



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

# **Sistemas de carregamentos de veículos elétricos *wireless***

**Tatiana Filipa Clara Nabais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Eletromecânica**

(2º Ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

**Covilhã, outubro de 2017**



# Agradecimentos

São muitas as pessoas a quem devo expressar a minha gratidão pelo auxílio e contribuição na realização deste trabalho.

À professora doutora Maria do Rosário Alves Calado pela sua orientação, auxílio e disponibilidade. Ao engenheiro José Pombo pela paciência, ajuda e partilha de conhecimentos diariamente. Ao Rui Mendes, também pela partilha dos seus conhecimentos que foram uma mais valia nesta dissertação.

Aos meus pais, por estarem presentes em todas as fases boas e menos boas da minha vida, podendo eu contar sempre com o apoio deles em qualquer situação. Por me terem passado os valores que fazem de mim a pessoa que sou hoje, e por sempre terem acreditado em mim, incentivando-me a nunca desistir dos meus objetivos. Por terem sido ainda, sempre que lhes foi possível, o meu suporte financeiro nesta dissertação e ao longo de todo o meu percurso académico.

Aos meus professores que contribuíram para o enriquecimento dos meus conhecimentos e aos meus colegas de curso que partilharam comigo sessões de estudo.

Por fim, mas não menos importante, ao meu namorado pelo apoio incondicional, pela força dada diariamente e por todos os sacrifícios feitos em prol do desenvolvimento deste trabalho. Aos meus melhores amigos, pois apesar das adversidades, não me deixaram desistir, e tiveram um papel ativo na elaboração deste trabalho, contribuindo com os seus conhecimentos e não só.

A todos, o meu mais sincero obrigado.



## Resumo

Esta dissertação tem como objetivo o estudo dos sistemas de carregamento de veículos elétricos sem fios. Dada a realidade atual, é cada vez mais importante optar por soluções amigas do ambiente, como é o caso dos veículos elétricos. Uma vez que os veículos elétricos oferecem ainda alguns constrangimentos no que diz respeito ao armazenamento de energia, as baterias e os tempos de carregamento, uma das soluções poderá vir a ser o carregamento destes através de sistemas sem fio. Nesta dissertação apresentam-se os sistemas de carregamento de veículos elétricos convencionais, assim como os sistemas de carregamento sem fio que já existem e outros que estão ainda em desenvolvimento. É feita uma revisão sobre os veículos elétricos e híbridos, assim como sobre as baterias neles usadas. São estudados os pontos fundamentais para um sistema de carregamento sem fios, entre eles: os conversores; topologias de compensação; frequência de ressonância e design das bobinas. Como contributos para uma proposta de um sistema de carregamento de baterias sem fio, é feito o estudo teórico e uma simulação numérica com os parâmetros de dois pares de bobinas diferentes, bem como é iniciada uma simulação prática com o objetivo de retirar informação sobre os parâmetros ideais para cada par de bobinas.

## Palavras-chave

Veículo elétrico, carregamento *wireless*, transferência de energia *wireless*, indução magnética, acoplamento indutivo ressonante



# Abstract

This work aims to study the wireless charging systems of electric vehicles. Given the current reality, it is increasingly important to choose environmentally friendly solutions, such as electric vehicles. Since electric vehicles still have some constraints on energy storage, batteries and charging times, one of the solutions could be charging them through wireless systems. This dissertation presents the conventional electric vehicle charging systems, as well as the wireless charging systems that already exist and other that are still in development. A review of the electric and hybrid vehicles is made. The fundamental points for a wireless charging system are studied, among them: the converters; compensation topologies; resonance frequency and coil design. As a contribution to a proposal for a wireless battery charging system, a theoretical study and a numerical simulation with the parameters of two different coils pairs are carried out, as well as a practical simulation with the objective of absorb information about the ideal parameters for each pair of coils.

# Keywords

Electric vehicle, wireless charge, wireless power transfer, magnetic induction, resonant inductive coupling



# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Objetivos .....	2
1.2.	Organização da dissertação .....	3
2.	Enquadramento .....	5
2.1.	Veículos elétricos .....	5
2.1.1.	Veículos elétricos híbridos .....	7
2.1.2.	Vehicle to grid .....	8
2.2.	Baterias.....	9
2.2.1.	Constituição de uma bateria .....	9
2.2.2.	Tipos de baterias .....	11
2.2.3.	Parâmetros das baterias.....	15
2.2.4.	Métodos de carregamento das baterias .....	18
2.3.	Conversores.....	21
2.3.1.	Topologias de conversores AC/DC para correção do fator de potência.....	22
2.3.2.	Topologias de conversores DC-DC .....	24
2.4.	Carregamento convencional de veículos elétricos.....	25
3.	Sistemas de carregamento de baterias de veículos elétricos .....	29
3.1.	Sistemas de carregamento de baterias de veículos elétricos.....	29
3.1.1.	MOBI.E.....	29
3.1.2.	Carregadores domésticos.....	31
3.1.3.	Carregadores sem fios .....	33
3.1.4.	Vantagens do carregamento sem fios .....	36
4.	Transferência de energia sem fios.....	37
4.1.1.	Transferência de energia indutiva.....	38
4.1.2.	Transferência de energia capacitiva .....	38
4.2.	Carregamento sem fios .....	39
4.2.1.	Carregamento dinâmico .....	40
4.2.2.	Acoplamento indutivo ressonante .....	41

4.2.3.	Topologias de compensação .....	42
4.2.4.	Filtro LC .....	43
4.2.5.	Design das bobinas .....	44
4.2.6.	Conversores e métodos de controlo.....	45
5.	Dimensionamento e análise do sistema de carregamento sem fios .....	49
5.1.	Análise teórica baseada em simulação do modelo e análise teórica .....	49
5.2.	Análise experimental .....	64
6.	Conclusões .....	73
	Bibliografia.....	75
	Anexos .....	79
	Anexo A - Caraterísticas de várias marcas de veículos elétricos .....	80
	Anexo B - Script Matlab.....	82
	Anexo C - Datasheet do TLP152 .....	83
	Anexo D - Datasheet do NCP5106 .....	84

# Lista de Figuras

Figura 1.1 - Estimativa das emissões de CO <sub>2</sub> e autonomia de diferentes tecnologias de veículos em 2010 e 2050 [1].	1
Figura 2.1 - Primeiro veículo híbrido desenvolvido por Ferdinand Porsche [2].	5
Figura 2.2 - Comparação entre motor elétrico e motor de combustão interna [3].	6
Figura 2.3 - Ligações série e paralelo das células [8].	10
Figura 2.4 - Bateria de arranque e bateria de ciclo profundo [10].	11
Figura 2.5 - Energia e potência específicas das diferentes baterias [1].	16
Figura 2.6 - Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante [12].	18
Figura 2.7 - Método de carregamento Multistage [12].	19
Figura 2.8 - Método de carregamento pulsado: a) VFPC; b) VDPC [12].	19
Figura 2.9 - Comparação dos métodos de carregamento das baterias. Adaptado de [11].	20
Figura 2.10 - Fases de carregamento de uma bateria de ácido-chumbo (a linha descontínua representa a corrente e a linha contínua a tensão) [9].	21
Figura 2.11 - Posicionamento típico dos diferentes conversores num veículo elétrico [14].	22
Figura 2.12 - Conversor boost PFC (a), conversor buck PFC (b) e conversor buck-boost PFC (c) [15].	23
Figura 2.13 - 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) [15].	24
Figura 2.14 - Conversor de meia ponte (a), conversor de meia ponte em cascata (b), conversor de meia ponte intercalado (c) e conversor de ponte completa com transformador incorporado (d) [15].	25
Figura 2.15 - Modos de carregamento do veículo elétrico [16].	26
Figura 2.16 - Tipos de tomadas [16].	27
Figura 2.17 - Tempos de carregamento para um veículo com uma bateria de 24 kWh [16].	27
Figura 3.1 - Mapa de Portugal com os postos de carregamento disponibilizados pela MOBI.E [18].	29
Figura 3.2 - Postos de carregamento MOBI.E [18].	30
Figura 3.3 - Carregador portátil (a), de parede (b), e base de segurança (c) da LugEnergy [20].	31
Figura 3.4 - Carregadores domésticos Homecharger da Efacec (a) [21], DuraStation (b) e WattStation (c) da General Electric [22].	32
Figura 3.5 - Carregadores domésticos MCCWB Charger (a) e MCWB Charger (b) da Magnum Cap [23][24], e EVlink Wallbox (c) da Schneider Electric [25].	32
Figura 3.6 - Carregador doméstico WB140A Charging Unit da Siemens [26].	32

Figura 3.7 - Sistema de carregamento sem fios da WiTricity [27].	34
Figura 3.8 - Painel de controlo e bloco de carregamento do sistema Plugless [28].	34
Figura 3.9 - Carregamento de um veículo com o sistema Plugless [28].	35
Figura 3.10 - Carro de segurança da Formula E, carregado através do sistema Halo da Qualcomm [30].	35
Figura 4.1 - Esquema típico de um circuito conversor ressonante em série, construído à volta do condensador de acoplamento [27].	38
Figura 4.2 - Sistema típico de carregamento sem fios de veículo elétrico [34].	40
Figura 4.3 - Sistema de carregamento dinâmico [36].	41
Figura 4.4 - Esquema simplificado de um carregador indutivo ressonante [27].	42
Figura 4.5 - Principais topologias de compensação: (a) SS, (b) SP, (c) PS e (d) PP [35].	43
Figura 4.6 - Filtro LC.	44
Figura 4.7 - Bobinas circulares (a), quadradas (b) e elípticas (c) [39].	45
Figura 4.8 - Bobinas com escudo de uma camada (a) e de duas camadas (b) [39].	45
Figura 4.9 - Circuito de um sistema de transferência de energia indutiva com compensação SS [39].	46
Figura 5.1 - Circuito elétrico representativo do acoplamento indutivo.	49
Figura 5.2 - Circuito elétrico representativo do acoplamento indutivo com representação da bateria.	50
Figura 5.3 - Pares de bobinas a serem testados: par 1 (a) e par 2 (b).	51
Figura 5.4 - Variação da indutância mútua em função da distância para o par de bobinas 1 (a) e para o par de bobinas 2 (b).	52
Figura 5.5 - Variação de $k$ em função da distância para o par de bobinas 1 (a) e para o par de bobinas 2 (b).	53
Figura 5.6 - Densidade de fluxo magnético para o par de bobinas 1, com distâncias entre elas de 1 mm (a), 10 mm (b), 25 mm (c) e 50 mm (d).	54
Figura 5.7 - Densidade de fluxo magnético para o par de bobinas 2, com distâncias entre elas de 1 mm (a), 10 mm (b), 25 mm (c) e 50 mm (d).	55
Figura 5.8 - Modelo do circuito em Simulink.	56
Figura 5.9 - Tensão de saída $v_2$ (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores de frequência: (a) 50 Hz, (b) 100 Hz, (c) 150 Hz.	57
Figura 5.10 - Variação da tensão de saída $v_2$ em função da frequência.	57
Figura 5.11 - Tensão de saída $v_2$ (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores da amplitude: (a) 50 V, (b) 100 V, (c) 150 V.	59
Figura 5.12 - Variação da tensão de saída $v_2$ em função da amplitude da tensão de entrada.	59
Figura 5.13 - Tensão de saída $v_2$ (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores da resistência R: (a) 0.2 $\Omega$ , (b) 0.6 $\Omega$ , (c) 2 $\Omega$ .	60
Figura 5.14 - Variação da tensão de saída $v_2$ em função da resistência R.	61
Figura 5.15 - Tensão de saída $v_2$ (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores da distância para o par de bobinas 1: (a) 5 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm.	62

Figura 5.16 - Variação da tensão de saída $v_2$ em função da distância para o par de bobinas 1. ....	62
Figura 5.17 - Tensão de saída $v_2$ (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores da distância para o par de bobinas 2: (a) 5 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm. ....	63
Figura 5.18 - Variação da tensão de saída $v_2$ em função da distância para o par de bobinas 2. ....	64
Figura 5.19 - Sistema comando do circuito de potência desenvolvido. ....	65
Figura 5.20 - Modulação SPWM Bipolar.....	66
Figura 5.21 - Circuito equivalente no lado secundário do sistema.....	66
Figura 5.22 - Impedância vista pela fonte.....	67
Figura 5.23 - Topologias de compensação a) SS, b) SP, c) PS e d) PP. ....	69
Figura 5.24 - Circuito final devidamente legendado. ....	70



# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características de alguns veículos elétricos [4].	7
Tabela 2.2 - Parâmetros típicos de disponibilização de energia de cada tipo de veículo elétrico [5].	8
Tabela 2.3 - Características de autonomia e de tempos de carregamento de alguns veículos elétricos e híbridos plug-in [6].	8
Tabela 2.4 - Características das tecnologias das baterias mais comuns [8].	15
Tabela 2.5 - Tempos de carregamento.	28
Tabela 5.1 - Características das bobinas.	51
Tabela 5.2 - Parâmetros do par de bobinas 1 medidos na simulação em Magnet.	51
Tabela 5.3 - Parâmetros do par de bobinas 2 medidos na simulação em Magnet.	52
Tabela 5.4 - Expressões para calcular os valores dos condensadores para as diferentes topologias (Adaptado de [40]).	70



# Lista de Acrónimos

AC	Corrente Alternada
ADC	Conversão Analógico-Digital
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DC	Corrente Contínua
EV	Veículo Elétrico
HEV	Veículo Elétrico Híbrido
I <sup>2</sup> C	<i>Inter-integrated circuit</i>
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
MCI	Motor de Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo Semicondutor de Óxido de Metal
NPC	Inversor de nível 3 <i>Neutral Point Clamped</i>
PHEV	Veículo Elétrico Híbrido <i>Plug-in</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso
RAM	Memória de acesso aleatório
ROM	Memória somente de leitura
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TEC	Transferência de Energia Capacitiva
TEI	Transferência de Energia Indutiva
THD	Distorção Harmônica Total
TESF	Transferência de Energia Sem Fios
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
VA	Volt-Ampere
VDPC	<i>Variable duty pulse current</i>
VFPC	<i>Variable frequency pulse charge</i>
ZPA	Ângulo de fase zero



# Nomenclatura

Símbolo	Designação	Unidades S.I.
$d_1$	Distância entre bobinas para o par 1	[mm]
$d_2$	Distância entre bobinas para o par 2	[mm]
$i_1$	Corrente de entrada	[A]
$i_2$	Corrente de saída	[A]
$K$	Fator de acoplamento magnético	-
$L_1$	Indutância própria da bobina 1	[H]
$L_2$	Indutância própria da bobina 2	[H]
$M$	Indutância mútua	[H]
$R$	Resistência representativa da bateria	[ $\Omega$ ]
$r_1$	Resistência interna da bobina 1	[ $\Omega$ ]
$r_2$	Resistência interna da bobina 2	[ $\Omega$ ]
$V_1$	Tensão de entrada	[V]
$V_2$	Tensão de saída	[V]



# 1. Introdução

Os produtos petrolíferos continuam a ser o principal recurso usado como fonte de energia no sector dos transportes. Devido ao constante aumento da demanda energética, este recurso natural está a escassear e, conseqüentemente, cada vez mais caro. Para além disso, as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) provocadas por este recurso representam uma grande fatia da totalidade da poluição do ar, Figura 1.1. A poluição do ar não só contribui para prejudicar o ambiente, contribuindo para o aquecimento global, como também é prejudicial à saúde humana. É por isso necessário encontrar uma alternativa sustentável a este recurso.

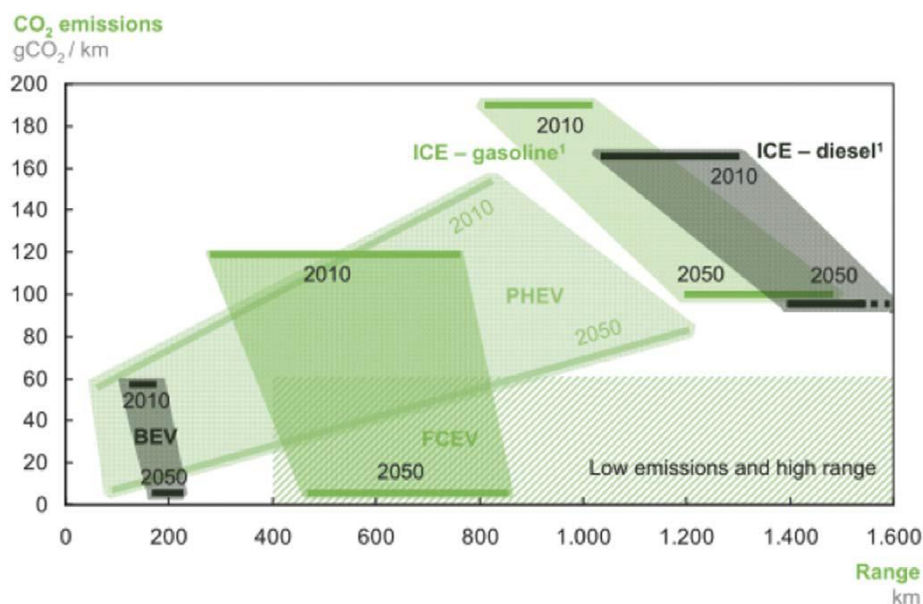


Figura 1.1 - Estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> e autonomia de diferentes tecnologias de veículos em 2010 e 2050 [1].

Toda esta conjuntura contribuiu para que os fabricantes automóveis apostassem de novo nos veículos elétricos (EV). A eletricidade pode ser um combustível de transporte alternativo viável para substituir os produtos petrolíferos, por isso a penetração dos EV no mercado tem sido crescente, bem como o interesse junto da comunidade científica, através de vários estudos e pesquisas. Os EV consomem apenas energia elétrica e geram zero emissões de gases de efeito de estufa, permitindo um transporte livre de fumo. Isto cria mudanças substanciais para reduzir a poluição do ar, tornando o ambiente mais limpo e saudável para todos os seres vivos. Uma vez que os EV não produzem ruído, ao contrário do que acontece com os motores de combustão interna (MCI), os ambientes urbanos veem assim também uma redução da poluição sonora, tornando as cidades mais silenciosas. Contudo, apesar de constantes desenvolvimentos e de

vários incentivos por parte dos governos, os EV apresentam ainda um preço muito elevado, têm uma autonomia limitada e exigem um longo tempo de carregamento.

A transferência de energia sem fios (TESF) é uma tecnologia que pode realizar transmissão de energia elétrica à distância, sem a necessidade de recorrer a fios. Os sistemas TESH utilizam a energia elétrica de uma fonte para a entregar a uma carga, sem que haja condução elétrica. Esta tecnologia foi inicialmente usada em dispositivos eletrônicos portáteis e mais recentemente em dispositivos de potência. Pode ser usada em muitas aplicações industriais, onde a ligação de fios seja inconveniente, perigosa ou até mesmo impossível. Dados os avanços nesta área e devido aos inconvenientes do típico carregamento com recurso a cabos, esta tecnologia torna-se muito atrativa para o carregamento dos EV, quer estacionário quer dinâmico. No caso do carregamento estacionário, o carregamento faz-se com o carro estacionado. No caso do carregamento dinâmico, o EV é alimentado continuamente, por isso pode estar em movimento sem necessidade de parar para carregar as baterias. Com esta tecnologia, e dada a facilidade de efetuar carregamentos com uma maior periodicidade, é também possível reduzir a capacidade das baterias, tornando o EV mais leve e barato. A TESH tem sido, por isso, alvo de diversas investigações. O carregamento através desta tecnologia apresenta diversas vantagens, tais como a ausência de fios expostos, fácil operação de carregamento e transferência de energia segura, mesmo em condições climatéricas adversas.

### **1.1. Objetivos**

É objetivo primeiro desta Dissertação o estudo e o desenvolvimento das tecnologias de carregamento sem fios, aplicadas ao carregamento dos sistemas de armazenamento dos veículos elétricos.

Pretende-se incidir na transferência de energia indutiva e estabelecer propostas de abordagem ao dimensionamento e análise de sistemas de carregamento baseados nesse princípio.

O tema posiciona-se na grande área dos Sistemas de Potência, englobando as áreas do eletromagnetismo, da eletrotecnia, da eletrónica e da análise numérica.

A utilização de diferentes técnicas de análise e de dimensionamento, como recurso aos métodos de dimensionamento analítico, simulação de circuitos elétricos e de simulação numérica baseada em elementos finitos, permitem a proposta de um sistema de carregamento sem fios. Pretendeu-se ainda revestir o trabalho de uma forte componente prática laboratorial.

## 1.2. Organização da dissertação

Esta dissertação divide-se em quatro capítulos principais:

- Capítulo 2. Enquadramento - Onde é feita uma revisão sobre os EV, passando pela história destes e pelas suas principais características. É feita uma comparação entre alguns EV com base nos parâmetros de cada um. É feito um estudo sobre as principais tecnologias de baterias usadas nos EV, a sua constituição, parâmetros e métodos de carregamento. É também feita uma comparação entre os diferentes tipos de bateria. De seguida faz-se uma revisão sobre os principais conversores usados na conversão de energia dos EV. Por fim, são expostos os diferentes tipos de carregamento convencional existentes para os EV.
- Capítulo 3. Estado de arte - Neste capítulo são enumerados os sistemas existentes de carregamento para os EV. Estão incluídos os típicos carregadores existentes na via pública, pertencentes à rede de postos de carregamento existente em Portugal, os carregadores domésticos, alguns carregadores sem fios já existentes no mercado e algumas tecnologias que estão ainda em fase de desenvolvimento.
- Capítulo 4. Transferência de energia sem fios - Aqui são tratados os aspetos relacionados com este conceito, e que tornam possíveis os sistemas de carregamento de EV sem o recurso a fios. Aborda-se os aspetos de design a ter em conta na conceção destes sistemas, nas várias formas de usar as bobinas, no acoplamento indutivo ressonante e nas topologias de compensação. É referida ainda a diferença entre transferência de energia indutiva e transferência de energia capacitiva, bem como o carregamento sem fios dinâmico.
- Capítulo 5. Dimensionamento e análise do sistema de carregamento sem fios - No último capítulo é proposto um sistema para carregamento sem fios, através do estudo de dois pares de bobinas de teste, que são simuladas e analisadas do ponto de vista magnético, através do programa de simulação Magnet. A partir desta determinam-se os melhores parâmetros de ligação magnética. A partir da simulação do sistema com base no Simulink, estabelecem-se diretivas para a conceção de um circuito eletrónico de controlo da transferência de energia.



## 2. Enquadramento

### 2.1. Veículos elétricos

Apesar de se pensar que os EV surgiram recentemente, estes já existem há mais de 100 anos, tendo sido já bastante populares. No início do séc. XX a maioria dos veículos eram elétricos. Esta popularidade devia-se ao facto de serem confortáveis, limpos e silenciosos, ao contrário dos carros a gasolina que eram barulhentos, poluentes e pouco fiáveis. Não era necessária embraiagem nem caixa de velocidades, e o motor era mais eficiente e fiável que o motor a combustão. Também, era de fácil arranque, ao contrário dos veículos baseados em motores de combustão que, em tempo frio, chegavam a precisar de 45 minutos para o fazer. Para além disso a autonomia não era um problema pois na altura as deslocações eram pequenas e faziam-se apenas dentro de localidades [2].

Mais tarde, combinou-se o motor a gasolina com o ME, com o objetivo de criar um carro com características e desempenho superiores. Surgiram assim os veículos híbridos (HEV), Figura 2.1. Ferdinand Porsche, engenheiro e mais tarde pilar da indústria automóvel, desenvolveu o primeiro híbrido, o primeiro *motor-in-wheel*, e o primeiro 4x4 elétrico [2].

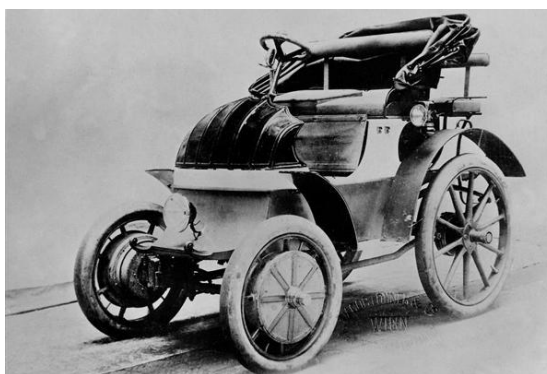


Figura 2.1 - Primeiro veículo híbrido desenvolvido por Ferdinand Porsche [2].

Os primeiros táxis eram elétricos e muitas marcas produziam veículos elétricos comerciais e particulares, que foram vendidos em número muito superior ao dos veículos a combustão, com o seu pico de produção em 1912. Parecia que o futuro pertencia aos carros elétricos. Contudo, deram-se alguns avanços nos modelos a gasolina, e estes começaram a apresentar um menor custo e uma maior fiabilidade. Também em 1912, deu-se a invenção do motor de arranque elétrico e a produção em série do Ford T. Criaram-se estradas entre cidades e a autonomia dos

EV não permitia fazer estas deslocações. Os EV foram então caindo em desuso e no início dos anos 20 já poucos circulavam [2].

Hoje em dia, devido aos problemas ambientais e preço dos combustíveis fósseis, e já com mais conhecimentos no que diz respeito à motorização elétrica, os EV ressurgiram em força. Mas alguns dos problemas relacionados com a tecnologia usada nestes veículos continuam a ser os mesmos de há cem anos atrás - a autonomia das baterias é ainda reduzida e estas continuam a ser caras e pesadas. A isto acresce a necessidade de carregamentos longos e ainda o risco de choque elétrico que lhes está associado. Contudo, os EV têm sido alvo de diversas investigações e desenvolvimentos, contando também com vários incentivos dos governos para que as pessoas adquiram estes veículos [2].

Os EV possuem um motor elétrico (ME) alimentado através de baterias, que podem ser carregadas sempre que seja necessário. Estes veículos dependem apenas da eletricidade, não dependem de qualquer combustível fóssil para se deslocarem, tornando-os muito atrativos do ponto de vista ecológico. O EV não possui embraiagem pois não tem uma caixa de velocidades. Esta não é necessária pois os ME desenvolvem binário em toda a gama de velocidades, ao contrário dos motores de combustão interna (MCI). Ou seja, o ME pode produzir uma grande quantidade de binário desde 0 r.p.m. até à sua r.p.m. máxima [2]. Para além disto, a sua densidade de energia é muito maior, o que significa que é possível usar motores mais leves e pequenos, obtendo uma maior eficiência [1], Figura 2.2. Também o facto de não existir desperdício de energia na transmissão e no ponto morto do veículo, torna o ME mais eficiente [3]. O ME é mais barato do que o MCI, contudo, requer componentes eletrónicos caros e complexos, incluindo conversores para transformar a energia que o EV recebe, resultando num custo global maior comparativamente aos MCI.

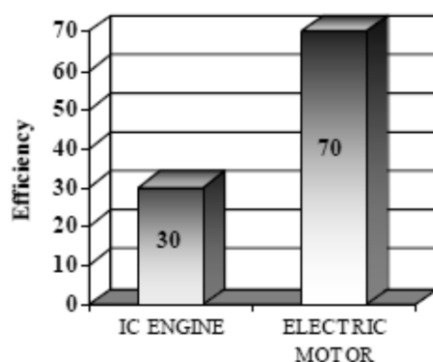


Figura 2.2 - Comparação entre motor elétrico e motor de combustão interna [3].

Os EV produzidos atualmente oferecem prestações muito elevadas, comparáveis nalguns casos às dos superdesportivos. Isto é possível porque os motores elétricos têm uma potência

específica (cv/kg) muito elevada e binários também muito elevados. Têm assim surgido no mercado oferta de alguns desportivos elétricos direcionados para segmentos de consumidores com elevado poder de compra e com preocupações ambientais [2].

Em suma, as vantagens apresentadas pelos EV face aos veículos com MCI são:

- Menor impacto ambiental;
- Energia elétrica - muito mais barata que os combustíveis fósseis;
- Ruído reduzido;
- Custos de manutenção quase inexistentes;
- Binário constante e disponível sempre que solicitado.

A Tabela 2.1 mostra as características principais de desempenho de alguns veículos elétricos.

Tabela 2.1 - Características de alguns veículos elétricos [4].

	Potência (kW)	Consumo (Wh/Km)	Autonomia (Km)	Capacidade (kWh)	Tipo de Bateria
<b>BMW i3</b>	125	125	150	19	Li-íon
<b>Nissan LEAF</b>	90	173	199	24	Li-íon
<b>Renaul ZOE</b>	65	146	210	22	Li-íon
<b>Citroen C-Zero</b>	49	126	150	16	Li-íon
<b>Volkswagen e-UP!</b>	40	117	150	18,7	Li-íon
<b>Renaul Kangoo Z.E</b>	44	155	170	22	Li-íon

### 2.1.1. Veículos elétricos híbridos

Os veículos elétricos híbridos (HEV) combinam então o ME e o MCI, e a sua energia é fornecida através das baterias e/ou do combustível, aumentando assim a autonomia do veículo. Os ME permitem diminuir o esforço do MCI reduzindo desta forma os consumos e as emissões.

Os HEV existem em duas versões diferentes. Na versão convencional, o veículo precisará sempre de abastecer combustível, embora com uma frequência menor. O combustível é a principal fonte de energia, ligeiramente aumentada pelas baterias. A condução é feita com auxílio dos dois motores, ME e MCI. Na outra versão, o híbrido *plug-in* (PHEV) permite reduzir ainda mais a frequência de abastecimento de combustível, uma vez que é possível carregar as baterias em casa, no trabalho ou em instalações de carregamento de uso público. O combustível é armazenado sob a forma de eletricidade nas baterias, tendo um reservatório de gasolina para quando é necessário. A condução é feita principalmente através da energia elétrica, até as baterias estarem descarregadas. A bateria é carregada durante a condução, durante a desaceleração ou ao travar, e através da ligação a uma tomada elétrica convencional. Os HEV

são normalmente combinados com o MCI a gasolina embora também já existam HEV a diesel [2]. Na Tabela 2.2 faz-se uma comparação das características de disponibilização de energia do veículo híbrido *plug-in* com veículos elétricos de diferentes segmentos. A Tabela 2.3 mostra as características de disponibilização de energia, bem como dos tempos de carregamento de diferentes veículos elétricos e veículos híbridos *plug-in*.

Tabela 2.2 - Parâmetros típicos de disponibilização de energia de cada tipo de veículo elétrico [5].

Tipo de veículo	Taxa	Capacidade da bateria (kWh)	Autonomia (Km)	Taxa de carregamento em casa (kW)	Taxa de carregamento na via pública (kW)
PHEV	0,35	12	60	3,5	7
EV Mini	0,3	18	120	3,5	7
EV Compacto	0,2	28	200	3,5	7
EV Médio	0,15	56	300	7	7

Tabela 2.3 - Características de autonomia e de tempos de carregamento de alguns veículos elétricos e híbridos *plug-in* [6].

Marca	Tipo	Tipo de bateria e energia	Autonomia (apenas elétrica)	Tempo de carregamento		
				Modo 1	Modo 2	Modo 3
Toyota Prius PHEV	PHEV	Li-íon 4.4 kWh	22,5 km	3 h	2,5 h	N/A
Chevrolet Volt PHEV	PHEV	Li-íon 16 kWh	64,4 km	5 - 8 h	2 - 3 h	N/A
Mitsubishi i-MiEV EV	EV	Li-íon 16 kWh	154,5 km	7 h	14 h	30 m
Nissan Leaf	EV	Li-íon 24 kWh	160,9 km	12 - 16 h	6 - 8 h	15 - 30 m
Tesla Roadster	EV	Li-íon 53 kWh	394,3 km	30 + h	4 - 12 h	N/A

### 2.1.2. *Vehicle to grid*

*Vehicle to grid* (V2G) é um conceito no qual o EV pode fornecer energia à rede elétrica. Requer uma gestão de fluxo de energia bidirecional, medidores inteligentes de energia e dispositivos de comunicação e controlo. O veículo desempenha um papel ativo na gestão da rede enquanto está estacionado. É capaz de enviar energia para a rede durante as horas de pico e carregar a sua bateria quando a disponibilidade de energia a baixo custo é elevada (horas de vazio). Atua como uma fonte de energia de emergência e como dispositivo de armazenamento, o que pode compensar em parte a intermitência das energias renováveis. Os desafios para a aplicação prática do conceito V2G são a criação de padrões de comunicação e ligação entre os veículos e

os operadores da rede, e a integração de um dispositivo inteligente, que controle o fluxo de energia tendo em conta as necessidades dos utilizadores. Como a duração da vida útil da bateria depende do número de ciclos de carga e descarga, o V2G pode contribuir para a sua redução. Tendo em conta o custo das baterias, isto afetaria negativamente a atratividade do sistema [1].

## 2.2. Baterias

As baterias desempenham o papel de reservatório de energia para os veículos elétricos. A rede elétrica fornece energia em AC que é transformada em DC para ser armazenada na bateria. No caso em que o veículo tenha motorização através de um motor alimentado a corrente alternada, a corrente disponibilizada pela bateria tem de ser novamente convertida para corrente alternada.

As baterias são um dos maiores motivos pelos quais o EV não atinge maior popularidade. Apesar da sua eficiência estar constantemente a ser melhorada, uma bateria ocupa ainda muito volume e é muito pesada, para além de que o seu elevado preço representa uma parte significativa do custo total do EV [2].

Uma bateria é constituída por duas ou mais células unidas e consistem em elétrodos positivos e negativos, ligados através de um eletrólito. Estas células convertem a energia química para energia elétrica. Um eletrólito é um tipo de material que quando dissolvido num solvente, se torna condutor elétrico. A reação química entre os elétrodos e o eletrólito gera energia DC. Nas baterias recarregáveis, a reação química pode ser revertida revertendo-se a corrente, voltando assim a bateria ao estado carregado. Existe uma grande quantidade de materiais e eletrólitos que podem ser combinados para formar uma bateria, contudo, dependendo do objetivo de utilização, algumas combinações de materiais e de tecnologias são mais adequadas que outras, uma vez que o desempenho das células varia com as condições de operação. Apenas um pequeno número de combinações foi desenvolvido como baterias recarregáveis adequadas para EV [7].

### 2.2.1. Constituição de uma bateria

- Células

Uma bateria pode ser qualquer acumulador que fornece energia elétrica através de transformações químicas. As baterias são constituídas pela junção de uma ou mais células, que são um bloco básico de construção eletroquímica. As células podem ser ligadas em série ou em

paralelo, com os terminais elétricos das saídas disponíveis. Geralmente as conexões entre as células são feitas internamente, por isso o número de células no interior da bateria pode não ser evidente a partir do invólucro exterior [8].

- Tensão na célula e 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 [8].

- Capacidade da célula e da bateria

A tensão da célula é determinada pelo seu eletrólito, mas a sua capacidade é infinitamente variável. Esta capacidade 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. É medida em ampere-hora, 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 [8].

- Ligação de células: Série ou Paralelo

Na ligação série, o polo positivo de uma célula é ligado ao polo negativo da célula seguinte. As tensões das células ligadas são adicionadas enquanto a capacidade se mantém constante. 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 [8].

Na ligação paralela, os terminais positivos são ligados entre si e os terminais negativos são também ligados entre si. Esta configuração é usada quando é necessário uma maior capacidade do que a prevista obter por uma célula individual [8].

A Figura 2.3 mostra as duas configurações de ligação das células numa bateria, em série e em paralelo. Figura 2.3 - Ligações série e paralelo das células [8].

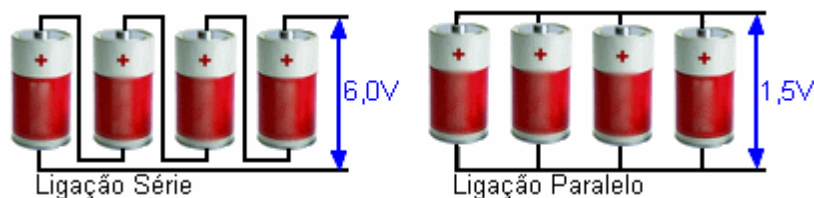


Figura 2.3 - Ligações série e paralelo das células [8].

## 2.2.2. Tipos de baterias

### 2.2.2.1. Baterias de Ácido-Chumbo

Com mais de 140 anos de desenvolvimento, as baterias de ácido-chumbo são uma tecnologia fiável e robusta. Devido à sua baixa resistência interna, estas baterias podem fornecer correntes bastante elevadas [7].

Foram as primeiras baterias recarregáveis e são amplamente usadas no acionamento de um veículo a combustão, e como tal, bastante conhecidas. As baterias fabricadas especialmente para esta aplicação chamam-se baterias de arranque, Figura 2.4. Estas baterias são indicadas para quando é necessário fornecer muita energia num curto espaço de tempo. Os elétrodos destas baterias são constituídos por placas de chumbo imersas num eletrólito ácido, na maior parte das vezes o ácido sulfúrico. As placas são finas de modo a ter-se uma superfície de contacto elevada, para que o processo químico de descarregamento seja mais rápido [9].

Nos EV são usadas baterias de ácido-chumbo mais robustas denominadas de baterias de ciclos profundos, que usam um eletrólito gel em vez de um eletrólito líquido, tornando a sua construção mais cara. As baterias de ciclo profundo são construídas com o objetivo de aumentar ao máximo a capacidade e o número de ciclos de carregamento e descarregamento durante a sua vida útil, Figura 2.4. Neste caso as baterias são constituídas por placas mais grossas, que auxiliam o armazenamento de energia. Estas características permitem a estas baterias serem usadas nos EV, contudo a sua baixa densidade de energia afeta a autonomia e o peso do veículo - as principais desvantagens nos EV. O que as torna mais pesadas é o facto de conterem uma maior quantidade de chumbo, necessária para os ciclos profundos [9].

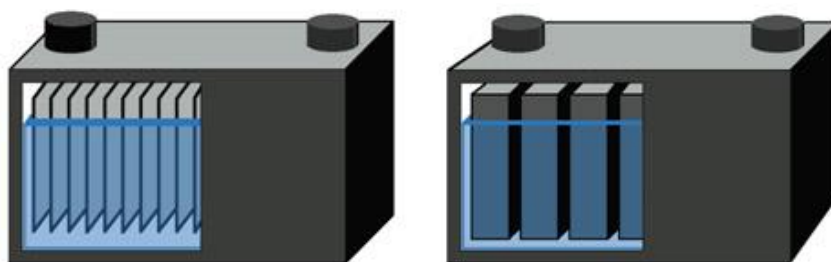


Figura 2.4 - Bateria de arranque e bateria de ciclo profundo [10].

### 2.2.2.2. Baterias de Lítio

As baterias de lítio são consideradas como a tecnologia mais promissora para armazenamento de energia para veículos elétricos. O lítio é o mais leve dos metais e tem um baixo potencial eletromecânico, o que o torna um dos metais mais reativos. As propriedades do lítio conferem às células eletroquímicas potencial para atingir altas densidades de energia. Das baterias de lítio fazem parte uma família de baterias recarregáveis onde os íons de lítio são os portadores de carga. Estes movem-se alternadamente entre os dois elétrodos durante o processo de carga e descarga [7].

São várias as combinações existentes de materiais aplicáveis nos elétrodos, bem como nos eletrólitos, o que permite que o desempenho das células de lítio possa ser personalizado para aplicações específicas. Algumas combinações são mais adequadas para uso em HEV e outras para EV. As células no geral têm um peso baixo e uma tensão alta em circuito aberto, afetando a densidade de energia de uma forma positiva. As características das células de lítio permitem-lhes ainda que a tensão seja constante num amplo intervalo de carregamento. O carregamento rápido é possível e a vida útil destas baterias é aceitável [7].

Para a maior parte das baterias de lítio, a temperatura deve ser controlada, especialmente devido à instabilidade do eletrólito, em que podem ocorrer reações secundárias. Isto causa perda de capacidade e/ou fugas térmicas. Sobrecarregar a célula tem o mesmo efeito. De forma a reduzir estes riscos, estas baterias devem ter um circuito de proteção para controlo de temperatura, controlo de corrente e níveis de tensão, permitindo desligar no caso de situações de risco [7].

Estas baterias são as mais utilizadas para aplicações de eletrónica de consumo, mas têm também sido muito utilizadas em EV nos últimos anos, pela sua boa relação entre densidade de energia e densidade de potência. Podem ser construídas em vários tamanhos e formas, permitindo a adaptação do formato do pack de modo a que este possa aproveitar zonas como a parte de baixo dos bancos ou a consola central do automóvel. São também relativamente leves, se comparadas com outras tecnologias de baterias com a mesma capacidade. Por outro lado, a resistência interna e as questões de segurança, quando não utilizadas de forma correta, tornam-se uma desvantagem destas baterias [9]. É possível serem carregadas com correntes elevadas e suportam uma larga gama de temperaturas de funcionamento. A principal desvantagem é o seu preço elevado [8].

#### **Baterias de Lítio Metálico**

A conceção de células em estado sólido de lítio metálico como eléctrodo negativo, resultou na primeira bateria de lítio recarregável com alta densidade de energia. O uso de lítio metálico foi várias vezes posto em causa devido a alguns acidentes causados por este. A causa principal

destes acidentes tem a ver com o crescimento de dendrites de lítio metálico no eletrodo negativo, durante o processo de carregamento. Isto pode atingir o eletrólito e provocar um curto-circuito interno. Contudo, foram encontradas soluções para estabilizar a superfície metálica e inibir a formação de dendrites. As baterias de lítio metálico com uma temperatura entre 80 e 120°C são uma boa solução para os EV [7].

### **Baterias de Iões de Lítio**

As baterias de iões de lítio (Li-íon) tornaram-se nas baterias recarregáveis mais usadas em EV. O conceito das baterias de iões de lítio surgiu para ultrapassar os problemas associados às baterias de metal de lítio. O seu eletrodo negativo é baseado em carbono (grafite ou carbono duro). Quando a célula está montada e em estado descarregado, os iões de lítio são extraídos do eletrodo positivo e inseridos no eletrodo negativo durante o processo de carga, e o oposto durante a descarga [7].

### **Baterias de Polímero de Lítio**

Estas são uma evolução das baterias de iões de lítio. São muito semelhantes a estas e oferecem a maior parte dos seus benefícios, mas o eletrólito consiste numa matriz polimérica, ou seja, é gelificado ou plastificado por um líquido. O eletrólito é distinguido macroscopicamente como um sólido e a ausência de líquido livre torna estas baterias mais estáveis e menos vulneráveis a sobrecargas [7]. Estas podem ser moldadas com a forma pretendida, devido às suas características. Desta forma é feito um melhor aproveitamento do espaço disponível, enquanto que as células de iões de lítio são cilíndricas. São assim mais compactas, uma vez que não há espaço desperdiçado dentro de cada módulo [9].

### **Baterias de Lítio-Oxigénio**

Estas baterias baseiam-se na oxidação do lítio como eletrodo negativo, e redução do oxigénio, como eletrodo positivo. A principal vantagem das células de lítio-oxigénio é a sua densidade de energia, que chega a ser duas a três vezes maior do que nas células de iões de lítio, tornando-as bastante atrativas para os EV. Contudo, também apresentam desvantagens, sendo uma delas a grande histerese da tensão, que pode ser da ordem de 1 V entre cargas e descargas, e que irá adicionar restrições na componente eletrónica e noutras partes do EV, para além de diminuir a eficiência de carga/descarga. Por outro lado, o controlo do oxigénio ou do ar pode ter efeitos ainda maiores na instalação do veículo. Se o ar for utilizado, não só o oxigénio se aproxima do eletrodo positivo, mas também o nitrogénio, dióxido de carbono e água vão estar presentes. Isto limita o desempenho da bateria devido a reações secundárias. Por esta razão, é preferível usar oxigénio limpo e seco, no estado comprimido, mas isto adiciona uma complexidade maior à bateria e reduz a sua densidade de energia [7].

### **Baterias de Lítio-Enxofre**

Estas utilizam lítio metálico como elétrodo negativo e enxofre elementar como elétrodo positivo. Uma vez que o enxofre em si não possui condutividade elétrica, é necessária uma matriz de carbono de forma a criar um elétrodo positivo viável, reduzindo a densidade de energia. Durante a descarga, o lítio do elétrodo negativo dissolve-se da superfície, difunde-se através do eletrólito e reage com o enxofre para formar polissulfuretos no elétrodo positivo. Por outro lado, as placas de lítio no elétrodo negativo e nos polissulfuretos são reduzidas na superfície do elétrodo positivo sequencialmente durante o carregamento[7].

### **2.2.2.3. Baterias de Níquel-Cádmio**

As baterias de Níquel-Cádmio (NiCd) foram a segunda tecnologia recarregável a surgir e utilizam hidróxido de óxido de níquel e cádmio como elétrodos [9]. Têm um preço inicial mais elevado que as de chumbo-ácido, contudo são mais resistentes a variações de temperatura e a condições de sobrecarga. Têm também a vantagem de suportar correntes elevadas durante a carga, levando a que o tempo de carregamento seja menor. A principal desvantagem destas baterias é a necessidade de descarga total para não haver viciação (diminuição da tensão fornecida pela bateria) devido à existência do efeito de memória [8]. Estas baterias são consideradas antigas e têm vindo a ser substituídas pelas de hidreto de metal de níquel e pelas de lítio, para além de que foi proibido o seu uso em aplicações para veículos, devido ao conteúdo de metal pesado, o Cádmio [7].

### **2.2.2.4. Baterias de Hidreto Metálico de Níquel**

Estas baterias foram recentemente usadas em HEV, como o *Toyota Prius* [1]. As baterias de hidreto metálico de níquel (NiMH) têm uma constituição semelhante às de NiCd, e apesar de terem menores densidades de energia e de potência, são uma alternativa mais económica às baterias de iões de lítio [9].

Estas baterias começaram por ser utilizadas nos computadores portáteis e nos telemóveis. Esta tecnologia foi desenvolvida por razões ambientais e pode ser vista como um desenvolvimento adicional da tecnologia das baterias de NiCd. Muitos dos materiais usados nas baterias de NiMH são raros, contudo, amigos do ambiente [7].

As células NiMH geralmente possuem uma resistência interna baixa e o ciclo profundo é possível. A tecnologia é robusta e tolerante de forma a resistir a condições de carga e descarga rápidas numa ampla gama de temperaturas [7].

Na Tabela 2.4 mostram-se algumas características principais de diferentes tipos de tecnologias de baterias.

Tabela 2.4 - Características das tecnologias das baterias mais comuns [8].

	Chumbo-ácido	Li-íon	Ni-Cd	NiMH
Ciclo de vida	200 a 300	500 a 1000	1500	300 a 500
Impacto ambiental	Alto	Baixo	Alto	Médio/Alto
Tensão da célula	2V	3,6V	1,3V	1,2V
Efeito de memória	Não	Não	Sim	Pouco
T° de operação	-15° a 50°	-20° a 50°C	-20° a 50°	-20° a 60°
Auto-descarga por mês (%)	<5	<5	<10	<20
Peso	Pesada	Muito leve	Leve	Leve
Tempo de carregamento	Longo	Curto	Médio	Médio
Densidade de energia (Wh/kg)	30 - 50	110 - 160	45-80	60-120
Custo típico da bateria	~21€ (7,2V)	~84€ (7,2V)	~42€ (6V)	~50€ (7,2V)
Custo por ciclo	~0,08€	~0,12€	~0,03€	~0,10€
Custo a longo prazo	Alto	Baixo	Médio	Médio

### 2.2.3. Parâmetros das baterias

Todas as células elétricas têm tensões nominais que representam a tensão aproximada quando estas estão a fornecer energia. As células podem ser associadas em série de modo a fornecer a tensão total necessária para alimentar um dado sistema.

A bateria normalmente é representada como tendo uma tensão constante  $E$ , mas a tensão aos seus terminais é inferior e de valor  $V$ , resultado da queda de tensão aos terminais da sua resistência interna. Supondo que uma corrente  $I$  está a fluir para fora da bateria, a relação entre esses valores de tensão  $E$  e  $V$  é dada por:

$$V = E - I \times R \quad (2.1)$$

- Perfis de Tensão e Descarga

A bateria de Li-íon é a que tem a tensão das células mais elevada. A maior parte das baterias recarregáveis convencionais tem um perfil de descarga a tensão praticamente constante. As tensões das células da bateria de Li-íon são mais elevadas do que as das células com eletrólito aquoso convencionais por causa das características destes sistemas. O perfil de descarga das baterias de Li-íon, geralmente, não é consistentemente feito a tensão constante devido à condutividade inferior dos eletrólitos não aquosos que são utilizados e à termodinâmica das reações nos elétrodos de intercalação. A tensão média de descarga numa célula de Li-íon é de

3,6 V, o que permite que uma célula possa ser substituída por três células de NiCd ou de NiMH na configuração de uma bateria [8].

- Energia e potência específicas

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 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 [8]:

$$\text{Energia específica} = \text{Potência específica} \times \text{horas de serviço} \quad (2.2)$$

$$\frac{Wh}{kg} = \frac{W}{kg} \cdot h = \frac{A \cdot V \cdot h}{kg} \quad (2.3)$$

Cada bateria é escolhida a partir de um balanço entre a densidade de energia e a densidade de potência, Figura 2.5. A bateria é normalmente escolhida para um EV através dos requisitos de energia necessários para uma certa autonomia. Contudo, a relação entre a autonomia do carro e a capacidade da bateria não é linear, pois o peso adicional da bateria (entre 150 a 500 kg para uma autonomia de cerca de 150 km) reduz a eficiência na estrada [1].

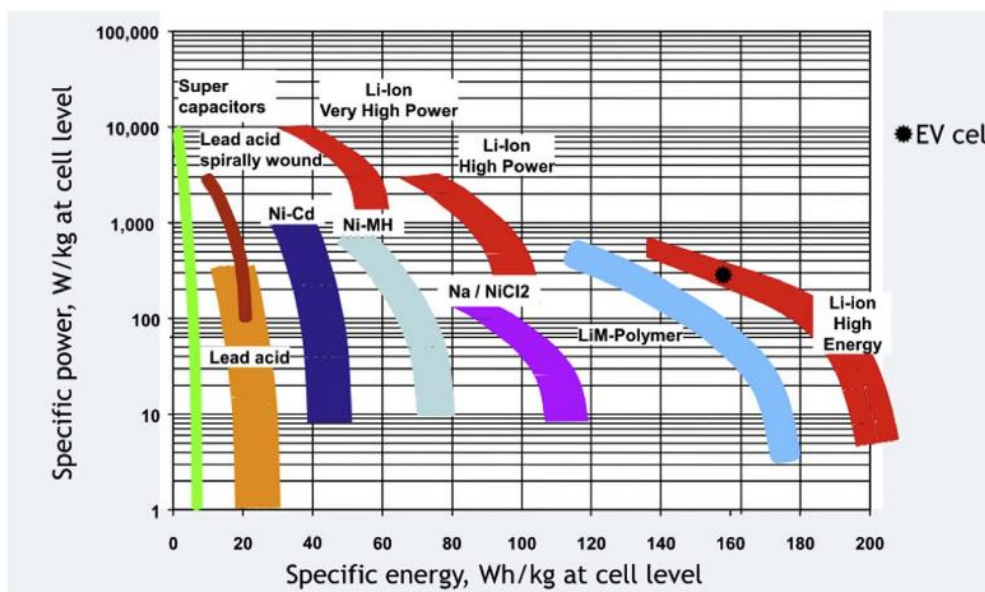


Figura 2.5 - Energia e potência específicas das diferentes baterias [1].

- Efeito da temperatura

O sistema de Li-íon tem a maior densidade de energia a -20°C. A bateria de Ni-Cd e as baterias de NiMH mostram maior retenção percentual de energia específica. No geral o desempenho a baixa temperatura das baterias alcalinas é melhor do que o desempenho das baterias de

chumbo-ácido. A bateria de chumbo-ácido e Li-íon apresentam melhores características a temperaturas mais elevadas. O desempenho é fortemente influenciado pelas condições específicas de descarga [8].

- Taxa de retenção ou auto-descarga

Na maior parte das baterias convencionais a taxa de auto-descarga 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 chumbo-ácido 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 [8].

- Vida útil

Um dos fatores que mais influencia a vida útil da bateria é o regime de carga. Das baterias convencionais, a de Ni-Cd do tipo ventilado é das melhores no que diz respeito ao ciclo de vida e duração total da vida útil bateria. Uma das desvantagens da utilização de zinco, lítio, e outros metais com elevados padrões potenciais negativos em baterias recarregáveis, é a dificuldade de recarga bem-sucedida por forma a obter um bom ciclo e tempo de vida. A bateria de níquel-zinco foi melhorada para fornecer um ciclo de vida prolongado. As baterias de Li-íon têm também demonstrado bons ciclos de vida [8].

- Custo

O custo total de uma bateria pode ser avaliado dependendo do modo de operação em que ocorre o funcionamento dessa bateria. É necessário considerar alguns outros fatores para além do custo inicial, como sejam: o número de ciclos de carga ou descarga que é possível fazer; e o número de ciclos de energia entregue numa aplicação, durante a vida útil de uma bateria. Assim, ao custo inicial poder-se-á juntar a avaliação de outros custos como por exemplo - o custo de utilização, determinado em euro por ciclo de carga/descarga ou em euro por total de kWh. Para além destes podem ainda calcular-se o de carregamento, o custo de manutenção e o custo dos equipamentos associados [8].

### 2.2.4. Métodos de carregamento das baterias

O método de carregamento a corrente/tensão constante é o mais usado no carregamento das baterias pela sua simplicidade e facilidade de implementação, e é caracterizado por três fases de operação, Figura 2.6.

A primeira fase, denominada de *trickle charge* (carga lenta), corresponde a uma tensão de célula abaixo do valor crítico de  $V_{trickle}$ . Assim, a célula deveria ser carregada com uma baixa corrente, na ordem de  $C/10$ , onde  $C$  é a 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 método apresenta algumas desvantagens, entre elas o tempo de carregamento [11].

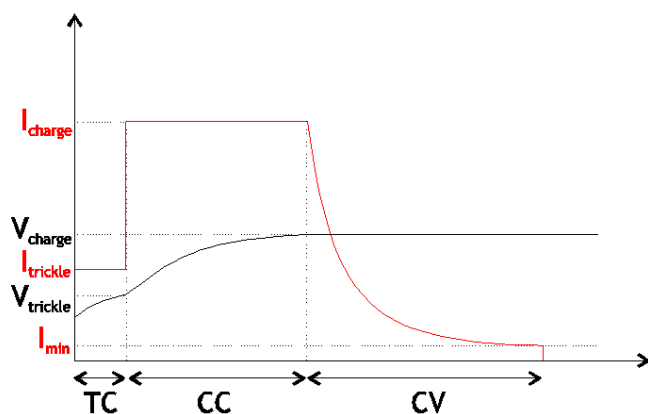


Figura 2.6 - Método de carregamento Corrente Constante/Tensão Constante [12].

Existem outros métodos de carregamento direcionados para minimizar estas desvantagens. Um deles é o carregamento multi-fase, que consiste em múltiplas fases de carregamento com diferentes níveis de corrente, Figura 2.7.

Este método estabelece diferentes níveis de corrente e de condições para as fases do carregamento. O critério mais usado para alternar entre as fases é um limite de tensão da célula definido, 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 [11]. Por vezes são escolhidos algoritmos de otimização para encontrar as melhores fases, baseados em abordagens diferentes, como o algoritmo PSO ou controladores fuzzy [13].

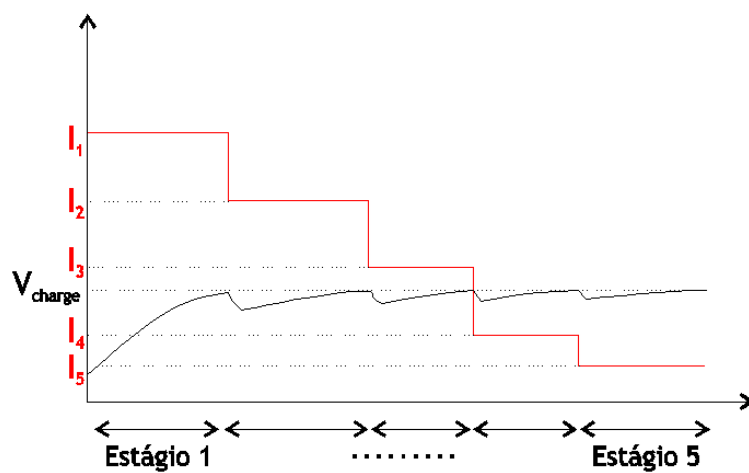


Figura 2.7 - Método de carregamento *Multistage* [12].

O método de carregamento por pulso, faz uso da corrente pulsada, podendo ser subdivididos em duas metodologias distintas, *variable frequency pulse charge* (VFPC) e *variable duty pulse current* (VDPC), Figura 2.8. 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 [12].

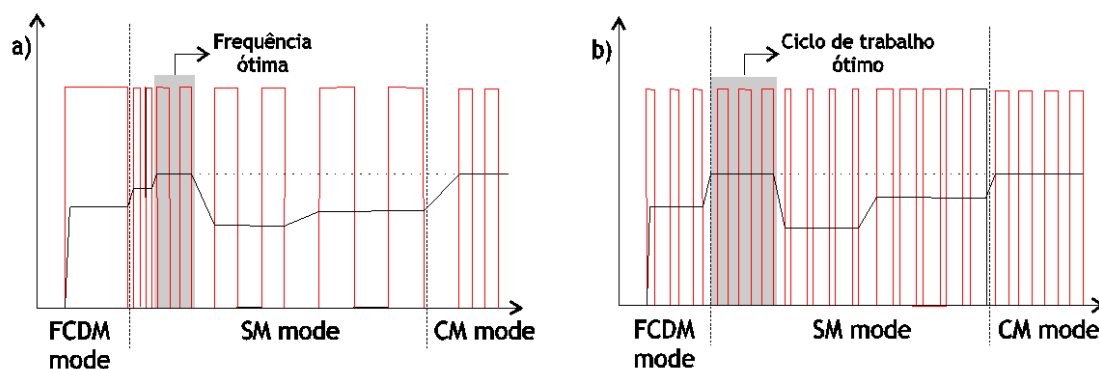


Figura 2.8 - Método de carregamento pulsado: a) VFPC; b) VDPC [12].

Na Figura 2.9 pode observar-se uma comparação entre os diferentes métodos de carregamento, onde é visível que o carregamento multi-fase tem a melhor relação em termos de eficiência, simplicidade, controlo e tempo de carregamento. No que diz respeito ao carregamento por pulso, este é o pior em termos de complexidade de implementação e controlo, embora também seja bastante eficiente [11].

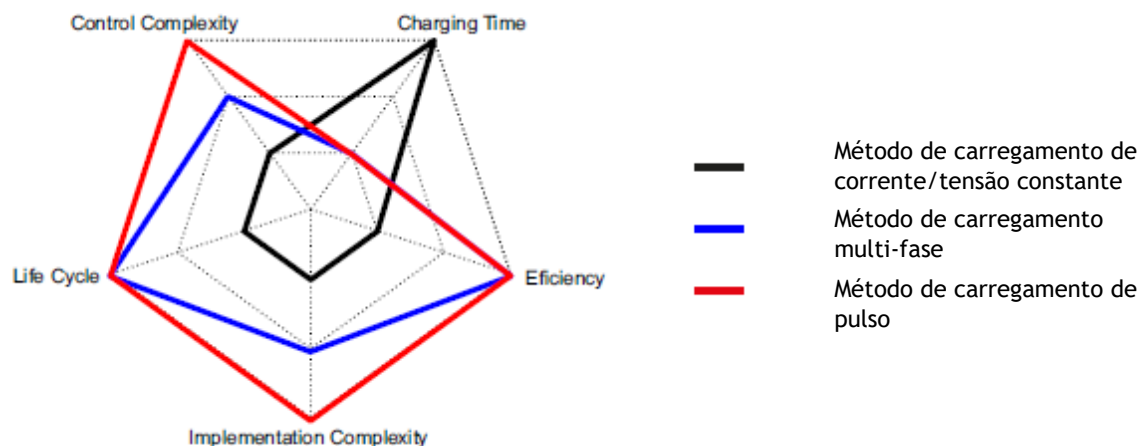


Figura 2.9 - Comparação dos métodos de carregamento das baterias. Adaptado de [11].

Grande parte das baterias podem ser carregadas sob condições de corrente constante, que é geralmente o método preferido de carregamento, embora na prática, a tensão constante ou métodos modificados de tensão constante também são utilizados.

As baterias de ácido-chumbo são carregadas num processo que se desenrola em três fases. Na primeira, deve ser fornecida uma corrente constante à bateria, na segunda deve ser fornecida tensão constante e na terceira é utilizada a carga flutuante, que compensa os efeitos da auto descarga da bateria [9], Figura 2.10.

O carregamento completo demora cerca de 12 a 16 horas e no caso de se utilizar uma corrente mais elevada ou um método de carregamento com várias fases pode demorar cerca de 10 horas. Estas baterias não permitem o carregamento rápido [9]. Não devem ser totalmente descarregadas pois isto pode afetar a recarga da bateria ou diminuir a capacidade de carga. As baterias de ácido-chumbo são sensíveis a variações de temperatura. [8].

Para uma autonomia de 200 km seria necessário usar 500 kg de células de ácido-chumbo, enquanto que com uma bateria de lítio seriam apenas necessários 150 kg. A sua vida útil é também mais curta quando comparada com outras tecnologias e por isso não é considerada no futuro dos EV [1].

Algumas baterias seladas podem não ser carregadas por métodos de tensão constante devido à possibilidade de instabilidade térmica. Geralmente, as baterias de NiCd ventiladas têm as propriedades de carga mais favoráveis podendo ser carregadas por diferentes métodos e num curto espaço de tempo. Estas baterias de NiCd podem ser carregadas ou sobrecarregadas numa ampla faixa de temperaturas sem se danificarem. As baterias NiMH e NiCd seladas têm boas características de carga, no entanto a gama de temperaturas é mais limitada para estes sistemas. A bateria de NiMH é mais sensível às sobrecargas, sendo aconselhável o controlo de carga para evitar o sobreaquecimento. As baterias de chumbo-ácido também têm boas

caraterísticas de carga, no entanto devem ser considerados alguns cuidados para evitar o sobreaquecimento excessivo [8].

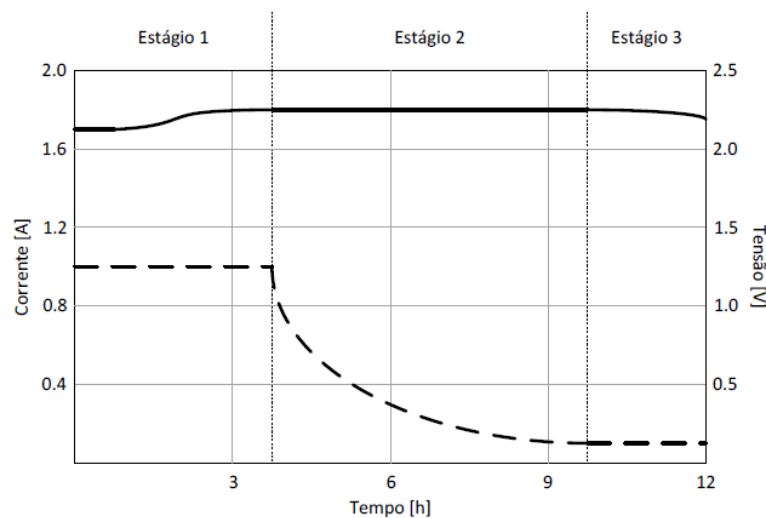


Figura 2.10 - Fases de carregamento de uma bateria de ácido-chumbo (a linha descontínua representa a corrente e a linha contínua a tensão) [9].

Muitos fabricantes estão a recomendar métodos de carga rápidos de menos de 2 a 3h para satisfazer a procura dos consumidores e o seu uso. Estes métodos exigem controlo para cortar a carga antes de ocorrer uma excessiva subida de pressão, ou temperatura na bateria. No geral, as técnicas de controlo são úteis para a recarga de baterias. Estas técnicas podem ser utilizadas de várias formas: para evitar a sobrecarga, para facilitar o carregamento rápido, para detetar uma condição anómala de funcionamento, cortando a carga ou reduzindo a taxa de carregamento para níveis seguros. Da mesma forma, controlos de descarga também são utilizados para manter o equilíbrio das baterias e para evitar o excesso de descarga. Outra abordagem é a bateria ‘inteligente’, que integra caraterísticas tais como [8]:

- Controlar a carga de modo a que a bateria possa ser carregada de forma ideal e segura;
- Introduzir a carga restante na bateria;
- Introduzir dispositivos de segurança para alertar o utilizador para operações inseguras ou indesejáveis, ou para desligar o circuito da bateria quando estas ocorrem.

### 2.3. Conversores

Os conversores desempenham um papel fundamental nos sistemas de carregamento das baterias dos EV. Diversas topologias de conversores podem ser usadas nos EV, Figura 2.11.

As baterias armazenam energia como uma carga DC. Normalmente elas obtêm essa energia através de linhas AC ligadas à rede. Para entregarem essa energia aos motores, esta deve ser convertida novamente. Este processo também funciona de forma inversa, ou seja, a energia ser entregue de volta às baterias através da travagem regenerativa ou através de V2G. A conversão típica nos EV é DC-DC ou AC-DC. O conversor AC-DC transforma a energia da rede que vai ser armazenada através de outra etapa de conversão DC-DC. A energia armazenada é fornecida ao motor através da conversão DC-DC e através dos acionamentos do motor [14].

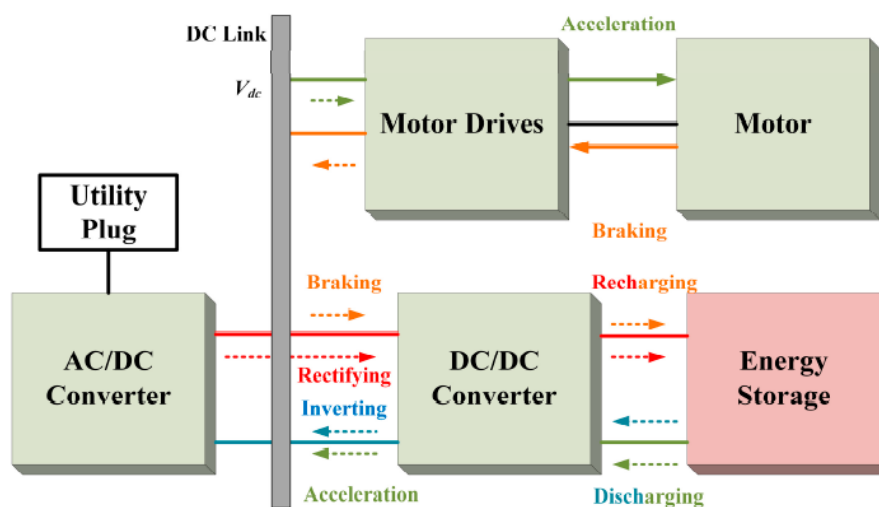


Figura 2.11 - Posicionamento típico dos diferentes conversores num veículo elétrico [14].

### 2.3.1. Topologias de conversores AC/DC para correção do fator de potência

A correção do fator de potência (PFC) é uma necessidade para que se consiga obter alta densidade de potência e eficiência. Existem duas técnicas de PFC: fase única e duas fases. A primeira é adequada para uso de baixa potência e carregamento apenas de baterias de chumbo-ácido, devido à elevada ondulação de baixa frequência. Para evitar isto, a segunda técnica é utilizada [14].

A tensão da rede AC deve ser convertida em tensão DC de forma a poder carregar as baterias. É então necessária a utilização de um conversor AC-DC. O nível de tensão DC convertido deve ser suficiente para carregar a bateria. Por isso, um conversor DC-DC é essencial para aumentar ou diminuir a tensão DC convertida. Os conversores *boost*, *buck* e *buck-boost* são os conversores convencionais que são usados para este fim, Figura 2.12. 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 PFC *boost*, *buck* e *buck-boost* são as topologias PFC 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 díodos em ponte [15].

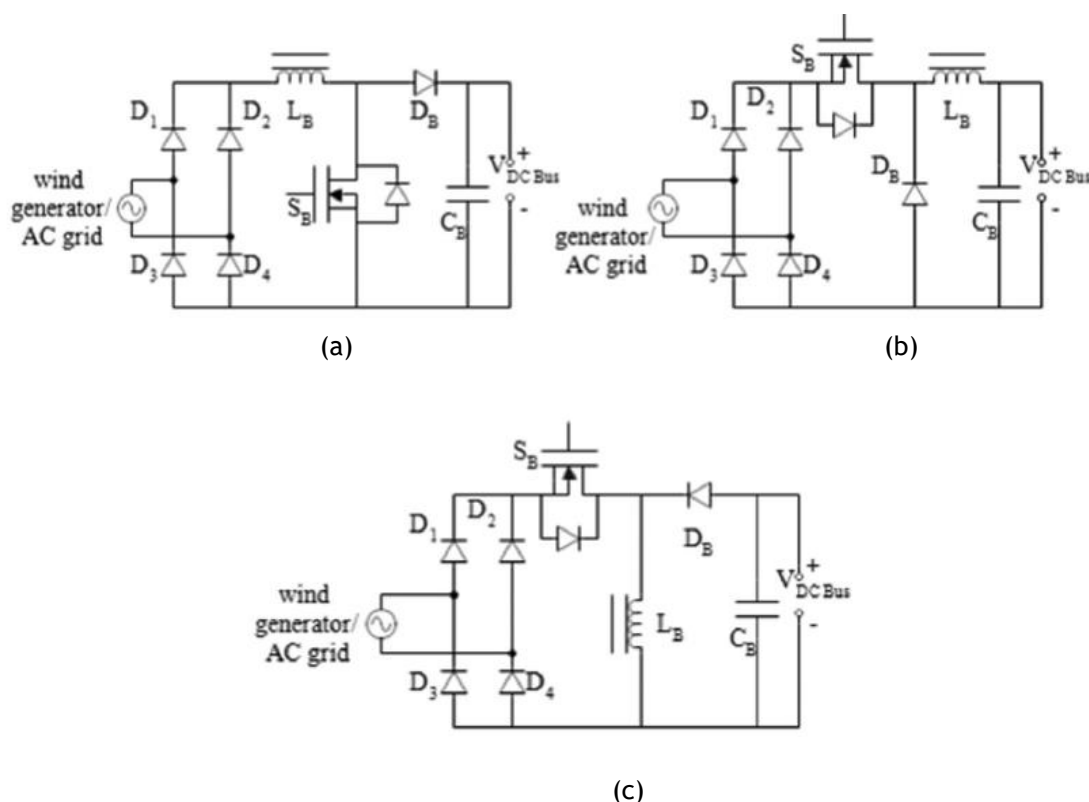


Figura 2.12 - Conversor *boost* PFC (a), conversor *buck* PFC (b) e conversor *buck-boost* PFC (c) [15].

A fim de minimizar esta perda e reduzir o tamanho e quantidade de 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 2.13. 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, é usado um retificador sem ponte PFC *cuk* [15].

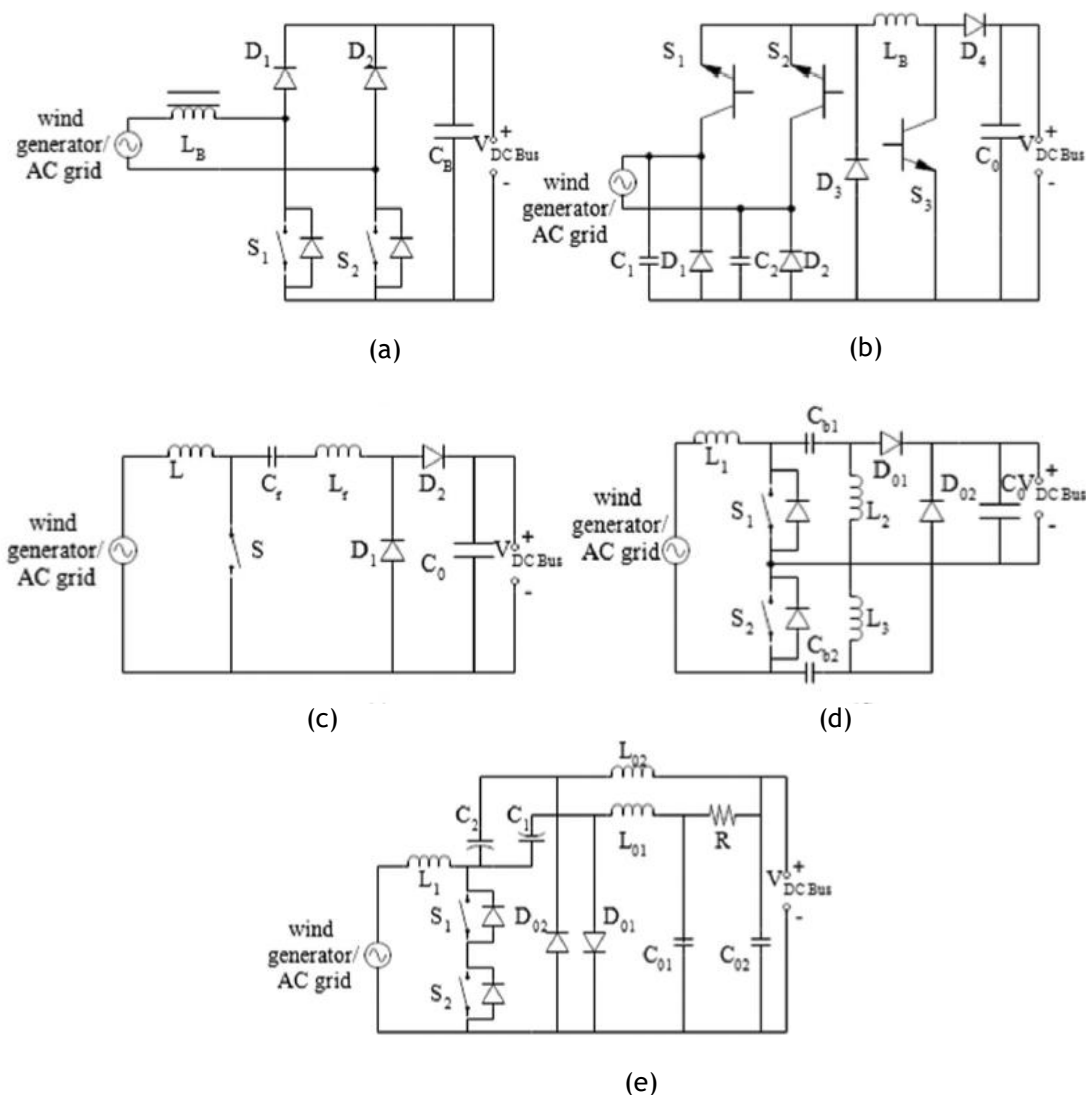


Figura 2.13 - Conversor boost sem ponte (a), conversor PFC buck-boost sem ponte (b), conversor PFC pseudo-boost sem ponte (c), conversor PFC SEPIC sem ponte (d) e retificador cuk sem ponte (e) [15].

### 2.3.2. Topologias de conversores DC-DC

O conversor DC-DC de meia ponte opera quer no modo *boost* quer no modo *buck*. Este conversor tem baixas perdas de comutação e condução, o que leva a uma maior eficiência. O conversor de meia ponte em cascata e o conversor de meia ponte intercalado foram mais tarde desenvolvidos, Figura 2.14. Estes conversores reduzem o stress térmico e elétrico que existe no conversor de meia ponte convencional. No conversor de ponte completa com transformador incorporado é possível obter-se comutação zero da tensão e da corrente. O transformador está incorporado na topologia do circuito deste conversor de modo a fornecer isolamento entre a entrada e a saída. Este conversor pode fornecer alta eficiência numa gama de tensão de saída

e sob várias condições de carga. Dado estas vantagens, este conversor é o preferido para atuar como carregador de bateria, entre as restantes topologias [15].

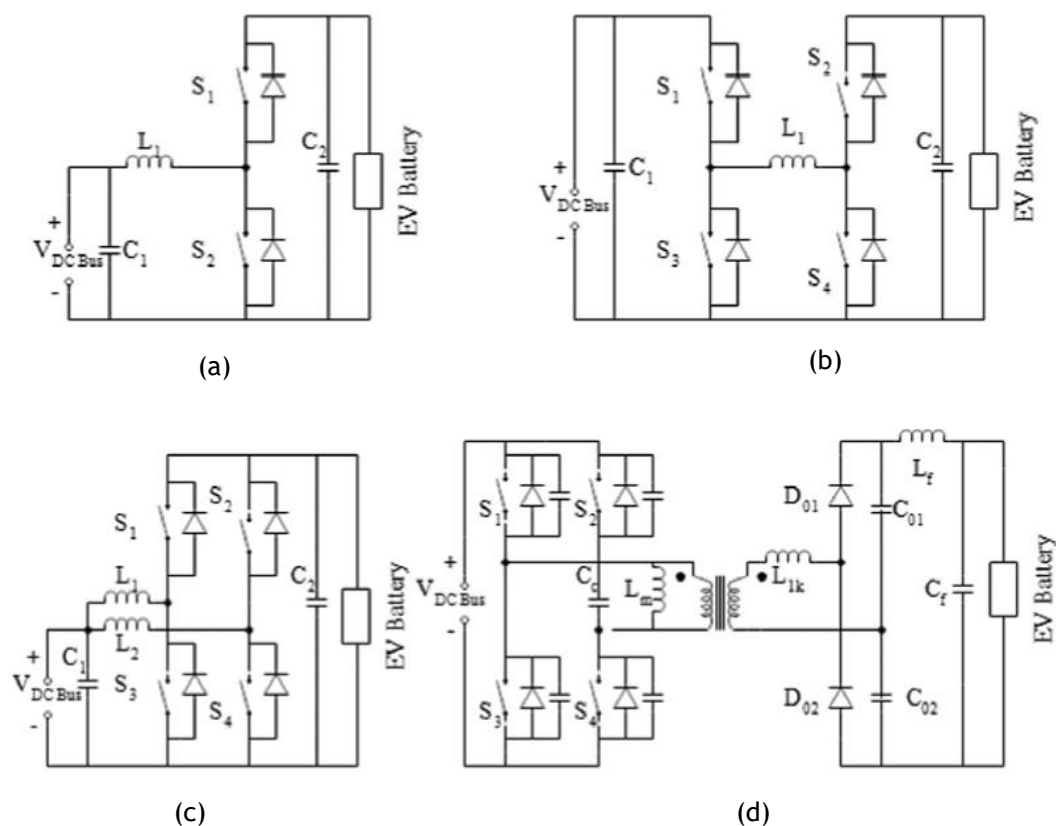


Figura 2.14 - Conversor de meia ponte (a), conversor de meia ponte em cascata (b), conversor de meia ponte intercalado (c) e conversor de ponte completa com transformador incorporado (d) [15].

## 2.4. Carregamento convencional de veículos elétricos

Um EV pode ser carregado em tomadas elétricas apropriadas através do carregador de bordo que possui. Este carregador assemelha-se a um carregador de telemóvel, mas com adequados níveis de potência muito maior. O carregador recebe energia AC através da tomada e carrega as baterias com energia DC.

Quatro modos de carregamento foram definidos [16], Figura 2.15:

- **Modo 1** - Corresponde à conexão direta do EV com a rede de alimentação AC utilizando uma tomada comum presente em qualquer residência. A conexão não pode exceder os 16 A, sendo que o recomendado é 10 A, demorando o EV cerca de 10-12 horas para carregar completamente. Requer condutores de energia e de proteção. Conectar um EV sem qualquer precaução neste tipo de instalação, pode ser perigoso quando os

dispositivos de proteção adequados estão ausentes, sendo que este método já quase não é usado e foi proibido nos Estados Unidos precisamente por motivos de segurança.

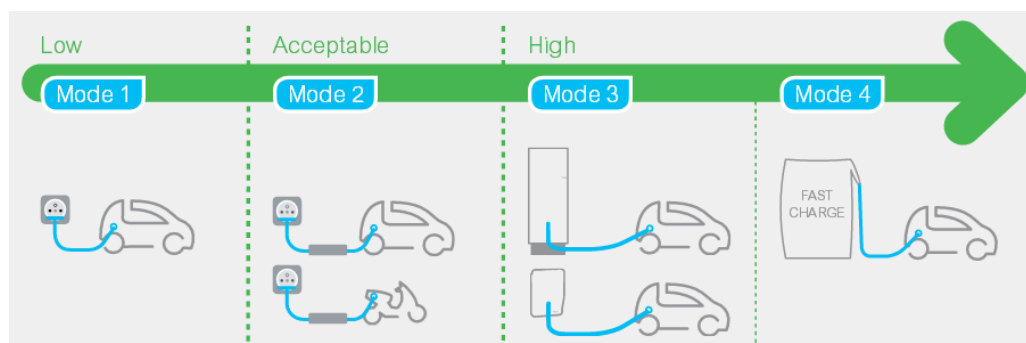


Figura 2.15 - Modos de carregamento do veículo elétrico [16].

- Modo 2 - O EV é igualmente conectado à rede de alimentação através de uma tomada doméstica, monofásica ou trifásica, e com instalação de um cabo de ligação à terra. Um dispositivo de proteção é embutido no cabo e este comunica com o veículo.
- Modo 3 - Consiste na conexão direta a uma rede elétrica através de uma tomada, cabo e circuito específicos. A função de controlo e proteção faz parte da instalação. Este é o único método de carregamento que vai de encontro às normas aplicadas nas regulamentações para as instalações elétricas, permitindo assim que eletrodomésticos possam funcionar enquanto o EV é carregado, ou, pelo contrário, otimizar o tempo de carregamento do EV.
- Modo 4 - O carregamento do EV é feito através de um carregador externo. A função de controlo e proteção, assim como o cabo de carregamento, estão integrados permanentemente na instalação e o EV é carregado com DC.

Os EV podem ser carregados através de energia AC ou DC. Os carregadores AC de bordo são usados para níveis de potência mais baixos. Alguns EV vêm com um carregador padrão de corrente AC de baixa potência e com um opcional para maior potência. Para além disso, as estações de carregamento externas são mais usadas para níveis de potência de carregamento mais elevados. Existem três sistemas principais de carregamento: CCS (*Combined Charging System* - Sistema de Carregamento Combinado), *ChadeMo* e *Supercharger* (apenas para os Tesla) [17].

A Figura 2.16 mostra os diferentes tipos de tomada utilizados no carregamento de veículos elétricos, para os diferentes modos de carregamento.

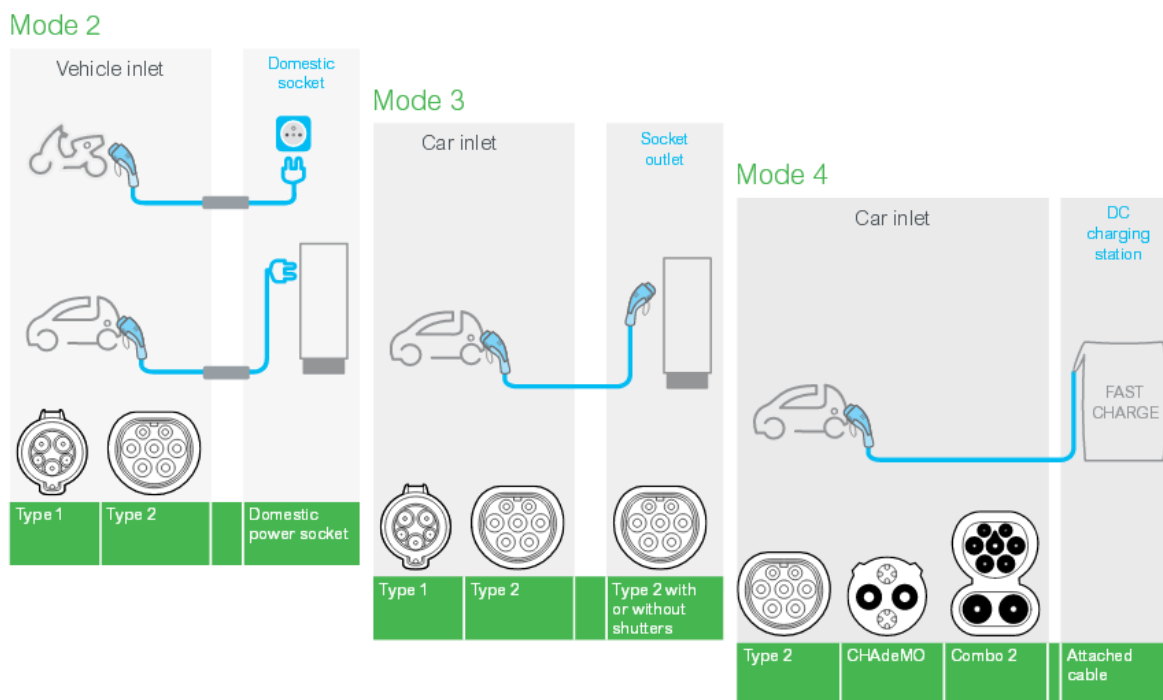


Figura 2.16 - Tipos de tomadas [16].

Consoante o método de carregamento, o processo de carga poderá ter tempos bastante distintos, e que podem variar desde alguns minutos até várias horas, tal como se ilustra na Figura 2.17. Também, é possível relacionar os tempos de carregamento com os valores da potência, da corrente e da tensão a que os carregamentos se desenrolam. Diversos fabricantes automóveis disponibilizam os tempos de carregamento em função destas grandezas, e mostram-se na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**









Source used	Domestic power socket	Dedicated AC power socket		Dedicated DC power socket
Power	Single-phase: 2.3 kW	Single-phase: 7.4 kW	Three-phase: 22.1 kW	Three-phase: 43 kW
Time to 'fill up'	 12 h	 5 h	 1h 30 min	 30 min
% of charge reached in 30 min	 4%	 10%	 34%	 100%

Figura 2.17 - Tempos de carregamento para um veículo com uma bateria de 24 kWh [16].

Tabela 2.5 - Tempos de carregamento.

<b>Tempo de carregamento</b>	<b>Potência</b>	<b>Tensão</b>	<b>Corrente máxima</b>
6 - 8 horas	Monofásico - 3,3 kW	230 V	16 A
2 - 3 horas	Trifásico - 10 kW	400 V	16 A
3 - 4 horas	Monofásico - 7 kW	230 V	32 A
1 - 2 horas	Trifásico - 24 kW	400 V	32 A
20 - 30 minutos	Trifásico - 43 kW	400 V	63 A
20 - 30 minutos	Contínuo - 50 kW	400 - 500 V	100 - 125 A

## 3. Sistemas de carregamento de baterias de veículos elétricos

### 3.1. Sistemas de carregamento de baterias de veículos elétricos

#### 3.1.1. MOBI.E

À semelhança de outros países, Portugal dispõe de uma rede de postos de carregamento espalhada por todo o território nacional - a rede MOBI.E. Esta rede conta com mais de 1200 postos de carregamento normal e 11 postos de carregamento rápido nos espaços de acesso público, e que fazem parte de uma rede piloto. Estão também integrados outros pontos de carregamento para além dos pontos da rede piloto, localizados em parques de estacionamento, centros comerciais, hotéis, aeroportos ou áreas de serviço [18]. A Figura 3.1 mostra a geografia da colocação dos postos de carregamento da rede piloto ao longo do país.

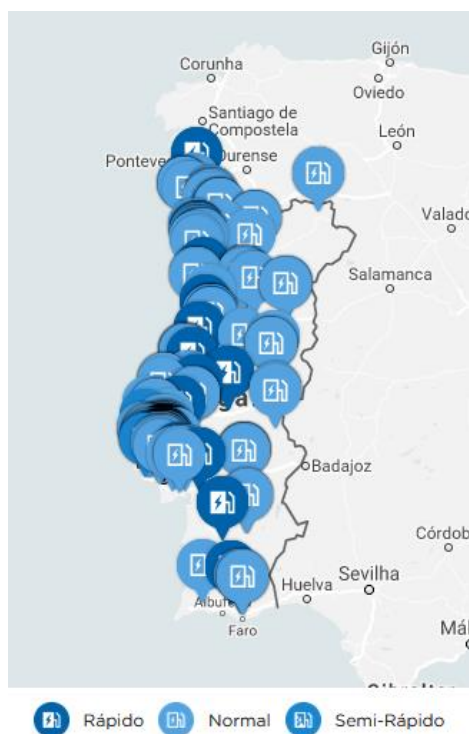


Figura 3.1 - Mapa de Portugal com os postos de carregamento disponibilizados pela MOBI.E [18].

Todos os postos são constituídos por um módulo de comunicação, que atua como interface entre o utilizador e a rede MOBI.E, permitindo a autenticação de utilizador, registo de consumos e outras funcionalidades. Possuem também um sistema de bloqueio do cabo que não permite que este seja removido sem que o utilizador faça *logout* no posto central de carregamento. Por outro lado, sempre que o cabo é desligado do veículo, o sistema corta automaticamente a eletricidade, pelo que não é possível abastecer outro veículo sem que seja feito um novo login. Os postos de carregamento normal possuem tomadas incorporadas às quais o utilizador acopla um cabo de carregamento. No caso dos postos de carregamento rápido, os equipamentos possuem ainda cabos próprios para ligar ao veículo [18].

O carregamento normal pode ser efetuado em postos de carregamento de 3,7kWh e tem uma duração entre 6 a 8 horas, permitindo o carregamento total da bateria; ou em postos de 22kWh com uma duração de pelo menos uma hora, dependendo do veículo. Estes postos encontram-se na via pública, bem como parques de estacionamento e centros comerciais. O carregamento rápido tem uma duração média de 20 minutos e permite ao veículo ter 80% da bateria carregada. Estes postos estão maioritariamente nas áreas de serviço, e em breve, nas principais cidades do país [18].

Para utilizar esta rede é necessário possuir um cartão de carregamento. Esta rede permite aos seus utilizadores localizar locais de carregamento, bem como planear trajetos e saber o estado de carregamento do veículo. Os utilizadores podem abastecer durante a noite, aproveitando a energia produzida por fontes renováveis nos momentos de menos consumo, e que de outra forma seria desperdiçada, e através de carregamentos rápidos durante o dia, de acordo com as necessidades de cada utilizador [18].

Os carregadores da MOBI.E são desenvolvidos pela Efacec, Siemens e Magnum Cap, Figura 3.2.



Figura 3.2 - Postos de carregamento MOBI.E [18].

### 3.1.2. Carregadores domésticos

Para além dos carregadores existentes na via pública, é possível carregar o veículo em casa - a maior parte do carregamento de EV é feita desta forma - através de uma tomada normal. Contudo, o carregamento feito desta forma é muito demorado, pelo que houve várias marcas a desenvolverem carregadores domésticos. Nos edifícios novos é já obrigatório instalar um ponto de carregamento ou tomada elétrica para o carregamento de baterias de EV [19]. É também possível instalar o sistema MOBI.E em condomínios, desde que solicitado [18].

Existem carregadores domésticos desenvolvidos pela LugEnergy, Efacec, pela General Electric, pela Magnum Cap, pela Schneider Electric, pela Siemens, entre outros.

A LugEnergy permite a instalação de postos de carregamento alimentados por energias renováveis. São postos que podem funcionar a energia solar ou eólica depois de devidamente estudadas e analisadas as condições de cada caso [20].

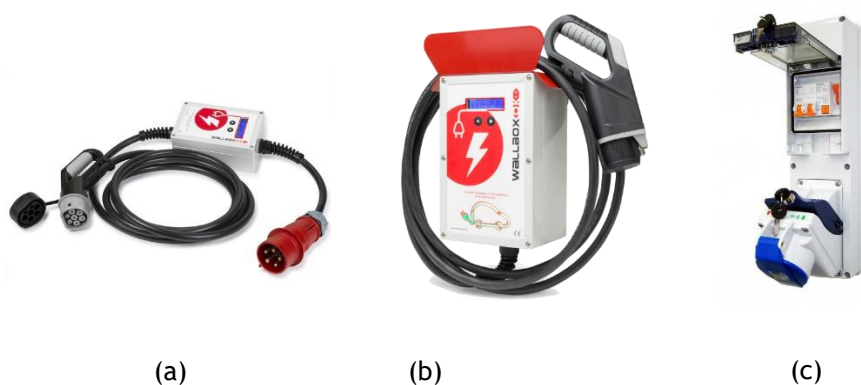


Figura 3.3 - Carregador portátil (a), de parede (b), e base de segurança (c) da LugEnergy [20].

A LugEnergy, empresa de soluções de carregamento para EV, disponibiliza várias soluções de carregamento adaptadas para cada EV sendo possível escolher o modo 2 ou 3 de carregamento.

A LugEnergy dispõe de um carregador portátil com saída e conexão ao EV, para carregamento ocasional. A velocidade de carregamento pode ser selecionada e varia de 6 a 32 Amperes, com a possibilidade de selecionar o adaptador de acordo com as necessidades. O carregador de parede varia de 16 a 32 Amperes e pode ser instalado numa garagem privada ou numa empresa. A base de segurança é um dispositivo para ser usado em condomínios e garagens partilhadas. Não permite a manipulação do carregador após a corrente ativa, apenas o titular da chave pode manipular o dispositivo. Aumenta a segurança do utilizador e é anti-vandalismo [20].

## Sistemas de Carregamentos de Veículos Elétricos *Wireless*

Podem ainda referir-se outros fabricantes como a Efacec, a General Electric, a Magnum Cap, a Schneider Electric e a Siemens, que disponibilizam já carregadores para EV, semelhantes entre si e que existem em vários tamanhos e gamas de potência. Alguns exemplos são mostrados nas Figuras 3.5 a 3.6.



Figura 3.4 - Carregadores domésticos *Homecharger* da Efacec (a) [21], *DuraStation* (b) e *WattStation* (c) da General Electric [22].

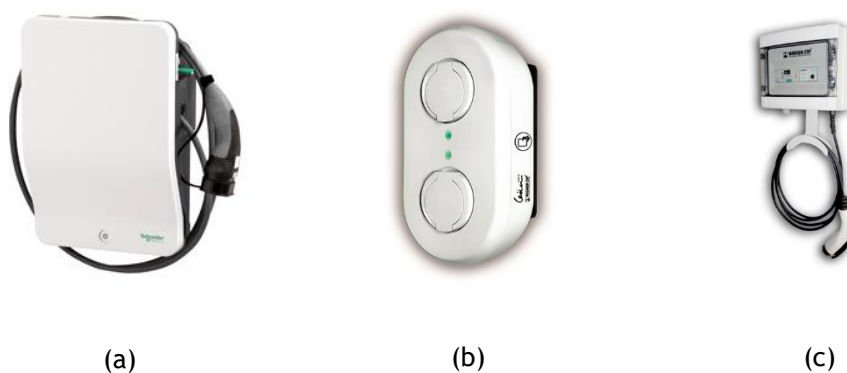


Figura 3.5 - Carregadores domésticos *MCCWB Charger* (a) e *MCWB Charger* (b) da Magnum Cap [23][24], e *EVlink Wallbox* (c) da Schneider Electric [25].



Figura 3.6 - Carregador doméstico *WB140A Charging Unit* da Siemens [26].

### 3.1.3. Carregadores sem fios

São cada vez mais as marcas de automóveis e instituições de investigação que mostram interesse na tecnologia de carregamento de EV sem fios. Atualmente são vários os grupos a contribuir para o desenvolvimento e investigação deste conceito [27], entre eles:

- Fornecedores do sector automóvel - Delphi, Magna, Maxwell e Panasonic;
- Organizações governamentais e centros de investigação - *Philips Research Europe, Oak Ridge National Laboratory, Argonne National Laboratory, Energy Dynamics Laboratory, e o Idaho National Laboratory;*
- Universidades - Universidade do Tennessee, Universidade de Wisconsin-Madison, Instituto Superior de Ciência e Tecnologia da Coreia e a Universidade Estadual do Utah;
- Marcas automóveis - General Motors, Audi, BMW, Chrysler, Daimler, Ford, Mitsubishi, Honda e Toyota.

Alguns sistemas de carregamento sem fios de EV estão já disponíveis, contudo, estão-no apenas em ensaios pré-comerciais e ainda não são produzidos em massa. A WiTricity Corp. é fornecedora de uma destas soluções, e tem parcerias com a Delphi Electronics, Mitsubishi Motors Corporation, Audi e Toyota Motor Corporation. O Plugless é um sistema fabricado pela Evatran em colaboração com a Nissan e a GM para apoio aos Nissan Leaf e Chevy Volt. A Mercedes Daimler e a Conductix-Wampfler têm um projeto de pesquisa de carregamento sem fio e a Qualcomm Inc., para além de já possuir o sistema Halo, anunciou um teste de carregamento sem fio em colaboração com o governo do Reino Unido e os Transportes de Londres [27].

A WiTricity, líder em desenvolvimentos no que diz respeito à tecnologia de carregamento sem fios, está a desenvolver um sistema com o objetivo de o lançar em 2017. Este é um sistema com uma eficiência entre 91 e 93%, que pretende disponibilizar aos fabricantes e fornecedores automóveis, bem como aos fornecedores de infraestruturas de carregamento, o design mais flexível e interoperável dos sistemas de carregamento sem fios. O sistema, que foi sujeito a testes rigorosos por parte do Departamento de Energia dos Estados Unidos, mostrou ser o mais eficiente e interoperável atualmente disponível. O design e arquitetura eficientes da WiTricity estão a ser considerados nos esforços globais de padronização [27].

O design do sistema WiTricity, baseado na arquitetura amplamente aceite de bobina circular, preferida por automóveis de todo o mundo, oferece [27], Figura 3.7:

- Taxas de carregamento entre 3,6 a 11 kW, de forma a atender às necessidades dos diferentes tipos de veículos, desde veículos PHEV, com baterias de pequena capacidade até veículos EV com baterias de alta capacidade e alta autonomia.

## Sistemas de Carregamentos de Veículos Elétricos *Wireless*

- Capacidade, a partir de um único sistema e design, para carregar veículos desde a gama dos desportivos de baixa distância ao solo até às gamas de para veículos médios de altura mais elevada, com um único sistema e design.
- Capacidade de ser instalado como um bloco de carregamento no chão, quer em residência privada, quer em pavimento de estacionamentos em infraestruturas de carregamento público.



Figura 3.7 - Sistema de carregamento sem fios da WiTricity [27].

A Evatran possui um sistema de carregamento sem fios de EV, denominado Plugless. Este sistema é compatível com uma gama de diferentes modelos de EV, entre eles o Tesla Model S, BMW i3, Nissan LEAF e Chevy Volt. O sistema inclui três componentes: o adaptador do veículo, o bloco de carregamento e o painel de controlo Figura 3.8. O veículo começa automaticamente a carregar assim que estaciona em cima do bloco de carregamento [28].



Figura 3.8 - Painel de controlo e bloco de carregamento do sistema Plugless [28].

O adaptador, é colocado por baixo do veículo, como mostra a Figura 3.9. Este é projetado para cada diferente modelo EV e funciona como recetor do sistema, convertendo a energia do transmissor em corrente elétrica. O bloco de carregamento funciona como transmissor para o

carregamento indutivo e o tempo necessário para que a bateria carregue completamente é de cerca de 8 horas [29].



Figura 3.9 - Carregamento de um veículo com o sistema Plugless [28].

A Qualcomm desenvolveu também um sistema de carregamento sem fios - Qualcomm Halo - que suporta transferências de energia a 3,7 kW, 7,4 kW, 11 kW e 22 kW com uma eficiência de 90%, Figura 3.10. O veículo apenas precisa de estacionar sem a necessidade de ligar cabos ou adaptadores. Esta tecnologia usa a indução magnética ressonante para transferir energia sem fios, de uma placa instalada no chão para uma placa integrada no veículo [30].



Figura 3.10 - Carro de segurança da Formula E, carregado através do sistema Halo da Qualcomm [30].

A Formula E tem uma parceria com a Qualcomm e o seu carro de segurança, Qualcomm Safety Car, é carregado através deste sistema. A Formula E consiste no campeonato totalmente

elétrico da FIA (Federação Internacional do Automóvel), pensado para atrair uma nova geração de fãs de automobilismo, acelerar o interesse pelos EV e promover a sustentabilidade.

### 3.1.4. Vantagens do carregamento sem fios

São várias as vantagens que podem ser apontadas à utilização do sistema sem fios para carregamento de veículos elétricos:

- Conveniência - Os sistemas de carregamento sem fios podem ser completamente autónomos. Os veículos iniciam o seu carregamento automaticamente, assim que estacionam sobre um carregador;
- Durabilidade do produto - Estes sistemas podem ser embutidos no chão, evitando assim problemas relacionados com a exposição à chuva, neve, ambientes gelados ou poeiras;
- Flexibilidade - Especialmente para dispositivos para os quais a substituição de baterias ou cabos de conexão para carregamento é dispendiosa, perigosa ou inviável (como por exemplo no caso de sensores implantados);
- Antivandalismo - Contrariamente aos sistemas convencionais que são mais propensos ao vandalismo devido à exposição do seu cabo de cobre, o sistema sem fios não tem a estrutura à vista, não sendo tão fácil vandalizá-la;
- Baixo risco de perigos - Os utilizadores podem tropeçar no fio usado nos sistemas convencionais, e existe ainda o risco de atropelamento visto que os carregadores convencionais costumam estar próximos da estrada [31][32].

## 4. Transferência de energia sem fios

A maior parte das técnicas de transferência de energia sem fios (TESF) utilizam o princípio da indução eletromagnética de curta distância, que pode ainda ser dividida em indução magnética, ou transferência de energia indutiva (TEI) e em indução eletrostática, ou transferência de energia capacitiva (TEC).

Apesar de ser uma tecnologia que se tem vindo a desenvolver recentemente, o conceito de TESF não é tão novo quanto se possa pensar. A primeira demonstração pública de TESF foi feita por Nikola Tesla, em 1891, demonstrando a iluminação de um tubo de vácuo através do acoplamento capacitivo. Pouco tempo depois Tesla demonstrou o princípio da indução eletromagnética através do ar, a uma determinada distância, e provou que esta podia ser mais versátil para aplicações de energia sem fios. Eventualmente estas técnicas evoluíram para comunicações sem fios. A partir de 1900, Tesla desenvolveu a TEI assim como algumas técnicas de radiação de longa distância. A TEI começou a ser usada em aplicações biomédicas nos anos 60. No fim dos anos 70, iniciou-se a investigação em torno da TEI de maior potência direcionada para sistemas rodoviários elétricos, com alguns projetos lançados ainda na década de 80; mas devido à falta de bons materiais como interruptores semicondutores e condensadores, estes projetos não tiveram o êxito pretendido. Durante os anos 90 a TEI ficou estabelecida comercialmente em aplicações de manuseio de materiais, de iluminação rodoviária e implementaram-se os primeiros sistemas comerciais de transporte de pessoas. Em 1999 os carregadores de dispositivos eletrónicos eram já muito comuns, pelo que se voltou a impulsionar a pesquisa e desenvolvimento da TEI. Recentemente, a TEI de alta potência surgiu como um meio interessante para carregar EV. Até 2008, o acoplamento capacitivo para TESF permaneceu ignorado desde que Tesla o apresentou e apenas de 2008 até agora a TEC voltou a ser protagonista de rápidos desenvolvimentos [33].

Mas apesar de a TEC se estar a desenvolver rapidamente, é apenas adequada para baixos níveis de energia e para transferência a curtas distâncias, enquanto que a TEI é adequada para baixos e altos níveis de energia abrangendo uma maior faixa de distâncias [33].

A TESF é investigada continuamente por todo o mundo com o objetivo de se encontrar soluções eficazes para transferência de energia com alta potência, alcançando longas distâncias, com boa eficiência, sem problemas de saúde associados e com um baixo custo.

#### 4.1.1. Transferência de energia indutiva

A TEI depende da indução do campo magnético. As aplicações de muito baixa potência ( $< 1W$ ) tendem a ser dispositivos biomédicos implantáveis ou sensores. Estas aplicações funcionam a uma alta frequência relativa, baixa eficiência e a uma curta distância. As aplicações de baixa potência (1W a 1kW) normalmente são telemóveis, televisões ou iluminação. A TEI de alta frequência e curta distância parece ter uma eficiência e custo aceitável, uma vez que é já comercializada. Os sistemas de TEI de baixa potência e longa distância estão ainda em desenvolvimento. Aplicações de nível médio a alto de potência ( $> 1kW$ ) incluem linhas de montagem automóvel, limpeza de fábricas e aplicações gerais de automação industrial. A pesquisa continua a crescer na área do carregamento dos EV. Este tipo de aplicações normalmente têm uma maior faixa de distâncias ( $> 10cm$ ) e a frequência de operação costuma ser baixa devido às limitações da eletrónica de potência [33].

#### 4.1.2. Transferência de energia capacitiva

A TEC consiste em transferir energia através do campo elétrico, como nos condensadores. É apenas aplicável na transferência de energia com pequenos intervalos de distância, Figura 4.1. Mas apesar das limitações ao nível da distância, é viável em aplicações com nível de potência na ordem dos kW. Quando comparada com a TEI, a TEC está ainda a surgir como uma opção viável dado os poucos pontos de referência, mas a variedade de aplicações é semelhante à da TEI, nomeadamente dispositivos biomédicos de baixa potência e carregamento de dispositivos móveis. Tem havido uma tendência no aumento de energia dos níveis de energia a transferir, com níveis de potência adequados a aproximarem-se da automação industrial e do carregamento de EV. Mas apesar disto, as limitações físicas no que diz respeito às distâncias impedem geralmente aplicações onde é necessária uma distância maior que 1 mm [33].

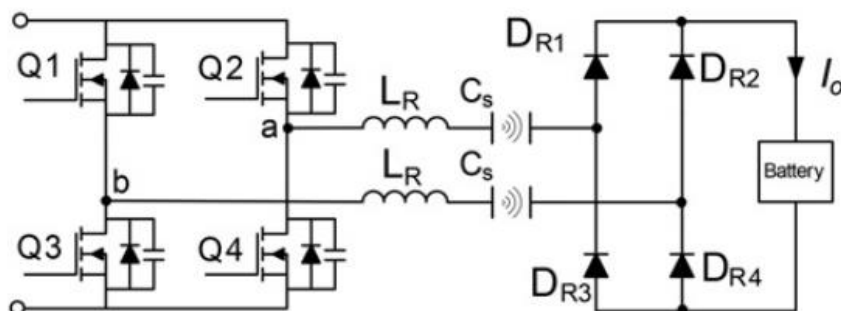


Figura 4.1 - Esquema típico de um circuito conversor ressonante em série, construído à volta do condensador de acoplamento [27].

## 4.2. Carregamento sem fios

A principal diferença entre um carregador sem fio e um carregador convencional é que um transformador é substituído por um conjunto de bobinas acopladas.

A principal vantagem deste método, usado maioritariamente no Japão e nos Estados Unidos, é a sua segurança. O risco de tropeçar num cabo ou de choque elétrico não existe. Contudo, a sua eficiência é sempre menor que 90% e muito dependente da posição do carro e da distância entre a bobina emissora e a bobina recetora. Para além disso, a radiação eletromagnética emitida pelas bobinas pode afetar a componente eletrónica do veículo, obrigando a que a resistência dos veículos e estas emissões possa ter de ser maior [1]. A radiação eletromagnética tem também de ser controlada dentro de uma gama de valores, de forma a não ser prejudicial para a saúde humana.

Um sistema típico de carregamento sem fios de EV é constituído por diversos blocos funcionais, tal como mostra a Figura 4.2. Primeiramente, as grandezas elétricas da fonte de alimentação AC são convertidas para grandezas DC através de um conversor AC-DC com correção do fator de potência. De seguida as grandezas elétricas DC são convertidas para grandezas AC de alta frequência. Entre a conversão DC-AC e a bobina de transmissão primária está inserido um circuito de compensação. Considerando a falha de isolamento da bobina lateral primária, um transformador isolado de alta frequência pode ser inserido entre o inversor DC-AC e a bobina lateral primária, de forma a obter segurança e proteção extra. A corrente de alta frequência na bobina transmissora gera um campo magnético alternado, que induz uma tensão AC na bobina recetora. Ao tornar-se ressonante com a rede de compensação secundária, a energia transferida e a eficiência são significativamente melhoradas. Por fim, a energia AC é retificada de forma a permitir o carregamento da bateria [34].

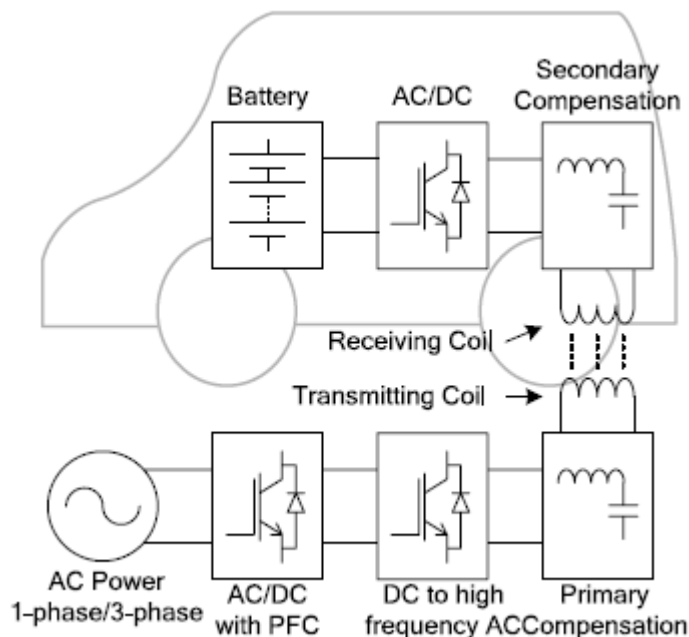


Figura 4.2 - Sistema típico de carregamento sem fios de veículo elétrico [34].

O desempenho dos sistemas de carregamento sem fio estacionários e dinâmicos depende principalmente dos materiais. Atualmente, o cobre é dos materiais mais usados nas bobinas, devido à sua boa condutividade e preço relativamente baixo. Os fios finos de cobre são torcidos e entrelaçados juntos para formar fios de *litz* que são utilizados para enrolar as bobinas. Isto minimiza os efeitos pelicular e fornece densidade de corrente suficiente. Por vezes são usadas ferrites no núcleo das bobinas, com o objetivo de servirem de escudo magnético quando se alcançam as frequências desejadas. O alumínio é também usado como escudo magnético devido ao seu alto desempenho e baixo custo [35].

#### 4.2.1. Carregamento dinâmico

O sistema de carregamento dinâmico permite aos EV carregarem enquanto se movimentam, permitindo também a redução da capacidade total da bateria, reduzindo assim o custo do EV e o seu tempo de carregamento, Figura 4.3.

Um desafio nos sistemas de carregamento dinâmico é como melhorar a eficiência do sistema - a eficiência destes sistemas é menor que a dos sistemas de carregamento estacionário. Isto porque uma certa quantidade de fluxo magnético gerado pela bobina primária não é acoplada com a bobina secundária [35]. Para todos os sistemas TESF há uma faixa de alinhamento específica entre o transmissor e o recetor em que a máxima energia é transferida, e sempre que esta faixa não seja respeitada, a transferência de energia será menor. No caso do carregamento dinâmico, manter esta faixa de alinhamento é mais difícil uma vez que o

deslocamento lateral do veículo está constantemente a mudar. De forma a resolver estes problemas de desalinhamentos, muitas pesquisas foram direcionadas para que se tentasse aumentar a faixa de alinhamento através de módulos de receção de energia mais eficientes. No entanto, estes métodos podem tornar-se difíceis de implementar ou muito dispendiosos [36].

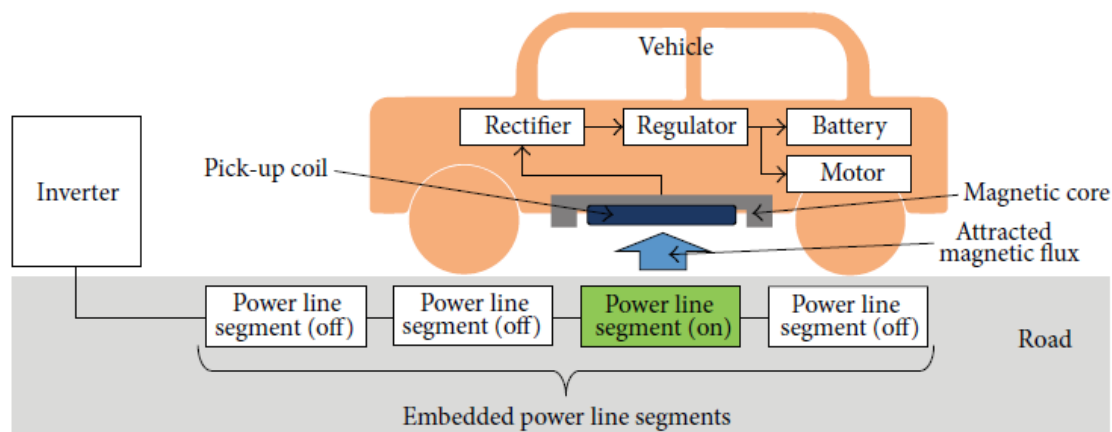


Figura 4.3 - Sistema de carregamento dinâmico [36].

A parte do sistema transmissor de energia é constituída pelo inversor e pela linha de alimentação, onde o inversor fornece energia para as linhas de alimentação que estão instaladas debaixo da estrada. A linha de alimentação é instalada como segmentos de linha de alimentação, onde o inversor liga apenas o segmento onde se irá localizar o veículo, de forma a atenuar a ineficiência da fonte de alimentação.

A parte recetora do sistema é anexada à parte inferior do chassis do veículo, que consiste na bobina de captação, núcleo magnético, retificador e regulador. O núcleo magnético captura o fluxo magnético das linhas de alimentação e vai induzir tensão ao longo das linhas de alimentação. Esta tensão induzida é convertida em tensão DC através de um retificador e convertida depois na faixa de tensão desejada através do regulador. Uma pequena porção da energia recebida é usada para acionar o motor enquanto que o resto é usado para carregar a bateria quando o veículo está em movimento. Quando o veículo está parado, toda a energia recebida é usada para carregar a bateria [36].

#### 4.2.2. Acoplamento indutivo ressonante

Num sistema de acoplamento ressonante, cria-se um regime de operação “fortemente acoplado” e a energia pode ser transferida de uma forma mais eficaz. A TESF de médio alcance

implementado com base nesta teoria de forte acoplamento é quase unidirecional e eficaz com o mínimo de interferências e perdas. A ideia por trás do sistema TESF por acoplamento ressonante é trocar energia de forma eficiente através da criação um forte acoplamento magnético entre dois objetos que estão sintonizados para ressoar à mesma frequência. Este fenômeno ocorre entre as bobinas que transportam corrente através dos seus campos magnéticos variáveis ou oscilantes [37].

O princípio geral de todo este mecanismo de acoplamento ressonante é que quando a bobina primária, ligada em série com um condensador, é alimentada pela tensão de entrada, produzirá um campo magnético oscilante. A energia será transferida alternadamente entre o campo magnético induzido no indutor e o campo elétrico no condensador, à frequência de oscilação. Devido às perdas resistivas e de radiação, esta oscilação desaparece a uma taxa determinada pelo fator  $Q$ . Quando a bobina secundária é sintonizada na mesma frequência, resulta na absorção de mais energia em vez de a perder em cada ciclo, Figura 4.4. Portanto a maior parte da energia é transferida neste processo [37].

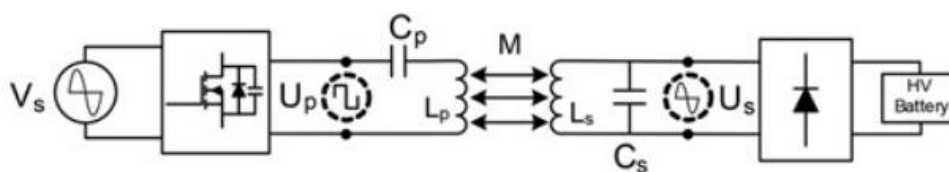


Figura 4.4 - Esquema simplificado de um carregador indutivo ressonante [27].

As principais funções dos circuitos ressonantes são, portanto [27]:

- 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.

### 4.2.3. Topologias de compensação

Para que um sistema de TESF opere na sua frequência de ressonância, é necessário adicionar condensadores de compensação para formar a ressonância entre os lados primário e secundário do sistema. No lado primário, ou transmissor, a topologia de compensação é utilizada para

minimizar a taxa Volt-Ampere (VA) da fonte de alimentação e atingir o ângulo de fase zero (ZPA) (diferença de fase entre tensão e corrente da fonte de alimentação ser zero), o que significa que não há necessidade de a fonte de alimentação fornecer potência reativa para que a potência aparente seja igual à potência real. No lado secundário, ou recetor, a compensação sintoniza o circuito de forma a que este tenha a mesma frequência de ressonância que o lado transmissor, sendo a transferência de energia maximizada. As topologias de compensação também auxiliam a comutação suave dos transístores 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 [35].

Existem várias topologias de compensação, mas as principais são: SS, SP, PS e PP, Figura 4.5. O S significa série e o P paralelo, indicando de que forma os condensadores estão ligados à bobina. A primeira letra representa o lado transmissor e a segunda o lado recetor. Nas topologias PS e PP a capacitância primária depende da condição da carga, enquanto que nas topologias SS e SP não. Daí as topologias SS e SP serem adequadas para condições de carga variável, desde que a ressonância seja garantida [35].

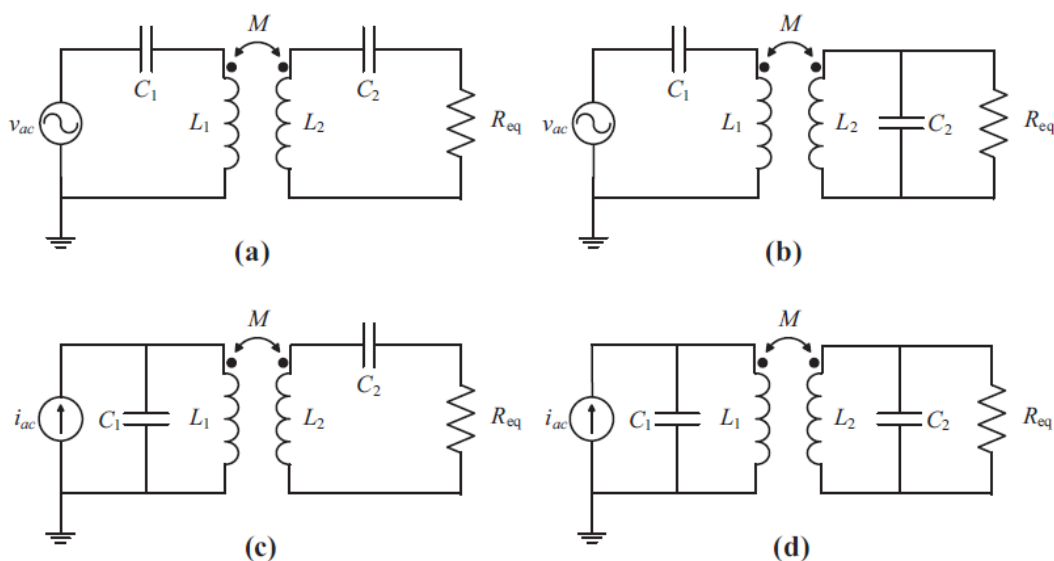


Figura 4.5 - Principais topologias de compensação: (a) SS, (b) SP, (c) PS e (d) PP [35].

#### 4.2.4. Filtro LC

Um filtro LC pode também ser considerado um circuito de ressonância, pois é composto por um condensador e uma bobina que podem ser ligados em série ou paralelo, apresentando uma capacidade oscilatória, que permite dar resposta a sinais oscilatórios, Figura 4.6. No início é

aplicada uma tensão aos terminais do condensador (C) até este estar carregado. Depois, no seu ciclo de descarga, o condensador gera uma corrente que percorre a bobina (L). A bobina irá então gerar um campo magnético que se irá opor a essa corrente e age de forma tornar o processo de descarga do condensador mais lento. Assim que a corrente do condensador vai diminuindo, também o campo magnético diminui, o que resulta na variação do campo magnético na bobina, provocando a indução de uma corrente contrária à corrente inicial no circuito. O condensador carregar novamente, mas com a polaridade contrária à anterior. Assim que o campo magnético desaparece, o condensador está carregado novamente e irá reiniciar-se um ciclo novo. Nos terminais do condensador e da bobina irá então ser gerado um sinal alternado a uma frequência característica, que será a frequência de ressonância [38].

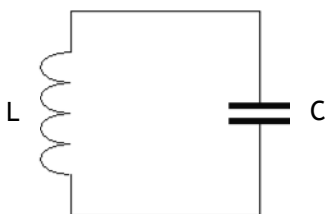


Figura 4.6 - Filtro LC.

Pode então dizer-se que os valores da indutância e da capacitância deste filtro interferem diretamente na frequência de ressonância, e cada valor dessas impedâncias vão fazer com que a oscilação do circuito seja diferente. A frequência  $f_{res}$  de ressonância do circuito pode ser calculada através de [38]:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

#### 4.2.5. Design das bobinas

O dimensionamento das bobinas é muito importante num sistema de carregamento sem fios na medida em que são estas as responsáveis pela conversão de energia magnética e elétrica, tornando possível o sistema de carregamento sem fios, determinando também a quantidade de energia transferida e a eficiência desse sistema, Figura 4.7. 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. Em aplicações para EV, a distância de transmissão, ou entreferro, varia normalmente de 100 a

300 mm, e a dimensão da bobina é sempre maior que a distância de transmissão. Para além disso, são adicionadas por vezes placas de ferrite nas bobinas para guiar o fluxo magnético e servir como escudo magnético [35].

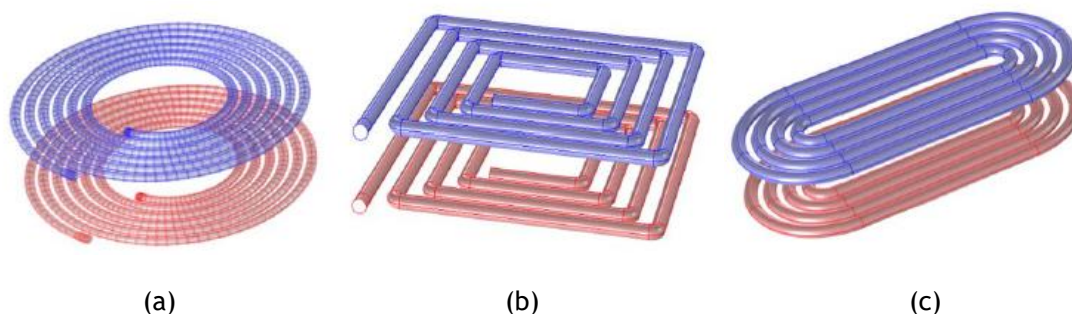


Figura 4.7 - Bobinas circulares (a), quadradas (b) e elípticas (c) [39].

Foi já concluído que se forem 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 no meio. Contudo, se forem camadas metálicas (como o alumínio) colocadas nas proximidades das bobinas, a indutância mútua é reduzida, Figura 4.8 [39].

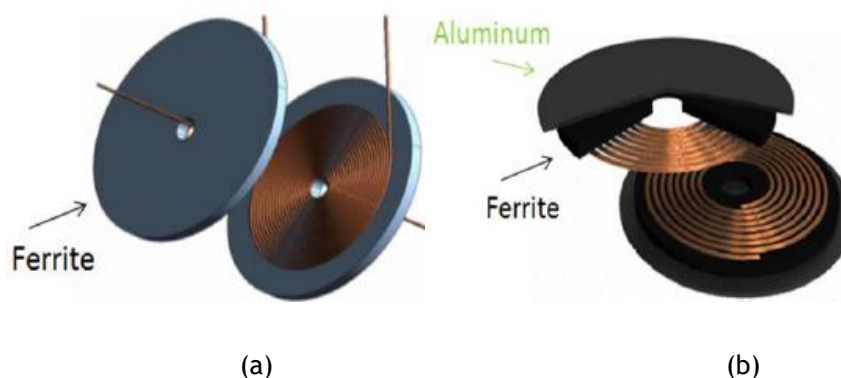


Figura 4.8 - Bobinas com escudo de uma camada (a) e de duas camadas (b) [39].

#### 4.2.6. Conversores e métodos de controlo

Os sistemas de carregamento sem fios modernos aproveitam as vantagens dos transístores de efeito de campo semiconductor de óxido de metal (MOSFET) e dos transístores bipolares de porta isolada (IGBT). Apesar dos IGBT serem mais adequados para sistemas de alta potência, os

MOSFET podem possibilitar frequências de operação mais altas e perdas menores, mas normalmente têm um preço mais elevado.

No lado transmissor, os conversores transformam energia AC de 50 Hz em energia AC de alta frequência. Existem duas formas de se fazer esta conversão: o método mais usado, é a conversão indireta de energia em duas fases, com a energia de 50 Hz primeiramente retificada para energia DC, e depois convertida em energia AC de alta frequência, através de um inversor de onda completa; o outro método, não tão comum, consiste na conversão direta da energia AC para energia AC de alta frequência através de conversores AC/AC. Do lado recetor, a energia AC de alta frequência é retificada para DC através de um retificador de onda completa, de forma a carregar as baterias. A frequência de ressonância é definida pela rede de compensação e realizada pelo inversor. A frequência de ressonância ou de comutação do inversor varia de 20 a 100 kHz em sistemas de carregamento sem fios para EV. Contudo, com os novos MOSFET de carboneto de silício, a frequência de ressonância pode chegar até 1 MHz, tornando o sistema de carregamento sem fios mais compacto [35].

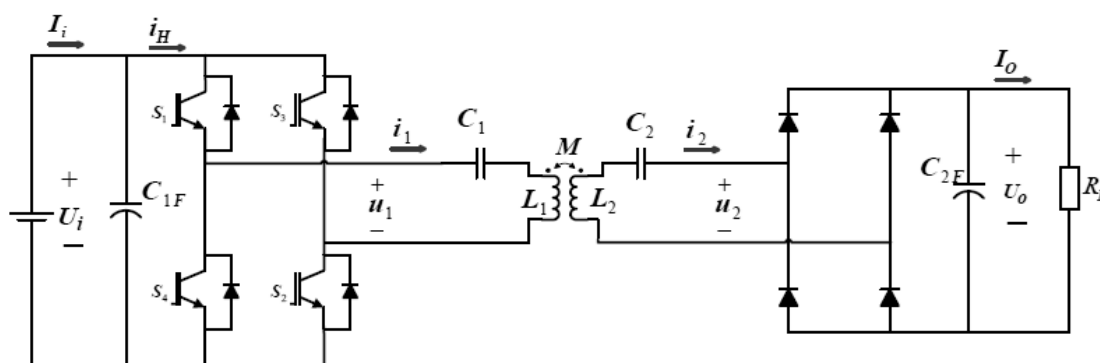


Figura 4.9 - Circuito de um sistema de transferência de energia indutiva com compensação SS [39].

A fase DC/AC é constituída pelo inversor de ponte completa de quatro transístores de potência (MOSFET ou IGBT). Também pode ser constituído por outras estruturas de inversores, como o de meia ponte ou inversor de nível 3 *neutral point clamped* (NPC). Contudo foram já feitas comparações entre estes três inversores em função de diferentes parâmetros, como a distorção harmónica total (THD), as perdas e o tamanho, e foi concluído que o melhor para o sistema ressonante indutivo seria o de ponte completa. Quando à fase AC/DC, é constituída por um retificador também de onda completa, com quatro díodos de potência. Este retificador é conectado a um condensador para manter uma tensão de saída na carga pura, ou quase pura. Esta etapa também pode ser constituída por outros inversores que funcionam como retificadores, com um bom controlo entre o primário e o secundário [39].

Nas aplicações de carregamento estacionário, os métodos de controlo são projetados para permitir o funcionamento do sistema com uma grande eficiência, permitindo ainda obter os

valores de tensão nas saídas desejadas e a transferência de energia bidirecional entre a rede e as baterias. Nos sistemas de carregamento dinâmico, os métodos de controle são desenhados com o objetivo de ativar rapidamente o circuito de detecção de veículo e entrada em carregamento para controlar a quantidade de energia recebida pela bobina secundária [35].



## 5. Dimensionamento e análise do sistema de carregamento sem fios

### 5.1. Análise teórica baseada em simulação do modelo e análise teórica

Para a simulação do sistema foram utilizados dois softwares - o Simulink e o Magnet. O Simulink é um software que permite a 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 posteriormente. O Magnet por sua vez é um software de simulação 2D e 3D de campos eletromagnéticos que permite criar protótipos virtuais de dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos, simples ou complexos. Permite a conceção de motores, sensores, transformadores, atuadores, solenoides, ímanes permanentes ou bobinas.

Por forma a simular o sistema de transferência de energia sem fios, considera-se o circuito elétrico equivalente da Figura 5.1. Nesse circuito  $r_1$  e  $r_2$  representam as resistências internas das bobinas 1 (emissora) e 2 (recetora), respetivamente;  $L_1$  e  $L_2$  são as indutâncias próprias das bobinas 1 e 2, respetivamente;  $M$  é a indutância mútua entre as duas bobinas;  $v_1$  é a tensão de alimentação da bobina 1 e  $v_2$  é a tensão de saída do circuito.

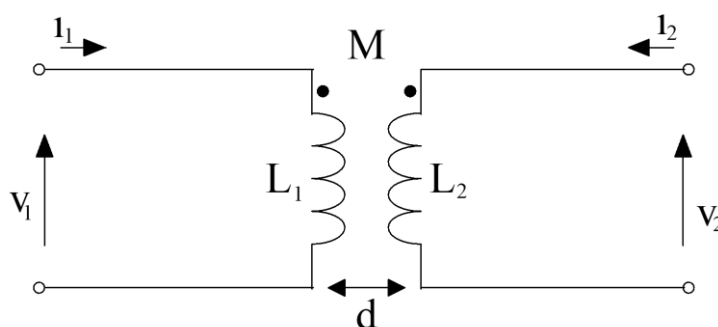


Figura 5.1 - Circuito elétrico representativo do acoplamento indutivo.

Aplicando a lei de Kirchhoff ao circuito, obtém-se:

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (5.1)$$

e

$$v_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (5.2)$$

Sendo o circuito de acoplamento utilizado para carregamento de uma bateria, introduz-se no circuito equivalente a resistência  $R$ , representativa da carga, obtendo-se agora o circuito da Figura 5.2.

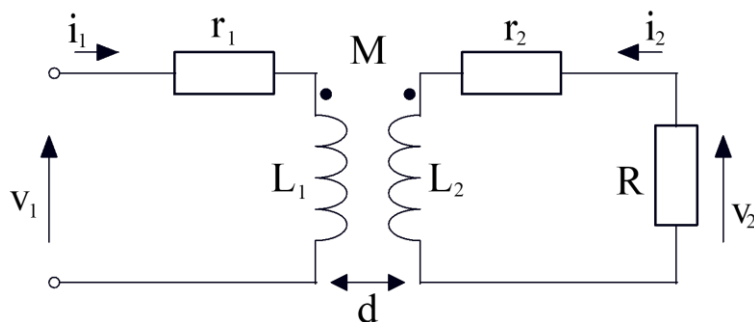


Figura 5.2 - Circuito elétrico representativo do acoplamento indutivo com representação da bateria.

Através das equações (5.1) e (5.2) e com base no circuito anterior vem:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1} \left( -M \frac{di_2}{dt} + v_1 - i_1 r_1 \right) \quad (5.3)$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_2} \left( -M \frac{di_1}{dt} + v_2 - i_2 r_2 \right) \quad (5.4)$$

O fator de acoplamento entre as duas bobinas é dado por:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 + L_2}} \quad (5.5)$$

O software Magnet permite calcular os valores das indutâncias de cada bobina ( $L_1$  e  $L_2$ ) e a respetiva indutância mútua ( $M$ ), para diferentes distâncias ( $d$ ) entre as bobinas e para cada par de bobinas. Para obter estes valores, foi utilizado um *script* no Matlab, em que foram inseridas as distâncias pretendidas. Ao executar este *script*, o Matlab iniciava a simulação no Magnet e registava os valores correspondentes das indutâncias para cada distância inserida. As bobinas simuladas no Magnet são as representadas na Figura 5.3, e têm parâmetros mostrados na Tabela 5.1.

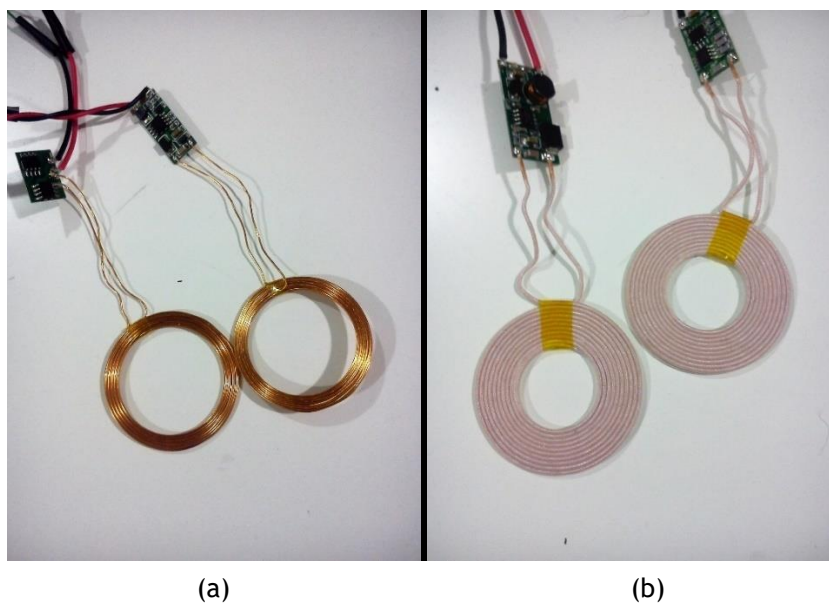


Figura 5.3 - Pares de bobinas a serem testados: par 1 (a) e par 2 (b).

Tabela 5.1 - Características das bobinas.

<b>Par de bobinas 1</b>	Diâmetro exterior	38,35 mm
	Diâmetro inferior	29,91 mm
	Espessura	1,8 mm
	Enrolamentos	15
	Resistência interna	0,4 $\Omega$
<b>Par de bobinas 2</b>	Diâmetro exterior	42,96 mm
	Diâmetro inferior	20,46 mm
	Espessura	2,4 mm
	Enrolamentos	20
	Resistência interna	0,2 $\Omega$

Os valores obtidos a partir da simulação são mostrados nas Tabelas 5.2 e 5.3, para os dois conjuntos de bobinas ensaiadas.

Tabela 5.2 - Parâmetros do par de bobinas 1 medidos na simulação em Magnet.

Distância (mm)	L1 (H)	L2 (H)	M (H)	k
1	8.2994e-05	8.2994e-05	6.6854e-05	0.805528
5	8.3155e-05	8.3145e-05	5.1992e-05	0.62528
10	8.3611e-05	8.3611e-05	4.2169e-05	0.504348
20	8.5298e-05	8.5298e-05	3.1634e-05	0.370864
30	8.84e-05	8.84e-05	2.5892e-05	0.292896
40	9.3527e-05	9.3527e-05	2.2469e-05	0.240241
50	1.0271e-04	1.0271e-04	2.0512e-05	0.199708

Tabela 5.3 - Parâmetros do par de bobinas 2 medidos na simulação em Magnet.

Distância (mm)	L1 (H)	L2 (H)	M (H)	k
1	6.0474e-05	6.0474e-05	5.0616e-05	0.836988
5	6.0639e-05	6.0633e-05	4.0403e-05	0.66632
10	6.1064e-05	6.1064e-05	3.2166e-05	0.526759
20	6.2522e-05	6.2522e-05	2.2607e-05	0.361585
30	6.5313e-05	6.5309e-05	1.7357e-05	0.265759
40	7.0006e-05	7.0006e-05	1.4281e-05	0.203997
50	7.8408e-05	7.8409e-05	1.2545e-05	0.159995

A partir dos modelos dos pares de bobinas 1 e 2, simulou-se o comportamento de acoplamento magnético para várias distâncias. As características obtidas mostram-se na Figura 5.4, para a indutância mútua, e na Figura 5.5, para o fator de acoplamento.

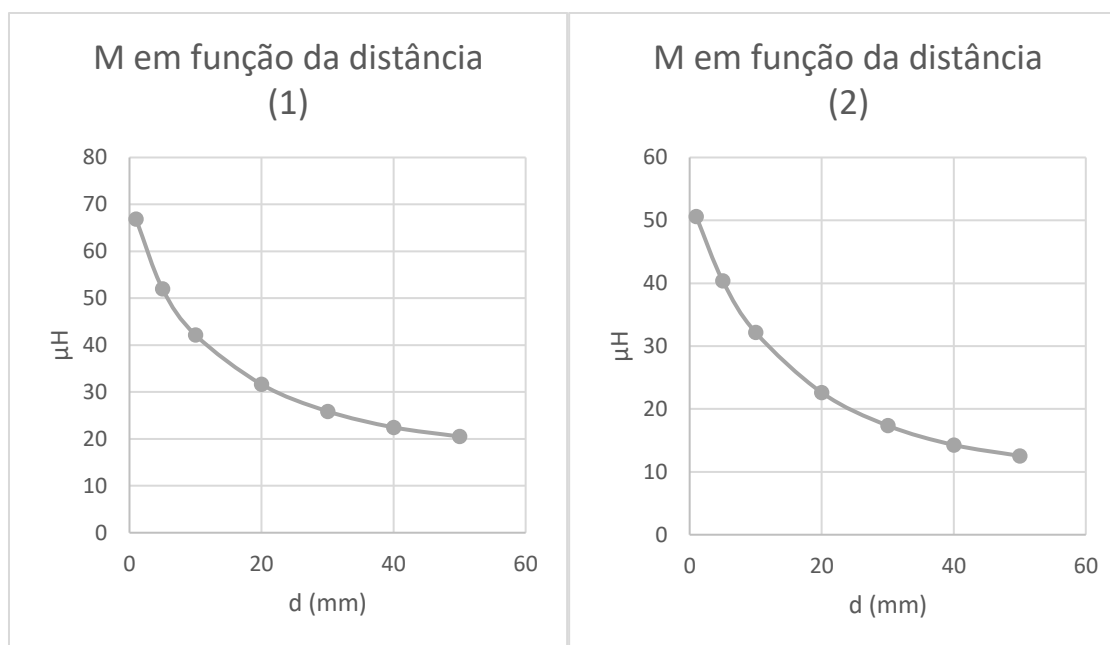


Figura 5.4 - Variação da indutância mútua em função da distância para o par de bobinas 1 (a) e para o par de bobinas 2 (b).

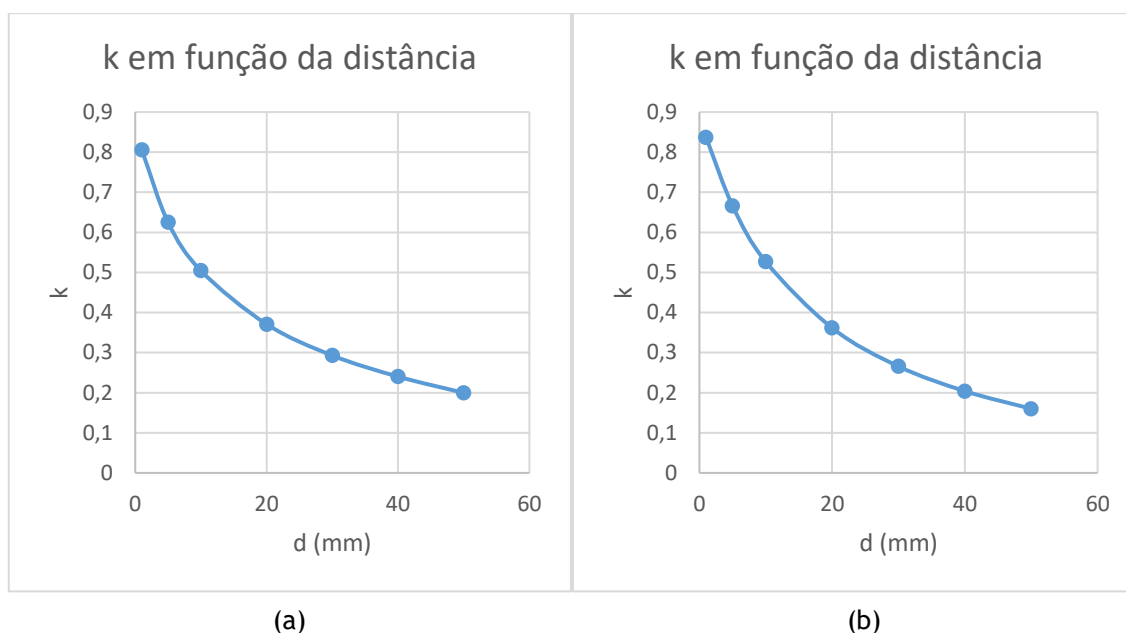
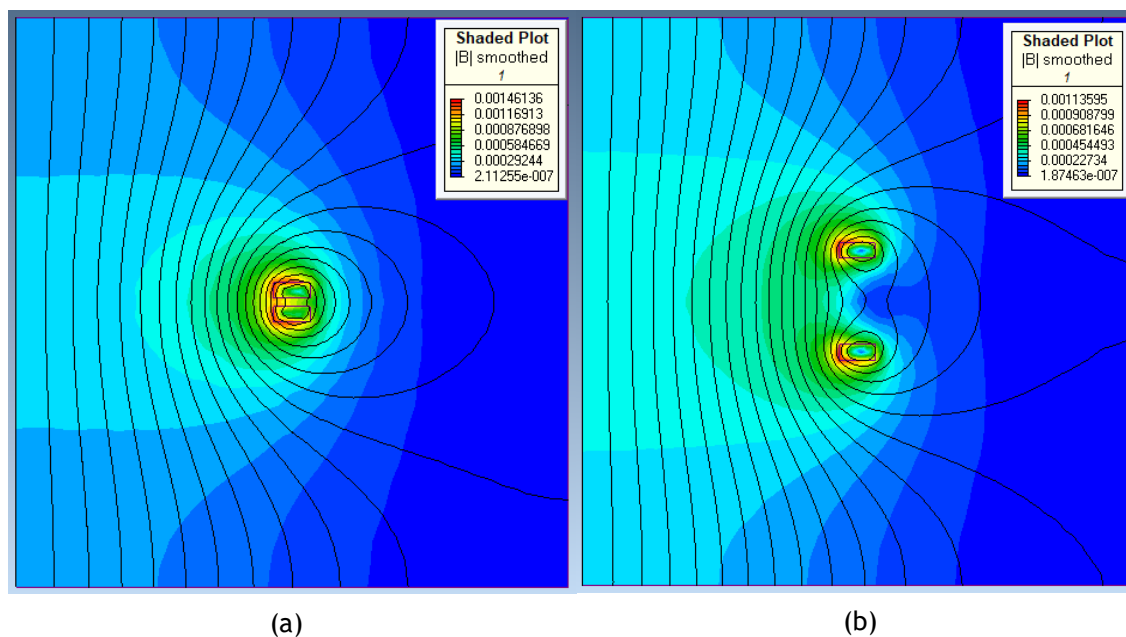


Figura 5.5 - Variação de k em função da distância para o par de bobinas 1 (a) e para o par de bobinas 2 (b).

Os mapas de cores dos modelos, onde se pode observar a densidade de fluxo magnético nas diferentes regiões, podem ser vistos na Figura 5.6 e na Figura 5.7, para os pares de bobinas 1 e 2, respectivamente. Nestas figuras, variou-se a distância entre a bobina emissora e recetora, tendo-se considerado os valores de 1, 10, 25 e 50 mm.



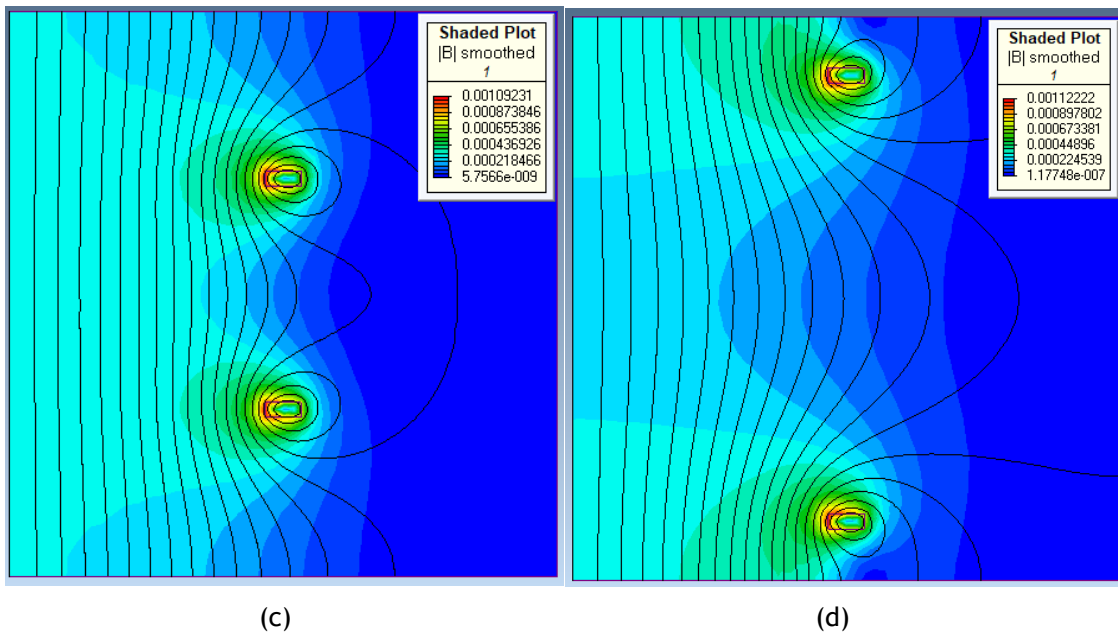
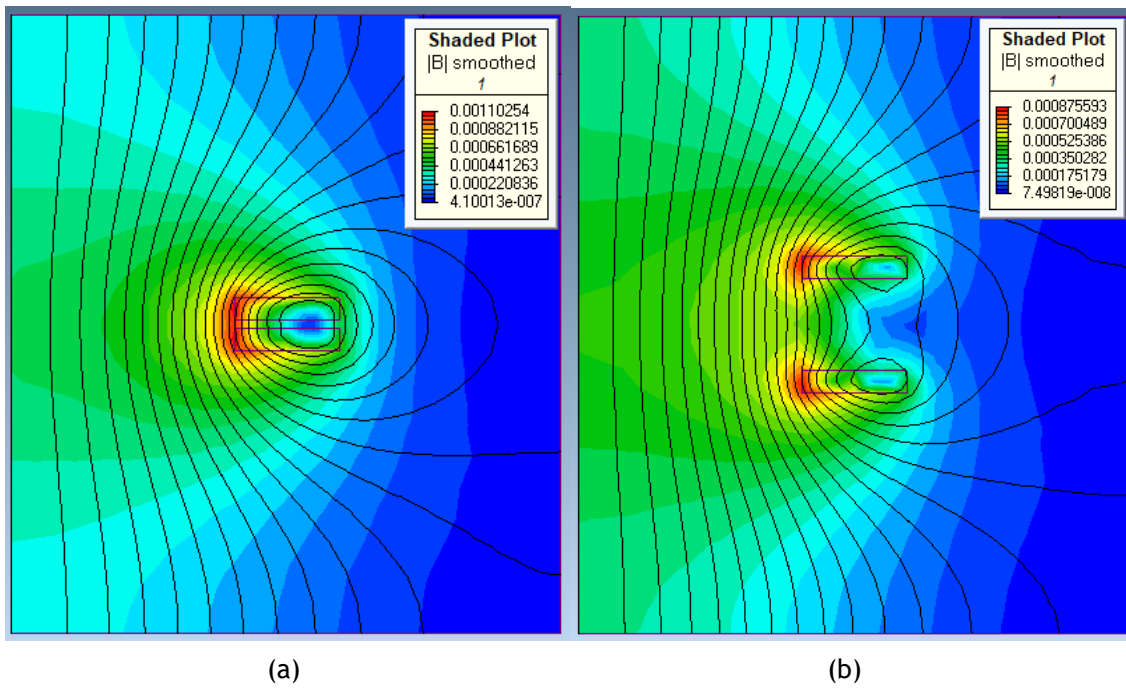


Figura 5.6 - Densidade de fluxo magnético para o par de bobinas 1, com distâncias entre elas de 1 mm (a), 10 mm (b), 25 mm (c) e 50 mm (d).



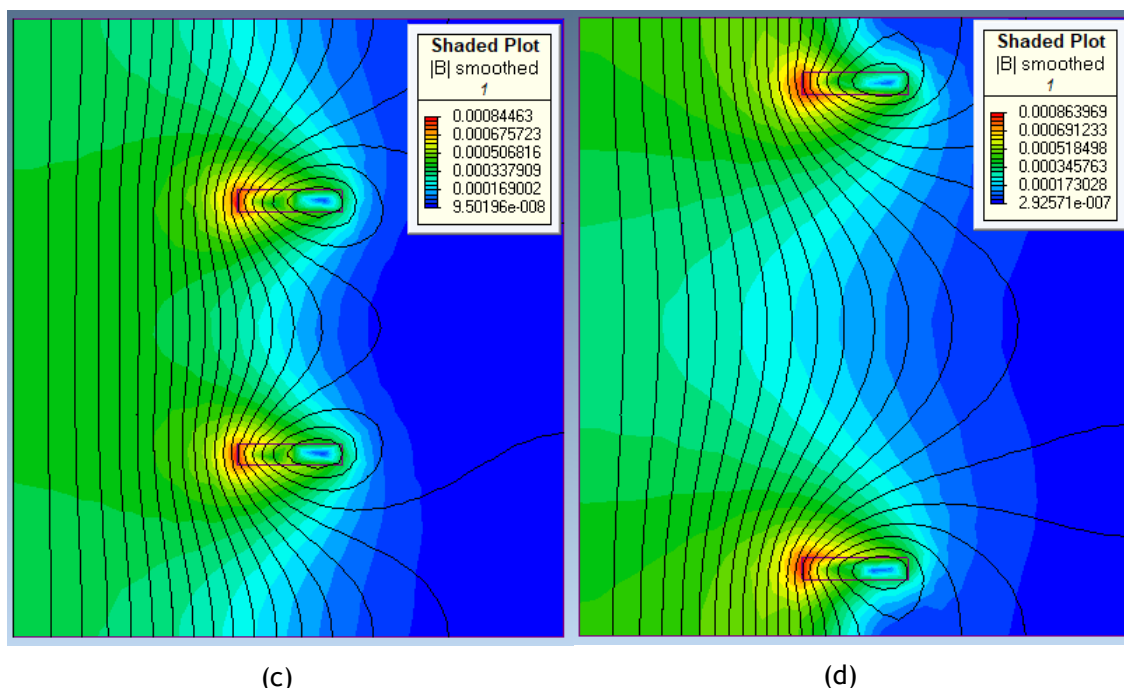


Figura 5.7 - Densidade de fluxo magnético para o par de bobinas 2, com distâncias entre elas de 1 mm (a), 10 mm (b), 25 mm (c) e 50 mm (d).

É possível observar que a densidade de fluxo magnético é significativamente maior no par de bobinas 2, seja qual for a distância.

Com o objetivo de analisar a variação da tensão à saída do sistema para diferentes valores da tensão de alimentação (25 V, 50 V, 75 V, 100 V, 125 V, 150 V, 175 V e 200 V), diferentes valores da frequência (25 Hz, 50 Hz, 75 Hz, 100 Hz, 125 Hz, 150 Hz, 175 Hz e 200 Hz), diferentes parâmetros do circuito (resistência de carga de 0.1  $\Omega$ , 0.2  $\Omega$ , 0.3  $\Omega$ , 0.4  $\Omega$ , 0.5  $\Omega$ , 0.6  $\Omega$ , 0.7  $\Omega$ , 0.8  $\Omega$ , 0.9  $\Omega$ , 1  $\Omega$ , 2  $\Omega$  e 5  $\Omega$ ), bem como para diferentes valores de distância entre as bobinas (1 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm e 50 mm), construiu-se o modelo do circuito em Simulink, utilizando o modelo matemático descrito através das equações do circuito. O modelo em Simulink mostra-se na Figura 5.8.

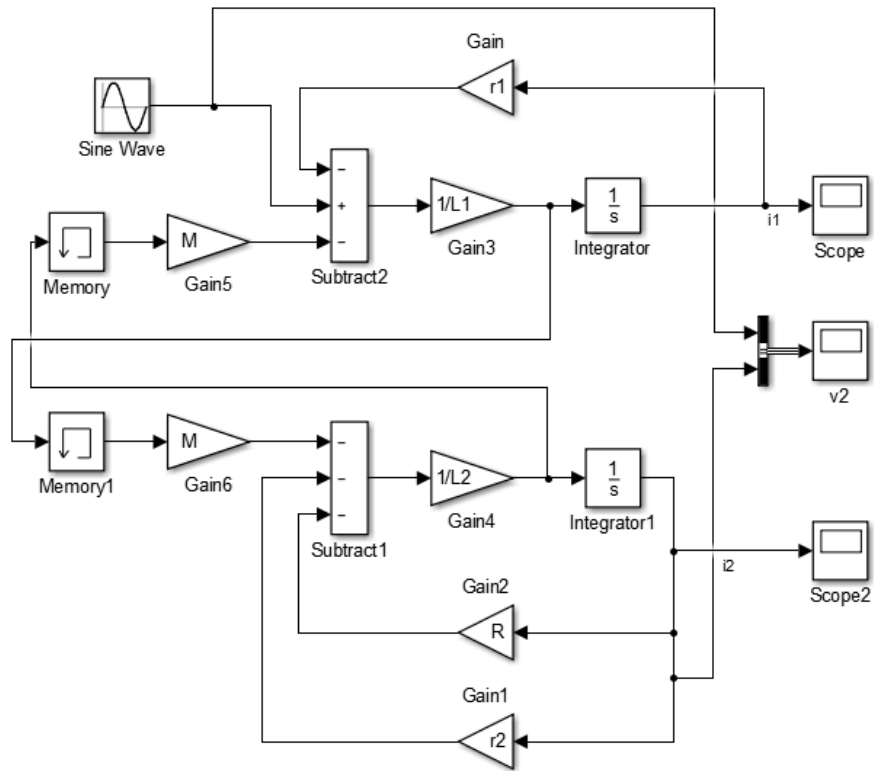
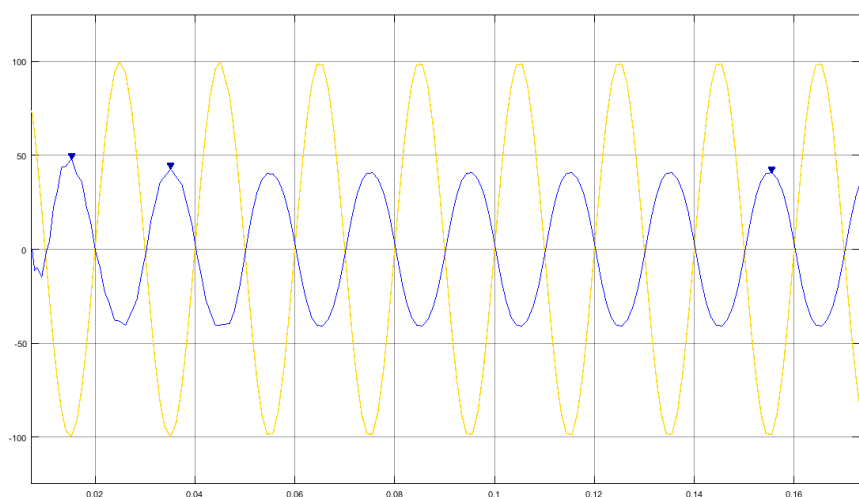
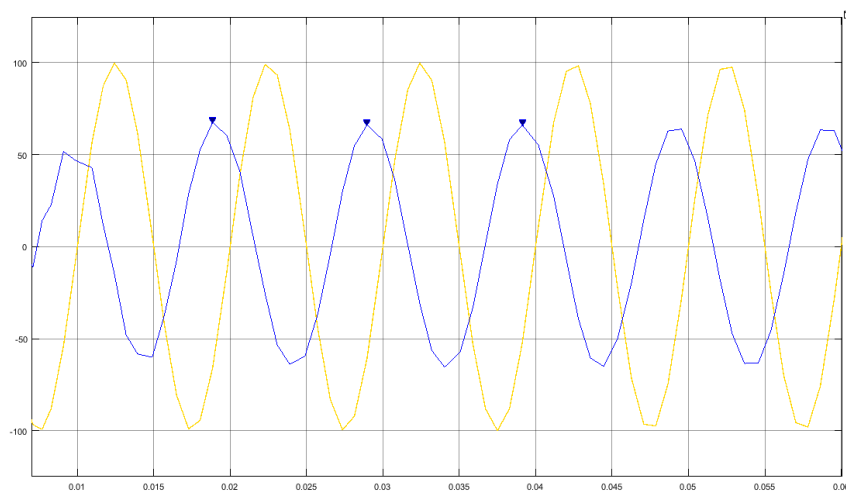


Figura 5.8 - Modelo do circuito em Simulink.

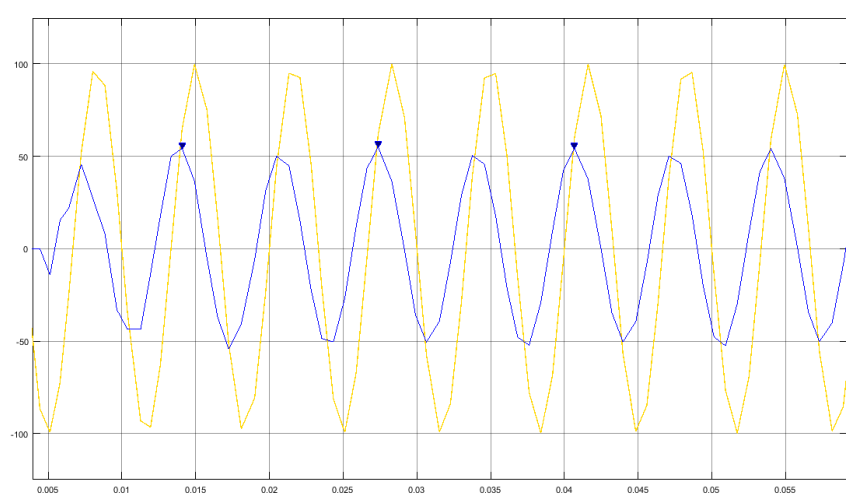
A Figura 5.9 representa três exemplos da variação da tensão de saída com diferentes valores de frequência- 50 Hz, 100 Hz e 150 Hz. Pode constatar-se que a melhor tensão de saída está relacionada com a frequência de 100 Hz.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9 - Tensão de saída  $v_2$  (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores de frequência: (a) 50 Hz, (b) 100 Hz, (c) 150 Hz.

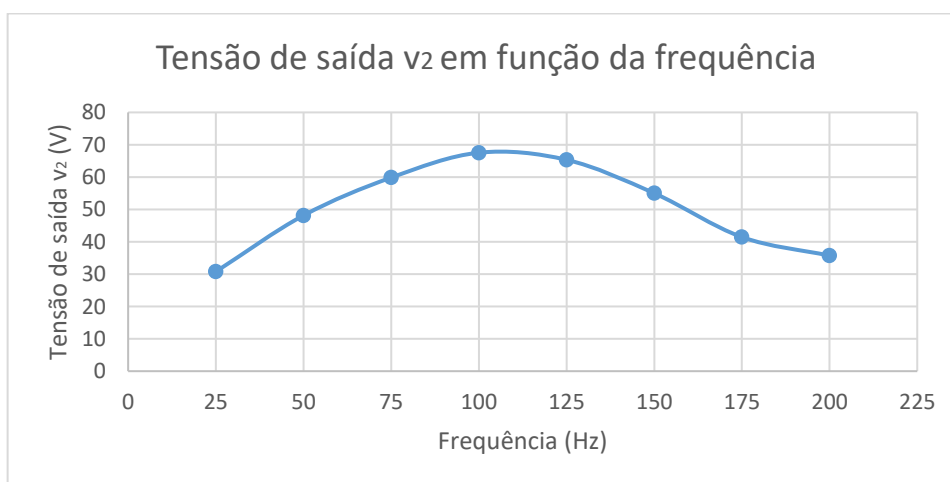
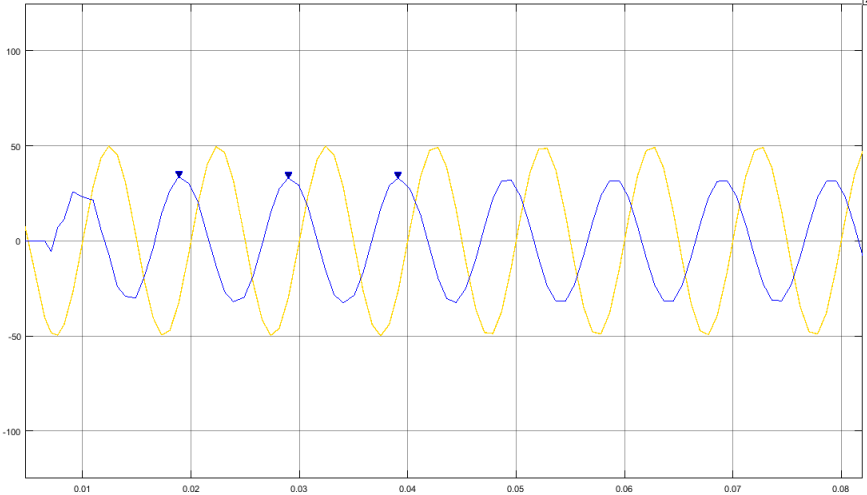
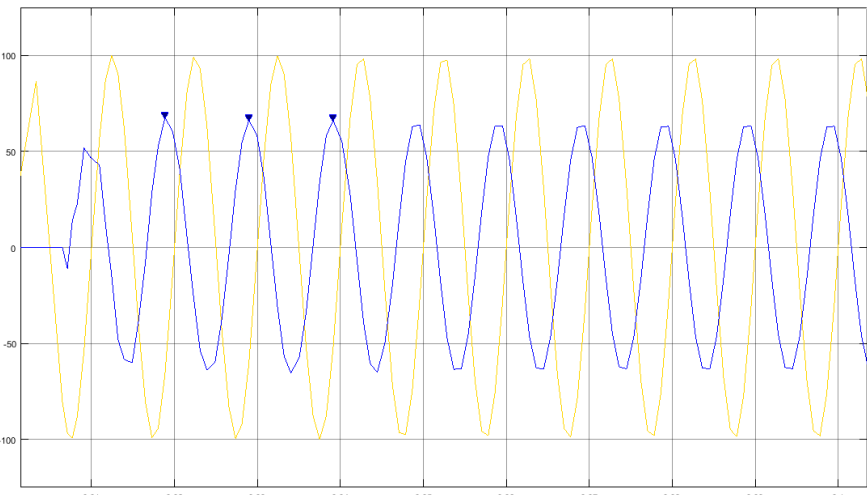


Figura 5.10 - Variação da tensão de saída  $v_2$  em função da frequência.

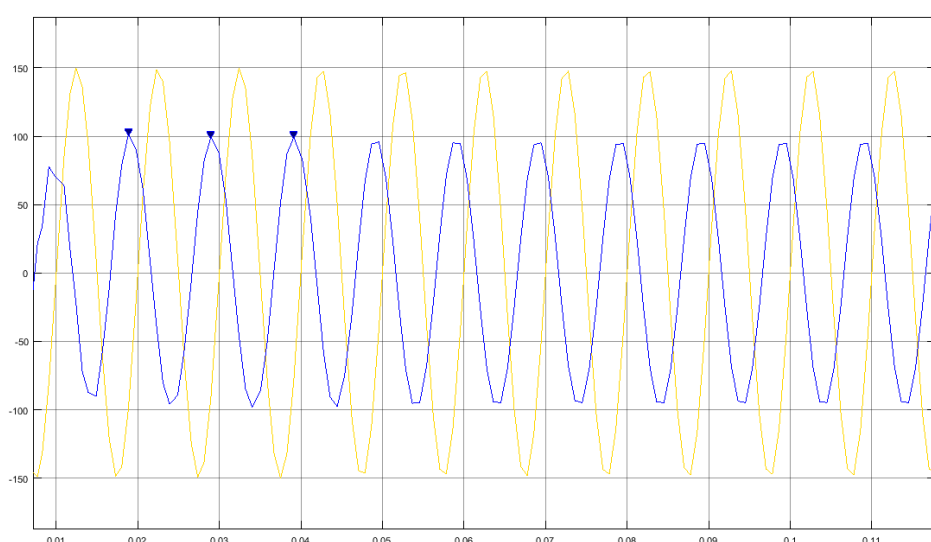
Na Figura 5.11 variou-se a amplitude. Para estas simulações foram usados os valores de amplitude 50 V, 100 V e 150 V. Foi possível verificar que quanto maior a amplitude maior a tensão de saída.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.11 - Tensão de saída  $v_2$  (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores da amplitude: (a) 50 V, (b) 100 V, (c) 150 V.

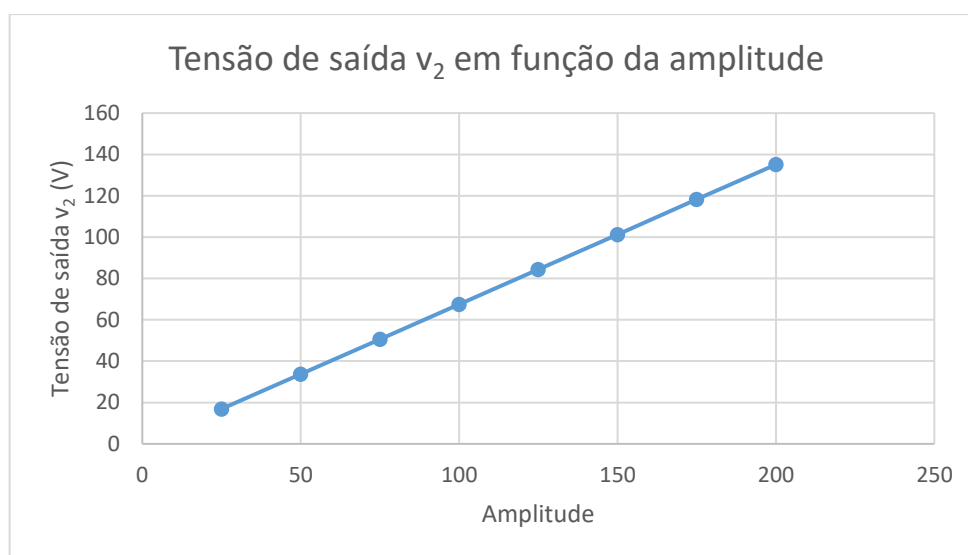
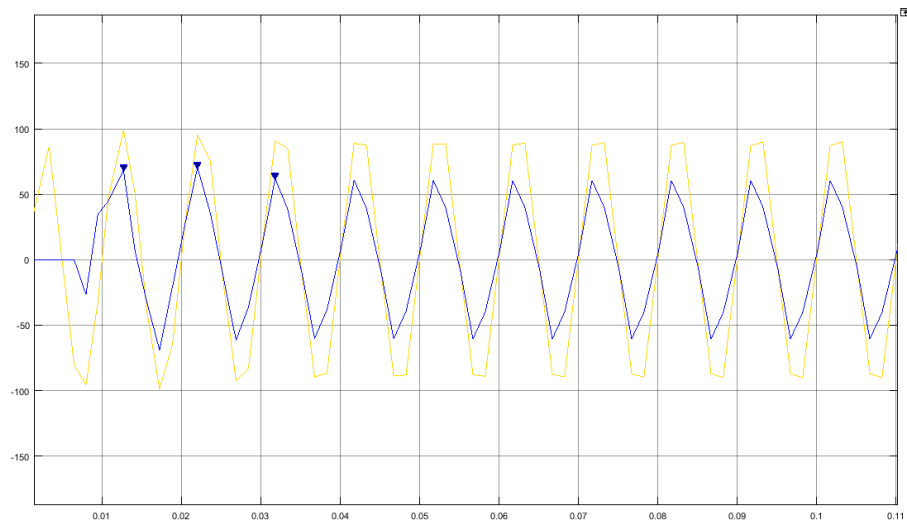
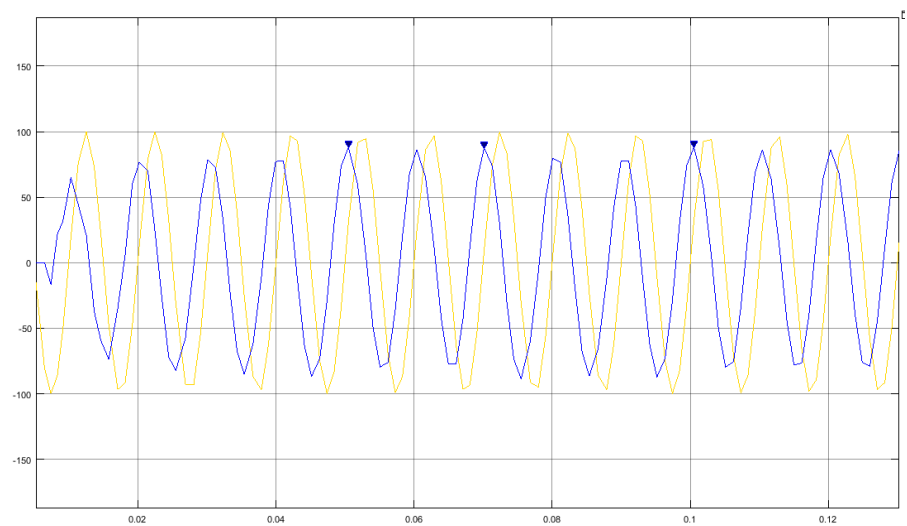


Figura 5.12 - Variação da tensão de saída  $v_2$  em função da amplitude da tensão de entrada.

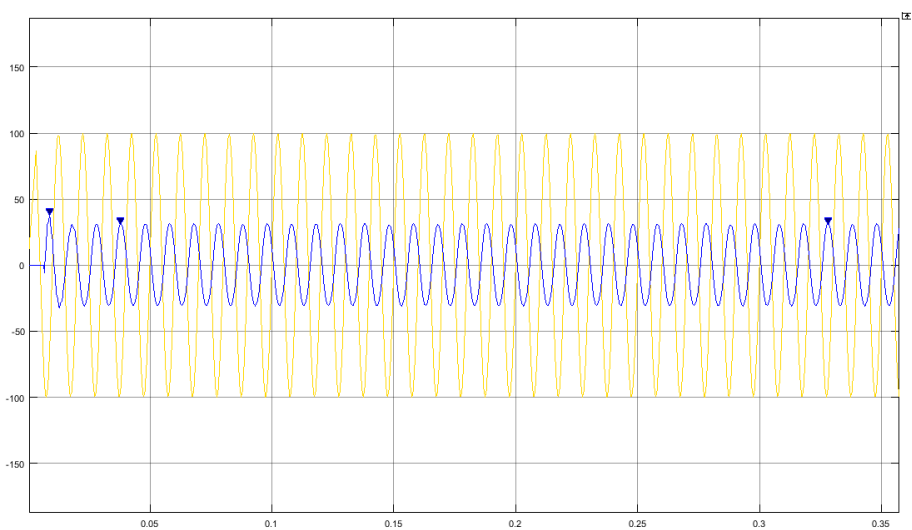
Nos três exemplos seguintes, 5.13, o parâmetro que se variou foi a resistência  $R$ . Para estas imagens foram usados os valores de  $0.2 \Omega$ ,  $0.6 \Omega$  e  $2 \Omega$ . Foi verificado que o valor de  $R$  para o qual a tensão de saída  $v_2$  teve melhor resultado foi  $0.6 \Omega$ .



(a)



(b)



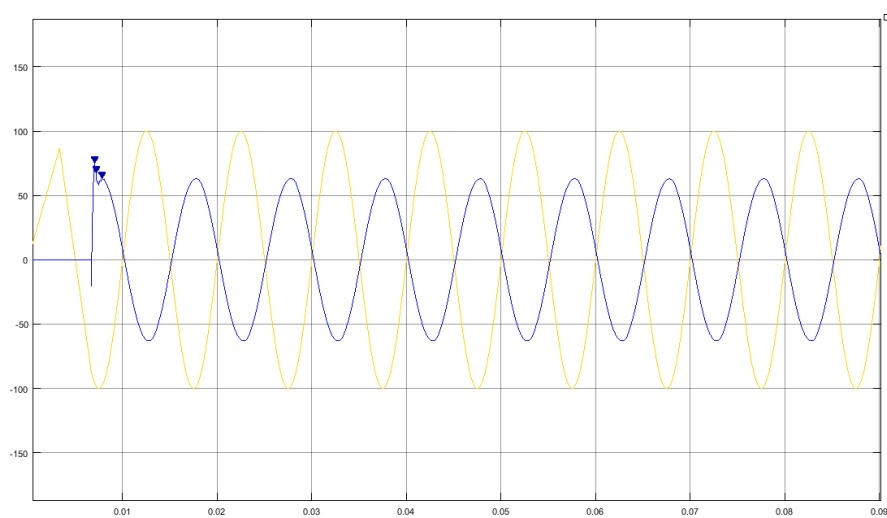
(c)

Figura 5.13 - Tensão de saída  $v_2$  (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores da resistência R: (a)  $0.2 \Omega$ , (b)  $0.6 \Omega$ , (c)  $2 \Omega$ .

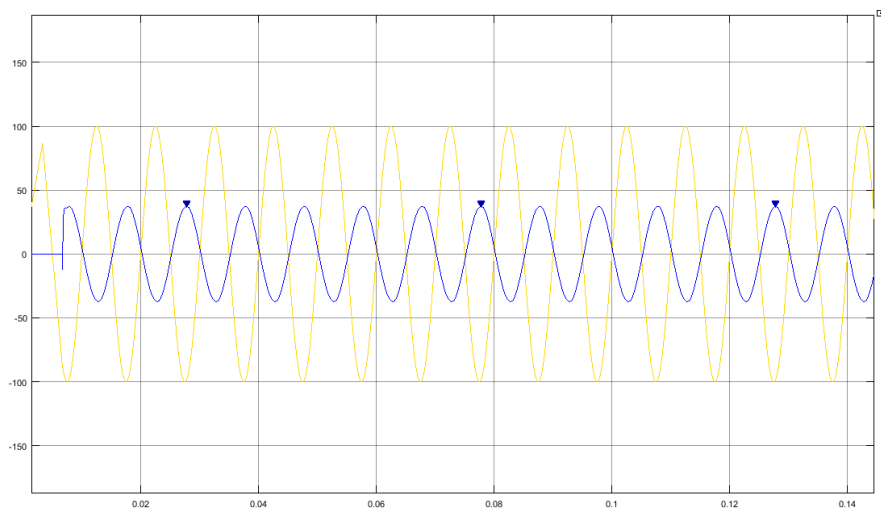


Figura 5.14 - Variação da tensão de saída  $v_2$  em função da resistência R.

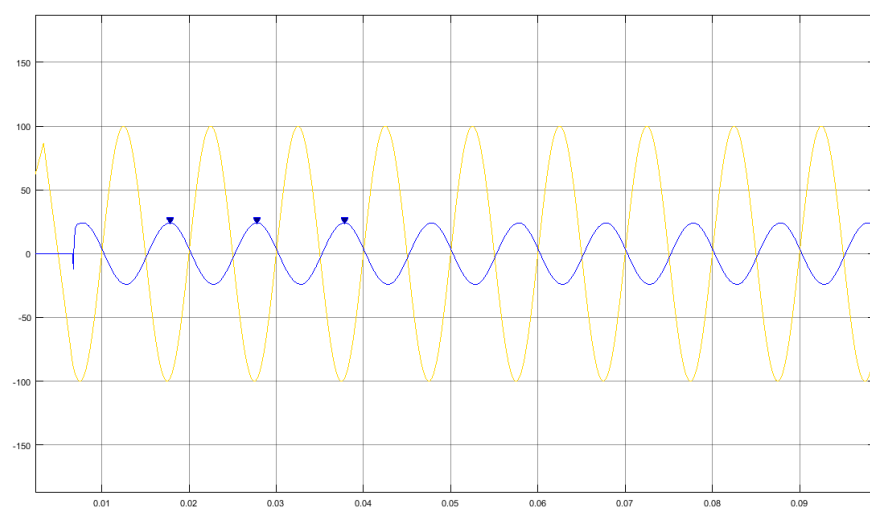
Nas figuras 5.15 e 5.17 conclui-se que para as diferentes distâncias de 5 mm, 20 mm e 40 mm e para ambos os pares de bobinas 1 e 2, a tensão de saída diminui quanto maior é a distância, como seria de esperar.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.15 - Tensão de saída  $v_2$  (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores da distância para o par de bobinas 1: (a) 5 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm.

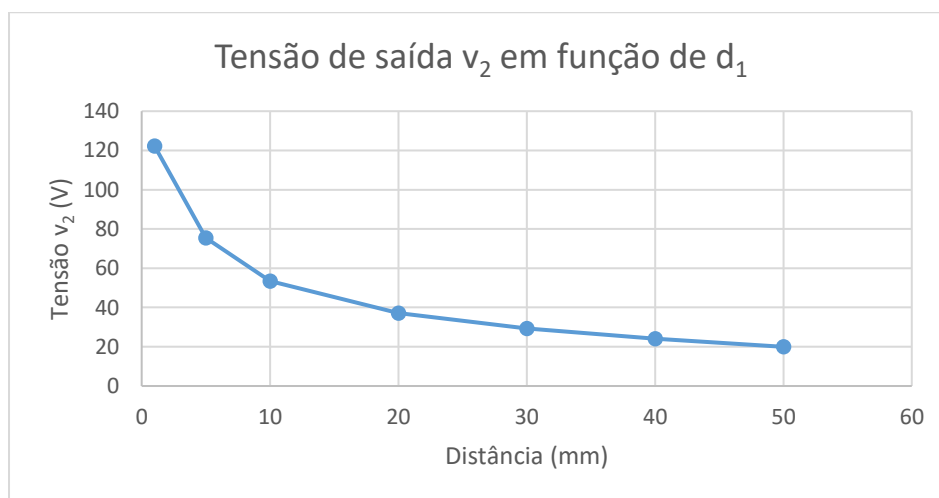
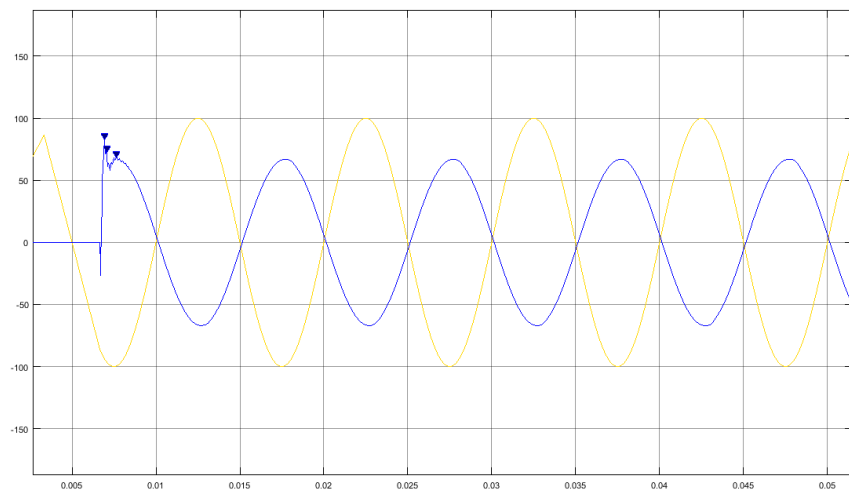
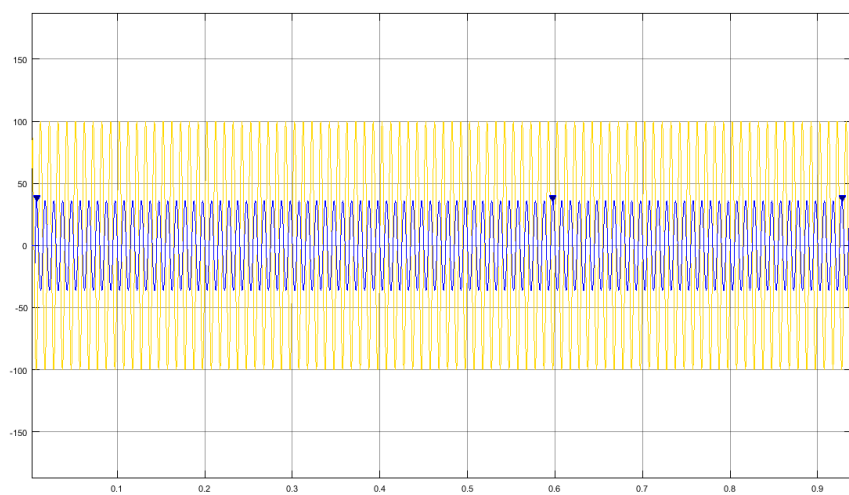


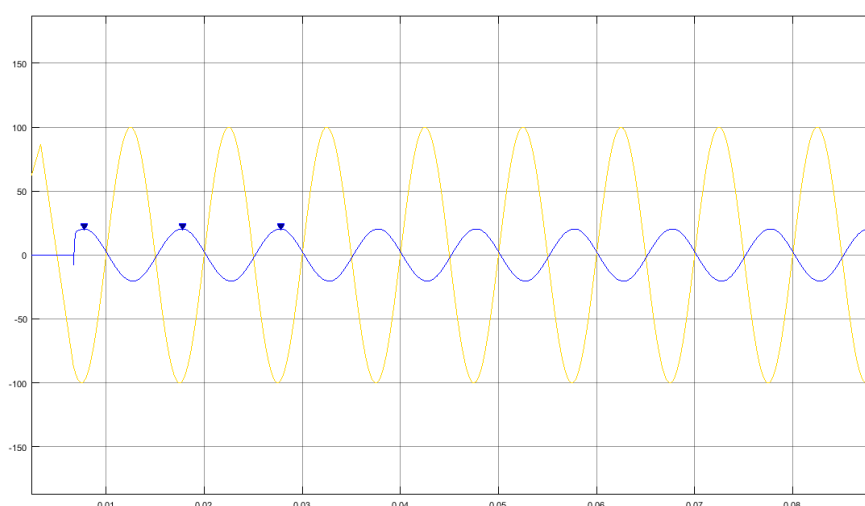
Figura 5.16 - Variação da tensão de saída  $v_2$  em função da distância para o par de bobinas 1.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.17 - Tensão de saída  $v_2$  (azul) e tensão de entrada (amarelo) variando os valores da distância para o par de bobinas 2: (a) 5 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm.

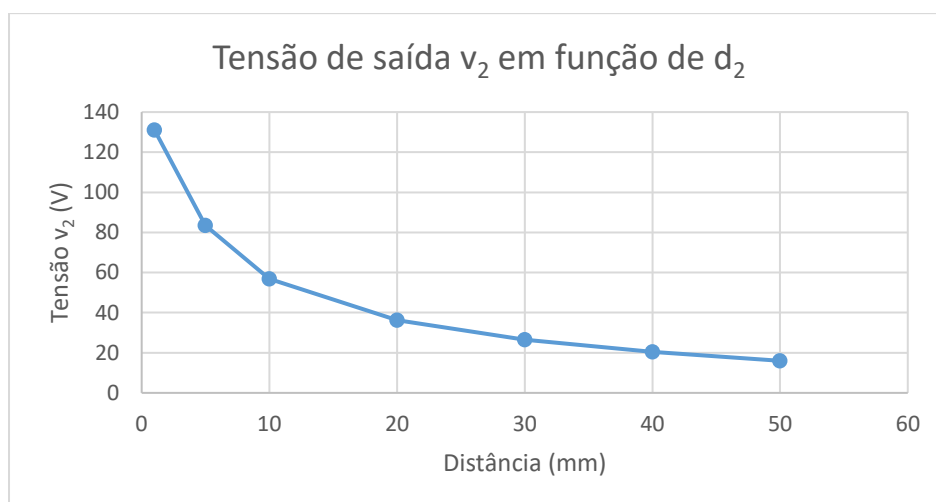


Figura 5.18 - Variação da tensão de saída  $v_2$  em função da distância para o par de bobinas 2.

Através destas simulações é possível concluir que quando se varia a distância, o par de bobinas 1 tem uma tensão de saída menor que o par de bobinas 2, no início. Aumentando-se a distância até 50 mm, é verificado no fim que o par de bobinas 1 tem uma tensão de saída ligeiramente maior que o par de bobinas 2. O valor ideal de  $R$  é  $0,6 \Omega$  e o melhor valor para a frequência é de 100 Hz.

## 5.2. Análise experimental

A Figura 5.19 apresenta o circuito elétrico de potência e de comando desenvolvido, podendo ser dividido em quatro blocos:

- I. Unidade de processamento e controlo;
- II. Sistema de comando do circuito de potência (*drive*);
- III. Conversor DC/AC;
- IV. Sistema de acoplamento.

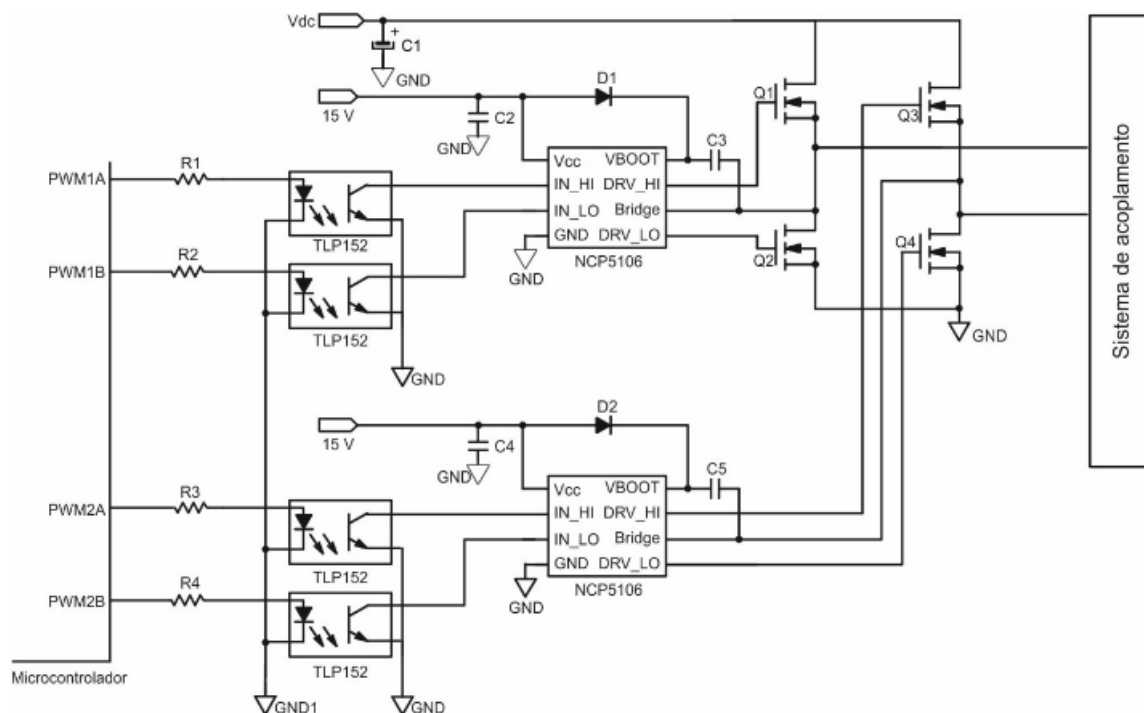


Figura 5.19 - Sistema comando do circuito de potência desenvolvido.

A unidade de processamento e controlo utilizada foi o microcontrolador TMS320F28027. É um microcontrolador de 32 bits de ponto fixo, empregue em tarefas matemáticas com alguma complexidade, capaz de realizar processamento paralelo. Possui uma frequência de *clock* de 60 MHz, com uma memória RAM de 12kb, memória ROM de 2kb e uma memória *flash* de 64kb. Dispõe ainda de 6 canais PWM e 8 canais de ADC com 12 bits de resolução e com um tempo mínimo de conversão de cerca de 333 ns. Possui ainda comutação I2C, CAN e SPI.

O sistema de comando do circuito de potência (*drive*) é composto por acopladores óticos TLP152 para garantir o isolamento da unidade de processamento e controlo. Além disso, é composto por *drives (high and low side)* para ativação dos MOSFET, em concreto, foi utilizado o componente NCP5106 da On semiconductor.

O conversor DC/AC é uma topologia clássica em ponte completa. A técnica de modulação utilizada no conversor foi a modulação bipolar. Esta técnica consiste na comparação entre uma forma de onda sinusoidal (onda moduladora) com uma forma de onda triangular (onda portadora), conforma se ilustra na Figura 5.20. A tensão aplicada ao filtro, saída do conversor em ponte completa, pode assumir dois níveis de tensão, concretamente: +Vdc e -Vdc, em que a frequência de comutação dos MOSFET (Q1-Q4) é imposta pela frequência da portadora (forma de onda triangular).

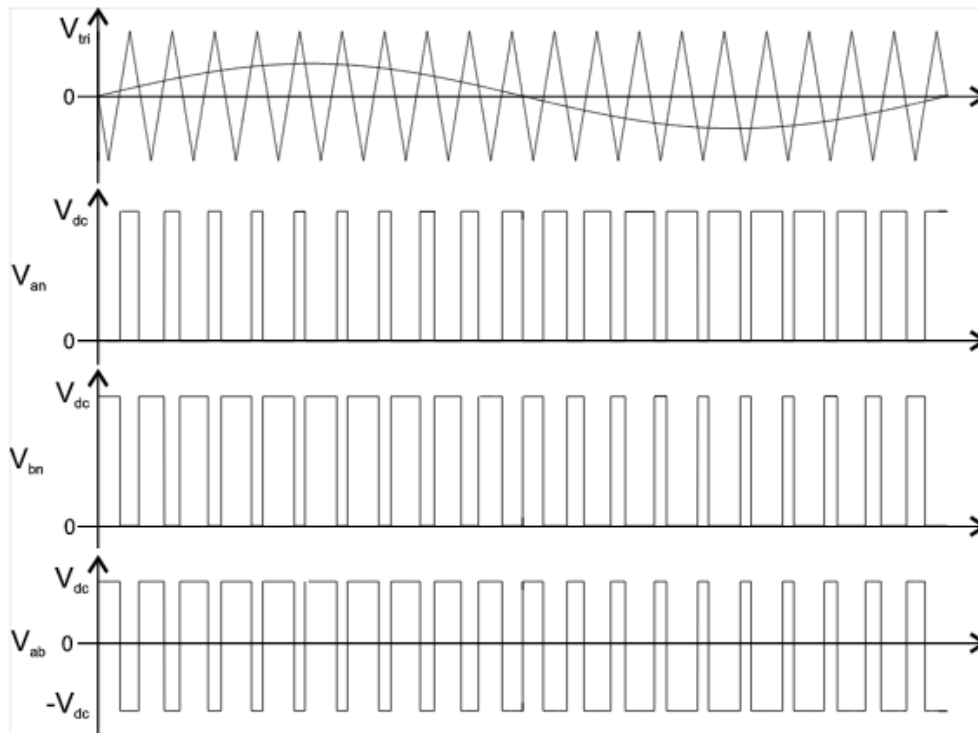


Figura 5.20 - Modulação SPWM Bipolar.

O sistema de acoplamento indutivo pode ser realizado com ou sem compensação. Há varias configurações para o sistema de TEI, dependendo da aplicação que se pretende.

Supondo que no lado secundário do sistema, se tem o circuito da Figura 5.21, em que  $L_s$  representa a indutância do enrolamento secundário,  $R_s$  a resistência do enrolamento secundário e  $R_{carga}$  corresponde à resistência equivalente da carga [40]:

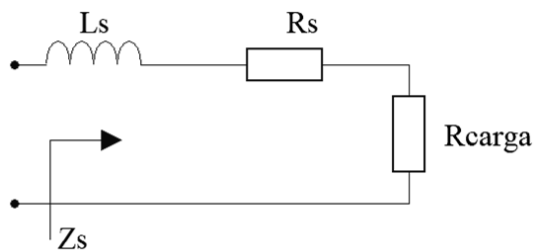


Figura 5.21 - Circuito equivalente no lado secundário do sistema.

A impedância  $Z_s$  é calculada através da equação:

$$Z_s = j\omega L_s + R_s + R_{carga} \quad (5.5)$$

Para se obter o efeito da carga do secundário no primário, é necessário calcular a impedância equivalente refletida  $Z_r$ , que depende da indutância mútua  $M$  e da frequência de operação  $\omega$ , sendo dada por [40]:

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (5.6)$$

A potência transferida obtém-se multiplicando  $Z_r$  pelo quadrado da corrente do primário  $I_p$  [40]:

$$P_{out} = R_e\{Z_p\}I_p^2 \quad (5.7)$$

Na teoria, não existe limite na capacidade de transferência de energia do primário para o secundário se o sistema funcionar à frequência de ressonância do secundário, que é determinada pela equação 4.1 já mostrada anteriormente.

A impedância vista pela fonte permite-nos obter informações sobre o comportamento de operação do circuito, bem como do modo de comutação do inversor e a amplitude da corrente primária de entrada. Também o fator de potência pode ser retirado da fase desta impedância [39].

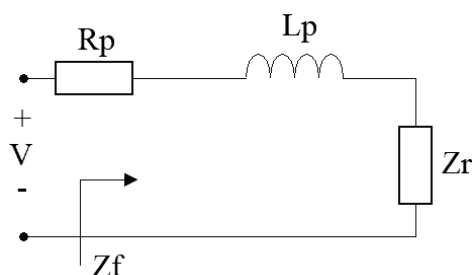


Figura 5.22 - Impedância vista pela fonte.

A impedância aos terminais da fonte de tensão  $Z_f$  perante o sistema - Figura 5.22, depende da impedância  $Z_r$ , da resistência  $R_p$  e da indutância do enrolamento primário  $L_p$ . Vêm então as seguintes equações [40]:

$$Z_f = R_p + j\omega L_p + Z_r \quad (5.8)$$

$$Z_f = R_p + j\omega L_p + \frac{(\omega M)^2}{Z_s} \quad (5.9)$$

$$Z_f = R_p + j\omega L_p + \frac{(\omega M)^2}{j\omega L_s + R_s + R_{carga}} \quad (5.10)$$

Através destas equações pode dizer-se que a impedância equivalente de todo o sistema tem características de uma carga indutiva. Contudo, quanto mais indutivo é  $Z_f$ , menor é a capacidade de transferência de energia do sistema. Isto é causado pelo baixo fator de potência [40].

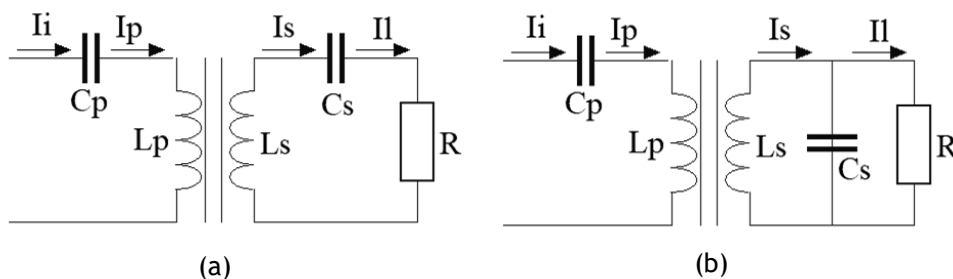
O fator de potência é útil para determinar o tamanho das taxas VA, de modo a que se o fator de potência estiver próximo de 1, o custo do inversor será baixo enquanto que o consumo de energia se mantém o mesmo. Mas se o fator de potência for muito inferior a 1, isto significa que é necessária uma corrente maior, embora o inversor absorva a mesma potência, e, portanto, o tamanho do inversor necessário será maior e conseqüentemente terá um custo maior [39].

As topologias de compensação melhoram a capacidade de transferência de energia, tal como já foi referido anteriormente no Capítulo 4. Colocando um condensador no lado primário e outro no lado secundário, obtém-se um aumento de energia transferida.

Com a aplicação deste método também o fator de potência vai ser compensado a um certo ponto em que  $Z_f$  se torne puramente resistivo, garantindo uma maior transferência de energia. Contudo, esta condição verifica-se apenas para uma determinada frequência de ressonância  $\omega_r$  [40].

Os dois condensadores usados nas topologias de compensação têm funções distintas. Ou seja, no lado primário o condensador tem como objetivo a redução do consumo de energia reativa por parte do sistema de forma a conduzir o fator de potência a 1. Enquanto que o condensador do lado secundário se destina a melhorar a transferência de potência para a carga. Tudo isto é fundamental, na medida em que esta compensação de toda a indutância refletida do circuito fora o ZPA [40].

Tal como foi explicado anteriormente, existem quatro tipos de principais topologias de compensação: SS, SP, PS e PP.



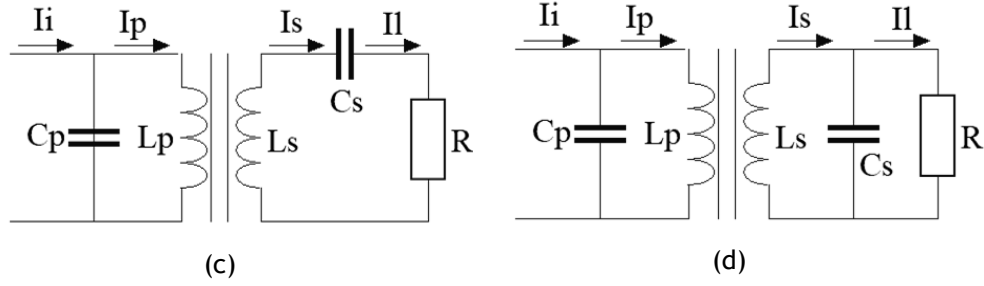


Figura 5.23 - Topologias de compensação a) SS, b) SP, c) PS e d) PP.

Ao introduzirem-se os condensadores, as equações de  $Z_s$  e  $Z_{fonte}$  terão que ser reescritas de forma diferente conforme a topologia usada. Assim, para as topologias S e P no secundário vem:

$$Z_s = j\omega L_s + R_s + R_{carga} + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (5.11)$$

$$Z_s = j\omega L_s + R_s + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R_{carga}}} \quad (5.12)$$

E para as topologias S ou P no primário:

$$Z_f = j\omega L_p + R_p + Z_r + \frac{1}{j\omega C_p} \quad (5.13)$$

$$Z_f = \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + R_p + Z_r}} \quad (5.14)$$

Para se obterem os valores dos condensadores, é necessário obedecer à teoria da ressonância, ou seja, é necessário que a parte imaginária seja nula. Na compensação do secundário, o valor obtido para o condensador  $C_s$  vai ser igual na topologia série e na topologia paralela, e é dado por [40]:

$$j\omega L_s - \frac{1}{j\omega C_s} = 0 \quad (5.15)$$

$$C_s = \frac{1}{\omega^2 L_s} \quad (5.16)$$

Na Tabela 5.4 estão presentes as diferentes formas de calcular o  $C_p$  para cada topologia de compensação.

Tabela 5.4 - Expressões para calcular os valores dos condensadores para as diferentes topologias (Adaptado de [40]).

Topologia	$C_p$
SS	$C_p = \frac{1}{\omega^2 L_p}$
SP	$C_p = \frac{1}{\omega^2 \left( L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)}$
PS	$C_p = \frac{L_p}{\left( \frac{\omega^2 M^2}{R} \right)^2 + \omega^2 L_p^2}$
PP	$C_p = \frac{L_p - \frac{M^2}{L_s}}{\left( \frac{M^2 (R_s + R_{carga})}{L_s^2} \right)^2 + \omega^2 \left( L_p - \frac{M^2}{L_s} \right)^2}$

O fator de potência é usado para calcular a frequência de ressonância global para cada fator de acoplamento  $k$ . Depois disso, esses valores de frequências ressonantes são aplicados às equações de todos os parâmetros e depois os seus valores são traçados para estabelecer uma comparação. Isto irá levar a que se tome uma decisão sobre qual a topologia a usar para determinados constrangimentos exigidos pela aplicação do designer [39].

Na Figura 5.24 pode ver-se o circuito montado na prática, com os seus componentes devidamente legendados.

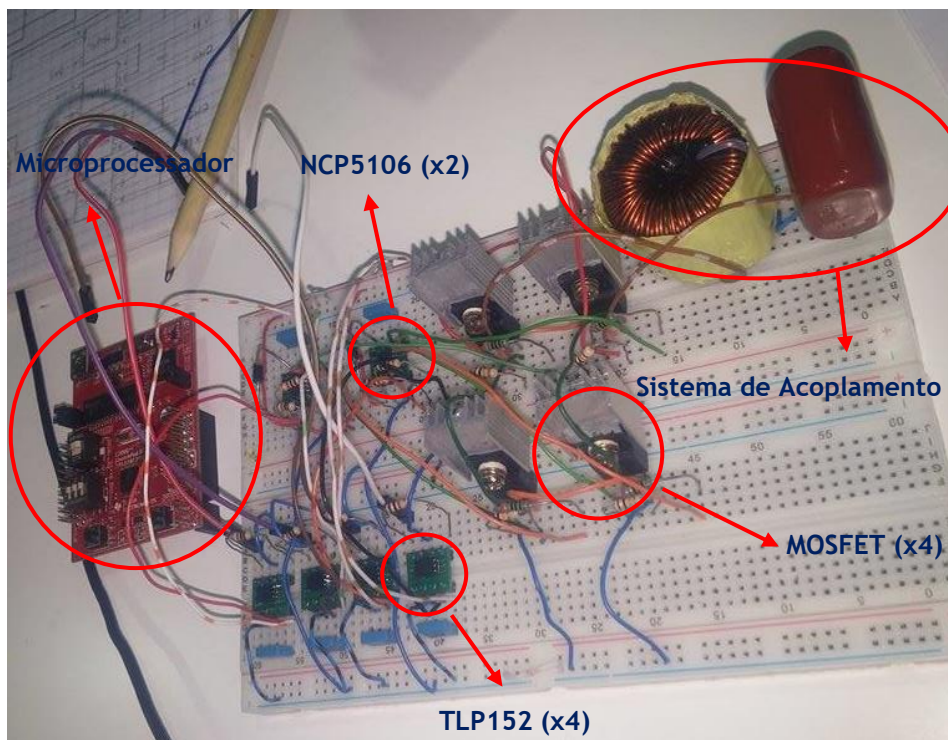
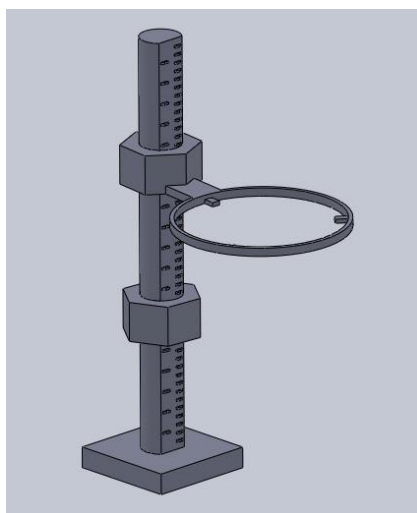
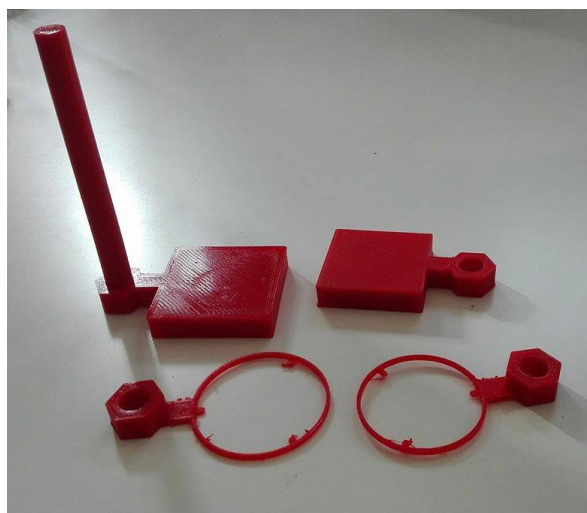


Figura 5.24 - Circuito final devidamente legendado.

Foi pensado um sistema que tornasse possível variar gradualmente e com precisão a distância das bobinas. Este foi então desenhado com o auxílio do software SolidWorks e depois feito numa impressora 3D. Depois de impresso o primeiro modelo Figura 5.25 (a), e de o experimentar com as bobinas disponíveis, constatou-se que poderia ser melhorado. Foram então feitas algumas alterações e foi impresso o objeto da Figura 5.25 (b), com dois tamanhos diferentes para cada par de bobinas, com o objetivo de se colar a bobina transmissora na base, variando a bobina recetora no aro que encaixa em cima e roda de forma a poder-se então ajustar a distância pretendida.



(a)



(b)

Figura 5.25 - Protótipo desenhado em Solidworks (a) e impresso em ABS numa impressora 3D (b) para variar a distância entre bobinas.



## 6. Conclusões

Após uma revisão de vários tópicos relacionados com os veículos elétricos, entre os quais baterias e carregadores disponíveis hoje em dia, é possível concluir-se que estes veículos estão bem encaminhados no que diz respeito à sua evolução. As baterias são cada vez mais eficientes, e os carregadores disponíveis apresentam tempos de carregamento cada vez menores. A investigação em torno do carregamento sem fios está já bastante desenvolvida, tendo sido apresentados alguns protótipos razoavelmente eficientes. O facto de haver já automóveis autónomos cria também alguma pressão para que os sistemas de carregamento sem fios sejam postos no mercado, contando que sejam eficientes e confiáveis.

No que diz respeito à simulação teórica foi possível notar que quando se variava a distância entre bobinas, o par 1 tinha uma tensão de saída menor que o par 2, inicialmente. Aumentando-se a distância até 50mm, foi verificado que o par de bobinas 1 tinha depois uma tensão de saída ligeiramente maior que o par de bobinas 2. Quanto à variação dos parâmetros, foi concluído que os melhores resultados na tensão de saída foram obtidos com uma frequência de 100 Hz, uma resistência  $R$  (representativa da bateria) de  $0.6 \Omega$  e uma amplitude o maior possível. Através da simulação das densidades de fluxo magnético foi também possível concluir que esta era significativamente maior para o par de bobinas 2.

Foi proposto um novo sistema para a transferência de energia e na análise experimental foi concluído o circuito inversor deste sistema. Foi também estudado o sistema de acoplamento, tendo em conta o sistema simples ou com o auxílio das topologias de compensação, concluindo-se que é imprescindível o uso destas topologias para se obter uma boa eficiência na transferência de energia. Este sistema necessita ainda de muito desenvolvimento, ficando esse desenvolvimento para trabalhos futuros. Entre eles a conceção do circuito retificador, o uso de ferrites e alumínio nas bobinas utilizadas, simulações com diferentes topologias de compensação, etc.



# Bibliografia

- [1] 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.
- [2] J. Martins and F. Brito, *Carros Elétricos*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, Lda, 2011.
- [3] B. Leite, "Sistema de gestão de carregamento de veículos eléctricos," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [4] J. Martínez-Lao, F. G. Montoya, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, "Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. November, pp. 970-983, 2017.
- [5] P. Liu and J. Yu, "Charging behavior characteristic simulation of plug-in electric vehicles for demand response," *2016 UKACC Int. Conf. Control. UKACC Control 2016*, 2016.
- [6] M. Yilmaz and P. Krein, "Review of Charging Power Levels and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles and Commentary on Unidirectional Charging," *Ieee*, vol. 28, no. 5, pp. 2151-2169, 2012.
- [7] H. Berg, "Battery technologies for electric vehicles," in *Batteries for Electric Vehicles*, Cambridge: Cambridge University Press, 2017, pp. 47-80.
- [8] N. Miguel and C. Pereira, "Simulação de Regimes de Carga e Descarga em Baterias," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2016.
- [9] H. M. G. Barbosa, "Desenvolvimento de um Sistema de Carregamento Externo de Baterias de Veículos Elétricos com Interface a Fontes de Energia Renovável," Universidade do Minho, 2013.
- [10] "Weblet Importer." [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/archive/advancements\\_in\\_lead\\_acid](http://batteryuniversity.com/learn/archive/advancements_in_lead_acid). [Accessed: 22-Aug-2017].
- [11] R. Velho, M. Beirão, M. 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, p. 605, 2017.
- [12] R. Velho, "Carregamento e Balanceamento Inteligente de Veículos Elétricos," Universidade da Beira Interior, 2017.

- [13] 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.
- [14] F. Un-noor, S. Padmanaban, L. Mihet-popa, and M. Nurunnabi, "A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle ( EV ) Components , Technologies , Challenges , Impacts , and Future Direction of Development," no. May, 2017.
- [15] N. Sujitha and S. Krithiga, "RES based EV battery charging system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. July, pp. 978-988, 2017.
- [16] Schneider Electric, "EVlink Electric vehicle charging solutions," *schneider-electric.com*, p. 68, 2017.
- [17] E. A. Grunditz and T. Thiringer, "Performance Analysis of Current BEVs Based on a Comprehensive Review of Specifications," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 2, no. 3, pp. 270-289, 2016.
- [18] "MOBI.E." [Online]. Available: <https://www.mobie.pt/how-electric-mobility>. [Accessed: 09-Aug-2017].
- [19] "Electric Car Charging 101 – Types of Charging, Charging Networks, Apps, & More! –." [Online]. Available: <https://evobsession.com/electric-car-charging-101-types-of-charging-apps-more/>. [Accessed: 02-Aug-2017].
- [20] "Posto de Carregamento para Carro Elétrico." [Online]. Available: <http://www.lugenergy.pt/wallbox-carregamento-carro-eletrico/>. [Accessed: 02-Aug-2017].
- [21] "Efacec Electric Mobility | EV Homecharger." [Online]. Available: <http://electricmobility.efacec.com/ev-homecharger/>. [Accessed: 25-Mar-2017].
- [22] "Section 3 Electric Vehicle Charging Stations," 2016. [Online]. Available: [https://www.geindustrial.com/catalog/buylog/03\\_BuyLog2013\\_ElecVehicChargStations.pdf](https://www.geindustrial.com/catalog/buylog/03_BuyLog2013_ElecVehicChargStations.pdf). [Accessed: 25-Mar-2017].
- [23] "magnumcap.com." [Online]. Available: <http://www.magnumcap.com/index.php/component/content/article?id=77>. [Accessed: 25-Mar-2017].
- [24] "magnumcap.com." [Online]. Available: <http://www.magnumcap.com/index.php/component/content/article?id=28>. [Accessed: 25-Mar-2017].
- [25] "EVlink Wallbox EV charging stations for homes and private properties." [Online]. Available: <http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/product-launch/electric-vehicle/evlink-residential-charging-station.page>.

[Accessed: 25-Mar-2017].

- [26] “Charging systems for ecars - Electromobility - Siemens.” [Online]. Available: <http://w3.siemens.com/topics/global/en/electromobility/Pages/charging-ecar.aspx>. [Accessed: 25-Mar-2017].
- [27] W. Eberle and F. Musavi, “Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging,” *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 1, pp. 60-66, 2014.
- [28] “Tech Specs - Gen 2 | Plugless Power.” [Online]. Available: <https://www.pluglesspower.com/gen2-tech-specs/>. [Accessed: 25-Mar-2017].
- [29] N. M. L. T. Syamil Ahamad Sabki, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle,” *2014 IEEE 8th Int. Power Eng. Optim. Conf.*, vol. PP, no. 99, pp. 42-46, 2014.
- [30] “Wireless Electric Vehicle Charging Technology | Halo & Power Transfer | Qualcomm.” [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/solutions/automotive/wevc>. [Accessed: 26-Sep-2017].
- [31] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, “Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413-1452, 2016.
- [32] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, and D. Bronson, “A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 3, pp. 585-595, Aug. 2012.
- [33] 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, Nov. 2015.
- [34] Siqi Li and C. C. Mi, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, Mar. 2015.
- [35] 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.
- [36] K. Hwang *et al.*, “Autonomous Coil Alignment System Using Fuzzy Steering Control for Electric Vehicles with Dynamic Wireless Charging,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2015, pp. 1-14, 2015.
- [37] S. Das Barman, A. W. Reza, N. Kumar, M. E. Karim, and A. B. Munir, “Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1525-1552, Nov. 2015.

- [38] J. Aguiar, “Transferência de Energia sem fios para carregamento de baterias,” Universidade do Minho, 2013.
- [39] U. Paris-sud, “Sciences et Technologie de l ’ Information , des Télécommunications Wireless Inductive Charging for Electrical Vehicles : Electromagnetic Modelling and Interoperability Analysis,” 2014.
- [40] P. Santos, “Sistema de carregamento de baterias sem contacto controlado através de uma bobina variável,” Universidade de Coimbra, 2016.

## **Anexos**

## Anexo A - Características de várias marcas de veículos elétricos

Brand	Model	Model year	Comr. from CEV?	Seats	Drive	Standard Tire size on driving wheel pair	Powertrain Warranty Distance/ Years	Battery Warranty Distance/ Years	Battery Type
Smart	fortwo e.dr. Coupe	2014 [106] 2015 [108]	Yes	2 [106]	Rear [106]	175/55R15 [106]	50kmi/4yrs [107]	50kmi/4yrs [107]	Li-ion Pol. [4] Li-ion [109]
Smart	fortwo BRABUS ELDr. Coupe	2014 [109]	Yes	2 [109]	Rear [109]	225/35R17 [109]			
Toyota	Scion iQ EV	2012 [35]	Yes	4 [110]	Front [35]	175/60R16 [111]	50kmi/4yrs [41]	100kmi/8yrs [41]	Li-ion [35] Li-ion [112] Pri. [4]
Fiat	500e	2015 [112]	Yes	4 [112]	Front [112]	185/55R15 [112]		100kmi/8yrs [114]	Li-ion [113]
Citroën	C-ZERO	2014 [113]	Yes	4 [113]	Rear [113]	175/55R15 [113]		50kmi/5yrs [115]	Li-ion [115]
Peugeot	iOn	2014 [115]	Yes	4 [115]	Rear [115]	175/60R15 [115]		160kmi/8yrs [117]	Li-ion [117] Pri. [4]
Mitsubishi	i-MiEV	2014 [42]	Yes	4 [42]	Rear [116]	175/60R15 [117]		160kmi/8yrs [120]	Li-ion [118]
Volkswagen	e-up!	2013 [118] 2015 [43]	Yes	4 [119]	Front [118]	165/65R15 [118]	100kmi/5yrs [43]	100kmi/8yrs [43]	Li-ion Pol. [83] Li-ion [122]
Chevrolet	Spark EV	2015 [83]	Yes	4 [83]	Front [43]	185/55R15 [43]			
Bolloré	Bluecar	2015 [83]	Yes	4 [83]	Front [43]	185/55R15 [43]			
Mitsubishi	MimiCab MiEV	2014 [121]	Yes	4 [121]	Rear [122]	145R12 [121]			
BMW	i3	2014 [77]	No	4 [77]	Rear [77]	155/70R19 [77]	50kmi/4yrs [88]	100kmi/8yrs [88] 62kmi/8yrs [29]	Li-ion [77] Pri. [4]
Renault	Zoe	2015 [46]	No	5 [46]	Front [123]	185/65R15 [46]	100kmi/5yrs [46]	60kmi/5yrs [46]	Li-ion [46] Pol. [4]
Volvo	C30 Electric	2013 [78] 2015 [125]	Yes	4 [78]	Front [123]	205/55R16 [124]			Li-ion [78]
Volkswagen	e-Golf	2015 [125]	Yes	5 [125]	Front [125]	205/55R16 [125]	60kmi/5yrs [47]	100kmi/8yrs [47]	Li-ion Pri. [47]
Nissan	Leaf (Visia)	2015 [127]	No	5 [127]	Front [127]	205/55R16 [127]	100kmi/5yrs [89]	160kmi/8yrs [126]	Li-ion Lam. [81]
Nissan	Leaf (Accentia.SV)	2016 [128]	No	5 [128]	Front [128]	205/55R16 [128]	100kmi/5yrs [89]	100kmi/5yrs [89]	Li-ion Lam. [129]
Honda	FIT EV	2014 [130]	Yes	5 [130]	Front [130]	185/65R15 [130]	60kmi/5yrs [131]	60kmi/5yrs [131]	Li-ion [130] Pri. [4]
Renault	Fluence Z.E.	2012 [60]	Yes	5 [60]	Front [132]	205/55R16 [60]	100kmi/5yrs [60]	100kmi/5yrs [60]	Li-ion [60]
Ford	Focus EV	2015 [133]	Yes	5 [133]	Front [133]	225/50R17 [49]	100kmi/8yrs [86]	100kmi/8yrs [86]	Li-ion [133]
Kia	Soul Electric	2015 [134]	Yes	5 [55]	Front [134]	205/60R16 [134]	100kmi/10yrs [50]	100kmi/10yrs [50]	Li-ion Pol. [134]
Mercedes-Benz	B-Class El. Dr.	2015 [135]	Yes	5 [135]	Front [135]	205/60R16 [135]	100kmi/8yrs [57]	100kmi/8yrs [57]	Li-ion [135] Cyl. [136]
BYD	e6	2015 [137]	No	5 [137]	Front [116]	235/65R17 [137]	10yrs [38]	10yrs [38]	LiFePO4 [139]
Nissan	e-NV200 (E-valia)	2015 [90]	Yes	5 [90]	Front [90]	185/65R15 [90]	100kmi/5yrs [90]	100kmi/5yrs [90]	Li-ion [140]
Toyota	RAV4 EV	2014 [84]	Yes	5 [84]	Front [84]	225/65R17 [84]	60kmi/5yrs [84]	100kmi/5yrs [84]	Li-ion [84] Cyl. [141]
Tesla	Model S	2015 [59]	No	5 [59]	Rear/AWD [59]	245/45R19 [59]	unlim./8yrs [59]	unlim./8yrs [59]	Li-ion [59] Cyl. [4]
Tesla	Model X	2015 [142]	No	67 [142]	AWD [142]		unlim./8yrs [142]	unlim./8yrs [142]	
Tesla	Roadster	2012 [43] 2015 [96]	No	2 [43] 2 [96]	Rear [44] AWD [96]	225/45R17 [43] P:245/35R20 [14]	100kmi/7yrs [43]	100kmi/7yrs [43]	Li-ion [45] Cyl. [4] LiFePO4 [96]
Kimac	Concept One	2015 [68]	Yes	2 [68]	AWD [68]	R:295/30R20 R:265/35R19 [32]			Li-ion [85]
Mercedes-Benz	SLS AMG ELDr.	2015 [68]	Yes	2 [68]	AWD [68]	R:295/30R20			
Lightning	Lightning GT	2015 [74]	No	2 [74]	Rear [74]	245/45R20 [47]			Li-titan [74]
Detroit Electric	SP:01 Pure	2015 [31]	No	2 [31]	Rear [31]	225/45R17 [31]			
Detroit Electric	SP:01 Perf.	2015 [31]	No	2 [31]	Rear [31]	225/45R17 [31]			
Venturi	Fetish	2015 [148]	No	2 [148]	Rear [31]	225/45R17 [31]			
Venturi	America	2014 [49] 2015 [61]	Yes	2 [50]	Rear [150]	275/45R20 [49]			Li-ion Pol. [148] Li-ion Pol. [150]
Renovo	R8 e-Iron Coupe	2015 [30]	Yes	2 [151]	Rear [37]	275/40R19 [37]			Li-ion [61]
Audi	R8 e-Iron	2015 [30]	Yes	2 [151]	Rear [37]	275/40R19 [37]			Li-ion [37]
Protoscar	LAMPO 3	2011 [152]	Yes	2+2 [152]	AWD [152]	P:245/40R18 [152] R:295/65R18			Li-ion Pri. [152]

Model	Curb weight (kg)	Max. cargo (kg)	Max. Weight (kg)	Weight Front/Rear (%)	Average Track Width (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Length (mm)	Front Area (m <sup>2</sup> )	Air drag coeff. Cd	A * Cd (m <sup>2</sup> )
fortwo	900 [106]	250 [106]	1150 [106]		1334 [106]	1559 [106]	1565 [106]	2695 [106]		0.29 [131]	
BRABUS	925 [09]	150 [109]	1150 [109]		1317 [09]	1559 [09]	1565 [09]	2727 [09]			
iQ EV	1100 [110]				1468 [111]	1680 [35]	1505 [35]	3120 [35]	2.15 [153]	0.299 [153]	0.64 cal.
500e	1355 [112]			57/43 [112]	1402 [112]	1627 [112]	1527 [112]	3617 [112]		0.311 [112]	
C-ZERO	1065 [113]	385 [113]	1450 [113]	44/56 [113]	1290 [113]	1475 [113]	1608 [113]	3475 [113]			
iOn	1065 [115]	310 [115]	1450 [115]		1290 [115]	1475 [115]	1610 [115]	3480 [115]	2.14 cal.	0.33 [115]	0.706 [115]
i-MiEV	1085 [42]	365 cal.	1450 [42]	46/54 [117]	1290 [42]	1475 [42]	1615 [117]	3675 [117]		0.35 [54]	
e-Up!	1139 [118]	361 cal.	1500 [118]	52/48 [155]	1426 [118]	1645 [118]	1489 [118]	3540 [118]	2.09 cal.	0.308 [80]	0.644 [51]
Spark EV	1300 [43]				1401 [43]	1627 [43]	1590 [43]	3720 [43]		0.326 [156]	
Bluecar	1120 [83]	230 [83]	1350 cal.		1700 [83]	1700 [83]	1610 [83]	3650 [83]			
MiniCab MiEV	1110 [121]	200 [121]	1310 cal.		1303 [121]	1475 [121]	1810 [121]	3395 [121]			
i3	1195 [77]	425 [77]	1620 [77]	47/53 [77]	1573 [77]	1775 [77]	1578 [77]	3999 [77]	2.38 [77]	0.29 [77]	0.69 [44]
Zoe	1468 [46]	475 cal.	1943 [46]	59/41 [46]	1511 [46]	1730 [46]	1562 [46]	4084 [46]	2.59 cal.	0.29 [28]	0.75 [46]
C30 EL	1725 [78]				1546 [159]	1782 [160]	1447 [160]	4266 [160]	2.18 [159]	0.28 [159]	0.61 cal.
e-Golf	1510 [125]	422 [125]	1960 [125]		1528 [125]	1799 [125]	1450 [125]	4270 [125]	2.19 cal. [52]	0.27 [125]	0.59 cal. [52]
Leaf 15	1474 [127]	471 cal.	1945 [127]		1538 [127]	1770 [127]	1545 [127]	4445 [127]	2.27 [161]	0.291 [127]	0.66 cal.
Leaf 16	1516 [128]	454 cal.	1970 [128]	58/42 [129]	1537 [129]	1770 [128]	1550 [128]	4445 [128]		0.29 [128]	
FIT EV	1475 [130]			55/45 [130]	1474 [130]	1721 [130]	1579 [130]	4114 [130]		0.34 [162]	
Fluence Z.E.	1535 [163]	388 cal.	2023 [60]	46/54 [80]	1546 [60]	1809 [164]	1458 [60]	4748 [60]			0.67 [164]
Focus EV	1642 [133]	365 [165]	2007 cal.		1525 [133]	1823 [133]	1478 [133]	4391 [133]		0.295 [166]	
Soul Electric	1490 [167]	470 cal.	1960 [134]		1582 [97]	1800 [134]	1593 [134]	4140 [134]		0.35 [168]	
B-Class EL Dr.	1650 [135]	445 [135]	2170 [135]		1548 [135]	1812 [135]	1599 [135]	4358 [135]		0.28 [135]	
e6	2380 [137]	375 [137]	2755 cal.		1573 [137]	1822 [137]	1645 [137]	4560 [137]			
e-NV200	1571 [140]	483 [90]	2220 [90]	48/52 [90]	1530 [90]	1755 [90]	1858 [90]	4560 [90]			
RAV4 EV	1828 [84]				1559 [84]	1816 [84]	1684 [84]	4574 [84]		0.30 [84]	
ModelS	2108 [59]	482 cal.	2590 [28]	48/52 [59]	1680 [59]	1963 [59]	1445 [169]	4978 [59]	2.34 [170]	0.24 [171]	0.56 cal.
ModelX										0.24 [142]	
Roadster	1235 [143]	249 cal.	1484 [172]	35/65 [173]	1482 [143]	1851 [143]	1126 [143]	3939 [143]		0.36 [53]	
Concept One	1950 [174]			42/58 [96]		1997 [174]	1198 [174]	4548 [174]			
SLS AMG EL Dr.	2110 [85]	250 [85]	2435 [85]	47/53 [175]	1667 [85]	1939 [85]	1262 [85]	4638 [85]			
Lightning GT	1850 [176]				1668 [177]	1940 [176]	1200 [176]	4445 [176]			
SP-01 Pure	1155 [31]				1751 [31]	1751 [31]	1117 [31]	3880 [31]			
SP-01 Perf.	1175 [31]				1751 [31]	1751 [31]	1117 [31]	3880 [31]			
Fetish	1200 [148]										
America	1525 [150]					2060 [150]	1450 [150]	4125 [150]			
Coupe	1474 [61]										
R8 e-tron	1841 [37]			40/60 [37]	1617 [178]	1929 [178]	1252 [151]	4431 [151]		0.28 [30]	
LAMPO 3	1700 [152]				1998 [152]	1998 [152]	1307 [152]	4687 [152]			

## Anexo B - Script Matlab

```

% Abrir ficheiro
filename='Coil1.mn';

dir_str=sprintf('%s\\%s',pwd,filename);
mag=openModel(dir_str);

% Nomes de componentes
Coil1='Coil#1';
Coil2='Coil#2';

% Displacement vector
% dist=[0.5 2 3];
dist=[1 5 10 20 30 40 50];
I=0.5; % Phase current- A

% Init inductance arrays
L1=zeros(1,length(dist));
L2=zeros(1,length(dist));
M=zeros(1,length(dist));

k=0;
for d=dist
    k=k+1;
    %set distance
    setpval('d',d,mag);

    %Set coil 1 current
    setpval('I1',I,mag);
    %Clear coil 2 current

    setpval('I2',0,mag);

    % 2D simulation
    solveMagnet('2D',mag);

    %Get linkage flux of coil 1
    flux1=flinkage(Coil1,mag);
    flux2=flinkage(Coil2,mag);

    %compute inductance of coil 1
    L1(k)=flux1/I;

    %compute mutual inductance
    M(k)=flux2/I;

    %Clear coil 2 current
    setpval('I1',0,mag);
    %Set coil 2 current
    setpval('I2',I,mag);

    % 2D simulation
    solveMagnet('2D',mag);

    %Get linkage flux of coil 2
    flux2=flinkage(Coil2,mag);
    %compute inductance of coil 2
    L2(k)=flux2/I;

end

% Close Magnet
closeModel(mag);

```

## Anexo C - Datasheet do TLP152

**TOSHIBA**

TLP152

Photocouplers GaAs Infrared LED &amp; Photo IC

**TLP152****1. Applications**

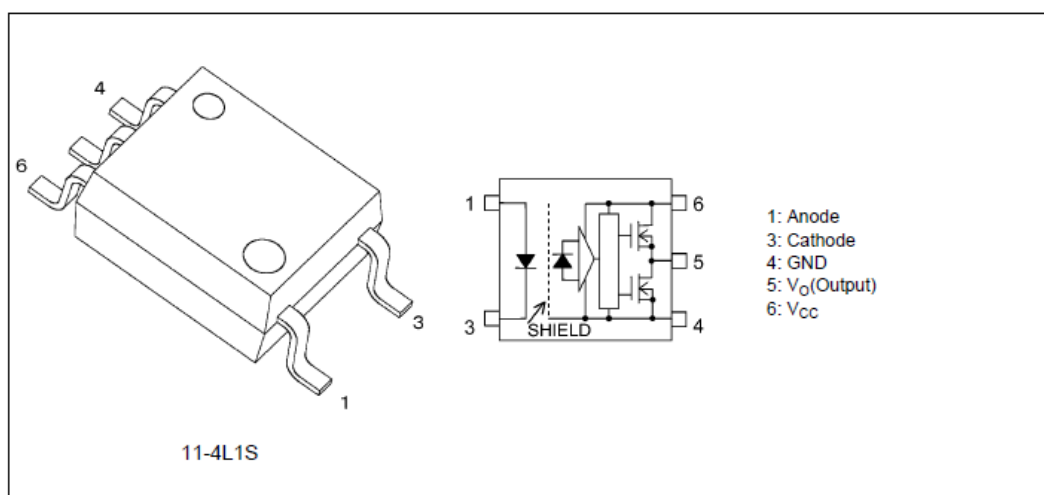
- Plasma Display Panels (PDPs)
- Transistor Inverters
- MOSFET Gate Drivers
- IGBT Gate Drivers

**2. General**

The TLP152 is a photocoupler in a SO6 package that consists of a GaAs infrared light-emitting diode(LED) optically coupled to an integrated high-gain, high-speed photodetector IC chip.

**3. Features**

- (1) Buffer logic type (Totem pole output)
- (2) Output peak current:  $\pm 2.5$  A (max)
- (3) Operating temperature: -40 to 100 °C
- (4) Supply current: 3 mA (max)
- (5) Supply voltage: 10 to 30 V
- (6) Threshold input current: 7.5 mA(max)
- (7) Propagation delay time:  $t_{pHL} = 190$  ns (max),  $t_{pLH} = 170$  ns (max)
- (8) Common-mode transient immunity:  $\pm 20$  kV/ $\mu$ s (min)
- (9) Isolation voltage: 3750 Vrms (min)

**4. Packaging and Pin Assignment**

## Anexo D - Datasheet do NCP5106

### NCP5106A, NCP5106B

## High Voltage, High and Low Side Driver

The NCP5106 is a high voltage gate driver IC providing two outputs for direct drive of 2 N-channel power MOSFETs or IGBTs arranged in a half-bridge configuration version B or any other high-side + low-side configuration version A.

It uses the bootstrap technique to ensure a proper drive of the high-side power switch. The driver works with 2 independent inputs.

#### Features

- High Voltage Range: Up to 600 V
- dV/dt Immunity  $\pm 50$  V/nsec
- Negative Current Injection Characterized Over the Temperature Range
- Gate Drive Supply Range from 10 V to 20 V
- High and Low Drive Outputs
- Output Source / Sink Current Capability 250 mA / 500 mA
- 3.3 V and 5 V Input Logic Compatible
- Up to  $V_{CC}$  Swing on Input Pins
- Extended Allowable Negative Bridge Pin Voltage Swing to  $-10$  V for Signal Propagation
- Matched Propagation Delays Between Both Channels
- Outputs in Phase with the Inputs
- Independent Logic Inputs to Accommodate All Topologies (Version A)
- Cross Conduction Protection with 100 ns Internal Fixed Dead Time (Version B)
- Under  $V_{CC}$  LockOut (UVLO) for Both Channels
- Pin-to-Pin Compatible with Industry Standards
- These are Pb-Free Devices

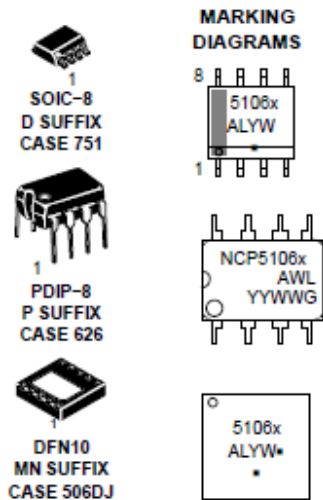
#### Typical Applications

- Half-Bridge Power Converters
- Any Complementary Drive Converters (Asymmetrical Half-Bridge, Active Clamp) (A Version Only).
- Full-Bridge Converters



**ON Semiconductor®**

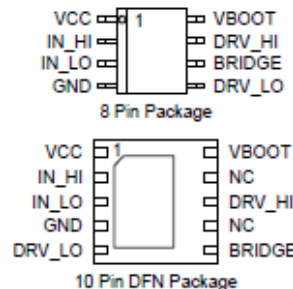
[www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)



NCP5106 = Specific Device Code  
 x = A or B version  
 A = Assembly Location  
 L or WL = Wafer Lot  
 Y or YY = Year  
 W or WW = Work Week  
 G or \* = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

#### PINOUT INFORMATION



#### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information on page 16 of this data sheet.

NCP5106A, NCP5106B

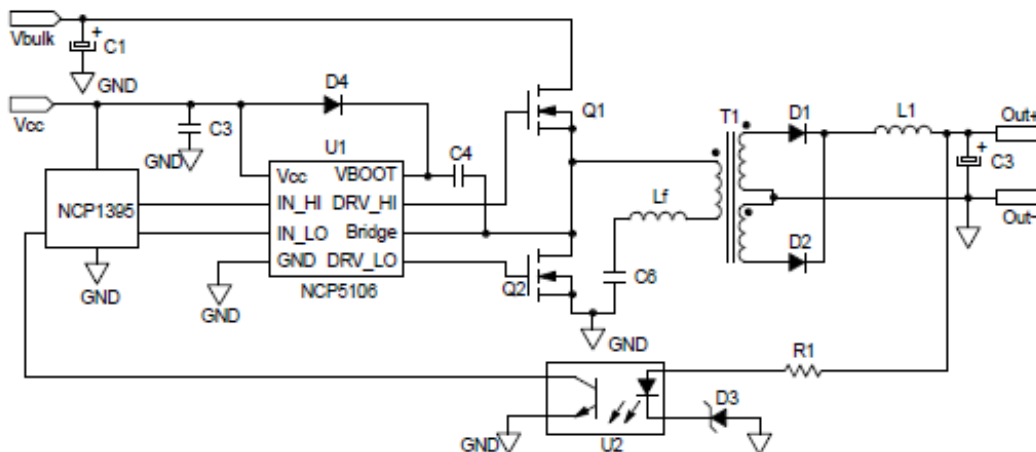


Figure 1. Typical Application Resonant Converter (LLC type)

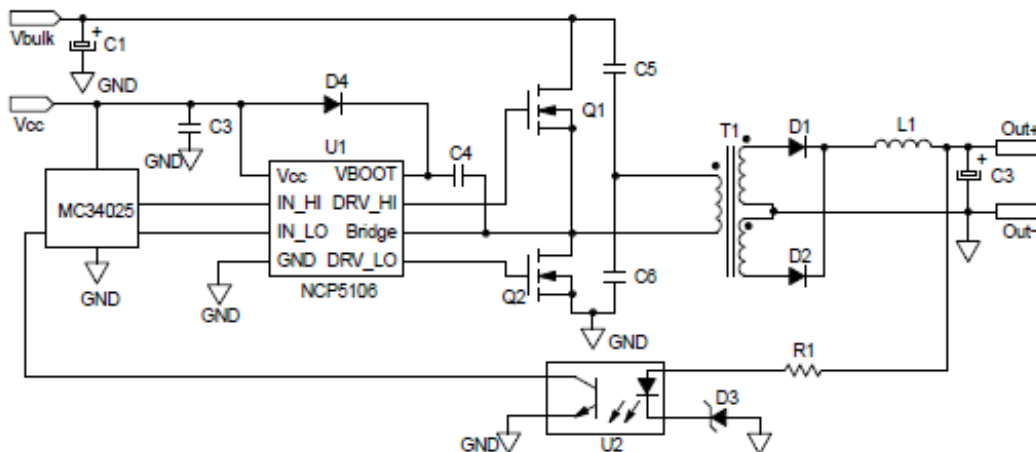


Figure 2. Typical Application Half Bridge Converter