pela ajuda e esclarecimento prestados aquando das minhas dúvidas e dificuldades com o matlab. És um dos melhores portugueses que eu conheci.

Aos meus amigos e colegas de batalha desde a licenciatura, obrigado pela paciência e ajuda.

À minha namorada pelo apoio incondicional, coragem e contagem regressiva dos dias. Obrigado pela força dada diariamente e pela compreensão dos sacrifícios feitos em prol desta dissertação.

Por fim, o mais importante dos meus agradecimentos dirijo a Deus que tornou todos os pontos acima possíveis e pelo favor imerecido que achou em mim.



## Resumo

O sistema de carregamento indutivo (IPT) é amplamente investigado dentro dos métodos modernos para carregamento de baterias, providenciando uma solução sem fios tanto para aplicações automotivas como para dispositivos portáteis. Para aplicações automotivas, o carregamento da bateria por transferência de energia indutiva está a ganhar grande popularidade em relação ao carregamento convencional, pois este é feito de forma automática sem a intervenção do utilizador. O sistema de carregamento indutivo (IPT) funciona da mesma forma que um transformador, no qual a energia é transferida de uma bobina para a outra por meio de um campo magnético variável.

Nesta dissertação é feita a análise de um sistema de transferência de energia por indução sem fios para o carregamento de baterias de bicicletas elétricas. Para o mesmo sistema, é considerada uma topologia não ressonante e uma topologia ressonante. É apresentado o modelo matemático para cada topologia, os quais são simulados em ambiente Simulink (Matlab) para diferentes números de espiras por bobina. As características eletromagnéticas de cada sistema são calculadas pelo método de elementos finitos através do Software MagNet.

De acordo com os resultados obtidos pelas simulações dos respetivos modelos é feita a análise do desempenho das diferentes configurações consideradas.

## Palavras-chave

E-bikes, sistema de carregamento IPT, topologias de compensação, carregamento de baterias.





## Abstract

Inductive charging system (IPT) is extensively investigated within modern battery charging methods, providing a wireless solution for both automotive applications and portable devices. For automotive applications, battery charging by inductive power transfer is gaining a lot of popularity over conventional charging, as this is automatically done without user intervention. Inductive charging system (IPT) works in the same way as a transformer, in which the energy is transferred from one coil to another by means of a variable magnetic field.

In this dissertation the wireless power induction transfer analysis for electric bicycle battery charging is made. For the same system, it is considered a non-resonant topology and a resonant topology. The mathematical model is presented for each topology, which are simulated in Simulink environment (Matlab) for different numbers of turns per coil. The electromagnetic characteristics of each system are calculated using the finite element method using MagNet Software.

According to the results obtained by the simulations of the respective models, the performance of the different configurations considered is analyzed.

## Keywords

E-bikes, IPT charging system, compensation topologies, battery charging.



*" O resultado dessas investigações o futuro dirá; mas sejam quais forem, e qualquer que seja esse princípio, serei recompensado o suficiente se mais tarde for admitido que contribuí uma parte, por pequena que seja, para o avanço da ciência. "*

*Nikola Tesla*



# Índice

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Introdução e estado de arte dos sistemas de carregamento</b> .....	<b>1</b>
1.1. Sistema de carregamento condutivo.....	2
1.2. Sistema de carregamento sem fios.....	5
1.2.1. Carregamento por acoplamento de ímanes (PMPT) .....	6
1.2.2. Carregamento capacitivo (CPT) .....	6
1.2.3. Carregamento indutivo (IPT) .....	7
1.2.4. Carregamento indutivo ressonante (RAPT) .....	7
1.3. Sistema de carregamento indutivo ressonante .....	7
1.3.1. Propostas de carregamento indutivo ressonante .....	8
1.3.2. Sistemas de carregamento indutivo ressonante existente .....	10
1.4. Enquadramento.....	12
1.4.1. Legislação .....	13
1.5. Motivação e objetivos .....	13
1.6. Estrutura da dissertação .....	13
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>15</b>
<b>Bicicleta elétrica</b> .....	<b>15</b>
2.1. Estado da arte .....	15
2.2. Mercado das bicicletas elétricas.....	16
2.3. Bicicletas Elétricas no Mercado.....	17
2.4. Motores elétricos .....	19
2.4.1. Motor de relutância variável .....	20
2.4.2. Motor de indução.....	20
2.4.3. Motor síncrono de ímanes permanentes .....	21
2.4.3.1. Motor BLDC.....	22
2.5. Controladores de motores aplicados à Bicicletas Elétricas .....	23
2.5.1. Sensor de efeito Hall .....	24
2.5.2. Sensor Ótico.....	26
2.6. Consumo e exigência de energia .....	27
2.6.1. Terreno plano .....	27
2.6.2. Terreno montanhoso.....	28
2.7. Conclusões.....	28
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>29</b>
<b>Tecnologia de baterias</b> .....	<b>29</b>
3.1. Introdução .....	29

3.2.	Parâmetros de uma bateria .....	31
3.2.1.	Capacidade .....	31
3.2.2.	Taxa C.....	31
3.2.3.	Estado de carga (SOC) .....	31
3.2.4.	Profundidade de descarga (DOD).....	32
3.2.5.	Efeito de memória .....	32
3.2.6.	Energia e potência específica.....	32
3.2.7.	Tensão na célula e na bateria .....	33
3.2.8.	Capacidade da célula e da bateria.....	33
3.2.9.	Taxa de retenção ou auto-descarga .....	33
3.2.10.	Resistência interna .....	34
3.2.11.	Vida útil .....	34
3.3.	Baterias de ácido-chumbo .....	34
3.4.	Bateria baseadas no níquel.....	35
3.4.1.	Baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) .....	35
3.4.2.	Bateria de hidreto metálico de níquel (NiMH) .....	36
3.5.	Baterias baseadas no lítio .....	37
3.6.	Métodos de carregamentos das baterias.....	39
3.6.1.	Corrente constante/tensão constante .....	39
3.6.2.	Multistage .....	40
3.6.3.	Pulso de corrente .....	40
3.7.	Gestão de carregamento das Baterias.....	42
3.7.1.	BMS .....	42
3.8.	Conversores .....	43
3.8.1.	Conversores DC-DC para correção do fator de potência .....	43
3.8.2.	Métodos de controlo.....	45
3.8.2.1.	Controlo Primário.....	45
3.8.2.2.	Controlo Secundário.....	46
3.9.	Conclusões.....	47
<b>Capítulo 4</b> .....		<b>49</b>
<b>Sistema de carregamento indutivo ressonante</b> .....		<b>49</b>
4.1.	Introdução.....	49
4.2.	Princípio de funcionamento.....	49
4.3.	Topologias de compensação.....	50
4.3.1.	Fator de qualidade.....	52
4.3.2.	Filtro .....	52
4.3.3.	Espectro Eletromagnético .....	53
4.4.	Estrutura de acoplamento magnético .....	54
4.4.1.	Indutores .....	54

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

4.4.1.1. Materiais.....	54
4.5. Conclusão.....	55
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>57</b>
<b>Simulação do sistema de carregamento sem fios.....</b>	<b>57</b>
5.1. Introdução.....	57
5.2. Simulação de carregamento indutivo sem topologia ressonante.....	57
5.3. Simulação de carregamento indutivo com topologia ressonante.....	61
5.4. Conclusão e análise dos resultados.....	63
<b>Capítulo 6.....</b>	<b>65</b>
<b>Conclusões e trabalho futuro.....</b>	<b>65</b>
6.1. Conclusões.....	65
<b>Referências.....</b>	<b>67</b>





## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Diagrama de blocos de um carregador de bateria convencional [3].....	2
Figura 1.2 - Tomadas utilizadas no modo 1 de carregamento: (a) Tomada Industrial IEC 60309 monofásica; (b) Tomada doméstica monofásica <i>Schüko</i> [4].....	2
Figura 1.3 - Posto de carregamento MCC10 para bicicletas eléctricas [5].....	3
Figura 1.4 - Posto de carregamento de bicicletas [6].....	4
Figura 1.5 - Posto de carregamento de bicicletas por energia solar [7].....	4
Figura 1.6 - Cronograma do desenvolvimento da TESH [13].....	6
Figura 1.7 - Sistema de carregamento indutivo ressonante aplicado a E-bike [20].....	8
Figura 1.8 - Carregamento sem fio de E-bike proposto em [34].....	8
Figura 1.9 - Carregamento sem fios de E-bike proposto pela <i>RCC</i> [35].....	9
Figura 1.10 - Carregamento sem fio de E-bike proposto pela <i>SEW Eurodrive</i> [35].....	9
Figura 1.11 - Posto de carregamento indutivo ressonante [36].....	10
Figura 1.12 - Posto de carregamento indutivo ressonante da empresa Daymak Inc. - EC1 SE [37].....	10
Figura 1.13 - Posto de carregamento indutivo em Lisboa [38].....	11
Figura 2.1 - Primeira bicicleta eléctrica patenteada [43].....	15
Figura 2.2 - Bicicleta eléctrica com motor no cubo da pedaleira [44].....	15
Figura 2.3 - Bicicleta eléctrica com motor sob a roda traseira, friccionando-a [45].....	16
Figura 2.4 - Previsão de venda de E-bikes na China e no resto do mundo: 2016-2025 [48].....	17
Figura 2.5 - Bicicleta eléctrica-híbrida de marca <i>BMW</i> [53].....	17
Figura 2.6 - Bicicleta eléctrica de marca <i>Mercedes</i> [54].....	18
Figura 2.7 - Bicicleta eléctrica solar [55].....	18
Figura 2.8 - Bicicletas eléctricas instaladas em Lagoa [56].....	19
Figura 2.9 - Classificação dos motores eléctricos [57].....	19
Figura 2.10 - Motor de relutância variável [57].....	20
Figura 2.11 - Motor de indução [57].....	21
Figura 2.12 - Motor eléctrico BLDC [58].....	22
Figura 2.13 - Motor BLDC - estrutura interna simplificada(a); enrolamentos do motor (b) [59].....	22
Figura 2.14 - Controlador de motor BLDC do fabricante <i>ElectroCraft</i> [57].....	24
Figura 2.15 - Princípio de funcionamento do efeito <i>Hall</i> [57].....	24
Figura 2.16 - Sensores de efeito <i>Hall</i> em função da disposição dos ímanes permanentes [3].....	25
Figura 2.17 - Circuito de comando de um motor BLDC de duas fases [61].....	26
Figura 2.18 - Sensor ótico e seu esquema eléctrico [57].....	27
Figura 2.19 - Peso do conjunto ciclista/ E-bike em terreno plano versus curva de velocidade [63].....	27

Figura 2.20: Efeito do gradiente: exigência de potência versus velocidade [63] .....	28
Figura 3.1 - Células de bateria ligadas em série [65] .....	29
Figura 3.2 - Células de bateria ligadas em paralelo [65] .....	30
Figura 3.3 - Esquema equivalente de uma bateria. ....	30
Figura 3.4 - Energia e potência específicas das diferentes baterias [67].....	33
Figura 3.5 - Algoritmo de carregamento CC/TC [70] .....	40
Figura 3.6 - Algoritmo de carregamento multistage [70] .....	40
Figura 3.7 - Método de carregamento pulsado: a) VFPC; b) VDPC [70] .....	41
Figura 3.8 - Comparação dos algoritmos de carregamento das baterias. Adaptado de [70]. ..	42
Figura 3.9 - Conversor <i>boost</i> (a), conversor <i>buck</i> (b) e conversor <i>buck-boost</i> (c) [78].....	44
Figura 3.10 - Conversor <i>boost</i> sem ponte (a), conversor PFC <i>buck-boost</i> sem ponte (b), conversor PFC <i>pseudo-boost</i> sem ponte (c), conversor PFC <i>SEPIC</i> sem ponte (d) e retificador <i>cuk</i> sem ponte (e) [78].....	45
Figura 3.11 - Conversor DC-AC de meia ponte no lado primário [35] .....	45
Figura 3.12 - Conversor DC-AC de ponte completa no lado primário [35] .....	46
Figura 3.13 - Retificador passivo e estágio DC-DC no lado secundário [35] .....	46
Figura 3.14 - Conversor AC-DC de dois díodos e dois MOSFETs [35] .....	47
Figura 4.1 - Esquema elétrico do modelo de acoplamento entre o primário e o secundário. .	49
Figura 4.2 - Topologias de compensação: (a) SS, (b) SP, (c) PS e (d) PP [81].....	51
Figura 4.3 - Filtro LC .....	52
Figura 4.4 - Comprimento de onda de uma onda sinusoidal [91] .....	53
Figura 4.5 - Bobinas elípticas (a), circulares (b) e quadradas(c) [92]. ....	55
Figura 4.6 - Bobinas com escudo de uma camada (a) e de duas camadas (b) [93]. ....	55
Figura 5.1 - Circuito elétrico do modelo com representação da bateria. ....	58
Figura 5.2 - Modelo do circuito indutivo em Simulink.....	59
Figura 5.3 - Acoplamento indutivo com topologia ressonante SS. ....	61
Figura 5.4 - Modelo do circuito indutivo ressonante em Simulink .....	62

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Modos e tipos de carregamento [4] .....	3
Tabela 1.2 - Comparativo entre as tecnologias de TESH [18] .....	7
Tabela 2.1 - Comparativo entre os motores BLDC e BLAC [3], [59].....	23
Tabela 2.2 - Tabela de comutação de sensores de efeito Hall para cada estado do rotor [57]	25
Tabela 3.1 - Características da bateria de ácido-chumbo [65], [66], [68] .....	35
Tabela 3.2 - Características da bateria de Níquel-Cádmio [64], [65], [69].....	36
Tabela 3.3 - Características da bateria de Hidreto Metálico de Níquel [64], [69] .....	37
Tabela 3.4 - Características da bateria de Lítio [65], [66], [69] .....	38
Tabela 4.1 - Comparação entre diferentes topologias de compensação. Adaptado de [82] ...	51
Tabela 5.1 - Características da estrutura de acoplamento.....	58
Tabela 5.2 - Resultados obtidos do Magnet para a distância de 30 mm .....	59
Tabela 5.3 -Potência média transferida a uma frequência de 1 kHz. ....	60
Tabela 5.4 -Potência média transferida a uma frequência de 10 kHz. ....	60
Tabela 5.5 -Potência média transferida a uma frequência de 50 kHz. ....	60
Tabela 5.6 -Potência média transferida a uma frequência de 100 kHz. ....	60
Tabela 5.7 -Potência média transferida a uma frequência ressonante de 1 kHz. ....	62
Tabela 5.8 -Potência média transferida a uma frequência ressonante de 10 kHz. ....	63
Tabela 5.9 -Potência média transferida a uma frequência ressonante de 50 kHz. ....	63
Tabela 5.10 -Potência média transferida à uma frequência ressonante de 100 kHz. ....	63



## Lista de Acrónimos

AC	Corrente Alternada
Ah	Ampère hora
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
BMS	Sistema de Gestão de Baterias
BLAC	<i>Brushless Alternating Current</i>
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i>
CC	Corrente Constante
CPT	Transferência de Energia Capacitiva
DC	Corrente Contínua
DoD	Profundidade de Descarga
E-bike(s)	Bicicleta(s) Eléctrica(s)
EV	Veículo Eléctrico
EN	Norma Europeia
HEV	Veículo Eléctrico Híbrido
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
IPT	Transferência de Energia Indutiva
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo Semicondutor de Óxido de Metal
NP	Norma Portuguesa
NASA	Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica Americana
NiCd	Níquel cádmio
NiHM	Hidreto metálico de níquel
Ni-OOH	Oxi-Hidróxido de Níquel
Nd-Fe-B	Neodímio-ferro-boro
PMPT	Transferência de Energia por Ímanes Permanentes
PHEV	Veículo Eléctrico Híbrido Plug-in
PSO	Otimização por Enxame de Partículas
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RAPT	Transferência de Energia Indutiva Ressonante
Sm-Co	Samário-Cobalto
SoC	Estado de Carga
TESF	Transferência de Energia Sem Fios
TC	Tensão Constante
VFPC	<i>Variable frequency pulse charge</i>
VDPC	<i>Variable duty pulse current</i>



## Nomenclatura

Símbolo	Designação	Unidades S.I
$i_p$	Corrente na bobina primária	[A]
$i_s$	Corrente na bobina secundária	[A]
$L_p$	Indutância própria da bobina do primário	[H]
$L_s$	Indutância própria da bobina do secundário	[H]
$V_p$	Tensão de alimentação	[V]
$V_s$	Tensão de saída do circuito	[V]
$k$	Fator de acoplamento magnético	-
$M$	Indutância mútua	[H]
$R_L$	Resistência representativa da bateria	[ $\Omega$ ]
$d$	Distância entre as bobinas	[mm]
$Q_s$	Fator de qualidade	-
$C_p$	Capacidade do condensador no primário	[F]
$C_s$	Capacidade do condensador no secundário	[F]
$R_p$	Resistência interna da bobina do primário	[ $\Omega$ ]
$R_s$	Resistência interna da bobina do secundário	[ $\Omega$ ]





# Capítulo 1

## Introdução e estado de arte dos sistemas de carregamento

As bicicletas elétricas (E-bikes) estão a ascender cada vez mais no sector dos transportes, no que tange a mobilidade elétrica sustentável. A otimização dos motores elétricos, bem como os avanços na eletrónica de potência, juntamente com a evolução das tecnologias de baterias estão por detrás desta ascensão imparável.

A eletricidade neste caso, constitui o combustível para este tipo de veículo, recebido através da rede elétrica e armazenado na bateria para propulsão do motor. Os níveis de armazenamento variam em função da composição interna de cada tecnologia de bateria.

Atualmente, as baterias de E-bikes apresentam várias tecnologias, entretanto, as usadas mais recentemente são as de lítio, acompanhadas de um sistema de gestão a bordo que controla os parâmetros das células. Estas baterias têm boa capacidade de armazenamento, tempo de carregamento bastante reduzido e uma autonomia excelente e duradora. O carregamento convencional de baterias das E-bikes é feito através da ligação entre o posto de carregamento/tomada e a E-bike. Em ambientes domésticos, este tipo de carregamento é favorável pois não requer potências elevadas [1].

Porém, o cabo constitui uma desvantagem pelo fato da intervenção do utilizador e dos riscos associados, principalmente o de eletrocussão. Tem-se verificado que foram várias as propostas tanto do meio académico como do meio empresarial, advindas de investigações cujo objetivo é transferir a energia entre o posto de carregamento e a E-bike, sem o uso de cabos. A seguir, apresenta-se o estado de arte dos sistemas de carregamento de E-bike existentes, bem como as propostas em fase de investigação.

## 1.1. Sistema de carregamento condutivo

Este tipo de carregamento existe desde os primórdios da existência de E-bikes, sendo feito pelo contacto direto entre o posto de carregamento e o próprio veículo, por meio de tomadas apropriadas e cabos elétricos específicos, alimentado a partir da rede elétrica (Plug-in) ou de fontes de energia renováveis [2] . O carregador, Figura 1.1, tem a função de retificação AC/DC para carregar a bateria. A Figura 1.2 mostra as tomadas utilizadas no modo de carregamento de E-bikes. Tomando em atenção as normas de segurança relativas ao revestimento de materiais, proteções contra curto-circuitos e, em especial, a proteções de pessoas, este modo constitui uma alternativa eficiente e segura.

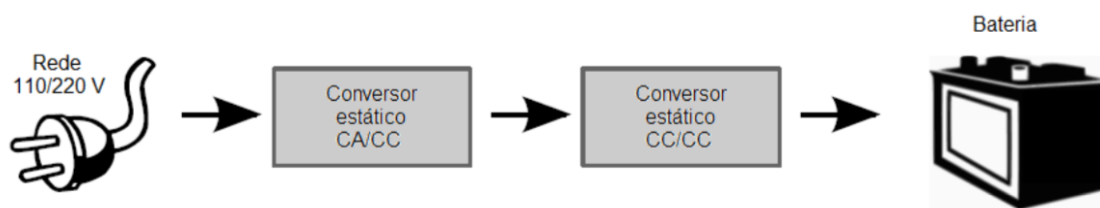


Figura 1.1 - Diagrama de blocos de um carregador de bateria convencional [3]

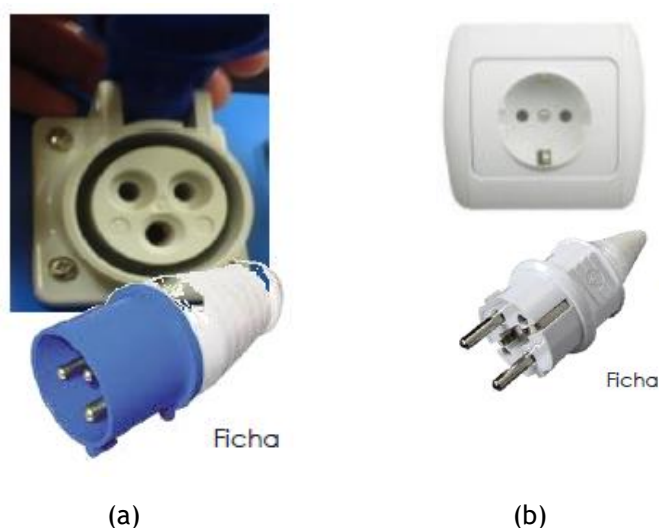


Figura 1.2 - Tomadas utilizadas no modo 1 de carregamento: (a) Tomada Industrial IEC 60309 monofásica; (b) Tomada doméstica monofásica Schuko [4]

O sistema de carregamento condutivo tem uma implementação simples e é de baixo custo. A norma europeia/portuguesa EN/NP61851 - Sistema de carga condutiva para veículos elétricos (2003), revista em Dezembro de 2010, define como deve ser feito o carregamento de um veículo elétrico e em que condições [4]. A Tabela 1.1 resume os modos de carregamentos.

Tabela 1.1 - Modos e tipos de carregamento [4]

Modo de carregamento	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (kVA)	Ligação	Tipo de carregamento
Modo 1 Modo 2	<16	230	< 3,7	1 - fase	Potência normal
Modo 2 Modo 3	16 - 32	230	3,7 - 22	1 ou 3 fases	Potência Média
Modo 2 Modo 3	63	230	43, 5	3 fases	Potência Elevada
Modo 4	>32	-	50	DC	Potência Elevada

As E-bikes enquadram-se no modo de carregamento 1 pois têm uma potência de carregamento inferior a 3,7 kVA. A utilização do modo 1 exige a presença de um dispositivo sensível à corrente residual, também chamado disjuntor diferencial, no lado da rede de alimentação, como proteção adicional à segurança do utilizador. Os modos de carregamento determinam o nível de segurança [4]. A seguir, são apresentadas algumas empresas que fornecem este tipo de carregamento.

A ZEEV, empresa especialista na oferta de soluções e serviços de mobilidade elétrica para empresas e particulares, disponibiliza uma gama completa de soluções de mobilidade que incluem o veículo, a infraestrutura de carregamento, os painéis fotovoltaicos e energia elétrica para carregamento. A empresa tem o posto de carregamento do tipo MCC10, específico para veículos de duas rodas, Figura 1.3 [5].



Figura 1.3 - Posto de carregamento MCC10 para bicicletas elétricas [5]

## Carregamento Wireless de Bicicletas Eléctricas

A empresa *Giulio Barbieri - Outdoor Solutions*, disponibiliza no mercado postos de carregamento de bicicletas com um sistema condutivo. As E-bikes são carregadas ligando o carregador de baterias às tomadas *Schüko*, com uma fonte de alimentação AC de 230 V e 2A, situada na barra, com sistema de controlo remoto e local, Figura 1.4 [6].



Figura 1.4 - Posto de carregamento de bicicletas [6]

A empresa *IN-GEO* fez a instalação de uma estação de carregamento solar para bicicletas eléctricas, o SunPodCyclo®, na cidade de Calvi, França, Figura 1.5. Alojando até 5 bicicletas eléctricas das marcas Arcade Cycles, foi instalada num estacionamento no centro de Calvi [7].



Figura 1.5 - Posto de carregamento de bicicletas por energia solar [7]

## 1.2. Sistema de carregamento sem fios

O conceito de carregamento sem fios parece ser novo, mas existe desde o século XIX. Nikola Tesla foi o precursor da transferência de energia sem fios (TESF), tendo feito a primeira demonstração deste princípio em 1891. A TESF teve a sua origem com a formulação das equações de Maxwell em 1862. Maxwell descreveu nas suas equações os fenómenos de ondas de rádio. Mais tarde, em 1884, Henry Poynting descreveu as ondas eletromagnéticas como energia [8]. A Figura 1.6 ilustra o desenvolvimento histórico da TESF. No final do século XVIII, o Prof. Heinrich Hertz demonstrou a propagação da onda eletromagnética no espaço livre, através de uma faísca para gerar energia de alta frequência que foi detetada numa extremidade recetora. Em 1890, Nikola Tesla conduziu as suas experiências sobre a transmissão de energia por ondas de rádio. O seu primeiro esforço para transmitir energia foi feito no Colorado, nos EUA, em 1899 [9]. Tesla construiu uma bobina maciça no seu laboratório com uma bola de cobre posicionada numa torre.

A bobina de Tesla entrava em ressonância a uma frequência de 150 kHz alimentada com 300 kW [10]. No entanto, não há evidências do sucesso da sua demonstração. Na década de 1960, William C. Brown demonstrou um método para amplificar as frequências das micro-ondas para aplicação na TESF [11]. O desenvolvimento de tubos klystron e magnetron e de antenas parabólicas possibilitou a demonstração da eficiência da tecnologia das micro-ondas para transmissão de energia. Em 1964, usando a invenção de uma antena retificadora, utilizou micro-ondas na conversão e transmissão de energia elétrica, tendo alimentado a partir do solo, sem fios, um helicóptero [11], [12].

Na década de 1970, o conceito de satélite de energia solar para captar energia da luz solar usando as células solares no espaço, irradiando-a depois para terra utilizando micro-ondas, foi concebido por Glaser [13]. Mais tarde, em 1975, Brown demonstrou uma transmissão de curto alcance de 475 W com micro-ondas, com a eficiência de conversão DC-DC de 54%. Depois disso, Brown e Robert Dickinson, no Laboratório de propulsão a jato da NASA, emitiram uma potência de 30 kW de potência a uma distância de 1,5 km, de um prato de 26 m para uma matriz de antena retificadora de 25 m<sup>2</sup>, usando micro-ondas de 2,38 GHz com a eficiência de 80% [10], [12].

Em 2007, um grupo de investigadores do MIT repetiu a experiência de Nikola Tesla com base na teoria do acoplamento usando ressonância magnética com uma eficiência de 40% a uma distância de 2 m, tendo utilizado bobinas de acoplamento com um raio de 30 cm [13]. Em 2016 foi mostrado um sistema de TESF inovador, combinando IPT-CPT, que transfere 2,84 kW a 1 MHz com eficiência de 94,5% para uma distância de 150 mm [14]. A transferência de energia realiza-se por meio de um campo magnético variável ou de um campo elétrico. A seguir abordam-se as várias tecnologias de carregamento sem fios.

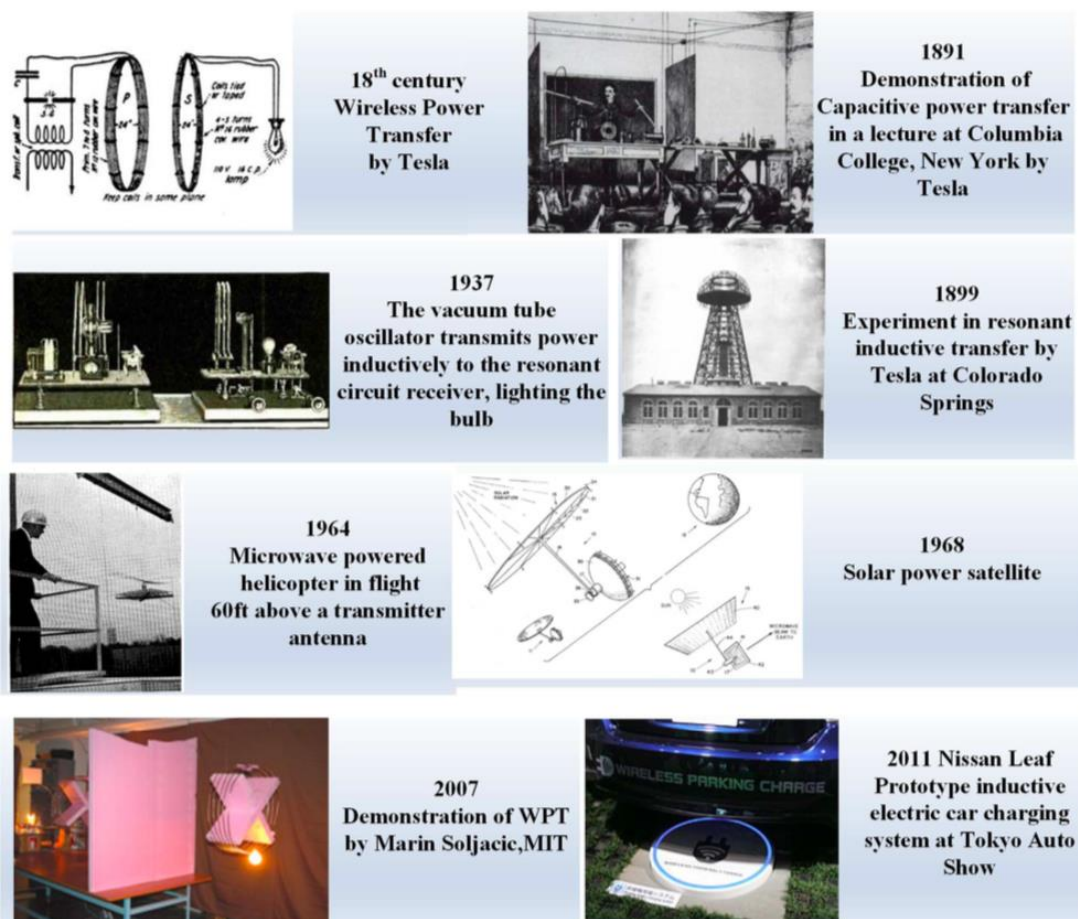


Figura 1.6 - Cronograma do desenvolvimento da TESP [13].

### 1.2.1. Carregamento por acoplamento de ímanes (PMPT)

A utilização de um campo magnético variável é uma outra forma de transferência de energia. É utilizada na transferência de energia por meio de acoplamento de ímanes permanentes, sendo também um tipo de carregamento sem fios, que tem lugar através da rotação de um rotor de ímanes permanentes (fonte) que por sua vez cria um campo magnético variável. O acoplamento magnético entre o rotor da fonte e o rotor do motor (carga), permite que os rotores girem à mesma velocidade, ou seja, à velocidade síncrona. Este tipo de carregamento não é adequado para o carregamento de bateria, pois a fiabilidade e o rendimento do sistema têm tendência a diminuir em função do alto número de elementos mecânicos.

### 1.2.2. Carregamento capacitivo (CPT)

Na transferência de energia capacitiva (CPT), a transferência entre a fonte e a carga é feita através de um campo elétrico variável [15]. Este tipo de carregamento tem popularidade em aplicações de baixas potências, principalmente no carregamento de dispositivos eletrónicos [16]. Aplica-se na transferência de energia a pequenas distâncias [17].

### 1.2.3. Carregamento indutivo (IPT)

A transferência de energia por indução é feita de igual modo através de um campo magnético variável. Baseia-se nas leis de Ampère e Faraday: a força eletromotriz induzida num condutor é proporcional ao número de linhas de fluxo, criadas pela passagem de uma corrente que atravessa esse condutor. Este sistema já existe em aplicações práticas, aplicado no carregamento tanto de VE como de E-bikes, tendo-se diminuído os riscos de electrocução pela substituição das tomadas que ligam o veículo à rede elétrica.

### 1.2.4. Carregamento indutivo ressonante (RAPT)

Nikola Tesla foi também o precursor da transferência de energia por ressonância magnética [16]. Este princípio descreve-se como se segue: colocando duas bobinas, afastadas entre si, à mesma frequência (de ressonância), cria-se um sistema com um elevado acoplamento magnético, permitindo a transferência de uma elevada quantidade de energia. A Tabela 1.2 mostra uma comparação entre as diferentes tecnologias de carregamento sem fios.

Tabela 1.2 - Comparativo entre as tecnologias de TESF [18]

Tecnologia	Desempenho			Custo	Volume	Nível Potência
	$\eta$	IEM	Frequência			
Carregamento por indução IPT	Médio	Médio	10-50 kHz	Médio	Médio	Médio/Baixo
Carregamento capacitivo CPT	Baixo	Médio	100-500 kHz	Baixo	Reduzido	Baixo
Carregamento por ressonância de antena RAPT	Médio	Médio	100-500 MHz	Médio	Médio	Médio/Baixo
Carregamento por acoplamento de ímanes PMPT	Reduzido	Elevado	100-500 MHz	Elevado	Elevado	Médio/Baixo
Carregamento por indução On-Line IPT	Médio	Médio	10-50 kHz	Médio	Médio	Médio/Baixo

## 1.3. Sistema de carregamento indutivo ressonante

Conforme foi visto, este sistema funciona através de um acoplamento forte entre duas bobinas em ressonância à mesma frequência, Figura 1.7. Os carregadores fornecem energia através do campo eletromagnético sem contacto direto, de forma eficaz e segura, garantindo isolamento galvânico entre as duas partes do sistema. O funcionamento deste sistema é igual ao de um transformador, a diferença entre eles está no valor do entreferro entre o primário e o secundário. Este sistema é constituído pela fonte de alimentação de alta frequência, um controlador de tensão e uma estrutura de acoplamento magnético [19].



Figura 1.7 - Sistema de carregamento indutivo ressonante aplicado a E-bike [20].

Estes sistemas podem ser incluídos em transportes públicos [21][22], sistemas de iluminação [23], sistemas ferroviários [24], dispositivos eletrônicos [25]-[27], robótica [28], veículos elétricos [29]-[31] e tantos outros. Muitas são as empresas e instituições de investigação que mostram interesse nesta tecnologia.

### 1.3.1. Propostas de carregamento indutivo ressonante

Vários investigadores académicos e operadores comerciais propuseram diferentes soluções no que diz respeito à posição das bobinas acopladas para a transferência de energia e posterior carregamento das bicicletas. Para todas as soluções propostas, a E-bike deve estar estacionada para se efetuar o carregamento. Relativamente a propostas da academia, em [32], [33] foi reportada uma investigação sobre diferentes soluções de acoplamento, todas elas consistindo de um acoplador magnético feito de um transmissor enterrado no subsolo e um recetor instalado dentro do suporte da E-bike. A distância entre o transmissor e o recetor do acoplador magnético é de 2 cm. Em [34], a bobina da bicicleta é colocada na lateral da cesta dianteira e a bobina ligada à rede é instalada próxima de uma parede, ambas na posição vertical, como mostra a Figura 1.8. A operação de carregamento sem fios ocorre a uma distância de 5 cm entre as bobinas.

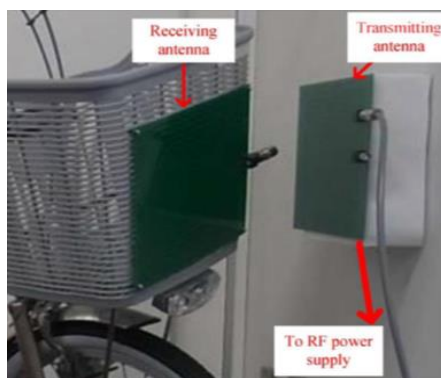


Figura 1.8 - Carregamento sem fio de E-bike proposto em [34]



## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

No lado comercial, a empresa *RRC Wireless Solutions* instala o recetor sob a selim da bicicleta, como destacado na Figura 1.9, tornando-se necessário que a bobina do lado do transmissor seja mecanicamente móvel, para o alinhamento perfeito [35].



Figura 1.9 - Carregamento sem fios de E-bike proposto pela *RCC* [35]

A *SEW Eurodrive* propõe colocar a bobina recetora dentro do suporte para bicicletas [35], como sugerido na Figura 1.10.



Figura 1.10 - Carregamento sem fio de E-bike proposto pela *SEW Eurodrive* [35]

Atualmente são vários os grupos a contribuir para o desenvolvimento e investigação deste conceito, entre eles:

- Empresas: Daymak Inc, Bosch, Yamaha, Shimano, Bellnix Co Ltd, Órbita, Bewegen Technologies Inc, Bikeemotion, Winora, BESV, Haibike, Riese and Muller, Qualcomm, WiTricity entre outras.

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

- Universidades - MIT, Universidade de Saitama do Japão, Universidade de Wisconsin-Madison, Instituto Superior de Ciência e Tecnologia da Coreia, Universidade Estadual do Utah, Universidade de Aveiro.
- Marcas automóveis - BMW, Ford, Mercedes, Nissan.

### 1.3.2. Sistemas de carregamento indutivo ressonante existente

Alguns sistemas já estão disponíveis, uns ainda em ensaios pré-comerciais e outros já em pleno funcionamento. A empresa *Bellnix Co Ltd* e um grupo de pesquisa liderado por Yasuyoshi Kaneko, professor da Escola de Engenharia da Universidade de Saitama no Japão, desenvolveram uma E-bike cuja bateria pode ser carregada de forma indutiva ressonante. O acesso ao posto de carregamento é feito mediante um cartão inteligente e demora 5 horas e meia para carregar a bateria, Figura 1.11 [36].



Figura 1.11 - Posto de carregamento indutivo ressonante [36]

A empresa canadiana *Daymak Inc.* anunciou a sua tecnologia de carregamento indutivo incorporada num sistema totalmente integrado, que será exibido nas E-bikes de fibra de carbono EC1 Special Edition (EC1 SE). A EC1 SE carrega a bateria usando uma estação de carregamento de indutivo da Daymak com painel solar. O posto de carregamento contará com recursos sem fio e bloqueio das bicicletas no local através de um aplicativo ou cartão-chave, Figura 1.12 [37].

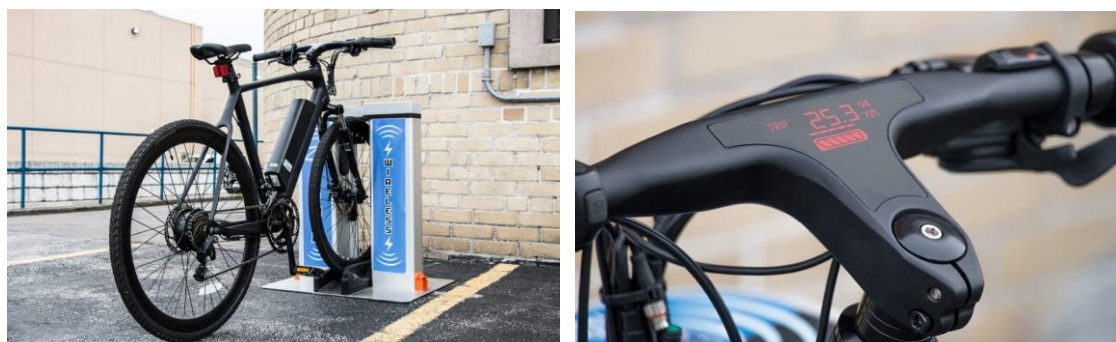


Figura 1.12 - Posto de carregamento indutivo ressonante da empresa Daymak Inc. - EC1 SE [37].

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

As empresas *EMEL* e *Órbita* desenvolveram em Lisboa um projeto intitulado Gira para utilização partilhada de E-bikes com sistemas de carregamento indutivo, Figura 1.13.



Figura 1.13 - Posto de carregamento indutivo em Lisboa [38]

As principais vantagens deste tipo de carregamento são:

- O isolamento galvânico proporciona o carregamento das baterias de forma mais segura em ambientes industriais, húmidos e adversos;
- Conveniência para o utilizador, já que permite efetuar o carregamento de forma totalmente automatizada, sem a necessidade de manuseamento cabos ou outros equipamentos;
- Não é necessário usar cabos elétricos nem fichas elétricas para fazer a interface entre o posto de carregamento e o veículo.

Em contrapartida, apresenta as seguintes desvantagens [39]:

- Eficiência mais baixa relativamente aos carregadores com ligação condutiva;
- A complexidade do fabrico, o tamanho e o custo;
- Circuitos ressonantes difíceis de sintonizar;
- Interferência eletromagnética: o uso de conversores de alta frequência pode causar interferência nas proximidades dos equipamentos;
- Interferência da presença de metais: se houver qualquer objeto metálico no meio da ligação magnética, as perdas aumentam e o sistema pode não funcionar.

O carregamento indutivo ressonante é basicamente o sistema de carregamento indutivo, associado a topologias ressonantes. Os principais objetivos das topologias ressonantes são [40]:

- Maximizar a potência transferida;
- Otimizar a eficiência de transmissão;
- Controlar a potência transmitida através da variação da frequência;
- Criar uma certa característica da fonte (fonte de corrente ou fonte de tensão);
- Compensar a variação do acoplamento magnético;
- Compensar a corrente de magnetização na bobina transmissora de forma a reduzir as perdas;

As topologias ressonantes podem ser distribuídas ou concentradas. As distribuídas são utilizadas em aplicações onde é necessária uma transferência de potência contínua ao longo de um percurso, transferência de energia dinâmica, enquanto que as concentradas permitem a transferência de potência numa posição estacionária, num posto de carregamento. A seguir são mencionados os principais parâmetros [19] que determinam a utilização e o desempenho dos sistemas de carregamento sem fios em determinadas aplicações:

- Eficiência;
- Nível de potência;
- Tolerância ao desalinhamento;
- Distância máxima entre os enrolamentos.

### 1.4. Enquadramento

Este trabalho pretende mostrar um estudo sobre o conceito de transferência de energia sem fios para carregamentos de E-bikes, abordando duas técnicas, a transferência de energia sem fios por indução magnética e a transferência de energia sem fios por acoplamento indutivo ressonante, sendo a mobilidade elétrica a principal área de foco. A técnica por acoplamento indutivo ressonante veio dar uma nova perspetiva às experiências de transferência de energia sem fios de Nikola Tesla, o grande precursor deste princípio. Esta nova visão, conforme [13], foi dada em 2007 nos Estados Unidos por uma equipa do MIT, que conseguiu alimentar uma lâmpada de 60 Watts a 2 metros do transmissor com 40% de eficiência. Quatro anos mais tarde, a renomada marca de automóvel Nissan mostrou que esta técnica é promissora para a mobilidade elétrica, ao criar o protótipo de um sistema para carregamento indutivo de carros elétricos em 2011 [13].

Assim, a elaboração desta dissertação começou com uma recolha e revisão bibliográfica das tecnologias de carregamento de E-bikes, seguido dos elementos constituintes das E-bikes,

nomeadamente a bateria, o motor e o controlador do motor; depois, elaborou-se a simulação e a análise da transferência de energia sem fios, culminando com a composição deste documento.

### **1.4.1. Legislação**

O Decreto-lei Nº 44 de 2005 da legislação portuguesa assevera que, as bicicletas elétricas são velocípedes equipados com motor elétrico auxiliar de potência máxima contínua de 0,25 kW, cuja alimentação é reduzida progressivamente com o aumento da velocidade e é interrompida se esta atingir uma velocidade de 25 km/h, ou se o utilizador deixar de pedalar. É obrigatório que a bicicleta de propulsão elétrica arranque usando somente a força humana, bem como o uso de capacete devidamente ajustado e apertado [41]. Deste modo, uma bicicleta elétrica deve ter um motor elétrico, um controlador e uma bateria.

### **1.5. Motivação e objetivos**

As E-bikes são veículos leves e compactos, que representam uma categoria potencialmente consistente de meio de transporte nos cenários atuais e futuros de uma mobilidade urbana inteligente e sustentável. Devido à necessidade geralmente frequente de usar E-bikes durante o dia, com a também frequente necessidade de recarregar a bateria, as soluções sem fios podem ser consideradas a maneira mais adequada de carregamento de E-bikes.

A transferência de energia sem fios traz vantagens, uma vez que não há necessidade de ligação de cabos, o que possibilita o carregamento durante o estacionamento. É com a motivação de contribuir para o desenvolvimento de soluções para estes casos, que o estudo do conceito de transferência de energia sem fios ganha relevância, uma vez que, com esta tecnologia, há facilidade de efetuar carregamentos com maior periodicidade e permite ao usuário percorrer distâncias maiores e com menor esforço.

Assim, o principal objetivo desta dissertação é a simulação e análise da transferência de energia indutiva sem topologia ressonante e com topologia ressonante. Na simulação deverão ser respeitados alguns princípios, nomeadamente o número de espiras e os valores de frequências. Daí que, durante a simulação serão realizados vários testes em função dos critérios referidos, de modo a compará-los e obter os melhores valores de potência média transferida para a carga.

### **1.6. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos dos quais, o presente capítulo 1 é composto pelos sistemas de carregamento de E-bikes já existentes. Após o enquadramento do trabalho, apresenta-se a legislação portuguesa que especifica a definição de bicicleta elétrica bem como a potência do motor e velocidade máxima que uma bicicleta elétrica poderá ter. Por fim, apresentam-se as motivações e os objetivos da dissertação.

## **Capítulo 2 - Bicicleta elétrica**

Neste capítulo é feito o estado da arte das E-bikes, bem como o seu estado atual no mercado de mobilidade elétrica. São apresentados e analisados de igual modo, os principais elementos de uma bicicleta elétrica, nomeadamente o motor elétrico, o controlador e o sensor de posição. Por fim, faz-se uma análise do consumo e exigências energéticas de motores aplicado a E-bikes.

## **Capítulo 3 - Tecnologias de baterias**

Neste capítulo são apresentadas as tecnologias de baterias existentes e os seus principais parâmetros. Abordam-se ainda, os vários métodos utilizados nos carregamentos de baterias, seguindo-se para o estudo do sistema de gestão de carregamento. Por fim, apresentam-se os conversores utilizados para a conversão AC-DC no sistema de carregamento indutivo ressonante, seguido dos tipos de controlo de corrente aplicados durante o carregamento.

## **Capítulo 4 - Sistema de carregamento indutivo ressonante**

Neste capítulo faz-se uma descrição mais aberta da estrutura de acoplamento do sistema de carregamento indutivo ressonante, referindo desde as várias topologias de compensação compostas pelos circuitos LC e as suas vantagens, até ao espectro eletromagnético, responsável pela distribuição das frequências.

## **Capítulo - 5 Simulação**

Neste capítulo apresentam-se as simulações do carregamento indutivo de baterias sem topologia ressonante e com topologia ressonante, seguidas da análise dos resultados.

## **Capítulo - 6 Conclusão e trabalhos futuros**

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões desta dissertação, fazendo uma análise aos resultados e objetivos atingidos. Por fim, são também apresentadas algumas sugestões a ter em conta em eventuais trabalhos futuros.



Em 1899, *John Schnepf* projetou uma E-bike, com o motor sob a roda traseira, friccionando-a, não especificando o tipo de motor nem a bateria Figura 2.3 [45].

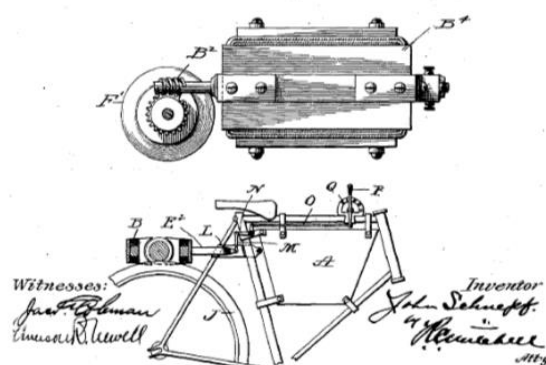


Figura 2.3 - Bicycleta elétrica com motor sob a roda traseira, friccionando-a [45].

À medida que o tempo foi passando, foram surgindo diversas patentes de E-bikes, tendo sido verificado a maior evolução nos anos 90, em função do avanço da eletrônica de potência na área dos controladores de motores, baterias e sensores do motor. Ainda nos anos 90, a marca japonesa Zike desenvolveu o primeiro motor elétrico aplicado a E-bikes com o respectivo controlador, seguido pelas marcas Yamaha, Honda, Sanyo e Panasonic. Estas E-bikes tinham um custo elevado; entretanto, iniciou-se a comercialização de bicicletas elétricas.

O interesse pelas E-bikes aumentou de tal forma que, as marcas chinesas começaram a produzir em grande escala motores para colocação no eixo da roda. No final dos anos 90 já existiam mais de cinquenta marcas de E-bikes no mercado [46]. A evolução das baterias permitiu à sua utilização em E-bikes, permitindo maior fiabilidade, maior capacidade de armazenamento de energia, maior robustez e baixo custo de aquisição [47].

## 2.2. Mercado das bicicletas elétricas

O mercado das E-bikes expandiu-se consideravelmente nos anos 90, graças às melhorias no motor e na tecnologia das baterias. As empresas chinesas produtoras de E-bikes cresceram tanto em número que, hoje em dia, segundo [48], a China é o maior produtor e exportador de E-bikes do mundo, fruto da adoção de técnicas de fabrico simples, maturidade tecnológica e ampla rede de fornecedores. As estimativas apontam que existam bilhões de E-bikes na China devido aos incentivos governamentais chineses, cujo o objetivo é diminuir drasticamente o número de motos naquele país. Depois do gigante asiático, a indústria de E-bikes despertou o interesse do mundo inteiro. A Figura 2.4 mostra uma previsão de vendas de E-bikes para os anos de 2016 a 2025.



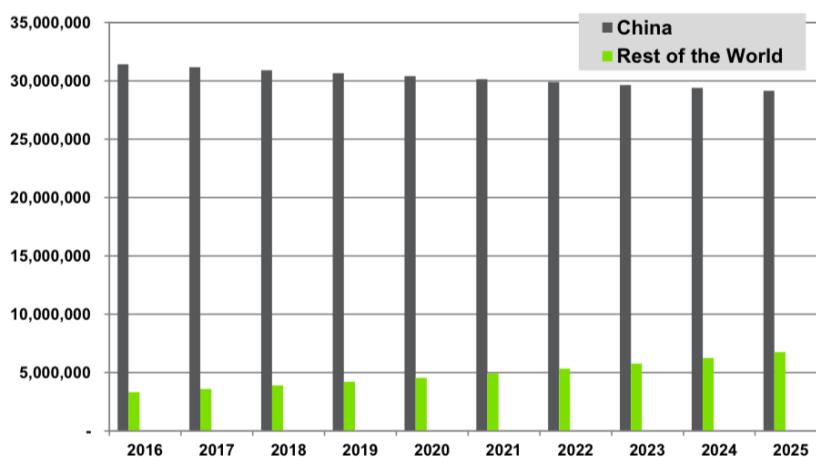


Figura 2.4 - Previsão de venda de E-bikes na China e no resto do mundo: 2016-2025 [48].

A Espanha, Holanda, Itália, Alemanha e Reino Unido são os países europeus que mais importam E-bikes a partir do mercado chinês, sendo a Holanda o primeiro [49]. Na Holanda o transporte com a utilização de bicicletas faz parte dos transportes públicos, sendo por isso considerada a capital do ciclismo, fazendo de Amsterdão a líder europeia em termos de utilização de E-bikes [50]. Em Portugal, as E-bikes têm sido enfatizadas através de iniciativas como o World Bike Tour e o projeto Buga de Aveiro que, por um tempo determinado, fornece E-bikes gratuitamente. Para ter acesso a estas, é exigido um documento de identificação. Muitas são as empresas a nível nacional, voltadas para a mobilidade elétrica sustentável. A Órbita, a Bewegen Technologies Inc e a ZEEV são algumas das empresas presentes no mercado [51],[52].

### 2.3. Bicicletas elétricas no mercado

Apresentam-se a seguir alguns modelos de E-bikes existentes no mercado. A *BMW* apresentou a nova E-bike Active Hybrid com assistência elétrica, Figura 2.5. Para um maior dinamismo e facilidade de rolamento, tem um motor de 250 W e 90 Nm, com uma bateria de 504Wh removível, com autonomia superior a 100km. Tem quatro modos de condução ajustáveis para escolher o nível de assistência ao pedal através de um ecrã embutido. Permite alterar a velocidades até 25km/h [53].



Figura 2.5 - Bicicleta elétrica-híbrida de marca *BMW* [53].

## Carregamento Wireless de Bicicletas Eléctricas

A seguir apresenta-se o modelo *smart E-bike* da *Mercedes*, Figura 2.6, com um motor de 250W sem escovas no eixo da roda traseira, com 35Nm e uma velocidade máxima de 25 km/h. Tem uma bateria de iões de lítio de 423WH, que permite uma autonomia de até 100 km. A bateria pode ser carregada em aproximadamente 5 horas [54].



Figura 2.6 - Bicicleta eléctrica de marca *Mercedes* [54].

Na Figura 2.7 mostra-se a '*Leaos Solar E-bike*', criada pelo alemão *Armin Oberhollenzer*, com o objetivo de ser alimentada somente pelos painéis solares que ocupam boa parte do quadro. Tem uma autonomia de 20km, transmissão automática Nuvinci, travão de disco, iluminação com farol e lanterna de LED. A bateria de 36 V e 6Ah é removível, que pode ser carregada a partir da rede eléctrica e pesa 2,2kg. Precisa de 20 horas para o total carregamento da bateria a partir da luz do sol [55].



Figura 2.7 - Bicicleta eléctrica solar [55].

A empresa *Bewegen Technologies Inc*, empresa dedicada à implementação de serviços de mobilidade partilhada baseada em E-bikes, e que fornece as bicicletas, as estações de carregamento e as docas de estacionamento, está presente em Portugal, onde disponibiliza os seus serviços no concelho de Lagoa, no Distrito de Faro, Figura 2.8. Toda a tecnologia por detrás deste sistema foi criada também por uma empresa portuguesa, a *Bikeemotion*, enquanto as operações do dia-a-dia do sistema são também asseguradas por uma empresa nacional, a *Wegoshare* [56].



Figura 2.8 - Bicicletas elétricas instaladas em Lagoa [56].

## 2.4. Motores elétricos

O motor elétrico transformar a energia elétrica em energia mecânica. A Figura 2.9 mostra a classificação dos principais motores.

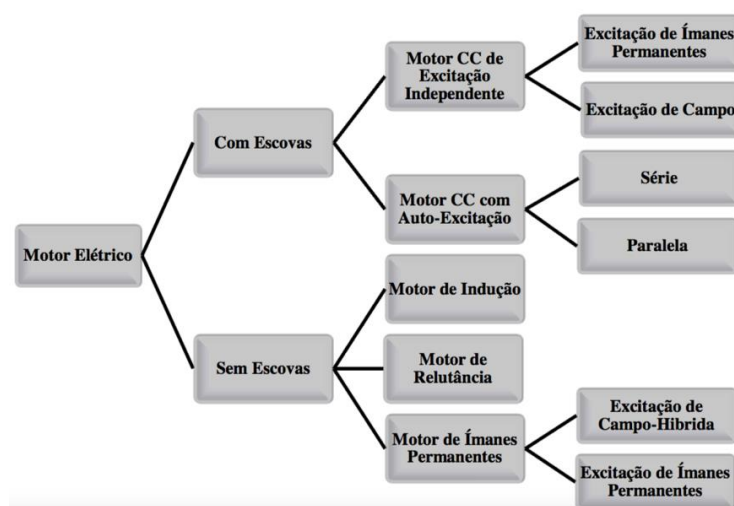


Figura 2.9 - Classificação dos motores elétricos [57]

Todo o motor é feito para uma aplicação específica, devido às suas particularidades de construção às características da carga a acionar. São selecionados em função do tipo de ligação, do sistema de acionamento e controlo, de forma a satisfazer a carga. Os motores elétricos podem ser alimentados através de conversores eletrónicos, consequência do avanço da eletrónica de potência, permitindo ajustar o controlo do motor, de modo a observar as características da carga a acionar. Nas E-bikes são mais utilizados os motores de relutância variável, os motores de indução e os motores síncrono de ímãs permanentes, que a seguir são explicados [57].

### 2.4.1. Motor de relutância variável

Têm uma construção bastante simples, com baixo custo de fabrico e são robustos. Apresentam uma boa relação binário/velocidade, e isso possibilita elevado binário a baixas velocidades e a operação numa vasta gama de velocidades. Porém, têm um controlo e processo de conceção difíceis, elevado *ripple* de binário, devido à diferença entre o binário máximo e o binário mínimo durante uma rotação, provocando um elevado ruído. Outrossim, necessitam de sensores de posição para efetuar devidamente o seu controlo. Os motores de relutância variável, Figura 2.10, são basicamente motores de passo, formados por polos salientes, e podem ter três ou mais enrolamentos no estator. Quando os enrolamentos são alimentados, estes magnetizam-se e atraem os polos do rotor. O rotor é constituído por materiais laminados de grande permeabilidade magnética, sendo livre de enrolamentos, anéis comutadores com escovas ou ímanes [57].

A indutância do enrolamento alimentado varia enquanto o rotor gira e isso desalinha os polos, diminuindo o valor da indutância, e aumentando o valor da corrente. Em contrapartida, quando os pólos estão alinhados, a indutância é grande e a corrente é baixa. As ininterruptas variações no valor da indutância e da corrente, dificultam o controlo dos motores de relutância variável. A aplicação deste tipo de motor em bicicletas elétricas aumentou devido à desvantagem do elevado custo dos motores com ímanes permanentes que utilizam terras raras.



Figura 2.10 - Motor de relutância variável [57]

### 2.4.2. Motor de indução

A tecnologia que envolve o motor assíncrono trifásico, mais conhecido por motor de indução, é a mais amadurecida dentre os vários motores AC. Apresenta uma construção robusta, baixo volume, um princípio de funcionamento muito simples, é leve, livre de manutenção constante, robusto face a sobrecargas, possibilita de forma simples inverter o sentido de rotação e é estável em ambientes austeros.



Figura 2.11 - Motor de indução [57]

Este motor tem o seu princípio de funcionamento baseado na criação de um campo magnético rotativo: ao aplicar uma tensão alternada no estator, cria-se um campo magnético girante. Este campo girante influencia os enrolamentos do rotor induzindo assim forças eletromotrizes. Gera-se então um campo magnético girante no rotor, criando, portanto, o movimento de rotação do rotor. A velocidade de rotação do rotor é diferente da velocidade de rotação do campo girante criado pelo estator. Essa diferença de velocidade denomina-se de deslizamento ou escorregamento [57].

### **2.4.3. Motor síncrono de ímanes permanentes**

Ao contrário do motor de indução ou assíncrono, no motor síncrono de ímanes permanentes a velocidade de rotação do rotor é igual à velocidade de rotação do campo girante criado pelo estator, não existindo, portanto, diferença de velocidades. Com o aparecimento de ímanes de alta densidade energética como o neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B) e o samário-cobalto (Sm-Co), o acionamento de motores de ímanes permanentes começou a desenvolver-se a um ritmo considerável. Substituindo os enrolamentos de campo por ímanes permanentes, estes motores eliminam as escovas, os anéis coletores e as perdas no campo. A ausência de perdas no campo proporciona uma alta eficiência; além disso, este tipo de motor tem uma ótima relação potência/volume, é robusto, tem facilidade de controlo de velocidade e alto binário. Porém, o custo elevado dos ímanes de terras-raras constitui a maior desvantagem deste tipo de motor e não só, a capacidade de carga do motor é limitada pelas características dos ímanes. A combinação de altas temperaturas e correntes elevadas causam a desmagnetização dos ímanes. A Figura 2.12 mostra este tipo de motor, especificamente construído para a utilização em E-bikes, podendo ser instalados na roda traseira ou na roda dianteira [57].



Figura 2.12 - Motor elétrico BLDC [58]

São classificados em dois grupos: Os motores DC sem escovas de enrolamentos concentrados BLDC e os motores AC sem escovas de enrolamentos distribuídos BLAC [57]. A Tabela 2.1 mostra comparações entre os dois tipos de motores.

### 2.4.3.1. Motor BLDC

O motor BLDC é o mais utilizado em bicicletas eléctricas. Neste motor, os eletroímãs encontram-se no estator e o rotor é feito de ímãs permanentes, como mostrado na Figura 2.13. A energia eléctrica é convertida em energia mecânica pela acção das forças magnéticas entre os ímãs permanentes presentes no rotor e o campo magnético rotativo induzido no estator pelos pólos bobinados. O estator é feito de lâminas de aço empilhadas umas sobre as outras, com os enrolamentos colocados nas ranhuras, que são cortadas axialmente ao longo da periferia interna [57].

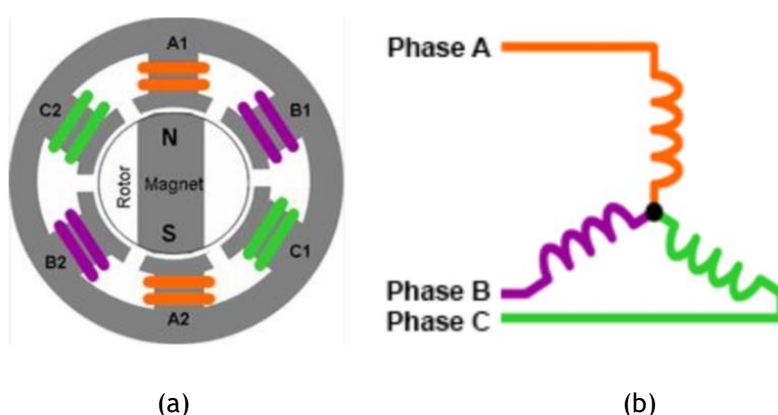


Figura 2.13 - Motor BLDC - estrutura interna simplificada(a); enrolamentos do motor (b) [59]

O motor apresenta um alto desempenho dinâmico, alta robustez, alta eficiência e alto binário, sendo ideal para aplicações de elevado desempenho [57]. A ausência de escovas constitui uma das maiores vantagens sobre o motor com escovas, pelos motivos abaixo discriminados [3]:

- As escovas desgastam-se devido ao atrito;
- As escovas restringem a velocidade máxima do motor e o número de pólos no estator.
- Gera-se ruído devido às trocas de ligações das escovas, podendo também gerar faíscas (arco elétrico);

Tabela 2.1 - Comparativo entre os motores BLDC e BLAC [3], [59].

Características	Motor BLDC	Motor BLAC
Comutação	Comutação eletrónica com base nos sensores de efeito Hall	Comutação nas escovas
Eficiência	Alta, não tem queda de tensão nas escovas	Moderada
Manutenção	Baixa manutenção devido à ausência das escovas	Periódica
Desempenho térmico	Melhor	Pobre
Potência de saída/Tamanho do motor	Alta. Tamanho reduzido devido às características térmicas, pois os enrolamentos estão no estator; a dissipação é superior	Moderada/Baixa
Velocidade/Binário	Permite uma operação linear em todas as velocidades com carga nominal	Moderadamente plana
Resposta dinâmica	Rápida	Lenta
Gama de velocidade	Alta. Não contém limitações mecânicas impostas pelas escovas	Baixa
Ruído elétrico	Baixo	Alto devido à geração do arco elétrico nas escovas
Tempo de vida	Longo	Curto
Controlo	Complexo	Simple
Requisito de controlo	O controlo é indispensável para o funcionamento do motor	O controlo só é necessário para variar a velocidade
Custo de fabrico	Alto, devido à existência de ímanes permanentes de terras raras	Baixo

## 2.5. Controladores de motores aplicados à E-bikes

O controlador é um circuito eletrónico que controla a velocidade do motor e faz a gestão do fluxo de energia; a energia da bateria é direcionada para o motor. Nos controladores aplicados em bicicletas elétricas, utiliza-se o método de controlo vetorial através da técnica de controlo por orientação de campo. Esta técnica funciona de forma semelhante ao controlo das máquinas DC de excitação separada, ou seja, implementa-se o controlo separado da corrente de campo e da corrente na armadura, regulando de forma independente o fluxo de campo e o binário, o que resulta num controlo simples. Mantendo o fluxo constante, o binário é controlado de forma independente. Para a sua implementação, utiliza-se um sensor de efeito Hall para detetar a posição instantânea do fluxo ligado ao rotor [57], [60]. A Figura 2.14 mostra um controlador de velocidade para motores BLDC com potência máxima de 300W, comercializado pela *ElectroCraf*. Pode ser alimentado entre 11 V e 50 V, a 6 A e 50 kHz. Permite um controlo ajustável, selecionado



por meio de botões, dos modos de operação para a aceleração e para o binário. Protege o motor contra sobreaquecimentos, inversão de sentido de rotação e sobrecorrentes [57].



Figura 2.14 - Controlador de motor BLDC do fabricante *ElectroCraft* [57]

### 2.5.1. Sensor de efeito Hall

A posição do rotor é detetada através de transdutores. O sensor de efeito Hall é o mais utilizado nos motores elétricos. Este efeito foi descoberto em 1879 por Edwin H. Hall, após ter verificado o aparecimento de uma diferença de potencial ao submeter um condutor elétrico a um campo magnético perpendicular à direção da corrente elétrica, como mostra a Figura 2.15. A força de *Lorentz* faz com que as cargas elétricas se desviem da sua trajetória original. Como consequência, os portadores de carga acumulam-se nas superfícies laterais do condutor, resultando numa diferença de potencial elétrico [3], [57].

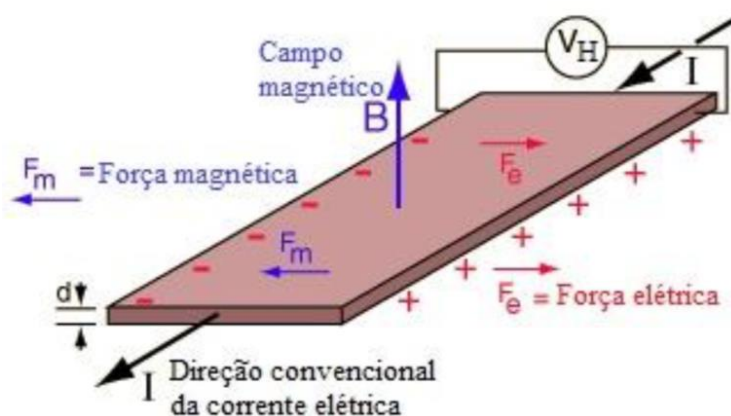


Figura 2.15 - Princípio de funcionamento do efeito *Hall* [57]

A tensão de Hall é dada pela equação (2.1):

$$V_H = \frac{I \cdot B}{n \cdot e \cdot d} \quad (2.1)$$

Onde,  $n$  é a densidade da mobilidade das cargas,  $e$  é a carga do elétron e  $d$  é a espessura do condutor.



O controlador usa a informação da posição do rotor obtida a cada intervalo de 60 graus para executar as comutações do inversor. No caso de motor trifásico, é utilizado em cada fase, desfasadas a 120 graus entre si, um sensor de efeito Hall, Figura 2.16, para determinar a posição do rotor. Gera-se um sinal analógico alto ou baixo quando os pólos magnéticos passam perto do sensor de efeito Hall, indicando a passagem pelo pólo norte ou pelo pólo sul do sensor, sendo o pólo norte o sinal lógico alto e o sul o sinal lógico baixo [3],[57]. A Tabela 2.2. mostra os estados dos sensores de efeito Hall resultantes de cada estado do rotor.

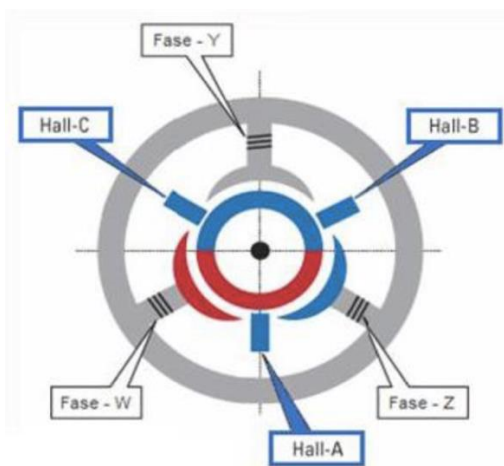


Figura 2.16 - Sensores de efeito Hall em função da disposição dos ímanes permanentes [3]

Tabela 2.2 - Tabela de comutação de sensores de efeito Hall para cada estado do rotor [57]

Estado	Hall A	Hall B	Hall C	Fase Y	Fase Z	Fase W
1	0	1	1	0	+ VCC	- VCC
2	0	0	1	+ VCC	0	- VCC
3	1	0	1	+ VCC	- VCC	0
4	1	0	0	0	- VCC	+ VCC
5	1	1	0	- VCC	0	+ VCC
6	0	1	0	- VCC	+ VCC	0

Cada valor equivale a um estado que representa a posição instantânea do rotor do motor, permitindo assim informar o sistema de controlo de qual é o enrolamento que necessita de ser alimentado a seguir de forma a fazer rodar o rotor. Assim, com base na combinação dos sinais lógicos dos sensores de efeito Hall, é determinada a sequência exata da comutação.

Os sensores de efeito Hall são integrados com o controlador para excitar a fase correta no arranque do motor, tendo em conta a posição de repouso do rotor, e evitar que ele inicie o movimento rodando em sentido contrário ao desejado. Também, fornecem ao controlador as informações necessárias para que o controlador excite as fases do estator numa sequência

correta, de acordo com o sentido de rotação e velocidade desejados. Os componentes principais do sistema de controlo do motor [61] são:

- Lógica de controlo (microcontroladores);
- Estágio de potência composto pelos dispositivos de comutação (MOSFETs, IGBT);
- Sensores de efeito Hall usados para a realimentação.

O microcontrolador recebe informações sobre a posição do ângulo do rotor através dos sinais gerados pelos sensores de efeito Hall instalados no motor. Usando esses dados, o microcontrolador usa a tabela de comutação e comanda os transistores de potência MOSFET que fazem alimentar e movimentar o motor. Na Figura 2.17 mostra-se um circuito de controlo típico de um motor BLDC de duas fases.

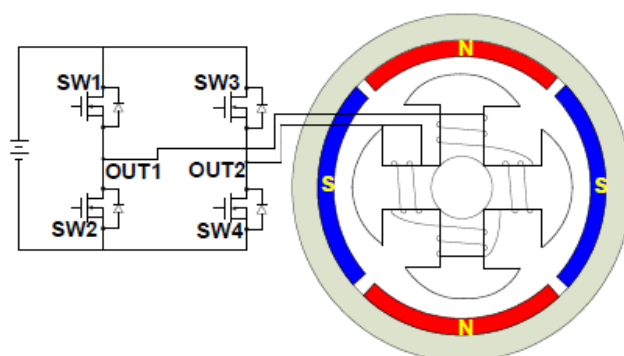


Figura 2.17 - Circuito de comando de um motor BLDC de duas fases [61]

O desempenho do motor é ditado principalmente pela estrutura do motor e a lógica de controlo. O circuito de controlo permite regular a velocidade, o sentido de rotação e o binário [62].

### 2.5.2. Sensor ótico

Consiste num disco com setores transparentes e opacos, montado num eixo de rotação. De um lado do disco é emitido um feixe de luz infravermelha proveniente de um foto-díodo e do outro lado esse feixe é recebido por um foto-transistor, como mostra a Figura 2.18. Tem uma construção simples, boa repetibilidade, vida útil considerada e alta resolução com interface digital. Em contrapartida, é muito frágil.

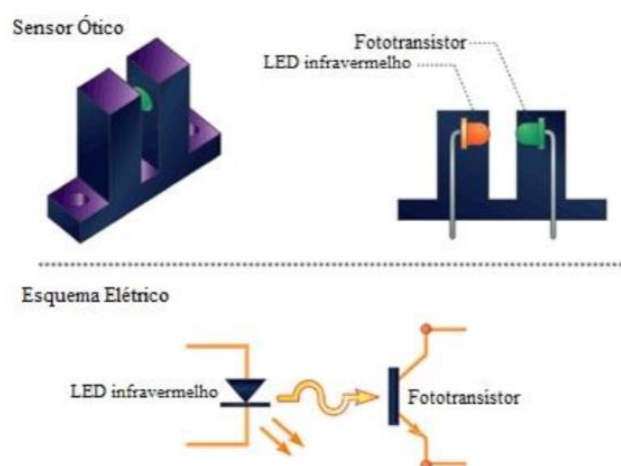


Figura 2.18 - Sensor ótico e seu esquema elétrico [57]

## 2.6. Consumo e exigência de energia

O consumo de energia da E-bike é analisado em duas vertentes: quando a E-bike está ligada à rede elétrica carregando a bateria, isto é, comportando-se como carga, e quando a bateria é fonte de alimentação para o motor. A bateria requer da rede elétrica uma potência constante, em função da sua capacidade energética advinda dos seus parâmetros de fábrica. Porém, quando a E-bike está em movimento, sendo a bateria fonte de alimentação para o motor, o consumo de energia depende maioritariamente do tipo de terreno a que a E-bike está submetida. Esta análise é feita a seguir.

### 2.6.1. Terreno plano

Neste tipo de terreno, a maior exigência de energia que recai sobre a bateria depende do peso do conjunto ciclista/E-bike. A Figura 2.19 mostra a potência necessária, para diferentes pesos do conjunto ciclista/E-bike, em função da velocidade. Resume-se que, quanto mais pesado for o conjunto ciclista/E-bike mais potência será exigida da bateria, e que para um aumento linear do peso do conjunto ciclista/E-bike, numa estrada plana, não resulta uma variação linear na exigência de potência, ao longo da gama de velocidade analisada.

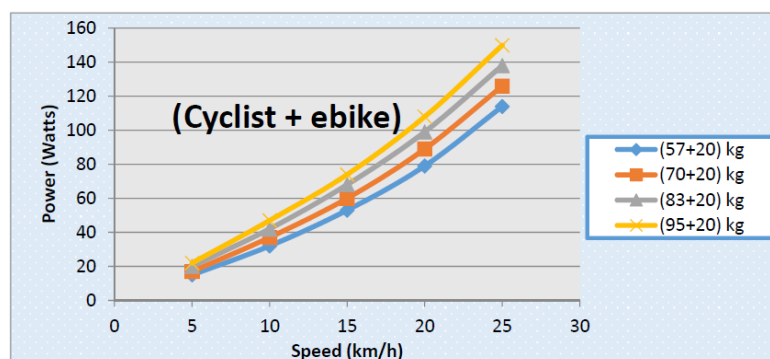


Figura 2.19 - Peso do conjunto ciclista/ E-bike em terreno plano versus curva de velocidade [63].

### 2.6.2. Terreno montanhoso

Quando um ciclista está a subir um terreno muito íngreme, a E-bike faz um esforço muito grande devido ao ângulo de inclinação. O motor exigirá, portanto, mais energia da bateria para satisfazer a demanda da carga durante a subida. O motor precisará de muita força atendendo às condições mencionadas. Na Figura 2.20 apresenta-se a exigência de energia na E-bike, quando submetida a um declive de 2,4% e 4 %. Resume-se que, quanto maior for o gradiente de inclinação a que a bicicleta estiver submetida, maior será a potência exigida à bateria. A autonomia da bicicleta diminui e reduz consequentemente a velocidade da bicicleta. A potência aumenta linearmente com o aumento do gradiente de inclinação.

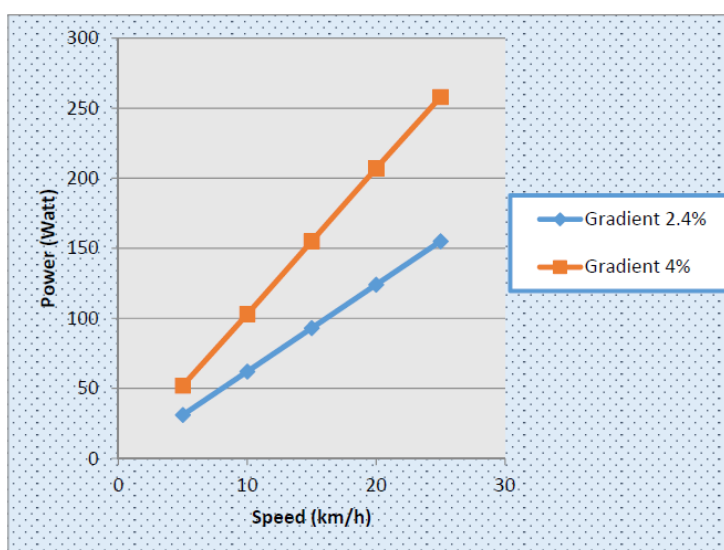


Figura 2.20: Efeito do gradiente: exigência de potência versus velocidade [63]

## 2.7. Conclusões

Neste capítulo apresentou-se o estado da arte das E-bikes, passando pela contextualização histórica e a sua integração atual no mercado da mobilidade eléctrica. Em seguida, apresentou-se os tipos de motores utilizados nas E-bikes, com destaque para os motores DC sem escovas, sendo apresentados dados comparativos entre os motores BLDC e BLAC. Apresentou-se a seguir os controladores dos motores, os sensores de efeito Hall e o sensor ótico, que são integrados com o controlador, desempenhando um papel fundamental no controlo e performance do motor.

Apresentou-se também o estudo dos consumos de energia dos motores eléctricos em modo de carga e em funcionamento. Constatou-se, portanto, que, para o modo de carga, a bicicleta demanda uma potência fixa à rede eléctrica, em função das suas características de fábrica. Porém, quando a E-bike está em movimento/funcionamento, sendo a bateria a fonte de alimentação para o motor, o consumo de energia depende maioritariamente do tipo de terreno a que a E-bike está submetida. Por fim, foram apresentadas e analisadas as curvas características das exigências energéticas dos modos de funcionamento das E-bikes para terrenos planos e montanhosos.

## Capítulo 3

# Tecnologia de baterias

### 3.1. Introdução

As baterias são dispositivos que armazenam energia química e a transformam em energia elétrica. Os elétrons produzem reações químicas que formam a corrente elétrica, denominadas reações eletroquímicas. Tecnicamente, as baterias são dispositivos eletroquímicos formados por duas ou mais células em série ou em paralelo em função das características da carga. Estas, trocam energia entre sistemas, ou seja, recebem energia elétrica, armazenam-na sob a forma química, e posteriormente devolvem essa mesma energia novamente sob a forma de energia elétrica [64].

As células podem ser montadas em série ou em paralelo, como já foi referido anteriormente. Esta disposição visa satisfazer as exigências energéticas dos dispositivos aos quais se destinam. As células são montadas em série caso se pretenda maior tensão nominal. O pólo positivo de uma célula é ligado ao pólo negativo da célula seguinte, Figura 3.1. A tensão da bateria é então a tensão das células multiplicada pelo número de células e a capacidade da bateria é a capacidade da célula individual. Esta configuração é a mais utilizada nas baterias [65].

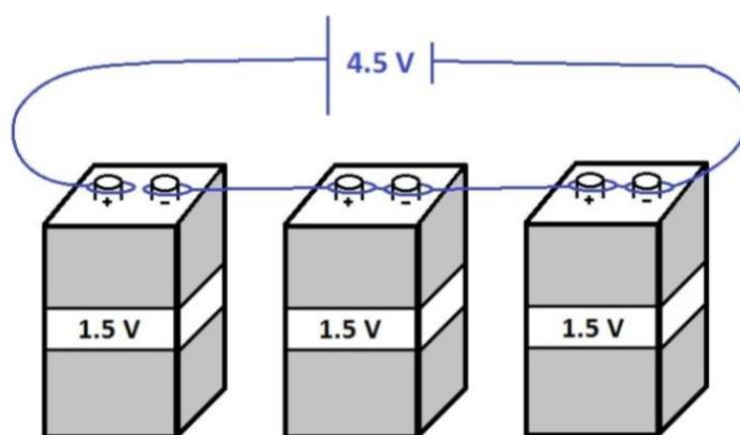


Figura 3.1 -Células de bateria ligadas em série [65]

As células são montadas em paralelo quando se pretende ter uma bateria de alta intensidade de corrente e conseqüentemente maior capacidade nominal. Os terminais positivos são ligados entre si e os terminais negativos são também ligados entre si, Figura 3.2. Neste caso, a tensão nominal da bateria será igual à tensão de uma célula individual. Para o correto funcionamento da bateria, as células devem ter as mesmas características.

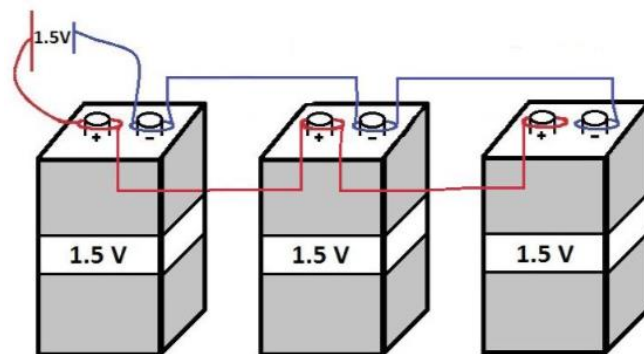


Figura 3.2 -Células de bateria ligadas em paralelo [65]

O esquema equivalente de uma bateria num circuito alimentado com uma fonte de tensão contínua é representado na Figura 3.3.

Dependendo da finalidade a que se destinam as baterias, estas são classificadas como primárias ou secundárias, sendo que o primeiro conceito diz respeito ao tipo de baterias fabricadas com o intuito de fornecer energia elétrica uma única vez. Por outro lado, as baterias secundárias são aquelas que podem ser recarregadas um número finito de vezes. As baterias usadas em E-bikes são do tipo secundárias, ou seja, recarregáveis, nas quais as reações que geram energia elétrica podem ser revertidas através da aplicação de energia de uma fonte externa, porém o número de ciclos de carga-descarga é limitado [3]. As baterias de ácido-chumbo, as baterias baseadas no lítio e as baterias baseadas no níquel são as mais conhecidas. Existem sete fatores importantes que são considerados na seleção de uma bateria: longevidade, segurança, densidade de potência (W/kg), custo, densidade de energia (Wh/kg), capacidade de energia (Ah) e tensão por célula [66].

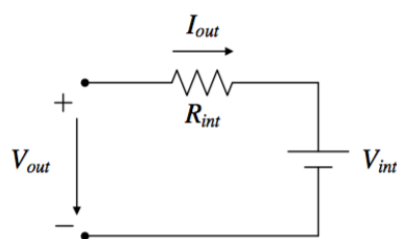


Figura 3.3 - Esquema equivalente de uma bateria.

A bateria inclui uma resistência interna  $R_{int}$  percorrida por uma corrente  $I_{out}$ , sendo  $V_{out}$  a tensão aos terminais da bateria e  $V_{int}$  a tensão interna da bateria, ou seja, a tensão quando esta se encontra em vazio. Assim, a tensão  $V_{out}$  medida aos terminais da bateria é definida por (3.1):

$$V_{out} = R_{int}I_{out} + V_{int} \quad (3.1)$$

Desta forma, a corrente que circula na bateria é dada por (3.2):

$$I_{out} = \frac{V_{out} - V_{int}}{R_{int}} \quad (3.2)$$

Quando  $V_{out}$  é superior a  $V_{int}$ , a bateria está a ser carregada, logo, assume-se que a corrente  $I_{out}$  é positiva e a energia flui no sentido da rede para o veículo eléctrico.

### 3.2. Parâmetros de uma bateria

#### 3.2.1. Capacidade

A capacidade nominal de uma bateria é dada em ampère-hora (Ah), que é a capacidade de corrente que uma bateria pode fornecer em uma hora. A capacidade de corrente (Ah) é expressa pela equação (3.3), sendo  $\Delta_t$  o tempo de descarga:

$$C_{Ah} = I \times \Delta_t \quad (3.3)$$

Ou de forma geral:

$$C_{Ah} = \int_0^t I(t) \cdot dt \quad (3.4)$$

Resumindo, a capacidade obtém-se pelo produto da corrente de descarga em ampère pelo tempo de descarga em horas. Se uma bateria fornece 2A de corrente eléctrica em duas horas, significa que tem uma capacidade de 4 Ah. A tensão das células, a corrente de carga e a temperatura são os parâmetros que influenciam a capacidade nominal de uma bateria.

#### 3.2.2. Taxa C

A taxa C representa a velocidade de descarga de uma bateria e relação à sua capacidade máxima. A corrente de descarga ou carga é descrita como uma taxa "C". Uma taxa de 3C significa que a bateria será descarregada completamente em 3 horas. Caso a bateria tenha uma capacidade de 150 Ah, isto quer dizer que a corrente é 150 A e será descarregada completamente numa hora. A taxa C é basicamente o índice de corrente máxima que uma bateria consegue debitar [65].

#### 3.2.3. Estado de carga (SOC)

A quantidade de energia armazenada na bateria é quantificada pelo seu estado de carga, em percentagem, dando aos utilizadores a informação necessária sobre a energia existente nas baterias [57]. Uma percentagem de 100 % corresponde à situação da bateria estar completamente carregada e 0% corresponde à bateria estar completamente descarregada. O estado de carga é calculado pela integração da corrente.

### 3.2.4. Profundidade de descarga (DOD)

A profundidade de descarga corresponde exatamente ao contrário do que representa o estado de carga: é a capacidade de energia gasta (descarregada) em relação à capacidade máxima que a bateria pode atingir sem se danificar. Este parâmetro é também expresso em percentagem e está diretamente relacionado com o número de ciclos de carga permitidos pelas baterias recarregáveis [65]. A profundidade de descarga pode ser calculada pela expressão (3.5):

$$DOD = 1 - SOC \quad (3.5)$$

### 3.2.5. Efeito de memória

Este efeito é causado pela formação de cristais e alterações químicas dentro da bateria, diminuindo assim a sua capacidade de descarga. Este efeito é prevenido deixando a bateria descarregar até a sua tensão de descarga mínima e recarregar quando é atingida essa tensão mínima, evitando assim que a bateria fique “viciada”. Quando uma bateria não é descarregada totalmente, a bateria guarda a tensão que tem aos seus terminais como sendo a tensão mínima, logo quando voltar a ser descarregada a bateria em vez de ter a tensão mínima nominal vai ter uma tensão mínima que corresponde ao valor de tensão guardado [64], [65].

### 3.2.6. Energia e potência específica

A potência específica é a quantidade de potência obtida por kg de bateria. É uma quantidade muito variável pois a energia fornecida pela bateria depende muito mais da carga que esta alimenta do que da própria bateria. A energia específica é a quantidade de energia elétrica armazenada em cada kg de massa da bateria e é dada por [64]:

$$Energia\ específica = Potência\ específica \times horas\ de\ serviço \quad (3.6)$$

$$\frac{Wh}{kg} = \frac{W}{kg} \times h = \frac{A.V.h}{kg} \quad (3.7)$$

Cada bateria é classificada a partir de um balanço entre a densidade de energia e a densidade de potência, Figura 3.4. A bateria é normalmente escolhida através dos requisitos de energia necessários para uma dada autonomia. Contudo, a relação entre a autonomia e a capacidade da bateria não é linear, pois o peso reduz a eficiência na estrada [67].



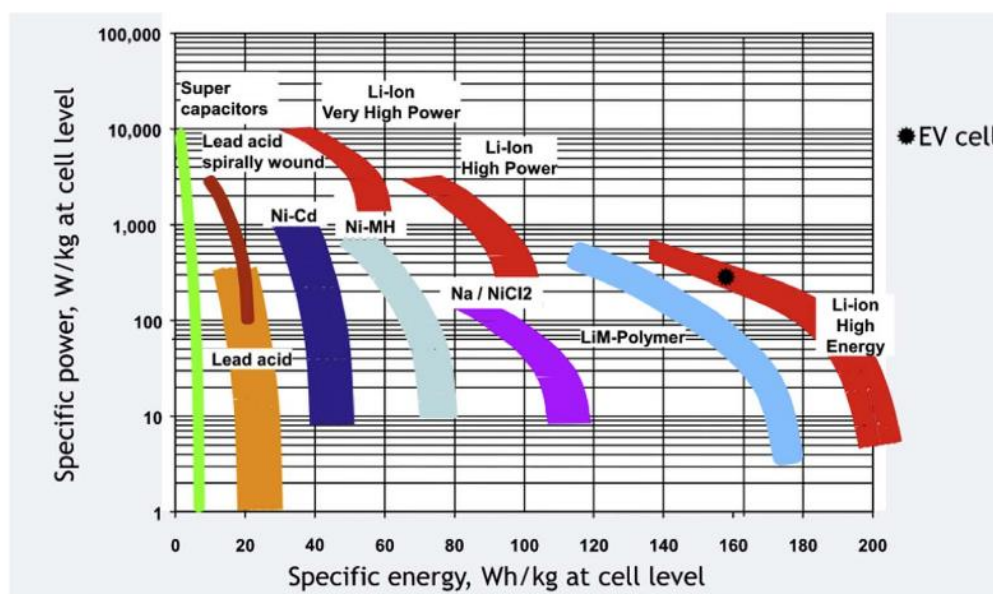


Figura 3.4 - Energia e potência específicas das diferentes baterias [67]

### 3.2.7. Tensão na célula e na bateria

A tensão de desempenho de uma bateria depende do número de células. A tensão obtida na descarga ou a tensão necessária em carga é a tensão de uma célula multiplicada pelo número de células da bateria [64].

### 3.2.8. Capacidade da célula e da bateria

A tensão da célula é determinada pelo seu eletrólito, mas a sua capacidade é variável. A capacidade de uma célula é basicamente o número de elétrons que podem ser obtidos a partir dela. Como a corrente é o número de elétrons por unidade de tempo, a capacidade da célula é a integração da corrente fornecida pela célula ao longo do tempo e é medida em Ah. A capacidade de uma célula é determinada pela quantidade de materiais ativos nela incluídos e é diretamente proporcional ao seu volume, ou seja, células maiores normalmente têm uma maior capacidade [64].

### 3.2.9. Taxa de retenção ou auto-descarga

A taxa de auto-descarga da maior parte das baterias convencionais é baixa. Normalmente, estas baterias são recarregadas periodicamente ou mantidas em “float” se forem para estar num estado de rápida disponibilidade. A maioria das baterias alcalinas podem ser armazenadas por longos períodos de tempo, mesmo estando descarregadas, sem que isso cause danos permanentes, podendo ser recarregadas quando haja necessidade da sua utilização. As baterias de ácido-chumbo não podem ser armazenadas descarregadas devido à sulfatação das placas, sendo prejudicial para o desempenho da bateria. Tipicamente, a taxa de retenção de capacidade diminui com o aumento do tempo de armazenamento. As baterias de Li-íon têm as melhores

características de retenção das baterias. A taxa de retenção nas baterias de Li-íon é tipicamente de 2% por mês à temperatura ambiente [64].

### **3.2.10. Resistência interna**

A resistência interna define-se como sendo a oposição à passagem da corrente, que tem como objetivo limitar a corrente de carga. O seu valor depende do estado de carga (SoC) e é diferente para a corrente de carga e para a corrente de descarga da bateria. A eficiência da bateria diminui à medida que a resistência interna aumenta e isso causa instabilidade térmica na bateria. A resistência interna deve ter um valor inferior ao da carga a aplicar à bateria, caso contrário a queda de tensão provocada pela corrente de descarga consumida pela carga vai limitar o tempo de serviço da bateria, ou seja, vai danificá-la [65].

### **3.2.11. Vida útil**

Descreve o número de ciclos de carga/descarga da bateria. O desempenho da bateria altera-se após ser atingido o número de ciclos definidos pelo fabricante. Os ciclos são dados tendo em conta a temperatura e a humidade a que as baterias estão sujeitas, bem como as condições de carga e de descarga [65].

## **3.3. Baterias de ácido-chumbo**

As baterias de chumbo são as mais utilizadas devido ao seu baixo custo e alta eficiência. Nestas baterias os elétrodos são constituídos por placas de chumbo imersos num eletrólito ácido, tipicamente o ácido sulfúrico. Os pólos negativos são de chumbo e os positivos são de dióxido de chumbo, o que resulta numa reação química com produção de sulfato de chumbo e água.

Possuem um tempo de vida de carga/descarga de 200 a 700 ciclos ao longo de 5 anos. Apesar de serem relativamente baratas e terem uma boa eficiência, são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde, pois há um risco de explosão se forem sobrecarregadas. O tempo de vida útil pode ser bastante reduzido pelas variações da temperatura durante o seu funcionamento, pois altas temperaturas aumentam a capacidade destas baterias, mas ao mesmo tempo diminuem o seu tempo de vida útil, enquanto que as baixas temperaturas diminuem a sua capacidade [66], [68].

Estas baterias não devem ser descarregadas totalmente, uma vez que uma descarga total pode impossibilitar a recarga da bateria, ou pelo menos, diminuir a capacidade de carga. O carregamento destas baterias deve ser feito com cuidado, pois carregamentos com tensões e correntes elevadas também diminuem o seu tempo de vida útil. A Tabela 3.1 apresenta as principais características desta bateria. Possui as seguintes vantagens [65], [66], [68]:

- Barata e simples de fabricar;
- Tecnologia madura, confiável e bem conhecida;

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

- Baixa auto-descarga: a taxa de auto-descarga é de entre as mais baixas em baterias recarregáveis;
- Baixa necessidade de manutenção;
- Capaz de suportar altas taxas de descarga.

Em contrapartida, apresenta as seguintes desvantagens:

- Não deve ser armazenada descarregada;
- Baixa densidade de energia;
- Ambientalmente hostil - o eletrólito e o conteúdo de chumbo podem causar danos ambientais;
- Vida útil limitada;
- Carga lenta.

Tabela 3.1 - Características da bateria de ácido-chumbo [65], [66], [68]

Tensão da célula	Temperatura de operação	Auto-descarga	Energia específica	Densidade de energia	Potência específica
2 V	-15 a +50 °C	<5 %	30 Wh.kg <sup>-1</sup>	25-26 Wh.dm <sup>-3</sup>	<300 W.kg <sup>-1</sup>

## 3.4. Bateria baseadas no níquel

### 3.4.1. Baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd)

As baterias de níquel-cádmio (NiCd) são constituídas por um cátodo de hidróxido de níquel, um ânodo de cádmio e um eletrólito alcalino, tipicamente hidróxido de potássio. Possuem um elevado número de ciclos de carga/descarga. Se for mantida corretamente, fornece 1500 ciclos de carga ou descarga. Permite carregar a baixas temperaturas e têm um prazo de validade longo em qualquer estado de carga. Devem ser completamente descarregadas para evitar o efeito memória, diminuindo assim a tensão fornecida pela bateria. Na Tabela 3.2 mostram-se as principais características desta bateria. Apresentam-se de seguida as principais vantagens [64], [65], [69]:

- Carga rápida e simples - mesmo após armazenamento prolongado;
- Alto número de ciclos de carga/descarga - se mantida adequadamente;
- Bom desempenho de carga;

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

- Vida útil longa - em qualquer estado de carga;
- É uma das baterias recarregáveis mais robustas;
- Tem o menor custo de bateria em termos de custo por ciclo;
- Disponível numa ampla gama de tamanhos e opções de desempenho;

Porém, têm as seguintes desvantagens:

- Densidade de energia relativamente baixa em comparação com sistemas mais recentes;
- Ambientalmente hostil - contém metais tóxicos;
- Alguns países estão a limitar o uso da bateria de Ni-Cd;
- Possui auto-descarga relativamente alta - precisa de recarga após o armazenamento.

Tabela 3.2 - Características da bateria de Níquel-Cádmio [64], [65], [69]

Tensão da célula	Temperatura de operação	Auto-descarga	Energia específica	Densidade de energia	Potência específica
1.2 V	-20 a +50 °C	<10 %	20-55 Wh.kg <sup>-1</sup>	25-60 Wh.dm <sup>-3</sup>	150-300 W.kg <sup>-1</sup>

### 3.4.2. Bateria de hidreto metálico de níquel (NiMH)

Apresentam uma constituição semelhante à das baterias de Níquel-Cádmio, ambas usam a mesma reação química no eletrodo positivo, oxi-hidróxido de Níquel (NiOOH) e ambas recorrem a um eletrólito de hidróxido de potássio (KOH), mas nestas, o eletrodo negativo usa uma liga absorvente de hidrogénio (na forma de hidreto metálico) em vez de Cádmio. O eletrodo de hidreto metálico apresenta uma maior densidade de energia do que o eletrodo de Cádmio, por isso, uma bateria de hidretos metálicos consegue ter duas ou três vezes mais capacidade do que uma bateria de Níquel-Cádmio do mesmo tamanho [69].

Possuem um tempo de vida de carga/descarga bastante elevado, chegando aos 3000 ciclos a 100% DOD. São baterias menos tolerantes a sobrecargas, em comparação com as de NiCd. Outro problema é a alta taxa de auto-descarga. Uma descarga completa destas baterias pode causar danos permanentes devido à inversão de polaridade, diminuindo assim o seu tempo de vida útil. As principais características destas baterias são apresentadas na Tabela 3.3. Estas baterias estão presentes na maior parte dos VE e PHEV de primeira-geração, embora ainda hajam alguns modelos que não usem estas baterias. Apresentam as seguintes vantagens [65], [69]:

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

- Maior capacidade em comparação com uma bateria Ni-Cd - o NiMH tem potencial para densidades de energia ainda maiores;
- Menos propensa ao efeito de memória do que a bateria de Ni-Cd;
- Ambientalmente amigável - contém apenas toxinas leves; rentável para reciclagem;
- Gera mais calor durante a carga e requer um tempo de carga maior que a de Ni-Cd;
- Mais cara que a bateria de Ni-Cd.

No entanto, as desvantagens são:

- Vida útil limitada - preferem-se ciclos de descarga superficiais em vez de profundos;
- Descargas repetidas com altas correntes de carga reduzem o ciclo de vida da bateria;
- Alta auto-descarga - tem cerca de 50% menos tempo de armazenamento do que a bateria de Ni-Cd;
- Degradação do desempenho, se armazenada a temperaturas elevadas;
- Alta manutenção - requer descarga total regular para evitar a formação de cristais.

Tabela 3.3 - Características da bateria de Hidreto Metálico de Níquel [64], [69]

Tensão da célula	Temperatura de operação	Auto-descarga	Energia específica	Densidade de energia	Potência específica
1.4-1.6 V	-20 a +60 °C	<20 %	80 Wh.kg <sup>-1</sup>	150 Wh.dm <sup>-3</sup>	200 W.kg <sup>-1</sup>

### 3.5. Baterias baseadas no lítio

Atualmente, é a bateria top de gama aplicada na maioria dos VE atuais. Cada célula das baterias de Lítio é constituída por dois elétrodos, um cátodo de Lítio, um ânodo de carbono poroso, um eletrólito, composto por sais de lítio numa solução não aquosa e por um separador. Nestas, os iões de Lítio vão do elétrodo negativo para o elétrodo positivo durante o descarregamento e vice-versa durante o carregamento.

Têm um tempo de vida de carga/descarga menor do que as de Hidreto metálico de Níquel, com cerca de 1200 ciclos. A auto-descarga destas baterias é mínima e não têm efeito de memória. Apresentam uma boa performance a altas temperaturas, mas a exposição prolongada a estas temperaturas degrada a bateria, reduzindo o seu tempo de vida útil. Oferecem também um bom

desempenho em termos de carregamento a baixas temperaturas, dos 5°C aos 45°C, permitindo assim um carregamento rápido [64], [69].

Como estas baterias não viciam, não é necessário carregarem totalmente, no entanto, não podem descarregar completamente porque podem ser danificadas. Se ocorrer um sobreaquecimento ou uma sobrecarga, estas podem arder ou até mesmo explodir. No entanto, para que tal não aconteça, existem mecanismos de segurança que desligam a bateria quando a tensão sai fora dos limites considerados seguros (3 a 4.2 V). São, atualmente, as baterias mais utilizadas em VE e HEV e são mais caras em relação às outras tecnologias. As principais características desta bateria são mostradas na Tabela 3.4. Apresentam as seguintes vantagens [65], [66], [69]:

- Maior densidade de energia em relação ao peso;
- Elimina a necessidade de cuidados periódicos para obtenção de uma vida útil longa;
- Não tem efeito de memória;
- Alcança uma melhor relação custo-benefício para baterias em série do que para uma única célula;
- É indiscutivelmente melhor para o meio ambiente, do ponto de vista da matéria-prima utilizada;
- A bateria cobalto de lítio é a tecnologia mais desenvolvida, com flexibilidade nas opções de formato.

Porém, apresentam as seguintes desvantagens:

- É necessário um circuito de proteção para evitar o sobreaquecimento;
- O envelhecimento pode depender das condições de armazenamento (melhor armazenadas quando num estado de carga de 30%);
- Pode danificar-se facilmente por excesso de (des)carga.

Tabela 3.4 - Características da bateria de Lítio [65], [66], [69]

Tensão da célula	Temperatura de operação	Auto-descarga	Energia específica	Densidade de energia	Potência específica
3-4.2 V	-20 a +50 °C	<5 %	100 Wh.kg <sup>-1</sup>	250-620 Wh.dm <sup>-3</sup>	300-1500 W.kg <sup>-1</sup>

Com o avanço dos EVs, a tecnologia das baterias de íões de lítio tiveram também grandes progressos nos últimos anos, fruto dos estudos significativos realizados nas áreas da química e da

ciência dos materiais, onde se analisaram diferentes materiais anódicos, catódicos e eletrólitos [69].

### 3.6. Métodos de carregamentos das baterias

O carregamento de uma bateria deve ser cuidadosamente manipulado para garantir a aceitação da carga dentro da duração de carga pré-especificada pelo fabricante, cumprindo em simultâneo os requisitos de segurança [64]. Devido à diversidade das tecnologias de baterias, nem todas devem ser carregadas com o mesmo método, nem com os mesmos níveis de tensão ou de corrente. A escolha do algoritmo de carregamento deve ter em consideração o tipo de bateria a que se destina, bem como as suas características, de modo a que o carregamento desta ocorra em segurança. O processo de carregamento da bateria pode ser conseguido por aplicação de diferentes algoritmos de carregamento, e em diferentes estágios de carregamento. Apresentam-se a seguir, os métodos envolvidos no sistema de carregamento de baterias.

#### 3.6.1. Corrente constante/tensão constante

Este é o método mais indicado para baterias que são vulneráveis a serem gravemente danificadas quando o seu limite máximo de tensão é excedido, como é o caso das baterias de íões de lítio. É o mais usado no carregamento das baterias pela sua simplicidade e facilidade de implementação, e é caracterizado por três fases de operação.

A primeira fase, denominada de *trickle charge* (carga lenta), corresponde a uma tensão na célula abaixo do valor crítico de  $V_{trickle}$ . Assim, a célula deveria ser carregada com uma baixa corrente, na ordem de  $C/10$ , da capacidade nominal da célula. Quando a tensão da célula atinge o valor de  $V_{trickle}$ , o algoritmo de carregamento passa para a segunda fase. Aqui a célula é sujeita a uma corrente constante, com um valor predeterminado e fixo que varia entre  $0.5 C$  e  $3.2 C$ , dependendo das especificações de cada célula. Quando a tensão da célula atinge o  $V_{charge}$  (normalmente  $4.2 V$ ), o algoritmo atinge a terceira fase. Aqui a célula é sujeita a uma tensão constante, e quando a sua corrente atinge um valor por defeito, na ordem de  $0.1 C$ , ou o máximo tempo de carregamento, o processo fica completo. Este algoritmo apresenta algumas desvantagens, entre elas o tempo de carregamento [70]. Este algoritmo constitui uma solução segura e relativamente rápida e é utilizado em baterias de íões de Lítio e em baterias de Chumbo-Ácido [70],[71],[72]. Na Figura 3.5 está representada a evolução da tensão e da corrente ao longo do tempo para este método de carregamento.

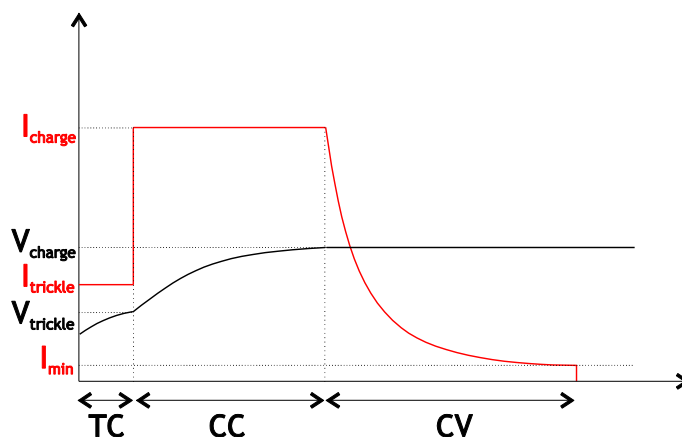


Figura 3.5 - Algoritmo de carregamento CC/TC [70]

### 3.6.2. Multistage

Um dos algoritmos de carregamento direcionados para minimizar a desvantagem do tempo de carregamento é o algoritmo multistage, que consiste em múltiplas fases de carregamento com diferentes níveis de corrente, Figura 3.6. Este método estabelece diferentes níveis de corrente e de condições para as fases do carregamento. O critério mais usado para alternar entre as fases de carregamento é um limite definido de tensão da célula, que reduz a corrente e torna as leituras da tensão mais realísticas, uma vez que a queda de tensão através da resistência interna da célula é menor [70]. Por vezes são escolhidos algoritmos de otimização para encontrar as melhores fases e níveis, baseados em abordagens diferentes, como o algoritmo PSO ou controladores fuzzy [73].

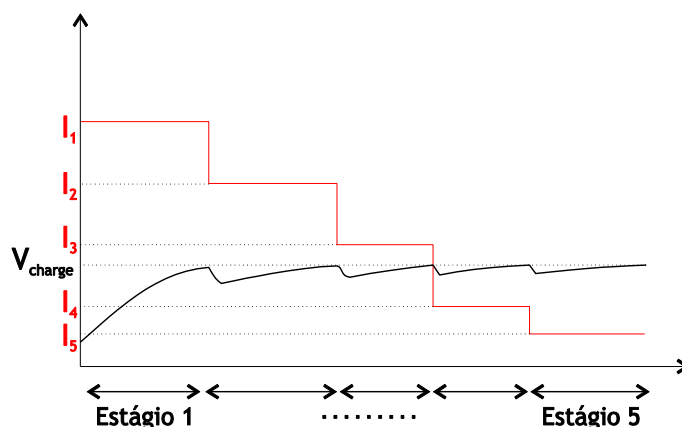


Figura 3.6 - Algoritmo de carregamento multistage [70]

### 3.6.3. Pulso de corrente

O algoritmo de carregamento por pulso de corrente surgiu com a finalidade de diminuir o risco de ocorrência de sobrecargas, quando se adota a solução de carregamento em corrente constante, e aumentar a eficiência do processo de carga da bateria. O processo de carga por pulsos de corrente consiste, genericamente, em aplicar um pulso de corrente com uma duração



típica de cerca de 1 segundo, seguido de um período de descanso (corrente nula) de tipicamente 20 a 30 microssegundos [74].

O período de pausa permite a estabilização das reações eletroquímicas, permitindo um menor aumento da temperatura, diminuindo-se o risco de sobrecarga e aumentando a eficiência do processo. Outra vantagem do período de descanso é o facto de se suavizarem eventuais reações não desejadas, como por exemplo, formação de cristais, que provocam uma diminuição do potencial e do tempo de vida útil da bateria [75]. Os algoritmos de carregamento por pulso fazem uso da corrente pulsada, podendo ser subdivididos em duas metodologias distintas, *variable frequency pulse charge* (VFPC) e *variable duty pulse current* (VDPC) [70], Figura 3.7. Na metodologia VFPC é otimizada a frequência da corrente pulsada, de forma a minimizar a impedância da célula, e consequentemente, maximizar a transferência de energia. Esta maximização pode ser alcançada ajustando a amplitude do pulso e variando a largura do pulso, ou vice-versa, como na metodologia VDPC.

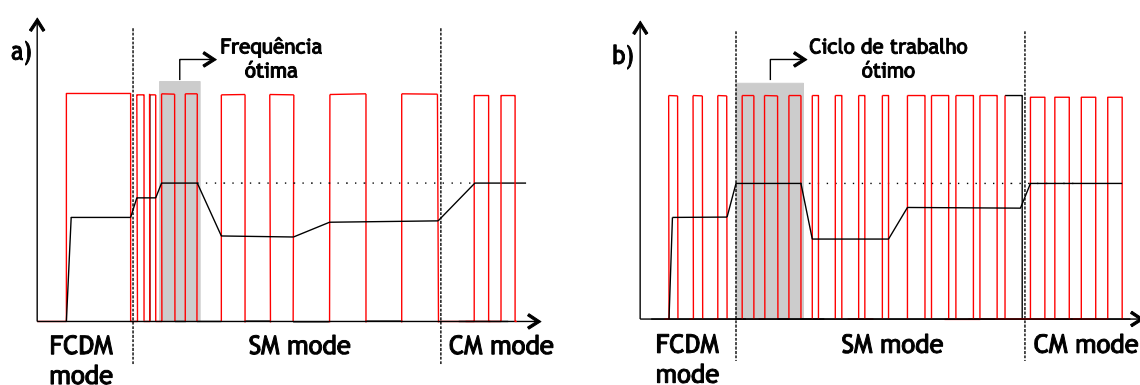


Figura 3.7 - Método de carregamento pulsado: a) VFPC; b) VDPC [70]

A Figura 3.8 apresenta uma comparação entre os diferentes métodos de carregamento, onde é visível que carregamento por pulso é o pior em termos de complexidade de implementação e controlo, embora também seja bastante eficiente. O carregamento multistage tem a melhor relação em termos de eficiência, simplicidade, controlo e tempo de carregamento [70].

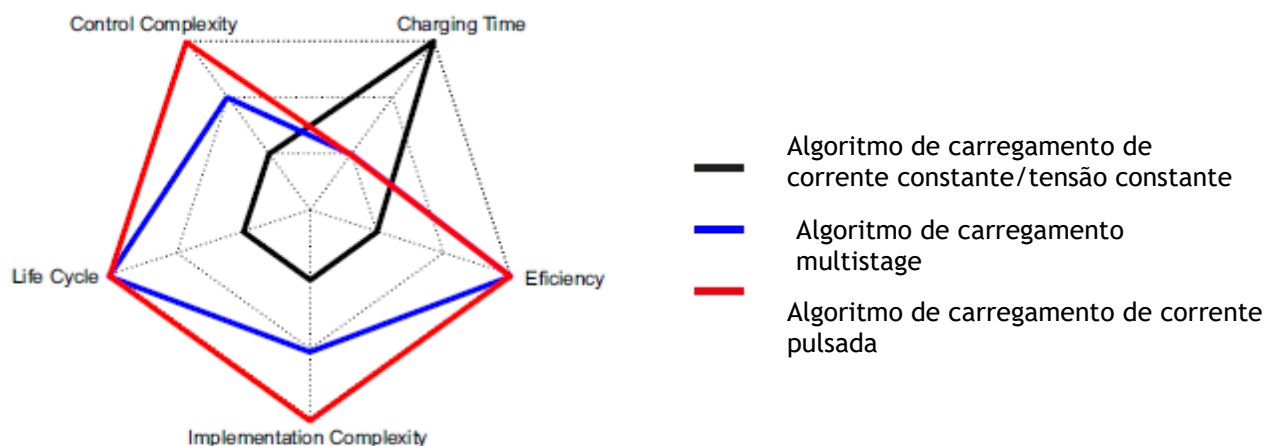


Figura 3.8 - Comparação dos algoritmos de carregamento das baterias. Adaptado de [70].

### 3.7. Gestão de carregamento das baterias

Conforme foi visto anteriormente, as baterias são constituídas pela junção de células, que são um bloco básico de construção eletroquímica ligados em série e/ou paralelo. O sistema de gestão de baterias BMS controla os níveis de tensão e de corrente das células ao longo do carregamento. O BMS é responsável pelo carregamento dentro dos limites de segurança das baterias, definidos pelo construtor, quer ao nível da temperatura, quer ao nível do estado de carga e da corrente de carga ou descarga, com o intuito de maximizar a vida útil das baterias.

#### 3.7.1. BMS

O BMS é o sistema de gestão e monitorização utilizado para gerir o conjunto de células de uma bateria, com o objetivo de se obter o melhor rendimento possível, maximizar o seu tempo de vida útil e garantir o funcionamento dentro dos seus valores nominais durante o carregamento. Uma E-bike deve incorporar um BMS que permita monitorizar e controlar todos os parâmetros necessários durante o carregamento. Do mesmo modo, o BMS também controla as correntes que o motor demanda da bateria nas mais diversas situações de funcionamento. De forma geral, as tarefas de um BMS são [39][76]:

- Proteção das baterias contra sobrecarga e descarga profunda;
- Monitorização e medição em tempo real, e com precisão, dos diversos parâmetros de operação das baterias como a temperatura, tensão e corrente;
- Cálculo do estado de carga das baterias;
- Controlo da corrente, tensão e temperatura das baterias;
- Cálculo da autonomia de energia disponível nas baterias;

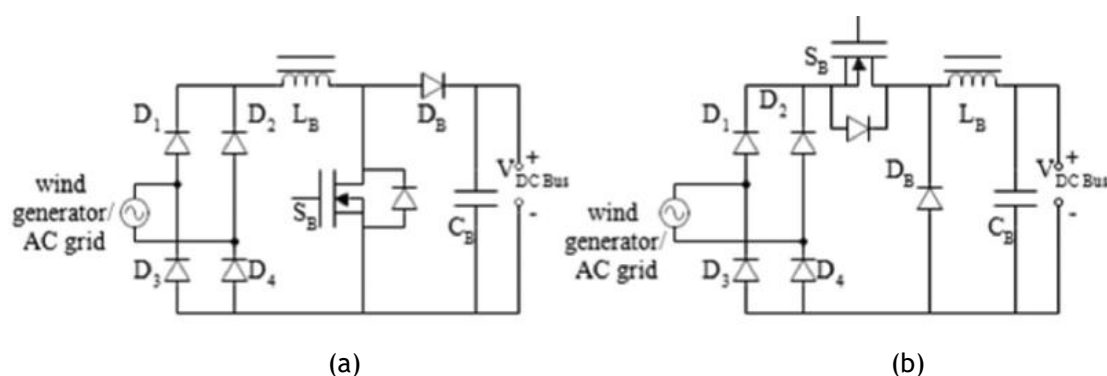
- Cálculo da profundidade de descarga das baterias;
- Equalização da energia nas baterias, distribuindo uniformemente a energia por cada bateria;

### 3.8. Conversores

No carregamento sem fios, são necessários dois conversores de potência, um no lado primário e o outro no lado secundário. No lado primário, geralmente é empregada uma etapa dupla de conversão, resultante da cascata de um AC-DC e um DC-AC. O objetivo deste estágio duplo é aumentar a frequência da potência da rede para dezenas de kHz. No lado secundário, é necessário um estágio AC-DC para carregar a bateria. O estágio AC-DC no lado primário é normalmente padronizado, sendo que a investigação em torno destes temas se faz ao nível do estágio entre a seção DC primária e a seção DC secundária [77]. No que diz respeito ao lado secundário, pode-se ligar o lado AC secundário à bateria DC através de um retificador passivo e de um conversor DC-DC ou um estágio AC-DC ativo [35]. A seguir, são descritas as topologias de conversores DC-DC existentes.

#### 3.8.1. Conversores DC-DC para correção do fator de potência

O nível de tensão DC convertido deve ser controlado para carregar a bateria. Por isso, um conversor DC-DC é essencial para aumentar ou diminuir a tensão DC convertida. Os conversores *buck*, *boost* e *buck-boost* são os conversores convencionais usados para este fim, Figura 3.9. É por isso, necessário ter um conversor AC-DC em série com um conversor DC-DC para converter a tensão AC na tensão DC necessária. Estes conversores comportam-se como uma carga não linear para a rede, e devido a esta característica, os harmônicos da corrente são injetados na rede AC, o que causa um fraco fator de potência de entrada. Para que se obtenha o fator de potência unitário e alta eficiência, a correção do fator de potência tem de ser incorporada nestes conversores. Os conversores convencionais *boost*, *buck* e *buck-boost* são as topologias para correção do fator de potência mais populares, em que um retificador de ponte completa é usado para a conversão AC-DC. Nestes conversores, a eficiência é reduzida devido à perda no circuito de diodos em ponte [78].



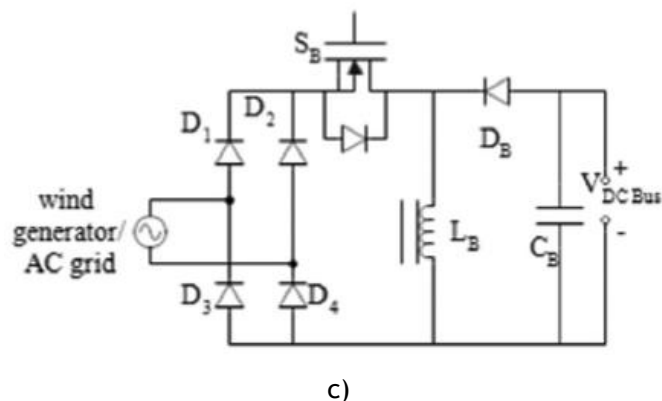
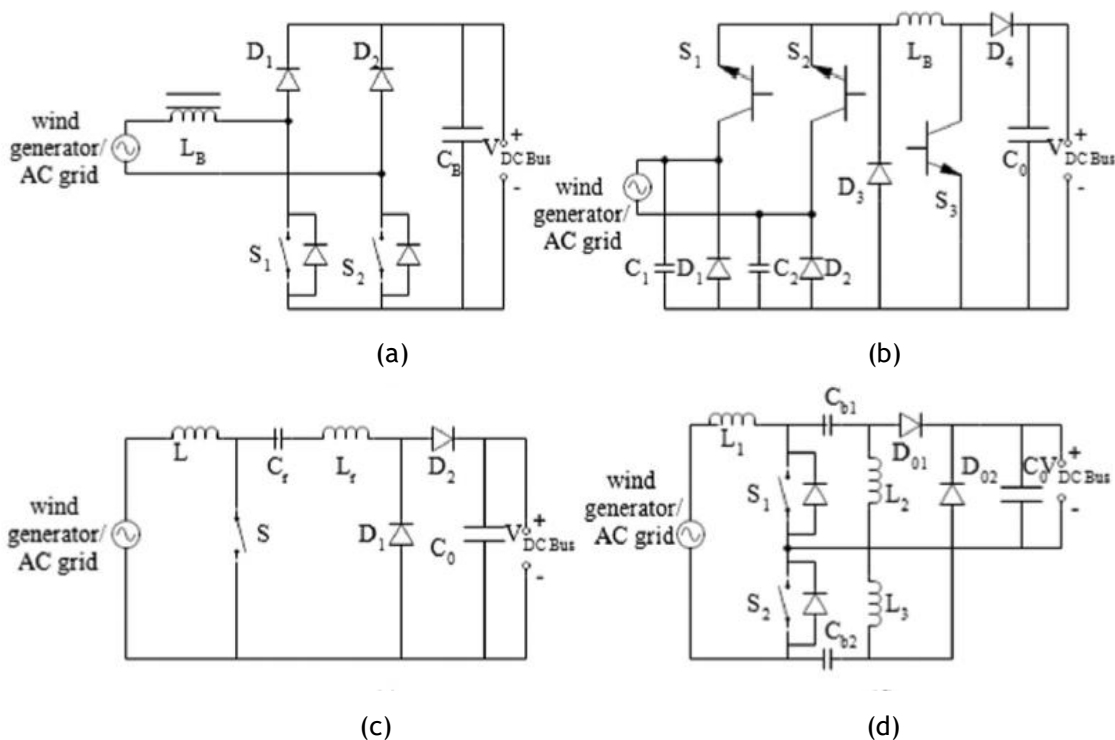
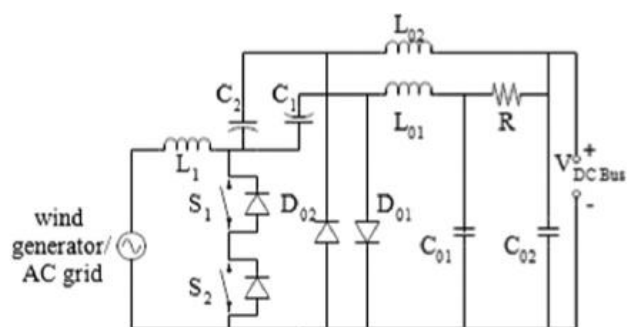


Figura 3.9 - Conversor *boost* (a), conversor *buck* (b) e conversor *buck-boost* (c) [78]

Para minimizar as perdas e reduzir o tamanho e quantidade dos componentes, foram propostas várias topologias sem pontes, tais como *boost*, *buck-boost*, *pseudo boost*, conversores de indutância primária *single ended* (SEPIC) e conversores *cuk*, que maximizam a eficiência do sistema, Figura 3.10. O conversor *pseudo boost* é um conversor *boost* modificado e o SEPIC e *cuk* são conversores *buck-boost* melhorados. Embora o conversor *boost* sem ponte seja a topologia preferida devido ao seu baixo custo, alta eficiência e simplicidade, este conversor tem uma maior emissão eletromagnética e uma elevada corrente de entrada. Estes problemas não existem nos conversores sem ponte SEPIC e *cuk*. Para aplicações de baixa tensão, usa-se um retificador sem ponte; para correção do fator de potência é usado um retificador sem ponte *cuk* [78].





(e)

Figura 3.10 - Conversor boost sem ponte (a), conversor PFC buck-boost sem ponte (b), conversor PFC pseudo-boost sem ponte (c), conversor PFC SEPIC sem ponte (d) e retificador cuk sem ponte (e) [78]

### 3.8.2. Métodos de controlo

No carregamento sem fios das E-bikes, os métodos de controlo são projetados para permitir o funcionamento do sistema com uma grande eficiência, permitindo ainda obter os valores desejados de tensão nas saídas e a transferência de energia da rede para as baterias, que precisa ser controlada. Muitos métodos diferentes de controlo foram propostos para o fazer. Dependendo de onde a ação de controlo é aplicada, o método de controlo pode ser classificado como controlo primário, controlo secundário e controlo duplo [35].

#### 3.8.2.1. Controlo primário

O estágio DC-AC do lado primário é fornecido pela ligação DC e produz a forma de onda AC útil para produzir a corrente alternada que flui na bobina primária e induz outra corrente na bobina secundária. As topologias implementadas no estágio DC-AC são: meia ponte e ponte completa. A topologia de meia ponte é mostrada na Figura 3.11. A forma de onda quadrada produzida  $V_1$  varia entre os valores  $(-V_{dc}/2)$  e  $(V_{dc}/2)$ , sendo  $V_{dc}$  a tensão de alimentação DC. O ciclo de trabalho de  $V_1$  corresponde ao ciclo de trabalho do sinal que controla os dois interruptores MOSFET; quando o MOSFET superior está à condução, o inferior está ao corte e vice-versa. Este conversor tem perdas de comutação e condução baixas, o que leva a uma maior eficiência [35].

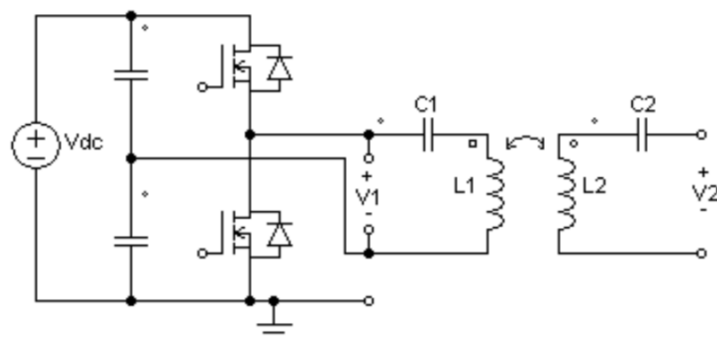


Figura 3.11 - Conversor DC-AC de meia ponte no lado primário [35]

O conversor de ponte completa é mostrado na Figura 3.12. Para a topologia de ponte completa, a forma de onda AC produzida,  $V_1$ , varia entre  $-V_{dc}$  e  $V_{dc}$ , sendo  $V_{dc}$  a tensão de alimentação DC.

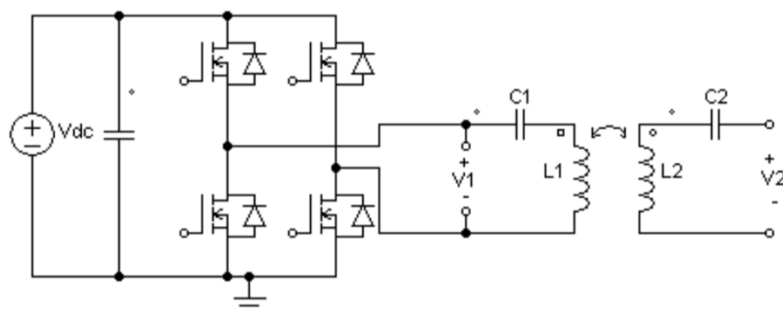


Figura 3.12 - Conversor DC-AC de ponte completa no lado primário [35]

A topologia em ponte completa é mais complexa de controlar, já que inclui quatro elementos ativos ao invés da topologia em meia ponte, que só tem dois elementos ativos para controlar. Na ponte completa, para além da duplicação de interruptores, exige o correto controlo dos dois braços. O fluxo de energia na ponte completa pode ser ajustado corretamente de acordo com uma modulação de mudança de fase: a energia é regulada controlando a diferença de fase entre os dois sinais que conduzem os dois braços da ponte completa. O controlo primário pode ser realizado alterando a frequência, o ciclo de trabalho e a fase entre os dois braços do conversor.

### 3.8.2.2. Controlo secundário

No lado secundário, é necessário um estágio AC-DC para converter a tensão AC decorrente da transferência de energia indutiva para uma tensão DC útil para carregar a bateria. De acordo com questões de eficiência e controlo, duas soluções alternativas são utilizáveis para o estágio AC-DC: um retificador passivo ou um retificador ativo. O retificador passivo tipicamente consiste numa ponte convencional de quatro díodos que simplesmente retifica o sinal de AC resultante das bobinas acopladas magneticamente. No entanto, a tensão DC produzida deve ser regulada para ser fornecida à bateria recarregável. Portanto, é necessário um estágio DC-DC intermédio entre o retificador passivo e a bateria, de modo a que a corrente de carga possa ser devidamente controlada [35]. Esta solução é mostrada na Figura 3.13.

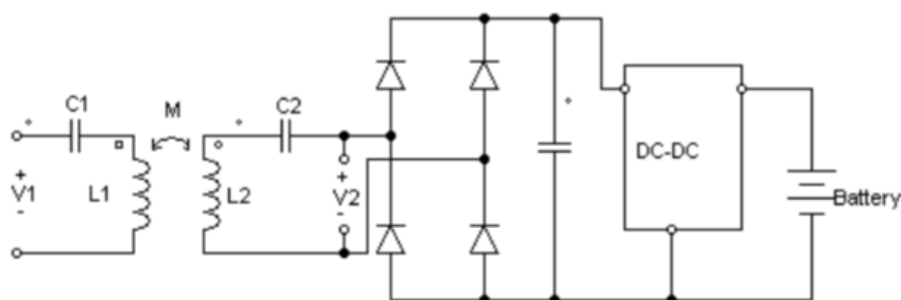


Figura 3.13 - Retificador passivo e estágio DC-DC no lado secundário [35]

A desvantagem de se usar outro estágio de conversão pode ser evitada utilizando um estágio AC-DC ativo. O uso de um retificador passivo convencional no estágio AC-DC não é conveniente em termos de eficiência e de controlo. No que diz respeito à eficiência, o uso de elementos ativos é mais interessante, considerando a ultrabaixa resistência dos MOSFET de potência. No que diz respeito à capacidade de controlo, um estágio ativo dá a oportunidade de controlar diretamente a corrente de carga da bateria, não requerendo um conversor DC-DC adicional para alimentar a bateria. Na Figura 3.14 é mostrado um estágio de conversão com dois díodos e dois MOSFETs. A quantidade de energia que flui em direção à bateria é ajustável controlando a diferença de fase entre os sinais aplicados nos MOSFETs [79], [80].

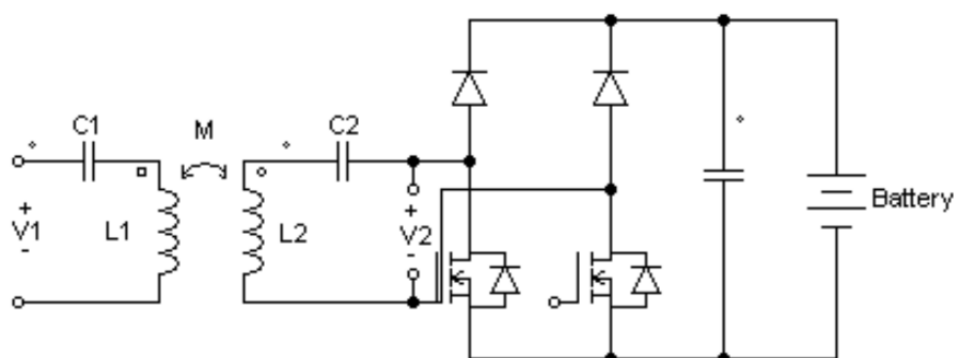


Figura 3.14 - Conversor AC-DC de dois díodos e dois MOSFETs [35]

O controlo de frequência no lado primário tem sido adotado em alguns projetos, pois a característica de um conversor ressonante está relacionada com a frequência de operação [35]. O controlo duplo consiste, portanto, na aplicação dos dois controlos.

### 3.9. Conclusões

A indústria automóvel e o mercado dos dispositivos eletrónicos móveis são os mais promissores para despoletar uma grande evolução na evolução das baterias. Neste capítulo fez-se uma abordagem à bateria, desde a definição dos seus parâmetros principais até à descrição das tecnologias utilizadas na bateria designadamente, as baterias de ácido-chumbo, as baterias baseadas no lítio e as baterias baseadas no níquel.

As baterias de íões de Lítio são as mais utilizadas em E-bikes, VE e HEV, pois, entre outras razões, fornecem uma grande potência, têm grande densidade de energia e baixo peso, o que é bastante importante nestes veículos. No entanto, possuem desvantagens, pois nenhuma das tecnologias de bateria consegue fornecer uma solução totalmente satisfatória com todos os requisitos.

Cada bateria tem as suas características intrínsecas típicas da sua construção, que devem ser respeitadas aquando da sua utilização. Posto isto, apresentaram-se os diferentes métodos de carregamentos de baterias, seguidos do sistema de gestão de carregamento, sendo o BMS o sistema responsável pelo cumprimento das especificações técnicas de cada bateria.

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

Por fim, foram apresentados e analisados os conversores usados para conversão de energia AC-DC bem como os conversores DC-DC e os três tipos de controle dos conversores aplicados na transferência de energia sem fios.

A mobilidade constitui nos dias de hoje, a riqueza do desenvolvimento dos VE e como tal, as baterias são o elo mais fraco, mas, entretanto, constituem o pilar da sua subsistência.



## Capítulo 4

# Sistema de carregamento indutivo ressonante

### 4.1. Introdução

As soluções por acoplamento indutivo ressonantes são as tecnologias mais promissoras para o carregamento sem fios. As vantagens deste sistema, conforme visto no capítulo 1, é o de satisfazerem os requisitos para o carregamento de baterias de E-bikes.

### 4.2. Princípio de funcionamento

Conforme foi visto no capítulo 1, este sistema funciona de forma idêntica ao de um transformador. Na Figura 4.1 encontra-se o esquema elétrico do acoplamento entre o primário e o secundário. A transferência de energia ocorre como se segue: a corrente sinusoidal ao circular no enrolamento primário com uma frequência angular  $\omega$  e um valor de corrente eficaz  $I_p$ , origina-se um campo magnético variável, segundo a lei de Ampère. Este campo magnético segundo a lei de Faraday, induz uma força eletromotriz no enrolamento secundário, dando origem a uma diferença de potencial  $V_s$  aos terminais do enrolamento secundário. Semelhantemente, este campo magnético criado pela corrente sinusoidal no secundário com frequência angular  $\omega$  e valor eficaz  $I_s$ , induz uma força eletromotriz que origina uma diferença de potencial  $V_p$  no enrolamento primário.

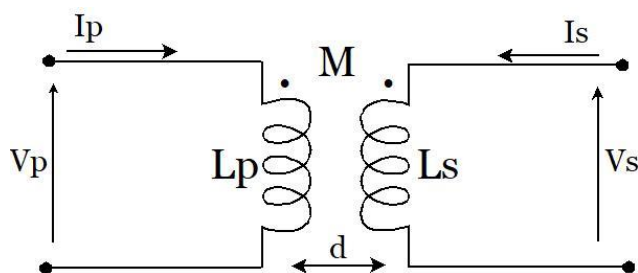


Figura 4.1 - Esquema elétrico do modelo de acoplamento entre o primário e o secundário.

Nesse circuito,  $I_p$  e  $I_s$  representam, respetivamente, as correntes das bobinas primária e secundária;  $L_p$  e  $L_s$  representam, respetivamente, as indutâncias própria das bobinas primária e secundária;  $d$  é a distância de entreferro entre as bobinas;  $M$  é a indutância mútua entre as bobinas, e  $V_p$  e  $V_s$  são as tensões de alimentação e de saída do circuito, respetivamente.

O fator de acoplamento,  $k$ , quantifica o nível de acoplamento entre os enrolamentos e varia entre 0 e 1, onde 1 corresponde ao acoplamento máximo e 0 a nenhum acoplamento. Diz-se que o sistema de acoplamento é fraco quando o seu valor varia entre  $0 \sim 0.2$ . Para melhorar as tensões induzidas  $V_p$  e  $V_s$ , quando tal sucede, utilizam-se fontes de alimentação com altas frequências (10-50 kHz) [19]. O valor da indutância mútua depende do número de espiras dos enrolamentos, da distância do entreferro entre os enrolamentos primário e secundário, bem como do grau de desalinhamento entre ambos os enrolamentos. Em suma, este parâmetro depende das características da estrutura de acoplamento magnético. Quando o valor da indutância mútua é reduzido, originam-se valores elevados de indutância de fugas em ambos os enrolamentos primários e secundários. Os valores das indutâncias de fugas são compensados através das topologias ressonantes, maximizando a capacidade de transferência do sistema. A indutância mútua entre as bobinas e o fator de acoplamento são dados por:

$$M = \sqrt{L_p * L_s} \quad (4.1)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p * L_s}} = \quad (4.2)$$

Conclui-se, portanto, que, a indutância mútua é um fator que relaciona parâmetros de construção dos indutores que tendem a ser constantes. A indutância mútua tende a ser maior quanto maior for o número de enrolamentos das bobinas e do seu raio.

### 4.3. Topologias de compensação

Existe compensação série e compensação paralela, sendo que na compensação série é colocado um condensador em série com a bobina do primário e/ou do secundário, e na compensação paralela é colocado um condensador em paralelo com a bobina do primário e/ou do secundário. No lado primário, a compensação é utilizada para reduzir ao máximo o consumo de energia reativa por parte do sistema, o que permite minimizar a potência aparente da fonte de alimentação. Quando perfeitamente compensado, a fonte fornece uma tensão em fase com a corrente, o que faz com que a transferência de energia do primário para o secundário ocorra com um fator de potência unitário.

No lado secundário, a compensação sintoniza o circuito de forma a que este tenha a mesma frequência de ressonância que o lado primário, sendo a transferência de energia maximizada. As topologias de compensação também auxiliam a comutação suave dos transistores de potência e reduzem as perdas dessa mesma comutação; tornam a corrente ou a tensão de carregamento constante, o que significa que quando o valor quadrático médio da tensão é fixo, também a saída de corrente ou tensão DC é fixa [81]. São quatro as topologias básicas de compensação usadas no acoplamento indutivo ressonante: SS, SP, PS e PP, Figura 4.2. Para simplificar a ilustração, foram omitidas as resistências série equivalentes das bobinas.

O S significa série e o P paralelo, indicando de que forma os condensadores estão ligados à bobina. A primeira letra representa o lado primário e a segunda o lado secundário. O tipo de compensação a utilizar depende da aplicação. Nas topologias PS e PP a capacitância primária depende da condição da carga, enquanto que as topologias SS e SP são mais adequadas para condições de carga variável porque a capacitância primária não depende da condição de carga, desde que a ressonância seja garantida [81].

A Tabela 4.1 mostra uma comparação entre as diferentes topologias de compensação aplicadas pela técnica de transferência por acoplamento indutivo ressonante, bem como os resultados dos principais parâmetros de várias referências.

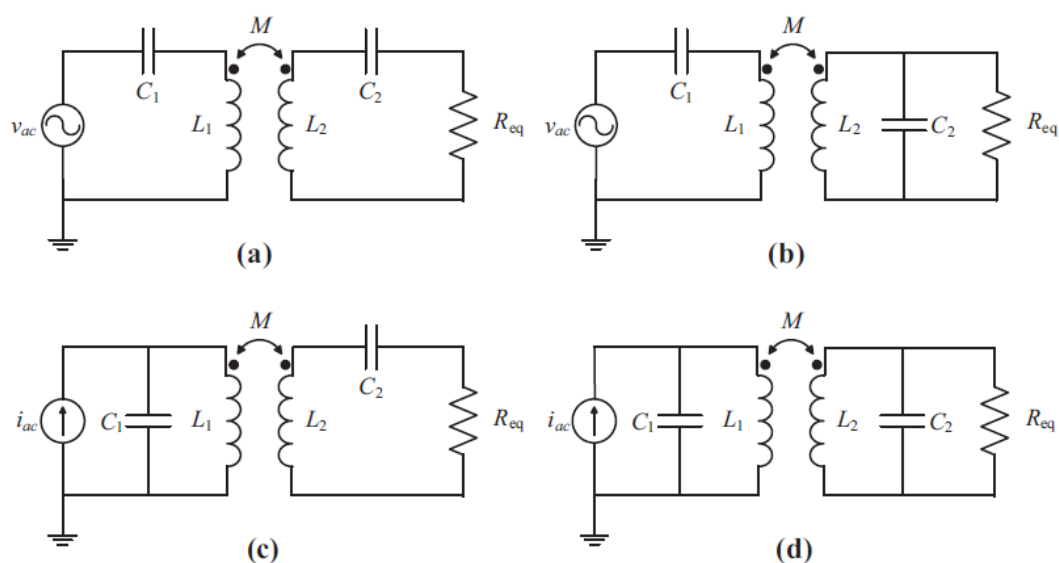


Figura 4.2 - Topologias de compensação: (a) SS, (b) SP, (c) PS e (d) PP [81]

Tabela 4.1 - Comparação entre diferentes topologias de compensação. Adaptado de [82]

Referência	Topologia	Potência	Frequência de ressonância	Distância entre bobinas	Eficiência
[83]	SS	2 kW	20 kHz	15 cm	82%
[84]	SPS	2 kW	100 kHz	14 cm	75%
[85]	SS	5 kW	50 kHz	20 cm	95%
[86]	SP	120 kW	8.7 kHz	10 cm	75%
[87]	SS	3 kW	60 kHz	2.8 cm	85%
[88]	SS	300 W	10 kHz	3 cm	80%
[31]	SS	400 W	31.5 kHz	3.5 cm	75%

### 4.3.1. Fator de qualidade

O fator de qualidade determina o nível de compensação do circuito ressonante. Devido às topologias de compensação aplicados em ambos os enrolamentos, existirão dois fatores de qualidade diferentes, um para o primário e o outro para o secundário. Define-se este fator como o quociente entre a potência reativa e a potência ativa. Quanto mais baixo for o fator de qualidade do secundário melhor é a estabilidade do sistema [19]. De acordo com [89], de modo a evitar problemas relacionados com a estabilidade, deve ser respeitada a seguinte condição:

$$Q_S < \sqrt{\frac{1}{2(1-\sqrt{1-k^2})}} \quad (4.3)$$

Onde  $Q_S$  é o fator de qualidade da rede ressonante secundária, obtida negligenciando-se o acoplamento magnético:

$$Q_S = \frac{2\pi f L_S}{R_L} \quad (4.4)$$

$$k = 1 \Rightarrow Q_S < 0,7071 \quad (4.5)$$

$$\frac{2\pi f L_S}{R_L} < 0,7071 \quad (4.6)$$

$$R_L > \frac{2\pi f L_S}{0,7071} \quad (5.7)$$

### 4.3.2. Filtro

As topologias de compensação são basicamente compostas por filtros LC, pois incluem um condensador e uma bobina ligados em série ou em paralelo, Figura 4.3, que apresenta uma capacidade oscilatória, permitindo dar resposta a sinais oscilatórios. O filtro LC também pode ser chamado de circuito sintonizador ou circuito de ressonância.

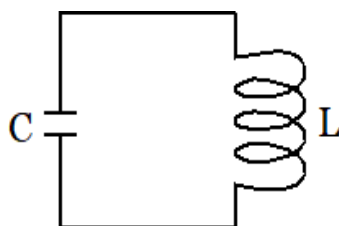


Figura 4.3 - Filtro LC

O seu funcionamento do circuito é como se segue: aplica-se uma tensão aos terminais do condensador até este ficar carregado. No seu ciclo de descarga, o condensador gera uma corrente que percorre a bobina. Esta corrente cria um campo magnético que se opõe a ela mesma, tornando lento o processo de descarga do condensador. O campo magnético diminui à medida

que a corrente do condensador diminui, fazendo com que o campo magnético da bobina varie, induzindo uma corrente contrária à primeira. O condensador carrega novamente, mas desta vez com polaridade inversa à anterior. O condensador estará carregado novamente quando o campo magnético desaparecer e reinicia-se um novo ciclo. Aparecerá um sinal alternado nos terminais da bobina e do condensador a uma frequência própria, que é a frequência de ressonância. O valor de capacitância dos condensadores e da indutância da bobina interfere na frequência de ressonância. A frequência de ressonância obtém-se pela equação (4.3):

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Leftrightarrow C = \frac{1}{(2\pi \times f)^2 \times L} \quad (4.3)$$

Quanto maior a frequência de ressonância, maior a eficiência do acoplamento, negligenciando-se as resistências das bobinas primária e secundária. A perda de comutação nos estágios de conversão de energia está intimamente relacionada com a frequência de operação. Ao aumentar a frequência de operação, as perdas de comutação também aumentarão [89].

### 4.3.3. Espectro eletromagnético

A distribuição de todas as frequências é representada no espectro eletromagnético. Todas as ondas se propagam à velocidade da luz ( $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$ ) no vácuo. O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é inversamente proporcional à frequência, sendo que as frequências altas têm comprimentos de onda mais curtos. Numa onda sinusoidal Figura 4.5, o comprimento de onda é a distância entre os dois picos de onda, e é dado por (4.4):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.4)$$

em que  $\lambda$  representa o comprimento de onda (metros),  $c$  a velocidade da luz no vácuo ( $c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$ ) e  $f$  é a frequência da onda. A distância máxima para transferência de energia sem fios, por acoplamento, que cada frequência permite é dada por (4.5):

$$D < \frac{\lambda}{2\pi} \quad [90] \quad (4.5)$$

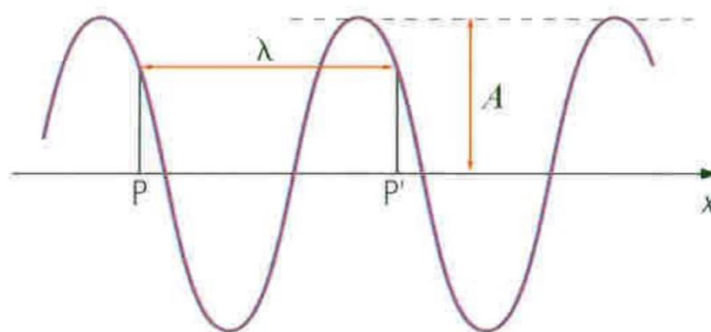


Figura 4.4 - Comprimento de onda de uma onda sinusoidal [91]

## 4.4. Estrutura de acoplamento magnético

É o elemento que possibilita a transferência de energia por indução, constituído pelos indutores.

### 4.4.1. Indutores

Os indutores, também conhecidos por bobinas, são elementos passivos que armazenam a energia elétrica no campo magnético formado pela corrente alternada, responsáveis pela conversão de energia magnética e elétrica, tornando possível o sistema de carregamento sem fios. Estas, quando percorridas por uma determinada corrente, opõem-se a qualquer variação brusca de corrente, sendo que a reação do campo magnético à corrente designa-se por coeficiente de autoindução, medido em Henrys (H). Ao enrolar os condutores, formando os enrolamentos, o coeficiente de autoindução aumenta e surge o conceito de bobina (indutância). Uma indutância depende essencialmente do número de espiras, da configuração, do núcleo magnético utilizado e do diâmetro do fio de bobinagem. Um sistema de bobinas pode ser constituído por duas ou quatro bobinas. Os sistemas de quatro bobinas são mais adequados para aplicações de médio alcance, enquanto que os de duas bobinas são mais indicados para aplicações de curta distância. As aplicações são consideradas como sendo de curto ou médio alcance com base na distância de transmissão ser menor ou maior do que a dimensão da bobina [91]. A eficiência do acoplamento é afetada principalmente pelo desalinhamento entre a bobina transmissora e a bobina recetora.

#### 4.4.1.1. Materiais

O tipo de material a utilizar desempenha um papel preponderante na estrutura de acoplamento magnético. O material utilizado deve ter alta permeabilidade magnética, baixas perdas por histerese e alta resistividade por causa do nível de transferência de energia e das altas frequências de comutação da fonte de alimentação, típicas do funcionamento do sistema indutivo ressonante. Para se cumprirem estas condições, a maioria das estruturas investigadas incluem ferrites para otimizar a eficiência da conversão de energia. A ferrite guia o fluxo magnético entre as bobinas e serve também como escudo magnético [81]. O cobre é o material mais utilizado nas bobinas, devido à sua boa condutividade e preço relativamente baixo.

#### 4.4.1.2. Geometrias

De forma análoga ao transformador, a estrutura de acoplamento é constituída por um enrolamento primário e um enrolamento secundário, com um determinado número de espiras. Conforme foi visto, o fator de acoplamento diminui com o aumento da distância entre os enrolamentos. Com o objetivo de melhorar o fator de acoplamento, desenvolveram-se diferentes estruturas de acoplamento magnético e, posteriormente estas foram otimizadas. Semelhantemente, a adoção de diferentes formas e geometrias é também uma forma de melhorar o fator de acoplamento. A Figura 4.5 mostra as geometrias das bobinas investigadas.

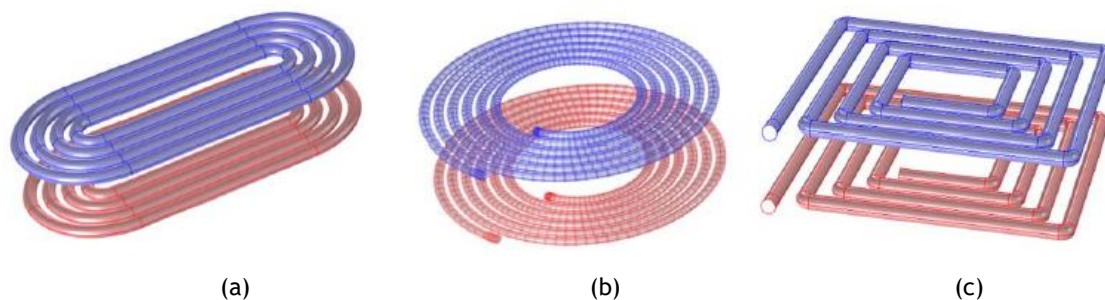


Figura 4.5 - Bobinas elípticas (a), circulares (b) e quadradas(c) [92].

Quando colocadas camadas magnéticas não condutoras com uma espessura apropriada entre as bobinas, a indutância mútua pode aumentar quatro vezes quando comparada com a indutância mútua de bobinas com apenas um entreferro. Contudo, se forem colocadas camadas metálicas (como o alumínio) nas proximidades das bobinas, a indutância mútua é reduzida, Figura 4.6 [93].

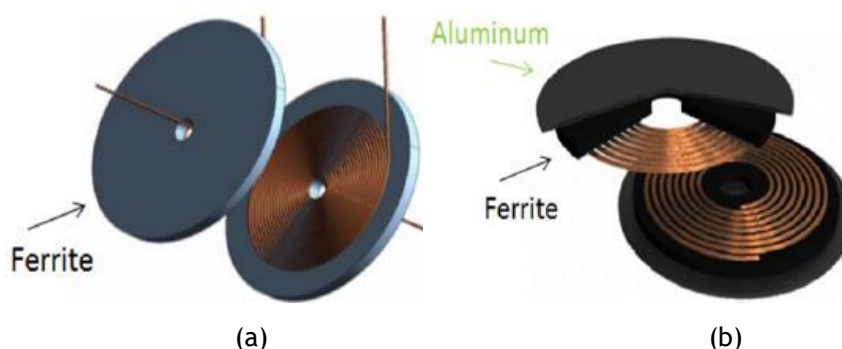


Figura 4.6 - Bobinas com escudo de uma camada (a) e de duas camadas (b) [93].

## 4.5. Conclusão

Neste capítulo fez-se uma descrição mais abrangente do sistema de carregamento indutivo ressonante. A princípio, explicou-se o princípio de funcionamento do referido sistema, seguido das topologias de ressonância, e dos elementos responsáveis pela ressonância magnética. Explicou-se ainda a analogia entre as topologias de ressonância e os filtros. Apresentou-se um estudo comparativo entre as diferentes topologias de ressonância e os resultados obtidos forma caracterizados pela potência transmitida, distância entre as bobinas e a eficiência do sistema. O espectro eletromagnético, caracterizado pela distribuição de todas as frequências, permitiu espelhar a distância máxima das frequências a transmitir no acoplamento indutivo ressonante.

Por fim, abordou-se a estrutura de acoplamento caracterizada pelos indutores. Abordou-se os requisitos que o material deve ter para a aplicação na transferência de energia e para frequências de comutação elevadas, sendo o cobre o material mais utilizado para a construção do indutor, ao qual se pode adicionar ferrite, proporcionando um melhor acoplamento magnético. As geometrias dos indutores também desempenham um papel importante neste sistema, principalmente para o fator de acoplamento entre as bobinas primária e secundária. Destacaram-se as geometrias

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

elíptica, circular e quadrada, sendo as duas últimas as mais favoráveis à utilização no processo construtivo da estrutura de acoplamento, nomeadamente as bobinas.



## Capítulo 5

# Simulação do sistema de carregamento sem fios

### 5.1. Introdução

Neste capítulo é feita uma simulação do sistema de carregamento sem fios indutivo sem topologia ressonante e outra com topologia ressonante, para um condutor de 2 A, de forma a comparar e analisar o tipo de carregamento que mais potência entrega à carga. Para as simulações dos sistemas, foram utilizados dois softwares - o Simulink e o Magnet.

O Simulink é um software que permite simular, testar e verificar sistemas embutidos e dinâmicos. Está integrado no Matlab, o que possibilita incorporar algoritmos em modelos e exportar resultados de simulações de forma a analisá-los. O Magnet é um software de simulação 2D e 3D de campos magnéticos que permite criar protótipos virtuais de dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos simples ou complexos. Permite a conceção de transformadores, solenóides, motores, sensores, bobinas, atuadores e ímanes permanentes.

### 5.2. Simulação de carregamento indutivo sem topologia ressonante

Considerando os símbolos  $I_p$ ,  $I_s$ ,  $L_p$ ,  $L_s$ ,  $d$ ,  $M$ ,  $V_p$  e  $V_s$  a representar as grandezas da Figura 4.1 do capítulo 4, a tensão de alimentação  $V_p$  e de saída  $V_s$  calcula-se aplicando as leis de Kirchhoff ao circuito, como se segue:

$$V_p(t) = L_p \frac{dI_p}{dt} + M \frac{dI_s}{dt} \quad 5.1$$

$$V_s(t) = L_s \frac{dI_s}{dt} + M \frac{dI_p}{dt} \quad 5.2$$

Como o objetivo é carregar a bateria, introduz-se a resistência  $R_L$  como representação da carga. Obtém-se um novo circuito como se segue:

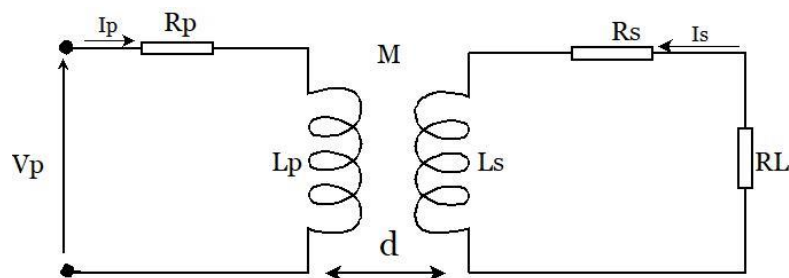


Figura 5.1 - Circuito elétrico do modelo com representação da bateria.

Neste circuito  $R_p$  e  $R_s$  representam as resistências internas das bobinas primária e secundária. Considerando as fórmulas (5.1) e (5.2), temos:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L_p} \left( -M \frac{dI_s}{dt} + V_p - I_p \times R_p \right) \quad 5.3$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( -M \frac{dI_p}{dt} + V_s - I_s \times R_s \right) \quad 5.4$$

Os valores das indutâncias da bobina primária e secundária ( $L_p$  e  $L_s$ ) e a indutância mútua ( $M$ ) para diferentes distâncias ( $d$ ) entre as bobinas foram obtidos a partir Software Magnet. Estes valores foram obtidos pela simulação magneto-estática de cada sistema. Para o efeito, admitiu-se o modelo numérico axi-simétrico a duas dimensões. Esta simulação é feita para um condutor com um limite de corrente máxima de 2, AWG 21. A Tabela 5.1 mostra as características da estrutura de acoplamento.

Tabela 5.1 - Características da estrutura de acoplamento

Material	Símbolo	Valor
Resistividade	$\rho_{Cu}$	$1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \times m$
<b>Geometria da bobina</b>		<b>Valor</b>
Diâmetro do condutor	d	0,785 mm
Diâmetro externo	$d_{out}$	0,07229 mm
Densidade de corrente	J	5 A/mm <sup>2</sup>
Valor máximo de entreferro	$\delta_{max}$	30 mm

Os resultados das indutâncias primária e secundária obtidos a partir do Magnet para a distância de 30 mm, e para diferente número de espiras, são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos do Magnet para a distância de 30 mm

Nº espiras	Diâmetro externo [mm]	$R_p = R_s$ [ $\Omega$ ]	$L_p$ [H]	$L_s$ [H]	$M$ [H]
10	103.7	$1.3625 \cdot 10^{-5}$	$2.0222 \cdot 10^{-5}$	$2.0222 \cdot 10^{-5}$	$4.5994 \cdot 10^{-6}$
20	119.4	$2.9483 \cdot 10^{-5}$	$7.3231 \cdot 10^{-5}$	$7.3231 \cdot 10^{-5}$	$2.1532 \cdot 10^{-5}$
30	135.1	$4.7572 \cdot 10^{-5}$	$1.5878 \cdot 10^{-4}$	$1.5878 \cdot 10^{-4}$	$5.5527 \cdot 10^{-5}$
40	150.8	$6.7893 \cdot 10^{-5}$	$2.8002 \cdot 10^{-4}$	$2.8002 \cdot 10^{-4}$	$1.1149 \cdot 10^{-4}$
50	166.5	$9.0446 \cdot 10^{-5}$	$4.4101 \cdot 10^{-4}$	$4.4101 \cdot 10^{-4}$	$1.9447 \cdot 10^{-4}$

Utilizando o modelo matemático descrito nas equações do circuito, construiu-se o modelo do circuito em Simulink, Figura 5.3. Para a solução do sistema, foi utilizado o método de integração *Dormand-Prince*, com um passo máximo de  $3 \times 10^{-7}$  s.

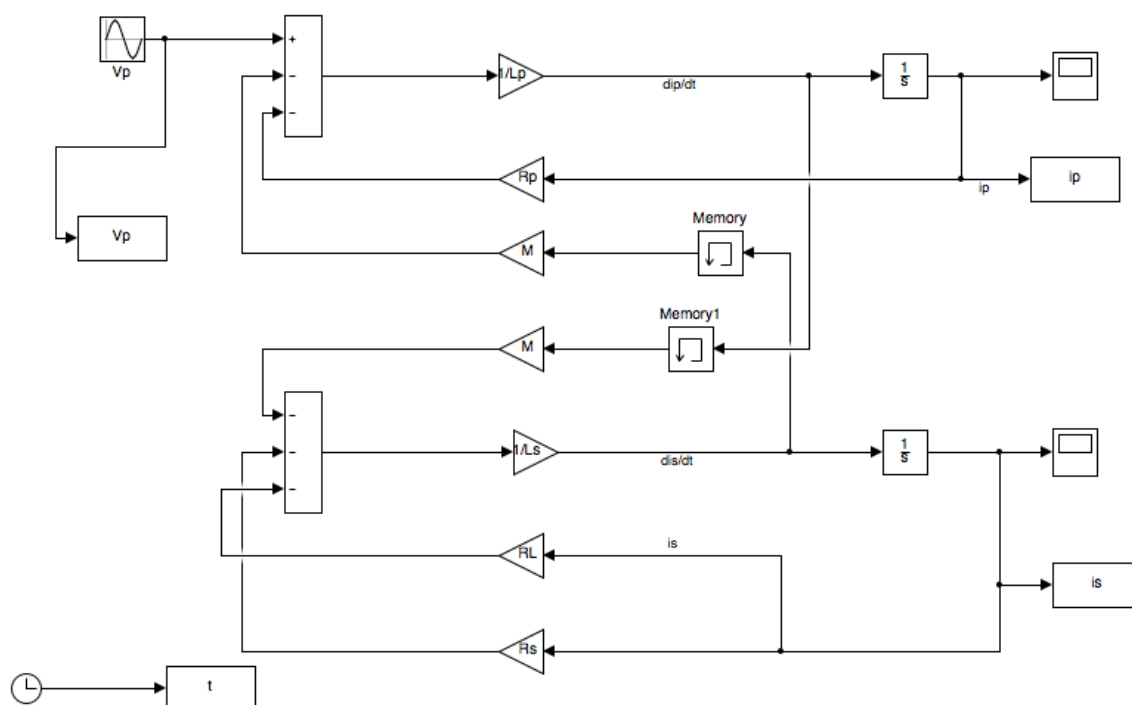


Figura 5.2 - Modelo do circuito indutivo em Simulink

Depois de obtidos os valores das resistências, indutâncias primária e secundária, bem como a indutância mútua entre as bobinas, criou-se um *script* em Matlab para executar todas as simulações pretendidas. As simulações foram feitas para as frequências de 1 kHz, 10 kHz, 50 kHz, e 100 kHz. Para cada sistema e para cada frequência, foi feita a simulação do modelo matemático em Simulink e registou-se o valor médio da potência elétrica entregue à carga. Os resultados obtidos para a transferência de energia pela técnica de acoplamento indutivo sem ressonância são mostrados na Tabela 5.3, na Tabela 5.4, na Tabela 5.5 e na Tabela 5.6 para as frequências ressonantes de 1 kHz, 10 kHz, 50 kHz e 100 kHz, respetivamente.

Tabela 5.3 -Potência média transferida a uma frequência de 1 kHz.

Nº espiras	Potência [W]	Intensidade de corrente no primário [A]	Intensidade de corrente no secundário [A]
10	42.2502	271.9669	21.5400
20	40.7430	102.3691	11.458
30	35.1267	54.5809	7.3555
40	30.1045	33.8770	5.1800
50	25.9574	22.9380	3.8532

Tabela 5.4 -Potência média transferida a uma frequência de 10 kHz.

Nº espiras	Potência [W]	Intensidade de corrente no primário [A]	Intensidade de corrente no secundário [A]
10	19.9872	65.0402	4.9528
20	9.8825	19.1778	1.7943
30	6.7059	9.1091	0.9930
40	5.0863	5.2648	0.6468
50	4.0727	3.3916	0.0929

Tabela 5.5 -Potência média transferida a uma frequência de 50 kHz.

Nº espiras	Potência [W]	Intensidade de corrente no primário [A]	Intensidade de corrente no secundário [A]
10	4.4448	14.7763	1.0011
20	2.1295	4.1669	0.36234
30	1.4361	1.9468	0.20198
40	1.0863	1.1160	0.13283
50	0.8753	0.7159	0.095359

Tabela 5.6 -Potência média transferida a uma frequência de 100 kHz.

Nº espiras	Potência [W]	Intensidade de corrente no primário [A]	Intensidade de corrente no secundário [A]
10	2.2785	7.5247	1.0011
20	1.0961	2.1134	0.36234
30	0.7447	0.9880	0.20198
40	0.5700	0.5674	0.13283
50	0.4622	0.3647	0.095359

Terminadas as simulações do carregamento sem fios indutivo sem topologia ressonante conclui-se, portanto, que, o valor de potência média entregue à carga para uma corrente máxima de 2 A é de 1.0961 W, com o sistema de 20 espiras e frequência de 100 kHz. O valor obtido é quase que impossível de aplicar numa bateria aplicada à E-bike.

### 5.3. Simulação de carregamento indutivo com topologia ressonante

De modo a aumentar a potência na carga, foi considerado um sistema de acoplamento indutivo como topologia ressonante SS ilustrado na Figura 5.3. Nesse circuito,  $C_p$  e  $C_s$  representam os condensadores primário e secundário;  $R_p$  e  $R_s$  representam as resistências primária e secundária,  $L_p$  e  $L_s$  representam as indutâncias próprias da bobina primária e secundária;  $M$  a indutância mútua entre as bobinas,  $V$  tensão de alimentação do circuito e  $R_L$  a resistência da carga, que representa a bateria da E-bike.

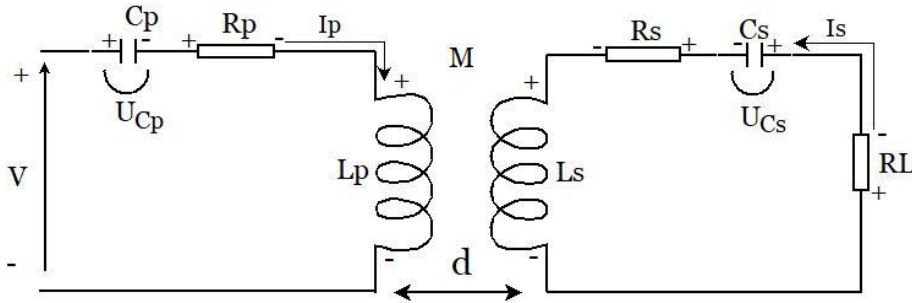


Figura 5.3 - Acoplamento indutivo com topologia ressonante SS.

As equações que regem o comportamento dinâmico do sistema são dadas por:

$$-V + U_{Cp} + I_p \times R_p + L_p \frac{dI_p}{dt} + M \frac{dI_s}{dt} = 0 \quad (5.5)$$

$$I_s \times R_L + U_{Cs} + I_s \times R_s + L_s \frac{dI_s}{dt} + M \frac{dI_p}{dt} = 0 \quad (5.6)$$

Organizando as equações (5.5) e (5.6), tem-se:

$$\frac{\partial^2 \times U_{Cs}}{dt^2} = \frac{V - U_{Cp} - I_p \times R_p - M \times \frac{C_s \times \partial^2 \times U_{Cs}}{dt^2}}{L_p \times C_p} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial^2 \times U_{Cs}}{dt^2} = \frac{I_s \times R_L - U_{Cs} - I_s \times R_s - M \times \frac{C_p \times \partial^2 \times U_{Cp}}{dt^2}}{L_s \times C_s} \quad (5.8)$$

Utilizando o modelo matemático descrito através das equações do circuito, construiu-se o modelo do circuito em Simulink, Figura 5.4. Para a solução do sistema, foi utilizado o método de integração Dormand-Prince, com um passo máximo de  $3 \times 10^{-7}$  s.

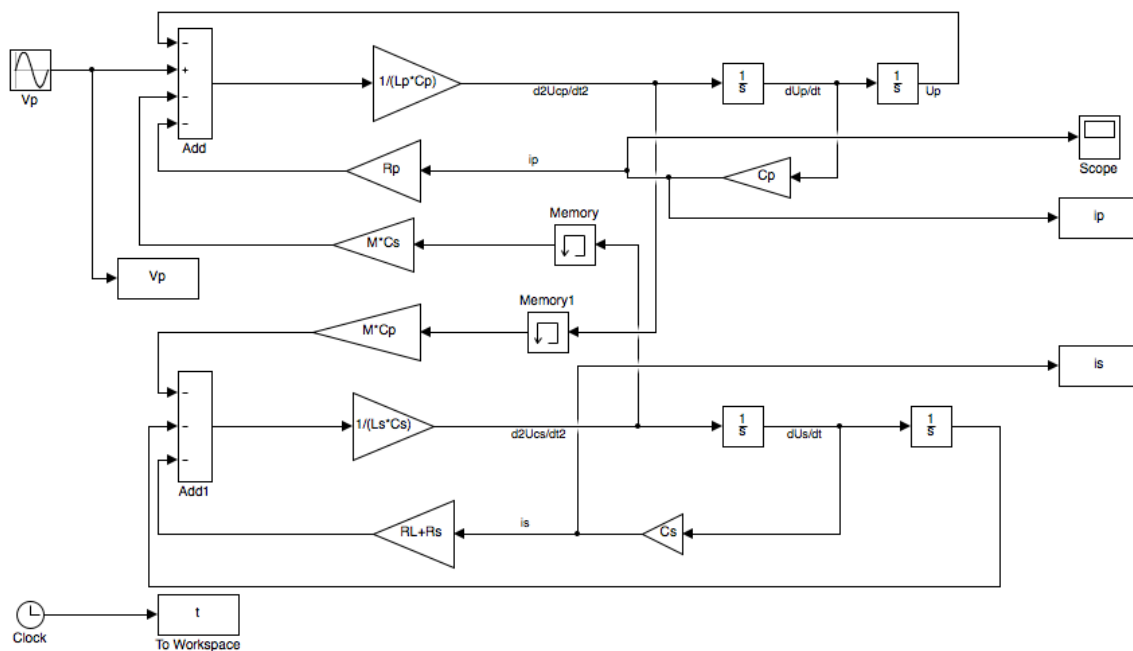


Figura 5.4 - Modelo do circuito indutivo ressonante em Simulink

Os resultados obtidos para a transferência de energia pela técnica de acoplamento indutivo com a topologia ressonante SS são mostrados na Tabela 5.7, na Tabela 5.8, na Tabela 5.9 e na Tabela 5.10 para as frequências ressonantes de 1 kHz, 10 kHz, 50 kHz e 100 kHz, respectivamente.

Tabela 5.7 -Potência média transferida a uma frequência ressonante de 1 kHz.

Nº espiras	Potência [W]	Intensidade de corrente no primário [A]	Intensidade de corrente no secundário [A]	Resistência da carga [ $\Omega$ ]	Capacidade do condensador Série [F]
10	90.53	345.64	30.85	0.1887	$1.256 \times 10^{-3}$
20	149.1	152.94	21.075	0.6833	$3.459.8 \times 10^{-4}$
30	179.85	89.124	15.75	1.4814	$1.5953 \times 10^{-4}$
40	189.02	57.601	12.123	2.6126	$9.0459 \times 10^{-5}$
50	182.78	39.703	9.537	4.1147	$5.7437 \times 10^{-5}$

Tabela 5.8 -Potência média transferida a uma frequência ressonante de 10 kHz.

Nº espiras	Potência [W]	Intensidade de corrente no primário [A]	Intensidade de corrente no secundário [A]	Resistência da carga [ $\Omega$ ]	Capacidade do condensador Série [F]
10	1380.8	269.11	38.254	1.8867	$1.2526 \times 10^{-5}$
20	870.39	85.018	16.022	6.8326	$3.4590 \times 10^{-6}$
30	484.92	35.853	8.1002	14.8144	$1.5953 \times 10^{-6}$
40	275.59	17.883	4.618	26.1263	$9.0459 \times 10^{-7}$
50	164.97	9.9445	2.8489	41.1469	$5.7437 \times 10^{-7}$

Tabela 5.9 -Potência média transferida a uma frequência ressonante de 50 kHz.

Nº espiras	Potência [W]	Intensidade de corrente no primário [A]	Intensidade de corrente no secundário [A]	Resistência da carga [ $\Omega$ ]	Capacidade do condensador Série [F]
10	1767.1	128.85	19.348	9.4337	$5.0104 \times 10^{-7}$
20	470.12	27.208	5.3043	34.1628	$1.3836 \times 10^{-7}$
30	176.29	9.5239	2.2092	74.0720	$6.3812 \times 10^{-8}$
40	81.909	4.2925	1.1326	130.6313	$3.6184 \times 10^{-8}$
50	43.759	2.2557	0.65817	205.7343	$2.2975 \times 10^{-8}$

Tabela 5.10 -Potência média transferida à uma frequência ressonante de 100 kHz.

Nº espiras	Potência [W]	Intensidade de corrente no primário [A]	Intensidade de corrente no secundário [A]	Resistência da carga [ $\Omega$ ]	Capacidade do condensador Série [F]
10	1274.8	77.539	11.732	18.8674	$1.2526 \times 10^{-7}$
20	272.97	14.645	2.8687	68.3256	$3.4590 \times 10^{-8}$
30	95.649	4.9522	1.1528	148.1440	$1.5953 \times 10^{-8}$
40	43.141	2.1988	0.58178	261.2627	$9.0459 \times 10^{-9}$
50	22.69	1.1464	0.33531	411.4687	$5.7437 \times 10^{-9}$

## 5.4. Conclusão e análise dos resultados

Conclui-se que para valores de corrente inferiores ou próximos do valor permitido, o maior valor médio de potência que é possível transferir para a carga é de 43 W com o sistema de 50 espiras a uma frequência ressonante de 50 kHz e uma carga com resistência de 205  $\Omega$ .

Pode-se notar ainda a importância das topologias ressonantes neste sistema de carregamento, pois foi possível aumentar a potência média entregue à carga de 1.0961 W para 43 W para o mesmo valor limite de corrente. Verificou-se ainda que, em sistemas com menor número de

espiras, para as frequências de 10 kHz, 50 kHz e 100 kHz, a potência entregue à carga é maior, relativamente à frequência de 1 kHz. A intensidade da corrente no primário de todos os sistemas apresenta valores bastante elevados para um número de espiras menores e valores baixos para um número de espiras elevados. Em todos os sistemas, verificou-se que a intensidade de corrente no primário é tanto maior quanto menor for número de espiras. Isso acontece pelo facto de os sistemas com menor número de espiras apresentarem menor valor de indutância e, como consequência, menor impedância.

Relativamente à resistência de carga necessária para garantir a estabilidade do sistema, verificou-se que o seu valor é superior para os sistemas com maior valor de indutância. No entanto, os valores obtidos para a resistência referida são demasiados elevados.



## Capítulo 6

# Conclusões e trabalho futuro

### 6.1. Conclusões

As E-bikes estão a posicionar-se cada vez mais no mercado dos transportes, tornando-se uma realidade com um crescimento notável. Atualmente, o motor BLDC é o favorito para a propulsão elétrica das E-bikes dadas suas características, sendo o sistema de armazenamento adequado as baterias de lítio, pela alta capacidade de armazenamento, tempo de carregamento bastante reduzido e uma excelente autonomia.

Os sistemas de carregamento de baterias de E-bikes com fios submetem o utilizador a riscos que advém da utilização do cabo. Os sistemas de carregamento sem fios permitem o carregamento da bateria de forma automática sem a intervenção do utilizador. O sistema de carregamento indutivo ressonante permite a transferência de energia através de um campo magnético variável, por meio de uma estrutura de acoplamento constituído pelo enrolamento primário ligado à rede de energia e um enrolamento secundário ligado ao carregador da bateria, separados por uma distância inversamente proporcional à indutância mútua entre as bobinas, tornando este sistema de carregamento cómodo e simples para o utilizador.

Este sistema tem tido um desenvolvimento significativo, fruto de estudos, pesquisas, investigações e propostas em torno da tecnologia de carregamento sem fios, tendo sido apresentados alguns modelos medianamente eficientes, uns com fonte de energia renováveis outros com ligação à rede de energia (Plug-in). As pesquisas em torno dos materiais anódicos e catódicos nos últimos anos conferiram avanços significativos nas tecnologias de baterias, tornando-as cada vez mais eficientes, com tempos de carregamento reduzidos. As baterias constituem o elo mais fraco no que tange aos VEs, porém são o pilar da sua subsistência.

A simulação do modelo de acoplamento indutivo ressonante permitiu comparar a potência média entregue à carga entre um sistema de carregamento indutivo sem topologia ressonante e um sistema com topologia ressonante. Verificou-se que utilizando o sistema de topologia ressonante é possível transferir maior quantidade de energia para a carga.

Tendo em conta o sistema eleito, os resultados obtidos computacionalmente poderão ser impraticáveis, uma vez que os valores mínimos de resistências determinados para a carga poderão não corresponder aos valores reais de resistência interna das tecnologias de baterias.

## Carregamento Wireless de Bicicletas Elétricas

Para trabalhos futuros, propõe-se a inclusão de um modelo matemático de uma bateria e a implementação experimental do sistema analisado, de modo a validar os resultados obtidos. Propõe-se, também, a análise de outras topologias ressonantes e técnicas de controlo ótimo para maximizar o desempenho do sistema, onde se podem considerar diferentes distâncias entre as bobinas.

## Referências

- [1] A. Khaligh and S. Dusmez, “Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 8, pp. 3475-3489, 2012.
- [2] B. Silva, “Desenvolvimento de um Posto de Carregamento Lento com BMS e Interface com o Cockpit para o CEPIUM,” Universidade do Minho, 2013.
- [3] V. P. Gonzales, “Projeto de uma Bicicleta Elétrica,” Universidade Tecnológica do Paraná, 2013.
- [4] S. G. de O. da Rede and E. de Mobilidade, “Formas de Carregamento de Veículos Elétricos em Portugal.” Lisboa, pp. 3-21, 2011.
- [5] ZEEV, “Postos de Carregamento | ZEEV,” 2017. [Online]. Available: <http://www.zeev.pt/servicos/postos-de-carregamento/>. [Accessed: 23-Mar-2018].
- [6] Giulio Barbieri, “Bike charger - EVO BIKE.” [Online]. Available: [https://www.giuliobarbieri.it/en/outdoor-products/e-mobility-and-carports/bike-charger-e-bike-charging-station\\_evo-bike](https://www.giuliobarbieri.it/en/outdoor-products/e-mobility-and-carports/bike-charger-e-bike-charging-station_evo-bike). [Accessed: 23-Mar-2018].
- [7] Advansolar, “New solar charging station for electric bikes | Advansolar.” [Online]. Available: <http://www.advansolar.com/en/blog/2014/09/23/new-solar-charging-station-for-electric-bikes/>. [Accessed: 23-Mar-2018].
- [8] P. Olivella-Rosell, R. Villafafila-Robles, and A. Sumper, “Plug In Electric Vehicles in Smart Grids,” *Power Syst.*, vol. 91, pp. 149-178, 2015.
- [9] R. V. Jones, “Heinrich Hertz’s Wireless Experiment,” 2018. [Online]. Available: [http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/pages/comm\\_links.html](http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/pages/comm_links.html). [Accessed: 24-Mar-2018].
- [10] T. Swartz, “The Lost Journal of Nikola Tesla,” 2017. [Online]. Available: [http://www.bibliotecapleyades.net/tesla/esp\\_tesla\\_10.htm](http://www.bibliotecapleyades.net/tesla/esp_tesla_10.htm). [Accessed: 23-Apr-2018].
- [11] J. I. Agbinya, *River Publishers Series in Communications Wireless Power Transfer , 2nd edition Description :*, no. December. Australia: River Publishers Serires in Communications, 2015.
- [12] J. Z. Ahmed El Oualkadi, *Handbook of Research on Advanced Trends in Microwave and Communication Engineering*, 1st Editio. USA: IGI Global, 2016.
- [13] D. Patil, M. Mcdonough, J. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, “Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges,” *IEEE Trans. Transp. Electrifi.*, vol. 4, no. 1, pp. 1-1, 2017.
- [14] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, and C. C. Mi, “An Inductive and Capacitive Combined Wireless Power Transfer System with LC-Compensated Topology,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 12, pp. 8471-8482, 2016.
- [15] D. Rozario, V. K. Pathipati, A. Ram, N. A. Azeez, and S. S. Williamson, “Modified resonant converters for contactless capacitive power transfer systems used in EV charging

- applications,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 4510-4517, 2016.
- [16] F. Musavi, M. Edington, and W. Eberle, “Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies,” *2012 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2012*, pp. 1804-1810, 2012.
- [17] J. Dai and D. C. Ludois, “A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6017-6029, 2015.
- [18] D. Iannuzzi and R. D’Ostilio, “Inductive charging station for Ebike Clever Mobility: A research project,” *2014 AEIT Annu. Conf. - From Res. to Ind. Need a More Eff. Technol. Transf. AEIT 2014*, pp. 5-8, 2015.
- [19] E. G. Marques, “Transferência de energia sem contactos para carga de baterias de veículos eléctricos,” Universidade de Coimbra, 2014.
- [20] Liu Keven, “Wireless charging station for electric bikes (E-bikes) A, Easy to operate. ...” [Online]. Available: <https://plus.google.com/112999335087328415808/posts/1wMg1UUMzWP>. [Accessed: 06-Jun-2018].
- [21] D. Miskovski and S. S. Williamson, “Modeling and simulation of a photovoltaic (PV) based Inductive Power Transfer electric vehicle public charging station,” in *2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo: Components, Systems, and Power Electronics - From Technology to Business and Public Policy, ITEC 2013*, 2013, pp. 1-6.
- [22] T. Shijo, K. Ogawa, M. Suzuki, Y. Kanekiyo, M. Ishida, and S. Obayashi, “EMI reduction technology in 85 kHz band 44 kW wireless power transfer system for rapid contactless charging of electric bus,” in *ECCE 2016 - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Proceedings*, 2016, pp. 1-6.
- [23] H. H. Wu, J. Boys, G. Covic, and D. Robertson, “A practical 1.2kW Inductive Power Transfer lighting system using AC processing controllers,” in *Proceedings of the 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2011*, 2011, pp. 345-350.
- [24] Y. Zhang, R. Zhang, and Y. Du, “Study and optimized design of contactless power transformer for high speed Maglev train,” *2011 Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2011*, 2011.
- [25] I. Villar, U. Iruretagoyena, A. Rujas, and I. P. De Arenaza, “Design and Implementation of a SiC based Contactless Battery Charger for Electric Vehicles,” no. 1, Mondragon, Espanha, pp. 1294-1300, 2015.
- [26] D. Dai and J. Liu, “Design of a practical human-powered contactless charger for cellphone,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 59, no. 3, pp. 476-482, 2013.
- [27] Astrid, Q. Li, and Y. C. Liang, “Contactless power delivery for mobile device charging applications,” *3rd Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2014*, pp. 659-662, 2014.
- [28] W. Z. Liang and Z. Zhang, “An Energy-Encrypted Contactless Charging System for Swarm Robots. Z. ZHANG 1 , X. XU 2 ,” vol. 317, no. c, Tianjin, China, p. 2015, 2015.

- [29] P. Pr and N. Parspour, "Dynamic Charging of Electric Vehicles Demonstrator for Contactless Energy Transfer," Stuttgart, Alemanha, pp. 0-4, 2017.
- [30] M. Caruso *et al.*, "Efficient contactless power transfer system for EVs," Palermo, Itália, 2016.
- [31] W. Jiang, S. Xu, N. Li, Z. Lin, and B. W. Williams, "Wireless power charger for light electric vehicles," *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 2015-Augus, no. June, pp. 562-566, 2015.
- [32] H. Z. Z. Beh, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Investigation of magnetic couplers in bicycle kickstands for wireless charging of electric bicycles," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 87-100, 2015.
- [33] G. A. C. and J. T. B. Hui Zhi (Zak) Beh, "Magnetic Couplers in Kickstands for Wireless Charging of Electric Bicycles," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 1348-1355, 2014.
- [34] J. I. Itoh, K. Noguchi, and K. Orikawa, "System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger," in *2014 International Power Electronics Conference, IPEC-Hiroshima - ECCE Asia 2014*, 2014, pp. 2277-2284.
- [35] F. Pellitteri, "Wireless Charging Systems for Electric Vehicle Batteries," Degli Studi Di Palermo, 2016.
- [36] Y. K. Bellnix Co, "Wireless Charging of Electric Bicycle Tested in Japan," 2015, 2015. [Online]. Available: [http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/english/NEWS\\_EN/20150305/407471/](http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/english/NEWS_EN/20150305/407471/). [Accessed: 23-Mar-2018].
- [37] D. Teal, "Daymak launches wireless charging on certain e-bikes | 2017-06-05 | Autonomous Vehicle Technology," 2017. [Online]. Available: <https://www.autonomousvehicletech.com/articles/90-daymak-launches-wireless-charging-on-certain-e-bikes>. [Accessed: 23-Mar-2018].
- [38] M. J. Bourbon, "Transportes públicos a duas rodas," *Expresso*, p. 2018, 2018.
- [39] B. J. R. da Silva, "Desenvolvimento de um Posto de Carregamento Lento com BMS e Interface com o Cockpit para o CEPIUM," Universidade do Minho, 2013.
- [40] F. Musavi and W. Eberle, "Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging," *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 1, pp. 60-66, 2014.
- [41] DRP, "Decreto-Lei nº44/2005, Diário da República - I Série-A Nº38 - 23 de Fevereiro de 2005." .
- [42] R. Cong, R. Martinez, and P. Vong, "Electric Bicycle System," Polytechnic State University San Luis Obispo, 2010.
- [43] O. J. Bolton, "Electrical Bike Patent," *United States Pat. Off.*, pp. 1-5, 1895.
- [44] H. W. Libbey, "Electrical Bike Patent," *United Sates Pat. Off.*, no. 596, pp. 1-3, 1967.
- [45] J. Schnepf, "Electrical Bike Patent," *United Sates Pat. Off.*, no. 627, pp. 1-6, 1899.
- [46] Eu vou de Bike, "Bicicletas, Lazer e Transporte Urbano » O mercado das bicicletas elétricas." [Online]. Available: <http://www.evoudebike.com/2010/08/o-mercado-das->

- bicicletas-eletricas/. [Accessed: 23-Mar-2018].
- [47] Y. K. Kim, S. H. Rhyu, and I. S. Jung, "Parameter determination of the BLDC motor considering the dynamic equation of vehicle," *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, 2010.
- [48] D. Hurst and J. Gartner, "Executive Summary: Electric Bicycles," *Navig. Res.*, 2012.
- [49] J. Fu, "The Role of Electric Two-Wheelers in Sustainable Urban Transport in China: Market analysis, trends, issues, policy options," *Sustain. Dev. United Nations*, pp. 1-17, 2013.
- [50] Bikemagazine, "Os países que mais utilizam a bicicleta na Europa." [Online]. Available: <http://www.bikemagazine.com.br/2017/07/os-paises-que-mais-utilizam-a-bicicleta-na-europa/>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [51] Turismo de Portugal, "BUGAs - Bicicletas Gratuitas de Aveiro - Centro de Portugal." [Online]. Available: <http://www.centerofportugal.com/pt/bugas-bicicletas-gratuitas-de-aveiro/>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [52] WBT, "Wold Bike Tour 2017." [Online]. Available: <https://worldbiketour.pt/>. [Accessed: 23-Mar-2018].
- [53] N. Fatela, "BMW apresenta nova bicicleta elétrica - Turbo." [Online]. Available: <http://www.turbo.pt/bmw-apresenta-nova-bicicleta-eletrica/>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [54] Agreda Automovil, "Comprar nueva bicicleta eléctrica Smart eBike envío GRATIS." [Online]. Available: <http://shop.agredasa.es/es/smart/150-bicicleta-electrica-smart-ebike.html>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [55] B. Solar, "Bicicleta elétrica usa o sol para recarregar a bateria." [Online]. Available: <http://www.bikemagazine.com.br/2015/02/bicicleta-eletrica-usa-o-sol-para-recarregar-a-bateria/>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [56] Lagoa, "Rede pioneira de bicicletas elétricas põe lagoenses e turistas a mexer a partir de Janeiro | Sul Informação," 2017. [Online]. Available: <http://www.sulinformacao.pt/2016/11/rede-pioneira-de-bicicletas-eletricas-poe-lagoenses-e-turistas-a-mexer-a-partir-de-janeiro/>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [57] R. J. F. Araújo, "Desenvolvimento de uma Bicicleta Elétrica," Universidade do Minho, 2012.
- [58] H. Topper, "Hub Motor | Electric Bike Kit | E-Bike | Electric Bicycle Conversion Kit | Clean Republic," 2018. [Online]. Available: <https://www.electric-bike-kit.com/electricbikehubmotor.aspx>. [Accessed: 23-Mar-2018].
- [59] F. Dumitrache, M. C. Carp, and G. Pana, "E - bike electronic control unit," in *2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 2016, pp. 248-251.
- [60] Á. Pedro and P. Soares, "Controlo de Tração em Veículos Elétricos," Universidade do Porto, 2013.
- [61] C. L. G. Z. C. W. Y. H. J. Cheng, "Research and Design of Electric Vehicle Controller Based on Brushless DC Motor," in *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference July 26-28, 2017, Dalian, China*, 2017, pp. 10132-10136.

- [62] A. Francisco, *Motores Elétricos - Constituição, Funcionamento, Ligação*, 5ª Edição. ETEP, 2013.
- [63] R. Altoumami and S. Johansson, "Characteristics and Control of The Motor System in E-bikes," School of Engineering Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden, 2014.
- [64] N. Miguel and P. Couto, "Simulação de Regimes de Carga e Descarga em Baterias," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2016.
- [65] A. J. F. Freitas, "Sistema para gestão da energia e carregamento universal para um andarilho eletrónico," Universidade do Minho, 2012.
- [66] A. C. P. K. Sen, "Advancement in Battery Technology : A State-of-the-Art Review," Golden, Colorado, EUA, pp. 1-10, 2016.
- [67] A. Mahmoudzadeh Andwari, A. Pesiridis, S. Rajoo, R. Martinez-Botas, and V. Esfahanian, "A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, no. May, pp. 414-430, 2017.
- [68] L. Timóteo, "Bateria de Chumbo," 2018. [Online]. Available: <https://pt.slideshare.net/MarioTimotius/emobilidade-baterias-de-chumbo>. [Accessed: 03-Feb-2018].
- [69] X. H. C. Z. C. Z. Y. Li, "Technological Developments in Batteries," *IEEE Power Energy Mag.*, no. July, pp. 42-44, 2017.
- [70] R. Velho, M. Beirão, M. Do Rosário Calado, J. Pombo, J. Fermeiro, and S. Mariano, "Management system for large li-ion battery packs with a new adaptive multistage charging method," *Energies*, vol. 10, no. 5, 2017.
- [71] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, and E. Hossain, "A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development," *Energies*, vol. 10, no. 8, 2017.
- [72] E. A. Grunditz and T. Thiringer, "Performance Analysis of Current BEVs Based on a Comprehensive Review of Specifications," *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 2, no. 3, pp. 270-289, 2016.
- [73] C. L. Liu, S. C. Wang, S. S. Chiang, Y. H. Liu, and C. H. Ho, "PSO-based fuzzy logic optimization of dual performance characteristic indices for fast charging of Lithium-ion batteries," *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, pp. 474-479, 2013.
- [74] D. F. MoreiraTavares, "Soluções técnicas para sistemas de carga de veículos eléctricos," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [75] Qualcomm, "Wireless Electric Vehicle Charging Technology | Halo & Power Transfer | Qualcomm," 2017. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/solutions/automotive/wevc>. [Accessed: 24-Mar-2018].
- [76] D. R. Tobergte and S. Curtis, "Electric vehicle battery management system," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689-1699, 2013.
- [77] T. F. C. Nabais, "Sistemas de carregamento de EV wireless," Universidade da Beira Interior, 2017.
- [78] N. Sujitha and S. Krithiga, "RES based EV battery charging system: A review," *Renew.*

- Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. Complete, pp. 978-988, 2017.
- [79] T. Diekhans and R. W. De Doncker, "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6320-6328, 2015.
- [80] T. Diekhans, F. Stewing, G. Engelmann, H. Van Hoek, and R. W. De Doncker, "A systematic comparison of hard- and soft-switching topologies for inductive power transfer systems," *2014 4th Int. Electr. Drives Prod. Conf. EDPC 2014 - Proc.*, 2014.
- [81] Z. Bi, T. Kan, C. C. Mi, Y. Zhang, Z. Zhao, and G. A. Keoleian, "A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility," *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 413-425, 2016.
- [82] P. K. Joseph and D. Elangovan, "A review on renewable energy powered wireless power transmission techniques for light electric vehicle charging applications," *J. Energy Storage*, vol. 16, pp. 145-155, 2018.
- [83] J. Sallan, J. L. Villa, A. Llombart, and J. F. Sanz, "Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2140-2149, 2009.
- [84] J. L. Villa, J. Sallán, J. F. Sanz Osorio, and A. Llombart, "High-misalignment tolerant compensation topology for ICPT systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 945-951, 2012.
- [85] J. L. Villa, A. Llombart, J. F. Sanz, and J. Sallán, "Practical development of a 5 kW ICPT system SS compensated with a large air gap," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 1219-1223, 2007.
- [86] L. L. Hao, A. Hu, and G. A. Covic, "Development of a discrete energy injection inverter for contactless power transfer," *2008 3rd IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2008*, vol. 27, no. May, pp. 1757-1761, 2008.
- [87] A. J. Moradewicz and M. P. Kazmierkowski, "FPGA based control of series resonant converter for Contactless power supply," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 57, no. May, pp. 245-250, 2008.
- [88] A. Zaheer, G. A. Covic, and D. Kacprzak, "A bipolar pad in a 10-kHz 300-W distributed IPT system for AGV applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 7, pp. 3288-3301, 2014.
- [89] F. Pellitteri, V. Boscaïno, a. O. Di Tommaso, R. Miceli, and G. Capponi, "Inductive Power Transfer for 100W battery charging," *IECON 2013 - 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 894-899, 2013.
- [90] S. J. Mazlouman, A. Mahanfar, and B. Kaminska, "Mid-range wireless energy transfer using inductive resonance for wireless sensors," *Comput. Des. 2009 ICCD 2009 IEEE Int. Conf.*, pp. 517-522, 2009.
- [91] J. Filipe and V. Aguiar, "Transferência de Energia sem fios para carregamento de baterias," Universidade do Minho, 2013.
- [92] M. Ibrahim, "Wireless Inductive Charging for Electrical Vehicles : Electromagnetic



Modelling and Interoperability Analysis,” Universidade Paris-SUD, 2014.

[93] N. Shinohara, *Wireless Transfer via Radio Waves*. John Wiley and Sons, 2014.