

# **Modelização e Análise de Sistemas de Carregamento *Wireless***

**(Versão Final Após Defesa)**

**Ricardo Santarém Moreira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2<sup>o</sup> ciclo de estudos)

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

**novembro de 2023**



## Declaração de Integridade

Eu, Ricardo Santarém Moreira, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M11897 de Engenharia Eletromecânica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 22/11/2023



(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente  
assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)



# Agradecimentos

Este trabalho, para ser concretizado, teve necessidade de envolver, na sua elaboração, a colaboração e/ou apoio de outras pessoas, a quem não posso deixar de manifestar o meu reconhecimento.

Expresso a minha gratidão à Professora Doutora Maria do Rosário Alves Calado pela orientação de excelência que me facultou durante todo o meu trabalho de Mestrado. Estou profundamente grato pelo apoio, profissionalismo e constante disponibilidade e dedicação depositadas em mim. Por todas as críticas construtivas e pela partilha de conhecimentos. Obrigado, pois sem esse incentivo e apoio nada disto seria possível.

Ao Doutor Rui Mendes, pela constante disponibilidade para ajudar e inúmeras sugestões que foram uma mais-valia nesta dissertação.

Aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional em todo o meu percurso como pessoa. Irei sempre valorizar os esforços, as dificuldades, as frustrações e momentos difíceis para me mostrarem que tudo isso valeu a pena. Irei guardar no meu coração todos os momentos bons e menos bons que me moldaram com pessoa.

Ao meu irmão por desde sempre caminhar a meu lado na vida e a tornar melhor. Obrigado pelo apoio constante no meu percurso académico.

Aos meus avós, por estarem presentes quando os meus pais não podiam. Por me mostrarem que com paciência e resiliência tudo é alcançável.

À minha namorada e melhor amiga, por me apoiar em todas as etapas e decisões, pela paciência e por me fazer acreditar que eu era capaz. Foste a minha força e motivação para concluir este trabalho.

Aos meus amigos, Ivan, João, Diogo e Miguel por terem tornado todo este percurso mais risonho.

Ao Zeus, obrigado pela tua breve estadia.



# Resumo

Nos últimos anos, os veículos elétricos (VE) têm vindo a ganhar destaque como uma solução promissora para mitigar os desafios ambientais e energéticos globais. Para tornar a adoção destes mais conveniente e prática, o carregamento sem fios tem emergido como uma tecnologia inovadora e atraente.

Esta dissertação explora a evolução dos sistemas de carregamento sem fios, enquadrando os tópicos relacionados, tais como: a história dos veículos elétricos; o tipo de baterias utilizadas nos veículos elétricos; os métodos e modos de carregamento com fios; os tipos de transferência de energia sem fio; as topologias de compensação usados na tecnologia sem fios; o impacto do desalinhamento axial e aumento de distância entre o par de bobinas na eficiência da transferência de energia. É feita ainda uma apresentação dos principais sistemas presentes na indústria.

O presente trabalho foca-se maioritariamente no impacto que a geometria da bobina tem no fator de acoplamento do sistema e, por sua vez, no rendimento do mesmo. Propõe-se e analisa-se um núcleo ferromagnético inovador que comprova o aumento significativo do fator de acoplamento do sistema e demonstra resultados promissores equiparados com a literatura. Este estudo explora ainda o impacto das topologias de compensação ressonantes no desempenho global do sistema de carregamento sem fios, observando um aumento significativo na energia entregue à carga e o consequente aumento de rendimento.

O estudo analítico envolve a obtenção das soluções das expressões matemáticas que são aplicadas na caracterização eletromagnética de cada par de bobinas e o estudo numérico, que utiliza o método de elementos finitos, o qual foi realizado por intermédio de um *software* comercial.

Todo o processo de cálculo computacional é implementado em linguagem própria do *software Matlab* e a análise do comportamento dinâmico do sistema é feito através do *Simulink*.

## Palavras-chave

Veículo Elétrico; Sistema de transferência de energia sem fio; Enrolamento; Núcleo ferromagnético; Fator de acoplamento; Acoplamento indutivo ressonante; Rendimento



# Abstract

In recent years, electric vehicles (EVs) have been gaining prominence as a promising solution to mitigate global environmental and energy challenges. To make the adoption of EVs more convenient and practical, wireless charging has emerged as an innovative and attractive technology.

This dissertation explores the evolution of wireless charging systems, framing the surrounding topics such as: the history of electric vehicles; the type of batteries used in electric vehicles; wired charging methods and modes; types of wireless energy transfer; compensation topologies used in wireless energy transfer; the impact of axial misalignment and increased distance between the pair of coils on energy transfer efficiency. There is also a presentation of the main systems present in the industry.

This work focuses mainly on the impact that coil geometry has on the system's coupling factor and, in turn, its performance. An innovative ferromagnetic core is proposed and analysed, which proves a significant increase in the system's coupling factor and shows promising results on a par with the literature. This study also explores the impact of resonant compensation topologies on the overall performance of the wireless charging system, observing a significant increase in the energy delivered to the load and the consequent increase in performance.

The analytical analysis involves solving analytical expressions for the electromagnetic characterization of each pair of coils, and the numerical design, which uses the finite element method, was carried out using commercial software.

The entire computational calculation process is implemented in Matlab's own language and the system's dynamic behaviour is analysed using Simulink.

## Keywords

Electric Vehicle; Wireless; Power Transfer System; Winding; Ferromagnetic core; Coupling factor; Resonant inductive coupling; Efficiency



# Índice

Resumo .....	vii
Palavras-chave .....	vii
Abstract.....	ix
Keywords .....	ix
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas .....	xviii
Lista de Acrónimos .....	xx
Nomenclatura .....	xxii
Capítulo 1 .....	1
Introdução .....	1
1.1. Contextualização da temática .....	1
1.2. Objetivos do estudo.....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	2
Capítulo 2.....	4
Enquadramento .....	4
2.1. Veículos elétricos.....	4
2.2.1. A história dos veículos elétricos .....	4
2.1.2. Os diferentes tipos de veículos elétricos .....	5
2.2. Baterias .....	6
2.2.1. Bateria de Ácido-Chumbo .....	7
2.2.2. Bateria de Níquel-Cádmio .....	8
2.2.3. Bateria de Níquel-Hidreto Metálico .....	8
2.2.4. Bateria Ião de lítio .....	9
2.2.5. Parâmetros das baterias.....	10
2.3. Métodos de carregamento de baterias.....	13
2.3.1 Método de carregamento com corrente constante.....	14
2.3.2. Método de carregamento com tensão constante .....	14
2.3.3. Método de carregamento a corrente/tensão constante.....	14
2.3.4. Método de carregamento <i>multi-fase</i> .....	15
2.3.5. Método de carregamento por pulso .....	16
2.4. Modos de carregamento de veículos elétricos .....	17
2.4.1. Modo 1 .....	17
2.4.2. Modo 2 .....	18
2.4.3. Modo 3 .....	18
2.4.4. Modo 4 .....	18
Capítulo 3.....	20

Transferência de energia sem fios estática .....	20
3.1. Tecnologias de transferência de energia sem fios .....	22
3.1.1. Transferência de energia indutiva .....	22
3.1.2. Transferência de energia indutiva magnética ressonante.....	23
3.1.3. Transferência de energia capacitiva .....	24
3.2. Dimensionamento das Bobinas.....	24
3.2.1. Enrolamento .....	24
3.2.2. Núcleo ferromagnético .....	27
3.3. Filtro LC .....	27
3.4. Topologias de compensação.....	28
3.5. Topologia de compensação LCC ressonante .....	30
3.6. Conversores e métodos de controlo .....	32
3.7. Uso de inteligência artificial no controlo .....	33
3.8. Projetos existentes .....	34
Capítulo 4 .....	37
Transferência de energia sem fios dinâmica.....	37
4.1. Dimensionamento das bobinas para carregamento dinâmico.....	37
4.2. Tolerância a desalinhamento, velocidade e distância ao solo.....	38
4.3. Estradas eletrificadas .....	39
4.3.1. Técnicas de carga condutiva .....	40
4.3.2. Técnicas de transferência de energia indutiva.....	41
4.4. Projetos existentes .....	42
4.4.1. On-Line Electric Vehicle.....	42
4.4.2. <i>Electreon</i> .....	43
4.4.3. <i>Bombardier</i> .....	44
4.4.4. <i>Qualcomm Halo</i> .....	45
4.5. Desafios a serem ultrapassados .....	46
Capítulo 5 .....	48
Dimensionamento dos sistemas de carregamento sem fios .....	48
5.1. Metodologia .....	48
5.1.1. Formulação do problema .....	49
5.1.2. Dimensionamento .....	50
5.1.3. Materiais .....	53
5.1.4. Características das bobinas.....	54
5.2. Carregamento indutivo sem topologia de compensação série-série.....	54
5.3. Carregamento indutivo com topologia de compensação série-série.....	56
5.4. Resultados .....	58
Capítulo 6 .....	73
Considerações finais e estudos futuros .....	73
6.1. Limitações.....	74

6.1.1. Limitações externas .....	74
6.1.2 Limitações internas .....	74
6.2. Estudos futuros .....	74
Bibliografia .....	76
Anexos.....	81
Anexo A. Tabela AWG para fios condutores.....	82
Anexo B. Resultados obtidos através da simulação no <i>MagNet</i> .....	85



# Lista de Figuras

Figura 2.1 Maiores feitos na história dos veículos elétricos [3].....	5
Figura 2.2-Classificação dos veículos elétricos de acordo com a tecnologia motriz [3]..	6
Figura 2.3-Energia e potencia específica das diferentes tecnologias de bateria [5].....	7
Figura 2.4-Características das diferentes baterias ião de lítio comercializadas [12]. ....	10
Figura 2.5-Método de corrente/tensão contínua [17]. .....	15
Figura 2.6-Método de carregamento multi-stage [17].....	16
Figura 2.7-Diagrama temporal do método de carregamento por pulso [17].....	16
Figura 2.8-Comparação entre os métodos de carregamento. Adaptado de [18].....	17
Figura 3.1-Atratividade do carregamento sem fios, adaptado de [21]. .....	21
Figura 3.2-Interesse nas determinadas características de um VE, adaptado de [21]. ....	21
Figura 3.3-Esquema de um sistema típico de carregamento sem fios [25]. .....	23
Figura 3.4-Filtro LC [15].....	27
Figura 3.5-Topologias de compensação: (a) SS, (b) SP, (c) PS, (d) PP [24].....	29
Figura 3.6-Diagrama de comparação das topologias de compensação [31].....	29
Figura 3.7-Topologia ressonante LCC [32].....	30
Figura 3.8-Formas de onda para $f_m < f_s < f_r$ [32]. .....	31
Figura 3.9-Convertores existentes num sistema de transferência de energia sem fios [30]. .....	33
Figura 3.10-Exemplo de uma rede neuronal [31].....	34
Figura 3.11-Marcos dos sistemas de carregamento sem fios em ambiente académico [34]. .....	35
Figura 3.12-Marcos dos sistemas de carregamento sem fios em ambiente industrial [34]. .....	36
Figura 4.1-Rendimento de um sistema TEAI com distâncias ao solo entre 150 mm e 300 mm [36]. .....	38
Figura 4.2-Ilustração dos diferentes tipos de carga condutiva nas estradas eletrificadas: (a) por cima; (b) por baixo; e (c) ao lado [1].....	41
Figura 5.1-Fluxograma da Metodologia de Dimensionamento.....	49
Figura 5.2-Geometria do pot core [52].....	50
Figura 5.3-Vista geral das bobinas a serem simuladas.....	52
Figura 5.4-Circuito equivalente .....	55
Figura 5.5-Modelo do circuito indutivo no Simulink. ....	56
Figura 5.6-Circuito equivalente com topologia ressonante SS.....	57
Figura 5.7-Modelo do circuito indutivo ressonante no Simulink.....	58

Figura 5.8- Interação do campo magnético para uma bobina com geometria circular, com núcleo de ar, a 100 mm de distância.....	59
Figura 5.9-Interação do campo magnético para um par de bobinas com geometria circular, com núcleo ferromagnético, a 100 mm de distância entre as mesmas. ....	59
Figura 5.10-Interação do campo magnético para um par de bobinas com geometria circular, com núcleo ferromagnético, a 100 mm de distância entre as mesmas. Com escala B ampliada para melhor detalhe. ....	60
Figura 5.11-Fator de acoplamento para bobinas de núcleo de ar em função da distância entre as mesmas. ....	61
Figura 5.12-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de $0^{\circ}$ .....	63
Figura 5.13-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de $5^{\circ}$ . ....	63
Figura 5.14-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de $10^{\circ}$ . ....	64
Figura 5.15-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de $15^{\circ}$ .....	64
Figura 5.16-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de $20^{\circ}$ .....	65
Figura 5.17-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de $0^{\circ}$ .....	66
Figura 5.18-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de $5^{\circ}$ .....	67
Figura 5.19-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de $10^{\circ}$ . ....	67
Figura 5.20-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de $15^{\circ}$ . ....	68
Figura 5.21-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um angulo de desfasamento de $20^{\circ}$ .....	68
Figura 5.22-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de desfasamento de $0^{\circ}$ . ....	69
Figura 5.23-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de desfasamento de $5^{\circ}$ .....	70
Figura 5.24-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de desfasamento de $10^{\circ}$ .....	70
Figura 5.25-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de desfasamento de $15^{\circ}$ . ....	71

Figura 5.26-Varição da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de defasamento de  $20^\circ$ .....71

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1-Cenários de carregamento com valores típicos para a taxa de entrega da estação de carregamento, tempo de carregamento e modo de carregamento. 1f-monofásico; 3f- trifásico. Adaptado de [20]. .....	19
Tabela 3.1- Comparação das diferentes topologias de bobinas, adaptado de [29]......	26
Tabela 3.2- Características das topologias de compensação, adaptado de [24]......	30
Tabela 4.1- Comparação entre diversos sistemas TEAI, adaptado de [36]. .....	39
Tabela 4.2- Sumário do desenvolvimento do projeto OLEV, adaptado de [38]......	43
Tabela 5.1- Propriedades do material ferromagnético, adaptado de [53]. .....	53
Tabela 5.2- Propriedades elétrica do cobre [53]. .....	53
Tabela 5.3- Características das bobinas a serem simuladas. ....	54
Tabela 5.4- Comparação do fator de acoplamento entre este estudo e a literatura.....	65
Tabela B. 1- Resultados obtidos através do software MagNet para bobinas quadradas com núcleo de ar. ....	86
Tabela B. 2- Resultados obtidos através do software MagNet para bobinas circulares com núcleo de ar. ....	87
Tabela B. 3- Resultados obtidos através do software MagNet para bobinas hexagonais com núcleo de ar. ....	88
Tabela B. 4- Resultados obtidos através do software MagNet para bobinas quadradas com núcleo ferromagnético. ....	89
Tabela B. 5- Resultados obtidos através do software MagNet para bobinas circulares com núcleo ferromagnético. ....	90
Tabela B. 6- Resultados obtidos através do software MagNet para bobinas hexagonais com núcleo ferromagnético.....	91



# Lista de Acrónimos

AWG	<i>American Wire Gauge</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEM	Campo Eletromagnético
DD	Duplo D
DDQ	Duplo D em Quadratura
DEVCh	<i>Dynamic Electric Vehicle Charging</i>
DOD	Profundidade de Descarga
ER-EV	<i>Extended-range Electric Vehicle</i>
EUA	Estados Unidos da América
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
FIA	<i>Federation Internationale de l'Automobile</i>
GM	<i>General Motors</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
KAIST	<i>Korea Advanced Institute of Science &amp; Technology</i>
KRRI	Instituto Coreano de Investigação Ferroviária
LC	Bobina/Condensador
LCC	Bobina/Condensador/Condensador
LFP	Fosfato de Lítio de Ferro
Li-ion	Ião-lítio
LMO	Óxido de Lítio Manganês
MCI	Motor de Combustão Interna
NCA	Óxido de Lítio Níquel Cobalto Alumínio
Ni-Cd	Níquel-Cádmio
Ni-Mh	Níquel-Hidreto Metálico
NMC	Óxido de Lítio Níquel Manganês Cobalto
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
PP	Paralelo-Paralelo
PS	Paralelo-Série
RNA	Rede Neuronal Artificial
R&D	<i>Research and Development</i>
OLEV	<i>On-line Electric Vehicle</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
SOH	<i>State of Health</i>
SP	Série-Paralelo
SS	Série-Série
TEAI	Transferência de Energia com Acoplamento Indutivo
TEC	Transferência de Energia Condutiva
TEI	Transferência de Energia indutiva
TESF	Transferência de Energia sem fios
VE	Veículo Elétrico
WEVC	Sem fios <i>Electric Vehicle Charging</i>



# Nomenclatura

Símbolo	Designação	Unidade S.I
$E^0$	Tensão teórica obtida nos terminais da célula	[V]
$V$	Tensão real obtida nos terminais da bateria	[V]
$I$	Corrente	[A]
$R$	Resistência representativa da bateria	[ $\Omega$ ]
$C_{nominal}$	Capacidade nominal da bateria	[C]
$C_{disponivel}$	Capacidade disponível na bateria	[C]
$C_{libertada}$	Capacidade libertada pela bateria	[C]
$C_{max}$	Capacidade máxima da bateria	[C]
$Q$	Fator de qualidade	-
$L$	Indutância	[H]
$C$	Capacidade do condensador	[F]
$f_{res}$	Frequência de ressonância	[Hz]
$D_{out}$	Diâmetro Externo	[m]
$l_{ag}$	Distância entre bobinas	[m]
$l_s$	Comprimento da secção transversal do enrolamento	[m]
$r_{out}$	Raio exterior	[m]
$r_{in}$	Raio interior	[m]
$A_{wire}$	Área da secção transversal do fio condutor	[m <sup>2</sup> ]
$J$	Densidade de corrente	[A/m <sup>2</sup> ]
$I_{max}$	Valor máximo para a corrente elétrica	[A]
$d_{wire}$	Diâmetro do fio condutor	[m]
$l_{wire}$	Comprimento do fio condutor	[m]
$V_{coil}$	Volume aparente da bobina	[m <sup>3</sup> ]
$A_{sc}$	Área da secção anelar da bobina	[m <sup>2</sup> ]
$h_{coil}$	Altura da bobina	[m]
$V_p$	Tensão de alimentação	[V]
$r_p$	Resistência interna da bobina do primário	[ $\Omega$ ]
$i_p$	Corrente na bobina primária	[A]
$L_p$	Indutância própria da bobina do primário	[H]
$i_s$	Corrente na bobina secundária	[A]
$M$	Indutância mútua	[H]
$V_s$	Tensão de saída do circuito	[V]
$r_s$	Resistência interna da bobina do secundário	[ $\Omega$ ]
$L_s$	Indutância própria da bobina do secundário	[H]
$i_s$	Corrente na bobina secundária	[A]
$k$	Fator de acoplamento	-
$C_p$	Capacidade do condensador do primário	[F]
$C_s$	Capacidade do condensador do secundário	[F]
$w$	Frequência angular	[rad/s]





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1. Contextualização da temática

Na atualidade, a sustentabilidade é uma das primeiras prioridades em todos os setores. No setor automóvel onde outrora a qualidade, desempenho e flexibilidade de produção eram prioridades são agora equiparáveis, ou mesmo substituídas, pela sustentabilidade do ciclo de vida do veículo [1].

É necessário um enorme esforço global para cumprir os prazos propostos para combater as alterações climáticas, visto que os transportes rodoviários foram responsáveis, em 2017, por 29% de todas as emissões de gases com efeito de estufa e com um possível aumento de até 50% até 2030 [1].

Os veículos elétricos (VE) apresentam-se com uma boa alternativa aos de motor de combustão interna (MCI), no entanto a sua adoção enfrenta alguns obstáculos como os longos tempos de carregamento, de autonomia, do custo, das questões de segurança no carregamento, da durabilidade da bateria, entre outros. O futuro da mobilidade elétrica depende da criação de boas infraestruturas, como uma rede alargada de postos de carregamento rápido e estradas eletrificadas, que são definidas como uma estrutura rodoviária capaz de fornecer continuamente eletricidade aos VE, através de sistemas instalados na própria estrada [1].

O carregamento sem fios, para além de ser mais prático, elimina os riscos associados ao carregamento tradicional, do ponto de vista do utilizador, como contactos diretos com o cabo ao conectá-lo ao veículo e tropeçar no próprio cabo. Há também uma salvaguarda da infraestrutura de danos devido ao clima e atos de vandalismo [1]. É uma tecnologia interessante para os veículos em trânsito urbano que envolve bastantes paragens, tais como os autocarros. Implementando um posto de carregamento sem fios nas paragens é possível carregar enquanto este recolhe/larga passageiros, o que, se repetido ao longo do percurso e ao longo do dia, permite aumentar significativamente a autonomia.

O carregamento sem fios dinâmico permite que os veículos elétricos sejam alimentados continuamente enquanto se deslocam ao longo da estrada eletrificada, o que permite uma maior autonomia com menos capacidade de bateria. Por sua vez, a adoção de baterias com menor capacidade reduz o peso do veículo, tornando-o mais eficiente e económico. Desta forma, as principais limitações na adoção dos VE, ao nível do fornecimento de energia, são eliminadas culminando num futuro mais sustentável [2].

## 1.2 Objetivos do estudo

O presente estudo teve como principal objetivo comparar diversas tipologias de bobinas, contando com três geometrias diferentes: quadrada, circular e hexagonal para uma transferência de energia indutiva (TEI), quando expostas a diversas alterações no meio onde se encontram inseridas, tais como diferentes distâncias e defasamentos axiais entre elas. Foi também um objetivo do trabalho analisar o impacto do uso de um núcleo ferromagnético no fator de acoplamento, bem como a inserção de uma topologia ressonante com compensação em série-série (SS), de forma a avaliar a energia entregue à carga e o rendimento do sistema.

## 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

O 1º Capítulo é introdutório e aborda sucintamente o tema central do estudo. Aborda no geral o impacto da transferência de energia sem fios no mercado dos veículos elétricos. São ainda descritos os objetivos do tema e é apresentada a organização da dissertação.

O 2º Capítulo apresenta o enquadramento do tema onde é feita uma revisão sobre os VE, incluindo a sua história e principais características. De seguida, é apresentada uma comparação entre diversos tipos de baterias utilizadas nos VE. Por fim, são abordados os diversos métodos e modos de carregamento com fios.

O 3º Capítulo apresenta o estado da arte no domínio do carregamento sem fios de VE. Neste capítulo são descritas as características e componentes usados num sistema de carregamento sem fios, a importância do dimensionamento da bobina e do uso de um núcleo ferromagnético, a importância das topologias de compensação neste tipo de sistemas, e por fim são descritos alguns exemplos *in-situ* de sistemas.

O 4º Capítulo apresenta o estado de arte no domínio do carregamento sem fios dinâmico de VE. Aborda-se o tópico das estradas eletrificadas e as suas vantagens e desvantagens. Realiza-se também uma comparação do dimensionamento de bobinas para carregamento dinâmico com as utilizadas no carregamento estático. Por fim, são descritos alguns exemplos *in-situ* de sistemas dinâmicos.

O 5º Capítulo descreve a metodologia utilizada no decorrer deste trabalho. Neste capítulo é apresentado o dimensionamento dos sistemas de TEI não ressonante e ressonante. São apresentados e discutidos os resultados obtidos com o auxílio dos *softwares MagNet e Simulink*.

O 6º Capítulo indica as considerações finais, nomeadamente limitações do estudo e sugestões para investigações futuras.

Por fim, apresenta-se a Bibliografia e os Anexos que vão sendo referenciados ao longo do trabalho.

# Capítulo 2

## Enquadramento

### 2.1. Veículos elétricos

Na atualidade observa-se um crescimento exponencial da presença de veículos elétricos no setor automóvel. As marcas com maior presença no mercado já começam a substituir a sua oferta, outrora exclusivamente de veículos equipados com MCI, por VE. A principal razão desta escolha é o uso de combustíveis gerados através de energias renováveis e a ausência de emissões de carbono durante a sua utilização.

#### 2.2.1. A história dos veículos elétricos

É importante realçar que os VE não são uma novidade, visto que estes, há cerca de 100 anos, tinham uma quota de mercado significativa. A história destes veículos, ilustrada na Figura 2.1, pode ser dividida em três grandes fases: o aumento de popularidade (entre 1890 e 1920), o declínio de popularidade (a partir de 1920) e as tentativas de restaurar a popularidade (a partir de 1970). Em 1830, numa fase muito inicial, foram realizados testes com veículos elétricos leves construídos nos Estados Unidos da América (EUA), Reino Unido e Holanda, cerca de 10 anos após os princípios do motor elétrico terem sido demonstrados pela primeira vez. Nos anos seguintes, foram realizadas investigações exaustivas sobre baterias, que conduziram à demonstração da primeira pilha de chumbo ácido em 1859 [3].

Entre 1880 e 1920 assistiu-se a um pico de popularidade dos VE nos EUA, onde estes obtiveram maior sucesso que na Europa. Na altura existiam três tipos de veículos: a vapor, com MCI alimentados a gasolina e elétricos. Nas principais metrópoles o veículo elétrico tinha uma presença em relação ao de combustão interna de dois para um [3].

As principais vantagens dos VE sobre os seus concorrentes eram a inexistência de vibrações, os cheiros e os ruídos associados a veículos com MCI. A autonomia não se apresentava como um problema pois, na altura, grande parte do tráfego era devido à deslocação intraurbana. Com o objetivo de aperfeiçoar a autonomia para que estes veículos fossem também atrativos em ambientes rurais e interurbanos, foram adotadas três grandes medidas: a introdução de sistemas de baterias facilmente substituíveis, a implementação de travagem regenerativa e o desenvolvimento da tecnologia híbrida. Os veículos híbridos combinam o melhor das duas tecnologias, sem ruído na condução em zonas urbanas e sem problemas de autonomia fora das cidades. No entanto, muito

devido ao custo associado, a adoção deste conceito desapareceu até ao início da década de 70 [3].

Em 1912, foi atingido um pico histórico na utilização de VE, seguido de um declínio que teve início na década de 1920. Fatores técnicos e económicos, tais como o aumento de viagens interurbanas, um maior desenvolvimento tecnológico nos veículos de combustão interna, com melhores consumos, entre outros, conduziu ao aumento da adesão aos veículos MCI [3].

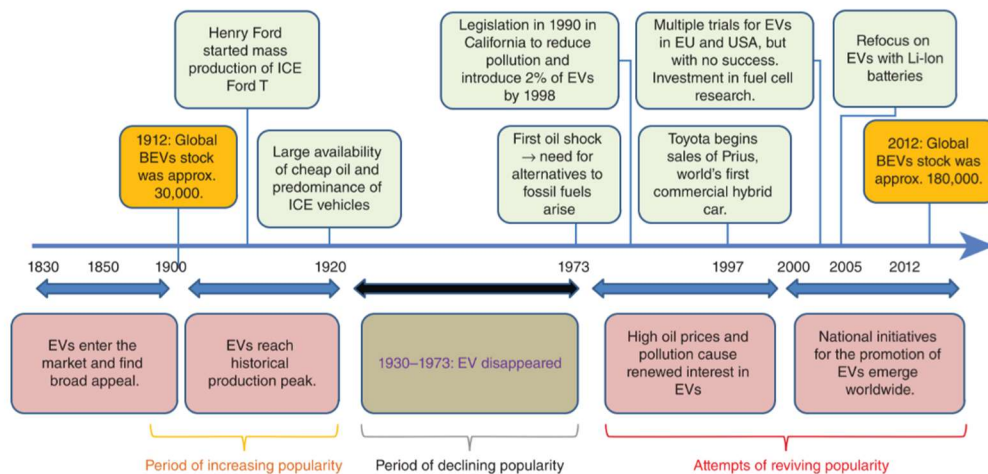


Figura 2.1 Maiores feitos na história dos veículos elétricos [3].

### 2.1.2. Os diferentes tipos de veículos elétricos

Os VE podem ser classificados em várias categorias, dependendo da sua tecnologia e características principais. São apresentados de seguida essas categorias, de acordo com o tipo de motorização e de fornecimento de energia, Figura 2.2.

Os BEV (*Battery Electric Vehicles*) são veículos que apenas dependem de ser alimentados por energia elétrica e não de qualquer motor de combustão interna. São veículos equipados com uma elevada capacidade de armazenamento em baterias, de maneira a fornecer a este uma autonomia aceitável [4].

Os PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*) são caracterizados pela coexistência de um MCI e um motor elétrico auxiliado por baterias, que por sua vez podem ser carregadas através de uma tomada externa. Neste tipo de veículos o objetivo do motor elétrico é auxiliar o MCI com a finalidade de reduzir o seu consumo [4].

Os HEV (*Hybrid Electric Vehicles*) são, tal como os PHEV, movidos através do conjunto de um motor a combustão e um elétrico. A grande diferença entre os dois grupos é que os HEV não podem ser carregados externamente. As baterias são carregadas através do MCI e outras tecnologias como a travagem regenerativa [4].

Os FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicles*) contêm um motor elétrico, que é alimentado através de hidrogênio pressurizado e oxigênio, obtendo-se apenas água como resíduo. De salientar que estes veículos só se podem considerar sustentáveis se a obtenção do hidrogênio não for feita através de gás natural [4].

Por fim, os ER-EV (*Extended-range EV*) são veículos bastante semelhantes aos BEV, no entanto, estão equipados com um motor de combustão complementar que carrega as baterias presentes quando necessário. Ao contrário dos veículos híbridos (PHEV e HEV), o MCI apenas é utilizado para carregar as baterias, visto não ter ligação com as rodas do veículo para tração [4].

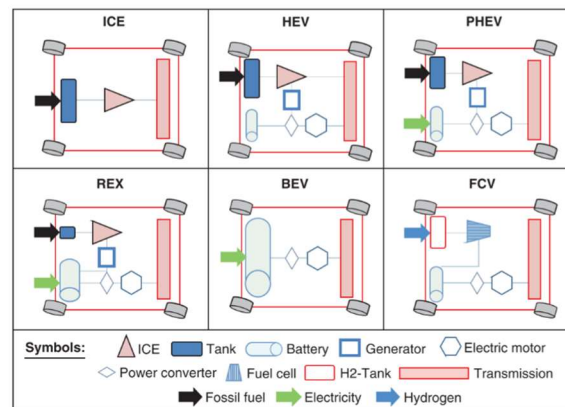


Figura 2.2-Classificação dos veículos elétricos de acordo com a tecnologia motriz [3].

## 2.2. Baterias

A prontidão tecnológica das baterias e o sistema de armazenamento de energia de um VE, são um problema crucial no desenvolvimento e inserção no mercado de VE [5].

Os parâmetros fundamentais na comparação dos diferentes tipos de bateria são a densidade de energia, densidade de potência, ciclo de vida e custo por kWh. Cada bateria é desenhada seguindo um compromisso entre energia e densidade de potência [5]. A Figura 2.3 mostra as gamas da potência específica e da energia específica para as diferentes tecnologias de baterias.

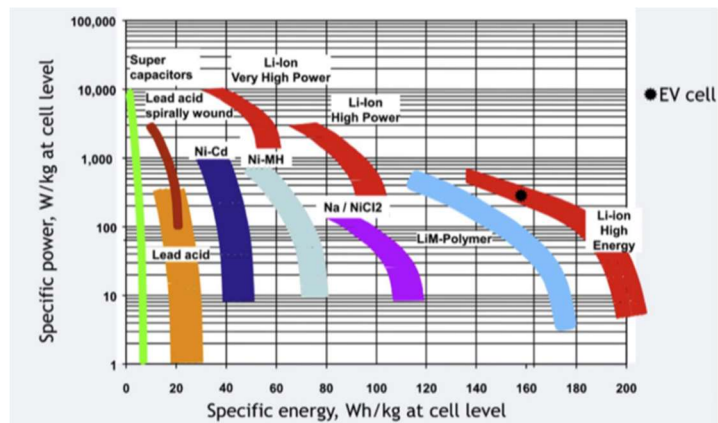


Figura 2.3-Energia e potencia específica das diferentes tecnologias de bateria [5].

### 2.2.1. Bateria de Ácido-Chumbo

Inventada por Gaston Planté em 1859, é um dos sistemas químicos mais antigos que facultam o armazenamento de energia. Ao longo de 160 anos a bateria de ácido-chumbo era utilizada numa panóplia de aplicações. Atualmente ainda encontram uso nos veículos com MCI para fornecer energia ao motor de arranque [6].

A bateria possui uma placa para o elétrodo positivo (dióxido de chumbo) e uma para o negativo (chumbo poroso) que são banhadas por ácido sulfúrico diluído em água pura com uma densidade de aproximadamente 1.28 g/mL. Esse líquido (também conhecido por eletrólito) flui de um lado para o outro entre os separadores dessas placas através de pequenos furos existentes. Este processo cria uma reação química necessária para gerar eletricidade. É importante entender que estes separadores também têm a função de isolar mecanicamente as placas positivas e negativas, para evitar que ocorra um curto-circuito da bateria. No acumulador, o chumbo é o ânodo e o dióxido de chumbo é o cátodo [7].

Os acumuladores têm a vantagem de poderem ser recarregados. Isto é possível devido aos iões móveis que, ao receberem energia elétrica, invertem a reação química de descarga, regenerando os reagentes. As baterias de ácido chumbo não foram desenvolvidas tendo em mente a possibilidade de oferecerem muitos ciclos de descarga, contando com aproximadamente 350 ciclos de vida útil de bateria [7].

De acordo com um estudo de 2003 intitulado “*Getting the Lead Out*”, da *Environmental Defense* e do *Ecology Center* de *Ann Arbor, Michigan*, a totalidade das baterias de todos os veículos em circulação contêm cerca de 2.600.000 toneladas de chumbo. A exposição ao chumbo a longo prazo pode causar danos cerebrais e renais, deficiência auditiva e problemas de aprendizagem em crianças. A indústria automóvel utiliza cerca de 1.000.000 toneladas de chumbo todos os anos, sendo 90% destas dirigidas para as baterias convencionais de chumbo-ácido. Apesar da reciclagem de

chumbo ser comum, estima-se que mais de 40 mil toneladas de chumbo acabam em aterros sanitários todos os anos. De acordo com o *Toxic Release Inventory*, outras 70 mil toneladas são libertadas no processo de mineração e manufatura deste mesmo [8][9].

### **2.2.2. Bateria de Níquel-Cádmio**

As baterias de níquel-cádmio estão tão bem estabelecidas no mercado como as baterias de ácido-chumbo, em termos de maturidade e idade. Baterias com base no níquel têm uma maior densidade de potência e uma densidade de energia ligeiramente maior (50-75 Wh/kg) e um número de ciclos superior ao das de ácido-chumbo (>3500 ciclos) [10].

As baterias de NiCd contêm níquel e cádmio como materiais ativos dos elétrodos positivo e negativo, respetivamente, e a solução alcalina aquosa KOH atua como o eletrólito. Estas baterias são propensas a sofrer o efeito de memória; quando isso acontece, a bateria deixa de ser carregada na sua totalidade. Este efeito acontece quando resíduos de carga na bateria provocam a formação de pequenos blocos de cádmio. Sendo assim, para uma otimização do ciclo de vida desta bateria é aconselhável descarregar totalmente antes do próximo carregamento [10].

Como o cádmio é uma substância altamente tóxica, a venda de baterias NiCd foi proibida a consumidores finais na União Europeia; no entanto, continuam a ser utilizadas nos sistemas em ambiente industrial que beneficiam das características específicas deste tipo de baterias [10].

### **2.2.3. Bateria de Níquel-Hidreto Metálico**

As baterias de Níquel-Hidreto Metálico (Ni-MH) são muito semelhantes às de níquel-cádmio (Ni-Cd), sendo a principal diferença a utilização de hidreto metálico em vez de cádmio. Estas baterias, são constituídas por diversos metais tais como: ferro, níquel, cobalto, manganês e alumínio. Assim, estas apresentam uma enorme vantagem ambiental face às baterias de chumbo e às de níquel-cádmio pelo facto de não conterem metais pesados. Apresentam uma densidade de energia entre 60 e 80 Wh/kg o que não é suficiente para alimentar um BEV. Apesar da grande maioria de veículos elétricos e híbridos utilizarem baterias ião de lítio, alguns modelos atuais ainda utilizam este tipo de tecnologia, tal como o Toyota Highlander. As primeiras gerações de veículos híbridos usavam baterias de níquel-hidreto metálico, contando com o Toyota RAV4, Toyota Prius, Honda Insight, Ford Escape Hybrid, entre outros [5].

#### **2.2.4. Bateria Ião de lítio**

As baterias ião de lítio são uma tecnologia em evolução de muito interesse, contam com uma presença muito forte em dispositivos eletrônicos portáteis, tendo-se tornado rapidamente a escolha predileta para alimentar veículos elétricos.

O lítio é um metal mais leve, tem maior potencial eletroquímico e fornece a maior energia específica por peso. As baterias ião de lítio apresentam elevadas densidades de energia e de potência. Estas são menos afetadas pelo efeito de memória, comparando com outro tipo de baterias. A junção de todas as características referidas, tornam estas baterias as melhores candidatas para propulsionar uma mobilidade sustentável. Longevidade, baixa auto-descarga e capacidade de carregamento rápido são outras vantagens deste tipo de baterias [11].

No entanto, são uma tecnologia cara e consideram-se perigosas por conterem eletrólitos inflamáveis quando danificadas ou carregadas incorretamente. Podem levar a explosões e incêndios. A disponibilidade dos recursos naturais começa a ser também uma preocupação [5].

Os quatro principais componentes de uma célula de ião de lítio são o cátodo, o ânodo, o eletrólito e o separador. Durante a carga, os íons de lítio deslocam-se do cátodo, através do eletrólito, para o ânodo. Quando a bateria entra no processo de descarga, os íons de lítio saem do ânodo para o cátodo, passando através do separador e juntando-se ao óxido de cobalto. Quando tal ocorre, sobra um eletrão por ião de lítio que é captado pelo ânodo de grafite gerando assim energia. As baterias comerciais atuais são designadas consoante o doador de íons de lítio no cátodo, uma vez que este é o principal determinante das propriedades da célula. Vários óxidos metálicos são utilizados para este fim: óxido de lítio cobalto (LCO), óxido de lítio manganês (LMO), fosfato de lítio de ferro (LFP), óxido de lítio níquel cobalto alumínio (NCA) e óxido de lítio níquel manganês cobalto (NMC). Esta variedade de materiais resulta em características significativamente diferentes que se reflete no mercado dos veículos elétricos. A Tesla utiliza baterias NCA em todos os seus modelos, enquanto o tipo predominante de todas as outras marcas é a bateria NMC [12]. Na Figura 2.4 observamos uma comparação resumo entre os vários tipos de baterias ião de lítio, no que diz respeito ao custo, maturidade, energia, potência, segurança, desempenho, durabilidade e materiais utilizados.

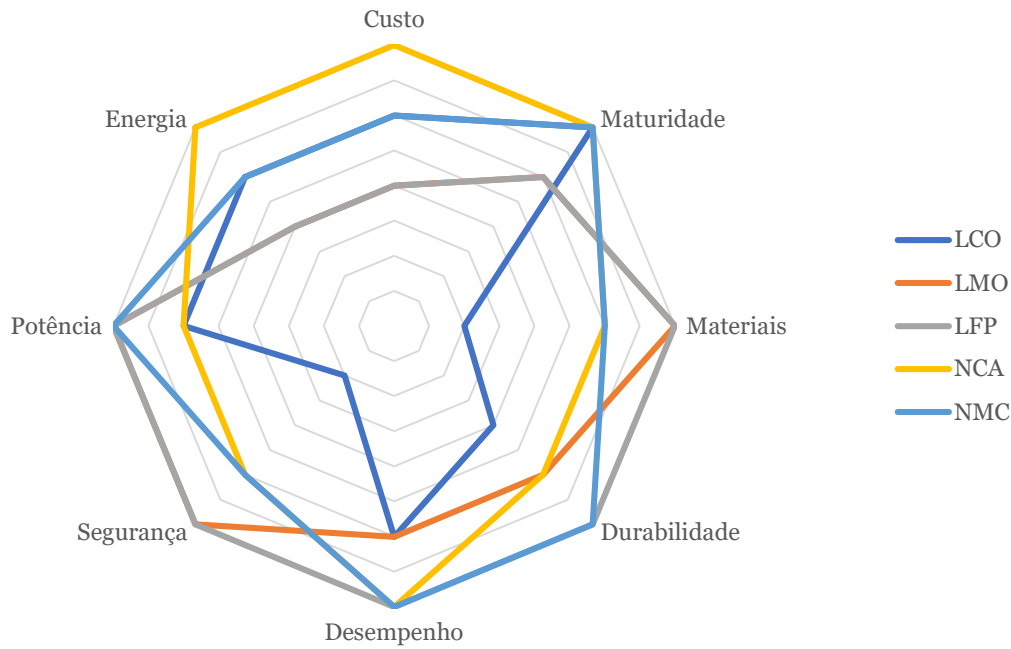


Figura 2.4- Características das diferentes baterias ião de lítio comercializadas [12].

### 2.2.5. Parâmetros das baterias

- Tensão

A tensão teórica obtida aos terminais da célula,  $E^0$ , pode ser determinada a partir da série eletroquímica utilizando valores, equação (2.1):

$$E^0(\text{cátodo}) - E^0(\text{ânodo}) = E^0(\text{célula}) \quad (2.1)$$

A tensão teórica aos terminais da célula é modificada pela equação de Nernst, que tem em conta o estado não normalizado do reagente. O potencial de Nernst altera com o passar do tempo, quer devido à utilização, quer à própria auto-descarga, pela qual a atividade do componente eletro-ativo na célula é modificada. Assim, a tensão nominal é determinada pelo comportamento químico da célula a qualquer momento [13].

A tensão real obtida aos terminais da bateria  $V$  é sempre inferior à teórica, devido à polarização e às perdas na resistência interna da bateria e depende da corrente de carga  $I$  e da resistência da bateria  $R$ . Estes fatores dependem da componente cinética do eletrodo, logo, variam com a temperatura, estado de carga e com a idade das células [13], equação (2.2).

$$V = E^0 - I \times R \quad (2.2)$$

Os valores típicos de tensão variam de 1.2 V para uma bateria Ni/Cd e 3.7 V para uma bateria ião de lítio [13].

- Capacidade nominal

A capacidade nominal de uma bateria é a corrente,  $I$ , que uma bateria pode fornecer durante uma hora. É um parâmetro importante na escolha do tipo de bateria pois é diretamente proporcional à energia armazenada na bateria. A capacidade  $C_{nominal}$  é expressa pela equação (2.3), sendo  $\Delta t$  o tempo de descarga:

$$C_{nominal} = I \times \Delta t \quad (2.3)$$

Para um veículo elétrico as baterias usadas não devem apresentar uma capacidade nominal inferior a 20 ampère-hora [14].

- Energia e potência específicas

Cada bateria é desenhada seguindo um compromisso entre densidade de energia e densidade de potência [5].

A potência específica é definida como a quantidade de potência obtida por unidade de medida de massa da bateria. Por a energia fornecida pela bateria depender mais da carga que alimenta do que a própria bateria, a potência específica apresenta quantidades muito variáveis. A energia específica é definida como a quantidade de energia elétrica armazenada em cada quilograma da bateria, calculando-se através do produto da potência específica pelas horas de serviço [15].

- Densidades de energia e de potência

A densidade de energia é a quantidade de energia, em Wh que a bateria pode armazenar por unidade de volume numa determinada condição de descarga. A densidade de potência é definida como a potência máxima disponível por unidade de massa que a bateria pode fornecer [14].

- Efeito de temperatura

A taxa da reação na célula é dependente da temperatura, de acordo com as teorias da cinética. A resistência interna também varia com a temperatura, sendo que temperaturas baixas provocam uma maior resistência interna. No entanto, se a temperatura for muito baixa, o eletrólito pode congelar dando uma tensão mais baixa, uma vez que o movimento

iônico é dificultado. A temperaturas elevadas, os elementos químicos podem decompor-se, ou pode haver energia suficiente disponível para desencadear reações indesejáveis, reduzindo a capacidade. A taxa de diminuição da tensão com descarga crescente será também mais elevada a temperaturas mais baixas [13].

- Estado de carga (SOC) e profundidade de descarga (DOD)

A determinação do SOC de uma bateria é uma tarefa complexa, dependendo do tipo de bateria e da aplicação em que esta está a ser utilizada. A estimativa precisa do estado de carga é muito importante, pois ajuda a melhorar o desempenho e a fiabilidade do sistema, podendo ainda prolongar a vida útil da bateria. Uma estimativa precisa do estado de carga previne as baterias de serem carregadas ou descarregadas para valores indesejáveis, que podem causar danos irreversíveis na sua estrutura interna. Resumidamente, o estado de carga apresenta, numa forma percentual, a quantidade de energia armazenada na bateria [16]. A equação (2.4) permite calcular o estado de carga da bateria *SOC* em função da relação percentual da carga disponível na bateria  $C_{disponivel}$  pela capacidade nominal da bateria  $C_{nominal}$ .

$$SOC = \frac{C_{disponivel}}{C_{nominal}} \times 100\% \quad (2.4)$$

A profundidade de descarga *DOD* é o parâmetro complementar do estado de carga, também calculado em valores percentuais, relacionando a carga gasta/libertada pela bateria  $C_{libertada}$  com capacidade nominal da bateria, equação (2.5) [16].

$$DOD = \frac{C_{libertada}}{C_{nominal}} \times 100\% \quad (2.5)$$

- Vida útil e SOH

A duração do ciclo de vida de uma bateria recarregável é definida como o número de ciclos de carga/descarga que esta pode realizar até à sua capacidade chegar aos 80% do que era originalmente. As baterias podem ter uma vida útil curta devido a diversos fatores para além do número de ciclos de carga, tais como a sobrecarga e a descarga profunda, estarem sujeitas a temperaturas extremas, a choques ou vibrações, entre outras [13].

O estado de saúde da bateria (*SOH*) é uma estimativa da vida útil da bateria representada em valores percentuais, calculada através do quociente entre a capacidade máxima da bateria  $C_{max}$  e a capacidade nominal da mesma [16]:

$$SOH = \frac{C_{max}}{C_{nominal}} \times 100\% \quad (2.6)$$

- Taxa de retenção ou auto-descarga

Na maioria das baterias, a taxa de auto-descarga é baixa. Normalmente as baterias são recarregadas periodicamente ou mantidas em “float” para permanecerem num estado de rápida disponibilidade. A maioria das baterias alcalinas pode ser armazenada por longos períodos, mesmo estando descarregada, sem causar danos à mesma, o que permite o recarregamento somente quando necessário. No entanto, as baterias de chumbo-ácido não devem ser armazenadas descarregadas devido à flutuação das placas, o que é prejudicial ao seu desempenho. A taxa de retenção de capacidade diminui com o aumento do tempo de armazenamento. De todo o tipo de baterias, as de Li-ion são as que apresentam as melhores características de retenção (2% por mês a temperatura ambiente) [15].

### **2.3. Métodos de carregamento de baterias**

Devido às altas densidades de energia e de potência, ciclo de vida longo e baixa taxa de auto-descarga, as baterias ião de lítio tornaram-se uma das tecnologias mais populares em veículos elétricos, sendo estes sistemas constituídos por centenas a milhares de células em série ou em paralelo. O desenvolvimento de um método de carga ideal para um sistema destes está estreitamente associado ao SOH de cada célula do sistema, o que apresenta desafios consideráveis. No entanto, a ampla utilização destas baterias tem sido grandemente restringida pelos métodos de carregamento existentes [17].

Métodos de carregamento simples consistem em carregamento em corrente constante (CC) ou em tensão constante (TC), ambos ineficientes e incapazes de satisfazer a procura crescente da indústria. Este tipo de métodos pode ser definido como um esquema de carregamento onde apenas um parâmetro, corrente ou tensão, permanece constante durante todo o processo de carga. Este tipo de método já não é visto em sistemas de gestão de baterias mais recentes. Assim, várias tentativas foram realizadas para desenvolver métodos de carregamento mais eficientes [17].

### **2.3.1 Método de carregamento com corrente constante**

A carga a corrente constante requer a necessidade de manter uma corrente constante durante todo o processo, que normalmente se baseia numa previsão precisa do SOC. Este método tem uma corrente delimitada para evitar sobre corrente numa fase inicial do carregamento. Este método é amplamente utilizado para carregar baterias de níquel-cádmio. O seu principal problema é a acumulação de erros no algoritmo de estimativa do SOC que podem levar a uma sobrecarga ou subcarga resultando numa redução do ciclo de vida da bateria [17].

O método padrão de carregamento com corrente constante é caracterizado por uma corrente elevada, normalmente entre 0,2C a 1C, tornando-o muito mais rápido e fácil de operar. Contudo, à medida que o processo de carga continua, o nível aceitável de corrente diminui gradualmente. Se a corrente de carga elevada permanecer inalterada numa fase mais posterior da carga, os materiais na placa do eletrodo serão separados, causando assim perdas na capacidade da bateria e afetando a sua vida útil [17].

### **2.3.2. Método de carregamento com tensão constante**

O método de carregamento com tensão constante exige que a tensão de alimentação se mantenha constante durante todo o processo de carga. Durante o processo, a tensão terminal da bateria aumenta gradualmente, o que provoca a diminuição gradual da corrente de carga. O processo termina quando é atingido um limite inferior ao predefinido, o que pode evitar a sobrecarga [17].

Este método permite ajustar a corrente de carga com base no SOC e um nível de tensão constante devidamente definido pode assegurar que as baterias ião de lítio são totalmente carregadas. No entanto, existem desvantagens, nomeadamente os possíveis danos causados devido a uma corrente mais elevada no período inicial de carga com SOC mais baixos. A corrente começa a diminuir à medida que o valor de SOC aumenta o que se traduz numa velocidade de carregamento mais reduzida na fase final [17].

### **2.3.3. Método de carregamento a corrente/tensão constante**

Para aproveitar plenamente as vantagens de ambos os métodos referidos anteriormente, e superando os seus inconvenientes, é usado o método de carga com corrente e tensão constante derivado dos métodos simples anteriormente descritos. Este é o mais comum no carregamento de baterias ião de lítio em VE [17].

É caracterizado por uma corrente predefinida para carregamento na fase CC, quando a tensão das baterias carregadas sobe para um nível predefinido, evoluindo para o

carregamento em tensão contínua. Durante esta fase, quando a corrente de carga é reduzida à corrente de corte, todo o processo de carga é completado, Figura 2.5 [17].

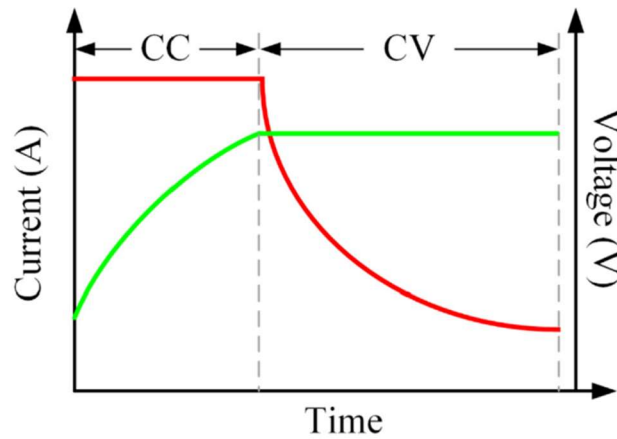


Figura 2.5-Método de corrente/tensão contínua [17].

Outro método de carga popular é a adição de uma fase de carga lenta antes da fase CC e uma fase de fim de carga após a fase CV. Consiste por isso em quatro fases onde a primeira, denominada de *trickle charge*, só é ativa quando a bateria está profundamente descarregada. A última fase, de fim de carga, é ativada quando a corrente de carga na fase de CV cai para um limiar predefinido. Esta última fase é semelhante à primeira que completa a carga com uma corrente significativamente reduzida, resultando num tempo de carregamento mais longo. Este método prolonga significativamente a vida útil da bateria [17].

#### 2.3.4. Método de carregamento *multi-fase*

De forma a combater os elevados tempos de carregamentos dos métodos anteriormente descritos, foi desenvolvido o método de carregamento *multi-fase*, que consiste em múltiplas fases de carregamento com diferentes níveis de corrente, Figura 2.6. O critério mais utilizado para alternar entre as fases de carregamento é um limite definido de tensão da célula, que reduz a corrente e torna as leituras da tensão mais realísticas, uma vez que a queda de tensão através da resistência interna da célula é menor [18]. Por vezes são escolhidos algoritmos de otimização para encontrar as melhores fases e os níveis de carregamento, baseados em abordagens diferentes, como o algoritmo PSO ou controladores *fuzzy* [19].

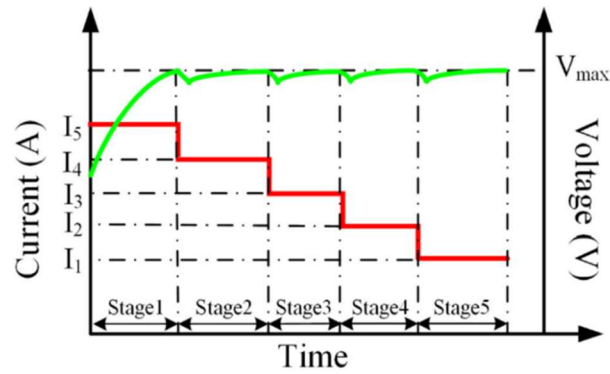


Figura 2.6-Método de carregamento *multi-stage* [17].

### 2.3.5. Método de carregamento por pulso

O carregamento por pulso, Figura 2.7, pode ser dividido em dois grupos: carregamento por pulso de corrente e carregamento por pulso de tensão. Pode por isso ser considerado como um carregamento CC ou CV descontínuo, para carregamento por pulso de corrente ou por pulso de tensão respetivamente. Este método foi primeiramente utilizado no carregamento rápido de baterias de chumbo-ácido e depois explorado para carregar baterias ião de lítio. A principal característica do carregamento por impulso é eliminar ou reduzir a tensão de polarização para permitir uma corrente aceitável no ciclo seguinte mais elevada do que nos outros métodos. Isto tornará a corrente média de carga mais elevada do que a de outros métodos de carregamento para reduzir o tempo de carregamento [17].

O método de carregamento por pulso de corrente permite a redução da tensão de polarização dando tempo de repouso no processo de carga para equilibrar a concentração iónica e assegurar que o estado interno da bateria tende a ser um estado de equilíbrio, o que ajuda a aumentar a aceitação da carga ao mesmo tempo que reduz o tempo de carga [17].

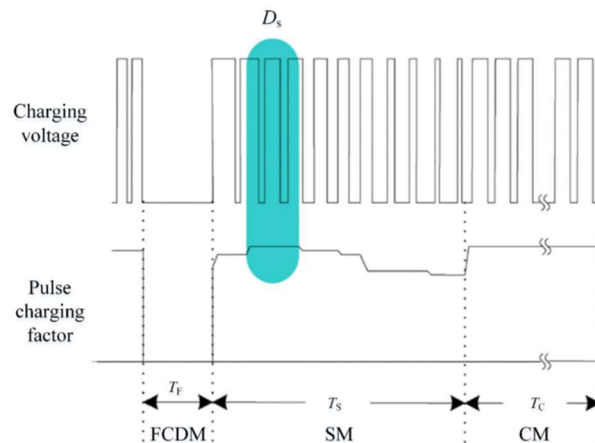


Figura 2.7-Diagrama temporal do método de carregamento por pulso [17].

É importante fazer uma comparação entre os diversos métodos de carregamento (Figura 2.8). De todos os métodos aqui referidos, o método *multi-stage* é o que apresenta melhor relação entre eficiência, simplicidade de controlo e tempo de carregamento; já o método de carregamento por pulso é o pior em termos de complexidade de controlo e implementação [18].

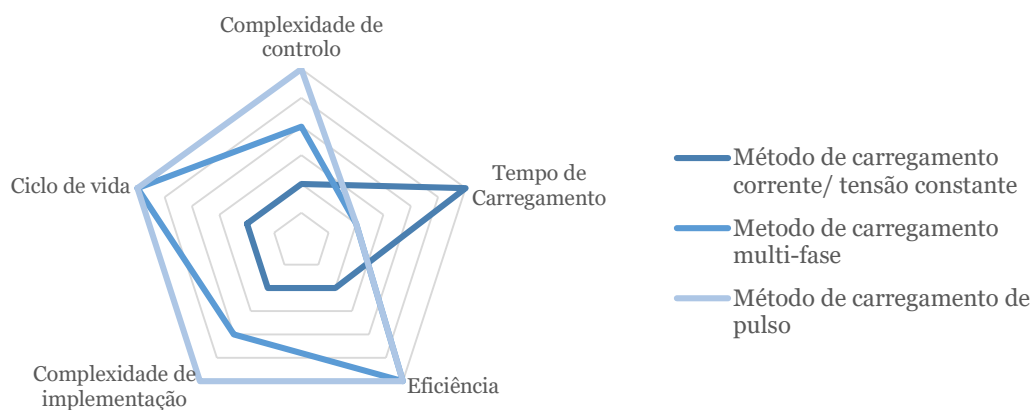


Figura 2.8-Comparação entre os métodos de carregamento. Adaptado de [18].

## 2.4. Modos de carregamento de veículos elétricos

A norma internacional IEC 61851-1 “*Electric vehicle conductive charging system*” define quatro modos de carregamento. Estes diferem entre si pelos diferentes parâmetros, como a segurança, tempo de carregamento entre outros.

### 2.4.1. Modo 1

O modo 1 é o método de ligação de um VE a uma tomada padrão de uma rede de alimentação de corrente alternada (CA), utilizando um cabo e ficha padrão, sem qualquer equipamento adicional [20].

Os valores nominais de corrente e de tensão não devem exceder os 16 A e 250 V para um sistema monofásico e 16 A e 480 V para uma instalação trifásica, de acordo com a norma internacional já acima mencionada. Devido a estas limitações, o tempo de carregamento pode demorar várias horas [20].

O modo 1 é o mais simples dos quatro, mas como não existe um circuito ou equipamento dedicado para a carga do veículo apresenta alguns riscos. Esta modalidade é proibida nos EUA [20].

### **2.4.2. Modo 2**

O modo 2 é caracterizado pela existência de um sistema de controlo e proteção integrado no cabo, entre a tomada e o veículo elétrico. Os valores nominais de corrente e de tensão não devem exceder os 32 A e 250 V numa instalação monofásica e 32 A e 480 V numa instalação trifásica [20].

Este modo está confinado às instalações domésticas e, tal como no modo 1, é utilizada uma tomada padrão [20].

### **2.4.3. Modo 3**

No modo 3, os veículos elétricos são carregados com equipamento específico, através de uma estação de carregamento permanentemente ligada a uma rede de alimentação CA e integrando funções de proteção e controlo. Como este modo utiliza um carregador dedicado, a gama de potências é maior, entre 3.7 kW e 22 kW, o que permite um carregamento muito mais rápido em relação aos dois modos definidos anteriormente [20].

Devido à utilização de um cabo específico, é possível monitorizar diversos parâmetros durante o carregamento tais como:

- Verificação de que o VE está corretamente ligado ao equipamento de alimentação;
- Verificação contínua da integridade do condutor de proteção;
- Transferência de informação acerca da corrente máxima permitida.

Este modo é aconselhado devido às inúmeras vantagens que proporciona, como por exemplo a utilização de um circuito dedicado e independente que elimina o risco de ligação a uma instalação não conforme, garantindo assim a segurança dos bens e das pessoas. Este modo permite também uma melhor gestão e controlo do período de carregamento, o que garante um melhor ciclo de vida para a bateria [20].

### **2.4.4. Modo 4**

No modo 4, o carregamento é feito através de equipamento de alimentação CC. A estação de carregamento pode estar ligada a uma rede CA com retificador. A estação fornece corrente contínua diretamente à bateria contornando o carregador de bordo. É o modo de carregamento mais rápido, onde a potência é superior a 24 kW [20].

Neste modo, a comunicação digital entre o VE e o equipamento de alimentação é obrigatória e deve cumprir os requisitos descritos na norma IEC 61851-24 [20].

A Tabela 2.1 mostra os valores de potência de carregamento, tipo de alimentação, tempo de carregamento e SOC em 30 minutos para os diferentes modos de carregamento.

Tabela 2.1-Cenários de carregamento com valores típicos para a taxa de entrega da estação de carregamento, tempo de carregamento e modo de carregamento. 1f- monofásico; 3f- trifásico. Adaptado de [20].

	Carregamento CA					Carregamento CC		
<b>Potência (kW)</b>	2-3 (1f)	3-7 (1f)	7-4 (1f)	11 (3f)	22 (3f)	24 (3f)	50 (3f)	100-350 (3f)
<b>SOC (%) em 30 min</b>	3	5	7	15	20	25	50	100
<b>Tempo (h) até SOC 100%</b>	18	12	7	4	2,5	2	1	10-20m
<b>Modo</b>	1 & 2	3			4			

## Capítulo 3

### Transferência de energia sem fios estática

Em março de 2022 a *WiTricity*, juntamente com a *Qualtrics*, realizou um inquérito a 1053 adultos americanos proprietários de VE ou que planeavam adquirir um VE dentro dos próximos dois anos. O grupo da amostra incluía 512 proprietários de VE e 541 pessoas que planeavam comprar o seu primeiro VE. O inquérito concluiu que quase todos os inquiridos estavam interessados em VE com capacidade de carregamento sem fios, com 96% indicando que era apelativo e 71% afirmando que era extremamente apelativo. As gerações mais novas demonstram ainda um maior interesse, com percentagens a atingir os 98% [21].

O carregamento sem fios é apelativo para a maioria dos compradores de VE, com um apelo particularmente elevado para aqueles que não possuem atualmente um. Isto sugere que o inconveniente do carregamento pode ser um obstáculo à adoção de VE. Num outro estudo anterior, a opção de carregamento sem fios aumentou a probabilidade de compra de um VE até 68% para aqueles que não possuíam na altura o veículo. A conveniência foi o principal benefício apontado pelos proprietários de veículos não elétricos, especificamente a falta de necessidade de ligar ou desligar o veículo da tomada. Por outro lado, os atuais proprietários de VE, como primeiros utilizadores da tecnologia, tendem a achar o carregamento sem fios apelativo por ser a tecnologia mais recente, Figura 3.1 [21].

Quando questionados, o carregamento sem fios é um fator de decisão mais importante do que, por exemplo, a capacidade de condução autónoma, assistência ao estacionamento e desempenho do veículo, Figura 3.2 [21].

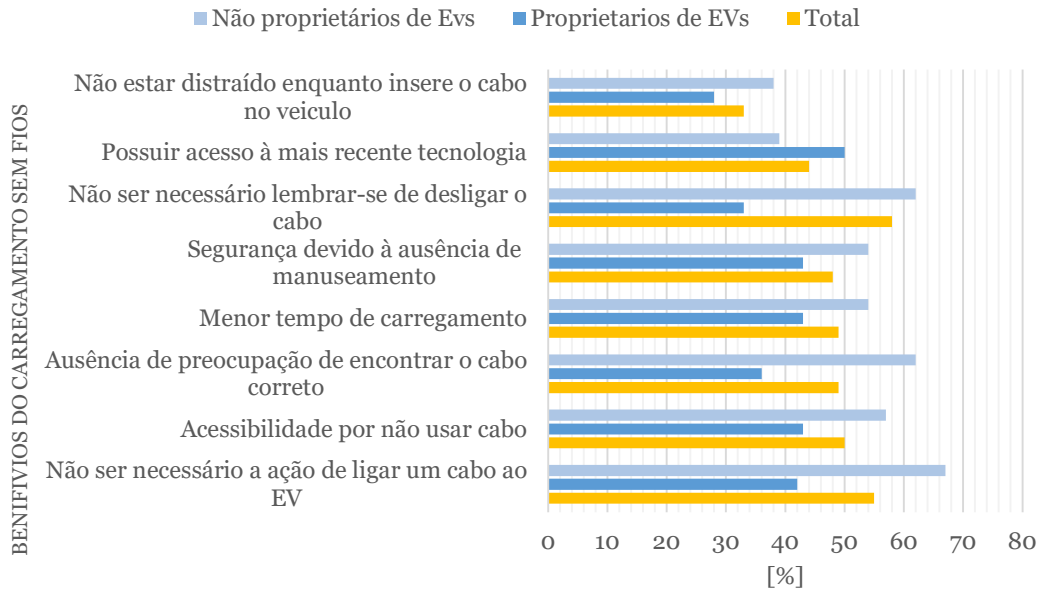


Figura 3.1-Atratividade do carregamento sem fios, adaptado de [21].

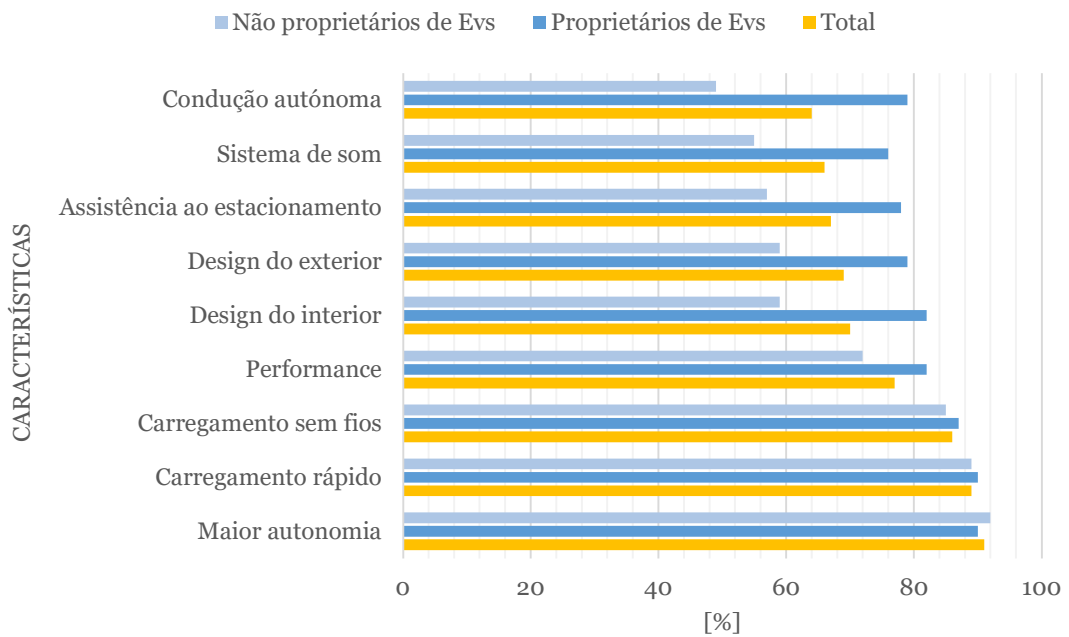


Figura 3.2-Interesse nas determinadas características de um VE, adaptado de [21].

O carregamento sem fios, para além de ser mais prático devido ao facto de ser um sistema completamente autónomo, elimina também os riscos associados ao carregamento tradicional no ponto de vista do utilizador, como contactos diretos com o cabo ao conectá-lo ao veículo, ou tropeçar no próprio cabo. Há também uma salvaguarda da infraestrutura de danos devido ao clima e atos de vandalismo. É uma tecnologia interessante para os veículos em trânsito urbano que envolve bastantes paragens, tais como os autocarros. Implementando um posto de carregamento sem fios nas paragens é possível carregar enquanto este recolhe/larga passageiros, o que, se repetindo ao longo

do percurso e ao longo do dia, permite aumentar significativamente a autonomia [1], [22].

A pesquisa e desenvolvimento na área do carregamento sem fios é focada, maioritariamente, em três áreas: no dimensionamento da bobina, nas topologias de compensação e nos conversores eletrônicos de potência [22].

### **3.1. Tecnologias de transferência de energia sem fios**

#### **3.1.1. Transferência de energia indutiva**

A transferência de energia indutiva (TEI) é um método de transferência de energia entre uma bobina primária (por vezes denominada de transmissora) e uma bobina secundária (por vezes denominada de recetora), sem necessidade de contacto físico. Este método utiliza os princípios eletromagnéticos subjacentes ao funcionamento do transformador, que se baseiam no conceito de indução mútua entre as duas bobinas [23].

Neste método, a bobina primária é colocada sobre a placa de carga ou pista, e a bobina secundária é embutida no chassi do VE. A bobina primária é alimentada por um conversor de alta frequência, que gera uma CA de alta frequência. Esta corrente fará surgir em torno de si um campo magnético variável, que atingirá a bobina secundária e induzirá uma tensão aos seus terminais através de indução eletromagnética. Esta tensão induzida é depois retificada para CC e utilizada para carregar a bateria do veículo [23].

A TEI é considerada um dos métodos de carregamento sem fios mais populares e é amplamente aceite, sendo desenvolvida para utilização em veículos como o Tesla Model 3. Permite o carregamento à distância de alguns centímetros, distância essa que pode ser aumentada com tecnologia de compensação eletrónica de potência adequada [23].

Contudo, a eficiência deste método é afetada por vários fatores, tais como a baixa frequência de funcionamento (até 100 kHz), as perdas no núcleo de ferrite, e a distância entre as bobinas. Estes fatores resultam numa maior dimensão do sistema e em níveis de eficiência mais baixos. Para melhorar a eficiência da transferência de energia indutiva, podem ser empregues topologias e técnicas de compensação adequadas, blindagem adequada e uso de materiais específicos. A investigação do projeto OLEV concluiu que utilizando uma frequência de 20 kHz, o rendimento na transferência de energia é de 83% para um nível de potência de 60 kW com uma distância entre bobinas de 20 cm e tolerância lateral de 24 cm [23].

O método de TEI proporciona um declínio de eficiência quando a distância entre as bobinas aumenta, tendo sido então desenvolvidos novos conceitos de sistemas de

carregamento totalmente sem fios para superar as limitações da TEI e tornar o processo de carregamento mais conveniente para os utilizadores. Um desses métodos é a transferência de energia indutiva acoplada (TEAI), que utiliza condensadores ligados às bobinas primárias e secundárias para compensar o fluxo de fuga causado por um aumento da distância entre bobinas. Ambos os circuitos LC na TEAI funcionam em fenómeno de ressonância, permitindo a transferência eficiente de energia à frequência de ressonância [24].

A Figura 3.3 mostra um esquema de um sistema típico de carregamento sem fios

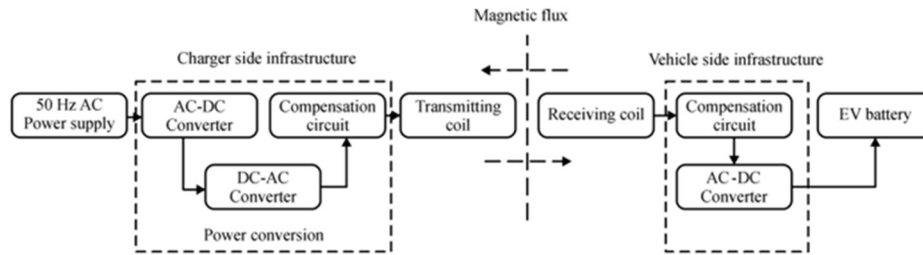


Figura 3.3-Esquema de um sistema típico de carregamento sem fios [25].

### 3.1.2. Transferência de energia indutiva magnética ressonante

Num sistema de acoplamento ressonante pode ser criado um regime de "forte acoplamento" (quantificado pelo fator de acoplamento  $k$ ) a fim de transferir energia de forma eficaz. Um sistema de transferência de energia sem fios de médio alcance baseado na teoria de forte acoplamento é altamente eficiente e minimiza interferências e perdas. O conceito do acoplamento ressonante é o de trocar energia eficientemente, criando um forte acoplamento magnético entre dois objetos que estão sintonizados com a mesma frequência de ressonância. Isto ocorre através dos campos magnéticos oscilantes das bobinas portadoras de corrente. O princípio geral de funcionamento é que quando uma bobina primária é alimentada com energia de entrada, ela oscila para produzir um campo magnético que transfere energia entre o campo magnético induzido no indutor e o campo elétrico através do condensador na frequência de funcionamento. No entanto, devido a perdas resistivas e de radiação, esta oscilação desaparece a uma taxa determinada pelo fator de qualidade,  $Q$  [26].

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.1)$$

Quando a bobina secundária está sintonizada à mesma frequência, absorve mais energia em vez de a perder em cada ciclo.

### **3.1.3. Transferência de energia capacitiva**

O acoplamento capacitivo recorre a um campo elétrico para transferir energia. É criado um campo elétrico entre o ânodo e o cátodo, que desenvolve uma capacitância para transferir energia, conhecida como indução eletrostática. Um acoplamento eficaz pode ser conseguido através da inserção de um meio dielétrico entre as placas primária e secundária, através da redução da área das placas ou através da expansão da distância entre estas [23].

Um dos principais benefícios da transferência de energia capacitiva (TEC) é o seu custo relativamente baixo e tamanho compacto, especialmente quando se lida com níveis de potência mais baixos. No entanto, pode não ser a melhor escolha para aplicações de alta potência. Devido a esta limitação, a maioria das soluções atuais de TEC tendem a concentrar-se em aplicações de baixa potência, tais como dispositivos eletrónicos portáteis [27].

## **3.2. Dimensionamento das Bobinas**

### **3.2.1. Enrolamento**

A bobina, um componente crucial dos sistemas de TEI, possibilita a transformação de energia entre as suas formas elétrica e magnética, permitindo a ocorrência de TEI e determinando a quantidade de energia transferida, bem como a eficiência do sistema. No domínio da tecnologia de carregamento sem fios, as bobinas são tipicamente divididas em duas categorias: sistemas de quatro bobinas e de duas bobinas. O sistema de quatro bobinas tem a vantagem adicional de ter dois graus de liberdade, o que permite fazer ajustes na impedância de entrada do sistema e na resistência de carga equivalente. Isto é conseguido através do posicionamento e ligação adequados entre os dois pares de bobinas. Estes sistemas são adequados para aplicações em que a distância de transmissão é relativamente longa. Em contraste, os sistemas de duas bobinas são mais adequados para distâncias de transmissão mais curtas, tendo-se constatado que proporcionam um desempenho superior. A distinção entre aplicações de curto e longo alcance baseia-se na relação entre a distância de transmissão e a dimensão da bobina, sendo de curto alcance quando a primeira é mais pequena e de longo alcance quando a segunda é maior. No caso de veículos elétricos, as distâncias de transmissão variam normalmente entre 100 mm e 300 mm e a dimensão da bobina é sempre maior do que esta gama, daí que seja preferível um sistema de duas bobinas [22].

Várias empresas, como a GM, *Qualcomm*, *WiTricity*, *Daimler*, entre outras, estão a desenvolver sistemas de carregamento sem fios para encontrar e resolver os problemas

relacionados com o baixo fator de acoplamento. Os principais fatores, tais como dimensões inadequadas, trajetória de relutância assimétrica, grande fluxo de fuga, parâmetros de sintonização inadequados, entre outros, afetam a eficiência da transferência de energia entre o par de bobinas do sistema. Entre os fatores acima referidos, os primeiros e mais importantes que afetam a transferência de energia são as dimensões inadequadas e os parâmetros de sintonização impróprios [28].

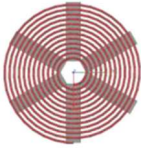
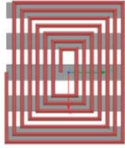
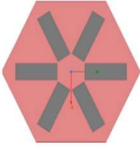

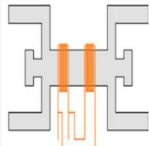



As bobinas de forma quadrada e retangular são uma boa escolha devido à sua capacidade de alinhar bem nas suas extremidades. No entanto, é importante salientar que os vértices podem gerar correntes de Foucault, o que por sua vez aumenta a indutância, impedância e o aparecimento de pontos quentes. Estas formas de bobina não são ideais para aplicações de alta potência [1].

Para bobinas de forma hexagonal, a transferência máxima de potência ocorre na posição central das bobinas, com a potência a diminuir significativamente nos vértices. As bobinas circulares são conhecidas pelo seu bom acoplamento entre as de diferentes formas de bobina, mas a sua eficiência de transferência diminui significativamente com o desalinhamento. Para uma ótima eficiência, o raio exterior da bobina primária deve ser o maior possível e tanto as bobinas primárias como as secundárias devem ter o mesmo tamanho [1].

Num esforço para resolver estas questões, foi proposta uma bobina de forma oval, pois permite mais desalinhamentos. No entanto, este desenho foi considerado inadequado para aplicações de alta potência, tais como carregamento de veículos elétricos, uma vez que não é tão eficiente como as bobinas de forma circular na transferência de alta potência. Estudos recentes introduziram novas topologias de bobinas, tais como a dupla D (DD) ou a dupla D em quadratura (DDQ) para melhorar o rendimento do sistema. Estes dimensionamentos envolvem o ajuste das formas das bobinas primárias para canalizar o fluxo magnético em direção à bobina secundária instalada no veículo [1].

A Tabela 3.1 compara as diferentes topologias de bobinas nos seus diferentes parâmetros.

Tabela 3.1- Comparação das diferentes topologias de bobinas, adaptado de [29].

	<b>Circular</b>	<b>Retangular</b>	<b>Hexagonal</b>	<b>Duplo D</b>
				
<b>Fluxo magnético</b>	Unilateral	Unilateral	Unilateral	Unilateral
<b>Trajétória do fluxo</b>	$\frac{1}{4}$ Diâmetro	$\approx$ Diâmetro	Circular/Retangular	$\frac{1}{2}$ Diâmetro
<b>Fluxo de fuga</b>	Alto	Médio	Baixo	Muito baixo
<b>Tolerância a desalinhamento</b>	Baixa	Média	Alta	Média
<b>Polarização</b>	Não polarizado	Não polarizado	Não polarizado	Polarizado
<b>Interoperabilidade</b>	Muito baixa	Muito baixa	Alta	Não interoperável com não polarizados
<b>Lado de operação</b>	Primário	Ambos	Secundário	Primário
<b>Impacto da blindagem no <math>k</math></b>	Baixo	Médio	Baixo	Alto
<b>Complexidade</b>	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
<b>Zona de carga</b>	Pequena	Pequena	Pouco maior	Média
	<b>Flux Pipe</b>	<b>Duplo D em quadratura</b>	<b>Bipolar</b>	<b>Quadruplo</b>
				
<b>Fluxo magnético</b>	Bilateral	Bilateral	Bilateral	Bilateral
<b>Trajétória do fluxo</b>	$\frac{1}{4}$ Diâmetro em todas as direções	2x fluxo circular	2x fluxo circular	-
<b>Fluxo de fuga</b>	Médio	Muito baixo	Muito baixo	Baixo
<b>Tolerância a desalinhamento</b>	Baixa	Muito alta	Média	Muito alta
<b>Polarização</b>	Polarizado	Polarizado	Polarizado	Polarizado
<b>Interoperabilidade</b>	Baixa	Alta	Alta	Alta
<b>Lado de operação</b>	Ambos	Secundário	Secundário	Ambos
<b>Impacto da blindagem em <math>k</math></b>	Alto	Alto	Alto	Alto
<b>Complexidade</b>	Média	Alta	Alta	Alta
<b>Zona de carga</b>	Média	Grande	Grande	Grande

### 3.2.2. Núcleo ferromagnético

Para além da forma da bobina em si, é também importante salientar o papel dos restantes componentes da placa primária. A utilização de um núcleo de ferrite em sistemas de bobinas é uma abordagem comum, uma vez que ajuda a direcionar o fluxo magnético e oferece proteção magnética. Núcleos de ferrite com alta permeabilidade podem aumentar o fator de acoplamento, proporcionando um “caminho” com baixa relutância para o fluxo magnético fluir. Algumas formas populares de núcleos de ferrite incluem núcleo quadrado, retangular, núcleo em U, núcleo em E, núcleo em H, núcleo em I e núcleo em S. O material isolante, normalmente alumínio, ajuda a restringir o campo magnético fora da zona de operação desejada de forma a proteger os seres humanos, sendo utilizado no enrolamento o fio *litz* pois apresenta perdas mínimas em comparação com o fio de cobre tradicional [1], [30].

### 3.3. Filtro LC

Um filtro LC, Figura 3.4, é composto por um condensador e uma bobina, ligados em série ou em paralelo, apresentando uma capacidade oscilatória que permite dar resposta a sinais oscilatórios, logo pode ser considerado um circuito de ressonância.

Inicialmente é aplicada uma tensão aos terminais do condensador até este estar carregado. De seguida, no ciclo de descarga, uma corrente percorrerá a bobina. A corrente na bobina irá então gerar um campo magnético que se opõe à corrente e age de forma a tornar o processo de descarga do condensador mais lento. À medida que a corrente do condensador vai diminuindo também o campo elétrico diminui, o que resulta numa variação do campo magnético na bobina, provocando a indução de uma corrente contrária à corrente inicial. Quando o campo magnético se extingue o condensador está carregado novamente e irá iniciar-se um ciclo novo. Nos terminais tanto do condensador como da bobina vai estar presente um sinal alternado a uma frequência característica, denominada de frequência de ressonância [15].

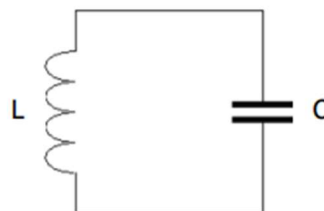


Figura 3.4-Filtro LC [15].

Os valores de indutância e da capacitância deste filtro interferem diretamente na frequência de ressonância, e cada valor dessas impedâncias fazem com que a oscilação do circuito seja diferente. A frequência de ressonância,  $f_{res}$  pode ser calculada através da equação (3.2) [15].

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

### 3.4. Topologias de compensação

Com a introdução de distâncias cada vez maiores entre as duas bobinas pode resultar num enfraquecimento do fator de acoplamento. Para contrariar isto, o circuito é operado a uma frequência de ressonância após a introdução de condensadores do lado primário e secundário do sistema com intuito de aumentar a quantidade de energia entregue à carga. Estudos demonstraram que a compensação da bobina primária pode reduzir a potência nominal do sistema TEAI, enquanto a compensação da bobina secundária pode melhorar o desempenho. O sistema ressonante opera num ângulo de fase zero entre a corrente e a tensão. A combinação de ligações em série e paralelo de condensadores para compensação em ambos os lados resulta em quatro topologias distintas [24]:

- Série-série (SS): Ambos os condensadores são ligados em série com as bobinas primária e secundária, Figura 3.5 (a);
- Série-Paralelo (SP): Um condensador é ligado em série com a bobina primária enquanto o outro é ligado em paralelo com a bobina secundária, Figura 3.5 (b);
- Paralelo-Série (PS): Um condensador é ligado em paralelo com a bobina primária enquanto o outro é ligado em série com a bobina secundária, Figura 3.5 (c);
- Paralelo-Paralelo (PP): Ambos os condensadores são ligados em paralelo com as bobinas primária e secundária, Figura 3.5 (d).

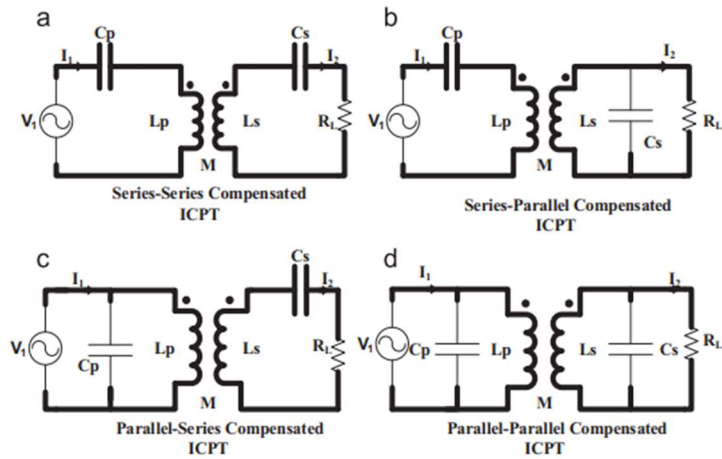


Figura 3.5-Topologias de compensação: (a) SS, (b) SP, (c) PS, (d) PP [24].

Em suma, as topologias SS e SP são as mais economicamente viáveis para uma elevada transferência de energia. A Figura 3.6 mostra a comparação de alguns parâmetros em cada uma das topologias de compensação. Na Tabela 3.2 pode-se observar que a capacidade do condensador no primário  $C_p$  nas topologias PS e PP depende da condição de carga, enquanto nas topologias SS e SP não. Isto sugere que as topologias SS e SP são mais adequadas para cargas variáveis visto que a ressonância é garantida. Aliado ao facto de os VE utilizarem baterias ião de lítio com duas fases de carga, é particularmente vantajoso utilizar a topologia SS, uma vez que atua como fonte de tensão constante [22], [25].

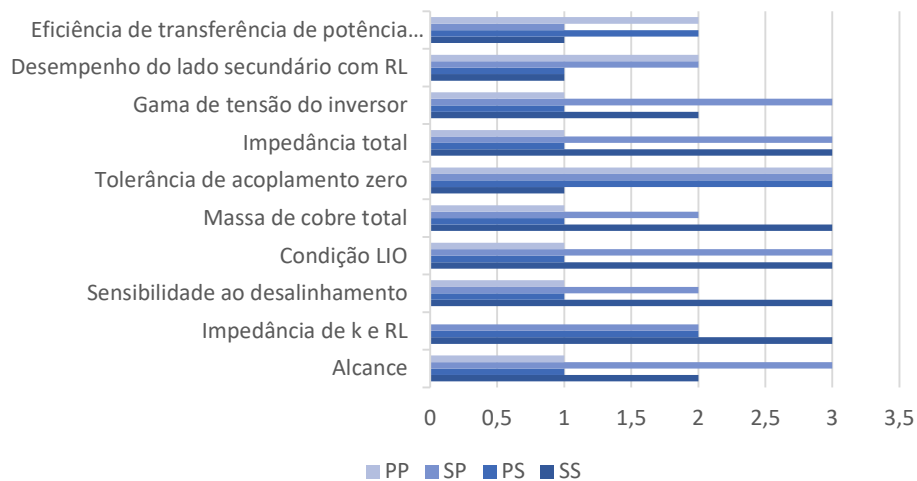


Figura 3.6-Diagrama de comparação das topologias de compensação [31].

Tabela 3.2- Características das topologias de compensação, adaptado de [24].

Topologia	Funciona como	Independente das cargas em	Fator de potência a curta distância	Fator de potência a longa distância	Impedância total num estado de ressonância	Rendimento
Série-Série (SS)	Fonte de tensão	Cs	Baixo	Muito alto	Baixo	Muito alto
Série-Paralelo (SP)	Fonte de corrente	Cs	Baixo	Alto	Baixo	Médio
Paralelo-Série (PS)	Fonte de tensão	Cp	Alto	Médio	Alto	Médio
Paralelo-Paralelo (PP)	Fonte de corrente	Cp	Muito alto	Médio	Alto	Alto

### 3.5. Topologia de compensação LCC ressonante

A topologia do conversor LCC ressonante é apresentada na Figura 3.7. Esta está dividida em três circuitos: um circuito inversor, um circuito ressonante e um circuito de filtragem retificador. O circuito inversor é constituído pelos transístores de comutação  $Q_1$ - $Q_4$ , o circuito ressonante pelo condensador  $C_r$ , indutância  $L_r$  e indutância  $L_m$ . O condensador  $C_r$  impede que a componente CC da tensão de saída do gerador de ondas quadrado flua para o transformador, equilibrando simultaneamente o fluxo magnético para evitar a saturação do circuito magnético. O circuito do filtro retificador é um duplo retificador de meia onda com uma tomada de tensão no meio do enrolamento secundário do transformador [32].

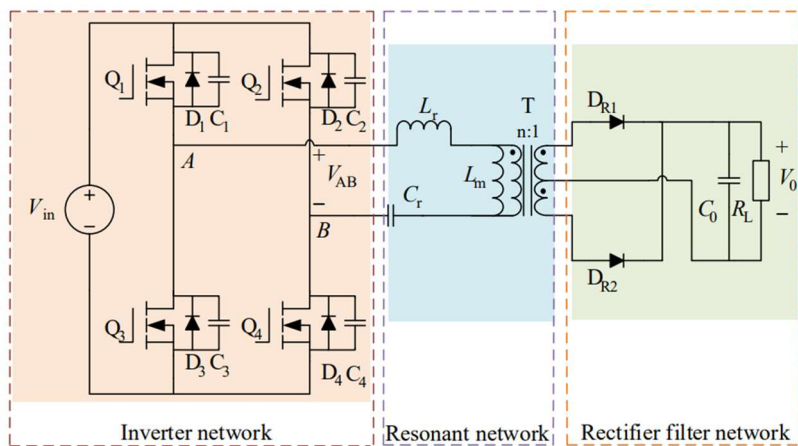


Figura 3.7- Topologia ressonante LCC [32].

O conversor LCC ressonante tem duas frequências ressonantes,  $f_r$  e  $f_m$ , calculadas através das equações (3.3) e (3.4) [32].

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.3)$$

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_m)C_r}} \quad (3.4)$$

Se a frequência do sinal de condução do MOSFET for  $f_s$ , a análise do modo de operação corresponde a  $f_m < f_s < f_r$ ; as formas de onda de tensões e de correntes no circuito para esta gama de frequências são mostradas na Figura 3.8. Quando a corrente de excitação é igual à corrente ressonante, a tensão em  $L_m$  não é bloqueada e  $L_r$ ,  $C_r$  e  $L_m$  ressoam conjuntamente. A partir da Figura 3.8, pode ser visto que o diodo no lado secundário está em condução intermitente, atingindo o valor 0 [32].

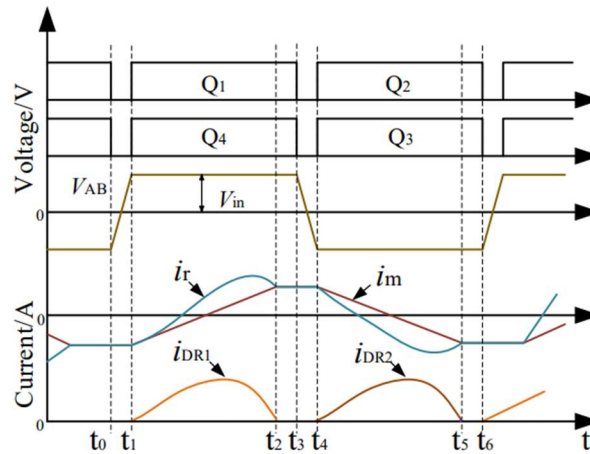


Figura 3.8-Formas de onda para  $f_m < f_s < f_r$  [32].

O método de aproximação harmónica é utilizado para estabelecer o modelo matemático equivalente do conversor ressonante LCC [32].

Se compararmos a topologia de compensação SS à LCC existem algumas semelhanças como o facto de as frequências de ressonância serem independentes das condições de acoplamento e de carga. Outra semelhança é que ambas as topologias são do tipo fonte de corrente, dependendo apenas da tensão de entrada, da frequência de ressonância e da indutância mútua. Mas as diferenças são mais significativas. Em primeiro lugar, a topologia de compensação SS necessita de menos componentes do que a topologia LCC. Esta é uma das vantagens da topologia de compensação SS [33].

Em segundo lugar, a potência de saída da topologia SS aumenta com a diminuição da indutância mútua. Isto exige que o carregador sem fios com compensação SS esteja equipado com tecnologia de deteção de posição ou proteção do limite máximo de potência de saída por questões de segurança. No entanto, tal não é necessário para o carregador sem fios de dupla face com compensação LCC devido às características de que a potência transferida diminui com a diminuição da indutância mútua. A potência máxima transferida será atingida quando os lados primário e secundário estiverem bem alinhados [33].

Em terceiro lugar, a potência de saída do carregador sem fios compensado em SS poderá ser determinada quando a frequência de ressonância, a estrutura da bobina e a tolerância de desalinhamento forem conhecidos. No entanto, no sistema com compensação LCC, as indutâncias adicionais podem funcionar como parâmetros suplementares para ajustar a potência de saída [33].

Por fim, a corrente na bobina primária é constante, sendo apenas determinada pela tensão de entrada. Isto é importante para os sistemas de carregamento sem fios multi-recetores [33].

No entanto, não é possível identificar facilmente qual das topologias é a melhor. Para comparar estas duas topologias, devem ser considerados outros aspetos, como a potência de saída, as tensões nos componentes e a eficiência [33].

### **3.6. Conversores e métodos de controlo**

Os sistemas de TEI e TEAI dependem dos conversores, que podem ser de vários tipos, para transferir energia eficientemente, Figura 3.9. O lado primário do circuito é responsável pelo controlo do fornecimento de energia ao sistema. Isto é normalmente conseguido através da utilização de um retificador e de um inversor operando em conjunto. O retificador converte a corrente alternada (CA) da fonte de alimentação numa corrente contínua (CC) enquanto o inversor converte esta CC de volta numa CA de uma frequência específica que é requerida pela carga. A investigação sobre conversores do lado primário está principalmente centrada no inversor, uma vez que este é o elemento principal para o funcionamento do circuito. Ao conceber inversores para sistemas TEI e TEAI, o foco está fortemente centrado em obter ressonância, o que melhora a eficiência global do sistema [30].

No lado secundário do circuito, a eletrónica de potência é utilizada para controlar os parâmetros de carga. O funcionamento com tensão constante (VC) é desejável para o carregamento de baterias de VE, uma vez que permite um processo de carregamento mais eficiente e controlado. Nos casos em que o funcionamento em VC é inerente ao

sistema, só é necessário um retificador para fornecer uma corrente contínua à carga. No entanto, nos casos em que o sistema não prevê o funcionamento a VC, um conversor DC-DC pode ser utilizado para controlar a tensão através da carga. Este conversor também pode ser utilizado para igualar as impedâncias, o que assegura que a carga e a fonte são compatíveis em termos das suas características elétricas, melhorando ainda mais a eficiência do sistema [30].

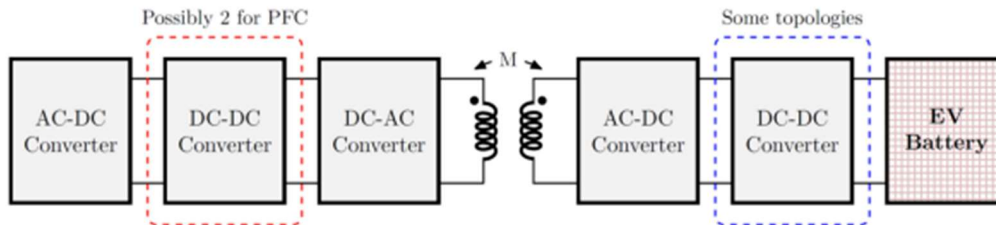


Figura 3.9- Conversores existentes num sistema de transferência de energia sem fios [30].

O controlo ativo de um sistema de carregamento sem fios é predominantemente focado em maximizar a eficiência do sistema e a própria transferência de energia. Normalmente, as considerações de dimensionamento para o controlo ativo de um sistema estático são focadas em alcançar uma operação rápida e ideal quando o sistema é energizado pela primeira vez. Os métodos utilizados para desempenhar esta função dependem da compreensão do estado do sistema em relação ao coeficiente de acoplamento/indutância mútua [30]. O conversor mais usado é o conversor *buck/boost* [31].

### 3.7. Uso de inteligência artificial no controlo

O tipo e dimensões do enrolamento afetam a eficiência do sistema e levam a outras alterações em diversos parâmetros, tais como indutância mútua, frequência de ressonância, entre outros. O método de tentativa e erro é um processo demorado e ineficiente para obter resultados desejáveis para os vários parâmetros e estes podem não alterar de um ponto de vista teórico, de simulação ou computacional [31].

Para reduzir o tempo e a carga computacional podem ser utilizadas abordagens de *soft computing*, como uma rede neural artificial (RNA). A RNA, em particular, é capaz de processar equações complexas e extensos cálculos para identificar parâmetros desconhecidos e simular resultados precisos rapidamente [31].

O funcionamento de uma RNA envolve duas partes. Na primeira parte existe uma recolha de informações sobre a rede durante o processo de aprendizagem. A segunda parte consiste na utilização de ponderações para descrever como os “neurónios” estão ligados, o que determina a saída destes. As ligações com mais ponderações têm um

impacto mais forte na saída. As redes neurais são úteis na resolução de problemas não lineares. Os algoritmos educacionais são um componente crucial das RNAs. Uma RNA típica compreende três tipos de camadas, como mostra a Figura 3.10 [31].

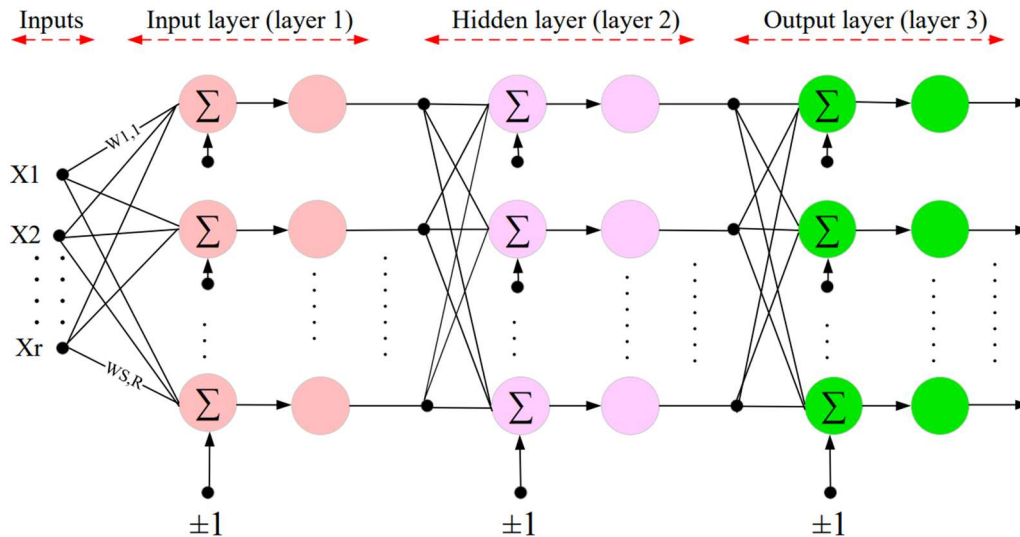


Figura 3.10-Exemplo de uma rede neuronal [31].

A camada de saída está situada na terceira camada, enquanto as camadas de entrada e as seguintes camadas ocultas estão ligadas. Com base nas interações entre estas camadas, podem ser identificados diferentes tipos de redes neurais. O peso da ligação é ajustado para minimizar o erro entre a rede neural adquirida e as saídas desejadas. Para treinar a rede neural, as ligações sinápticas ligam as três camadas. Consequentemente, a escolha do algoritmo adequado é crucial para alcançar o melhor e mais preciso resultado para um dado problema. As RNAs são altamente versáteis e encontram aplicação em várias tarefas, tais como controlo adaptativo, identificação de sistemas, aproximação de funções e otimização. Além disso, as técnicas de RNA oferecem benefícios em termos de pesquisa e procura de soluções [31].

### 3.8. Projetos existentes

A Figura 3.11 apresenta o desenvolvimento histórico da transferência de energia sem fios na investigação académica. No início do século XX, Hertz e Tesla deram contributos significativos para a compreensão das ondas eletromagnéticas e para as aplicações práticas dos sistemas TEI. Nomeadamente em 1964, W. C. Brown conseguiu a primeira utilização prática de carregamento sem fios por micro-ondas para um

helicóptero. Este marco despertou o interesse pela transferência de energia indutiva [34].

Com base nestes marcos, investigadores deram passos significativos na concepção de sistemas TESH mais leves, potentes e tolerantes a desalinhamentos. Em 1976 foi apresentado o primeiro sistema de carregamento sem fios dinâmico. O KAIST, em 2009, desenvolveu o protótipo de primeira geração OLEV, levando a sucessivas atualizações e melhoramentos. O sistema TESH baseado em ressonância magnética, proposto por Marin Soljačić em 2007, desempenhou um papel fundamental nas futuras investigações académicas [34].

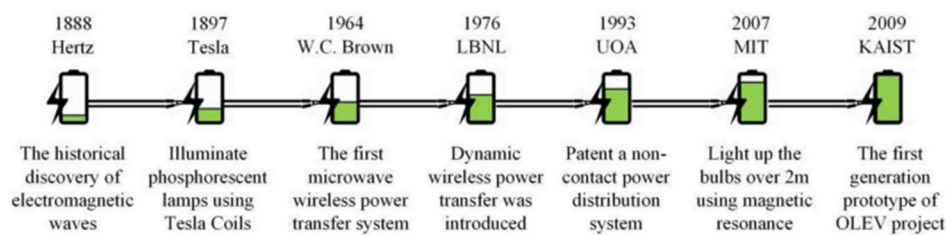


Figura 3.11-Marcos dos sistemas de carregamento sem fios em ambiente académico [34].

A Figura 3.12 muda o foco para aplicações industriais. Embora o GM EV1 tenha sido um marco importante na indústria de veículos elétricos, este apenas viu um crescimento substancial nos últimos anos, impulsionado pelo apoio político, avanços tecnológicos e aplicação de normas [34].

Nomeadamente, em 2013, a *Elix* Sem fios anunciou uma solução de carregamento sem fios de 10 kW em colaboração com a Universidade da Colúmbia Britânica. Em 2014, a *Vahle* e a *Hella* introduziram o carregamento sem deteção de objetos estranhos, aumentando a fiabilidade da TESH. Em 2015, a *Qualcomm Halo* e a Universidade de Auckland demonstraram uma nova tecnologia TEI num carro de segurança BMW i8, atingindo um nível de potência de 7,2 kW. Os sistemas de alta potência, como o PRIMOVE da Bombardier, surgiram em 2016. A Tesla e a Evantra comercializaram a tecnologia TESH para veículos elétricos em agosto de 2016. Em 2017, a Nissan estabeleceu uma parceria com a *WiTricity* para implementar o carregamento rápido sem fios na próxima geração do LEAF [34].

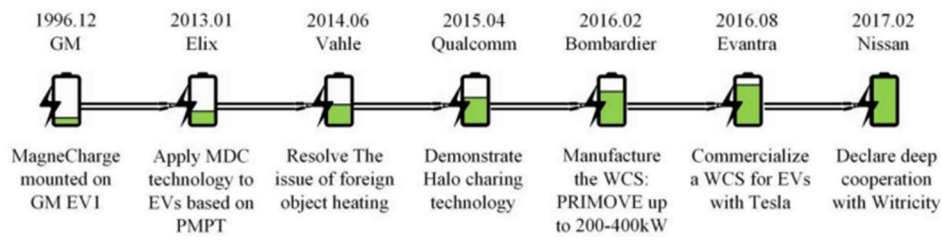


Figura 3.12-Marcos dos sistemas de carregamento sem fios em ambiente industrial [34].

Enquanto as universidades lideram os estudos fundamentais, os parceiros industriais dão prioridade à resolução de problemas práticos. A investigação académica e a R&D industrial complementam-se mutuamente, com parcerias de sucesso, como a Elix e a Universidade da Colúmbia Britânica, que servem como referências valiosas [34].

## Capítulo 4

### Transferência de energia sem fios dinâmica

Os VE apresentam-se como uma boa alternativa aos de motor de combustão interna, no entanto a sua adoção atravessa alguns obstáculos como longos tempos de carregamento, ansiedade do utilizador em relação à autonomia, custo, questões de segurança no carregamento, durabilidade da bateria, entre outros. O futuro da mobilidade elétrica depende da criação de infraestruturas como uma rede abrangente de postos de carregamento rápido e estradas eletrificadas [1].

O carregamento sem fios dinâmico permite que os VE sejam alimentados continuamente enquanto se deslocam ao longo da *e-road*, o que permite uma maior autonomia com menos capacidade de bateria. Por sua vez, a redução da capacidade e dimensões da bateria reduz o peso do veículo, tornando-o mais económico e barato. Desta forma, as principais limitações na adoção dos VE são eliminadas culminando num futuro mais sustentável [2].

#### 4.1. Dimensionamento das bobinas para carregamento dinâmico

Os sistemas de carregamento dinâmico para VE utilizam dois tipos de estruturas de bobina: o desenho de bobina única e o desenho de bobina segmentada. A principal distinção entre os dois está na conceção da bobina primária. O desenho de bobina única consiste num laço longo. A sua desvantagem é que quando o condutor na via não proporciona que a bobina primária ( $L_p$ ) seja totalmente coberta pelas bobinas secundárias ( $L_s$ ), gera um campo eletromagnético redundante, o que reduz o rendimento do sistema. Isto também pode levar a um aumento da perda de potência do sistema e a uma diminuição do desempenho global [35].

Por outro lado, o desenho da bobina segmentada é caracterizado pela divisão da bobina primária em várias secções. A vantagem deste desenho é que reduz os campos eletromagnéticos redundantes, melhora a eficiência do sistema e aumenta a transferência de potência entre as bobinas primárias e secundárias [35].

O desenho de um único laço é uma solução promissora para segmentos de estradas que contêm elevado tráfego. Esta configuração tem várias vantagens, tais como minimizar o número de componentes do sistema, reduzir a complexidade do controlo, ter uma construção mais simples e proporcionar uma transferência de energia constante [1].

No entanto, há também alguns inconvenientes nesta concepção. A sua baixa eficiência quando a via está parcialmente ocupada com poucos veículos, o baixo acoplamento entre bobinas primárias e secundárias, a elevada potência exigida pelos componentes elétricos devido à existência de uma única fonte de energia, e a necessidade de desligar todo o sistema em caso de falha, fazem com que nem sempre seja a melhor escolha [35].

Por outro lado, o conceito do laço segmentado oferece mais controlo sobre a transferência de energia. Pode ser ligado apenas quando um VE está a passar por cima de transmissores específicos, o que otimiza a transferência de energia. Esta opção também tem alta eficiência de pico, alto acoplamento, e ainda pode fornecer energia mesmo que um dos transmissores precise de ser desligado [35].

## 4.2. Tolerância a desalinhamento, velocidade e distância ao solo

Numa experiência realizada em [36] usando um sistema TEAI, com compensação SS, potência de 1 kW com bobinas de geometria retangular, foi estudado o impacto da distância entre a bobina primária e secundária no rendimento do sistema. A distância ao solo foi ajustada de 150 mm até 300 mm. Os resultados destas experiências são ilustrados na Figura 4.1, que mostra a eficiência do sistema TEAI de acordo com a distância ao solo. De salientar que os sistemas TEAI com distâncias menores apresentam rendimentos mais elevados devido aos coeficientes de acoplamento mais fortes. Com uma distância de 150 mm, atingiu-se um rendimento de 90,5%, mas à medida que a distância aumentou para 300 mm, o rendimento diminuiu para 82%. De notar que os veículos convencionais têm uma distância de 150-250 mm entre o chassis do veículo e a estrada.

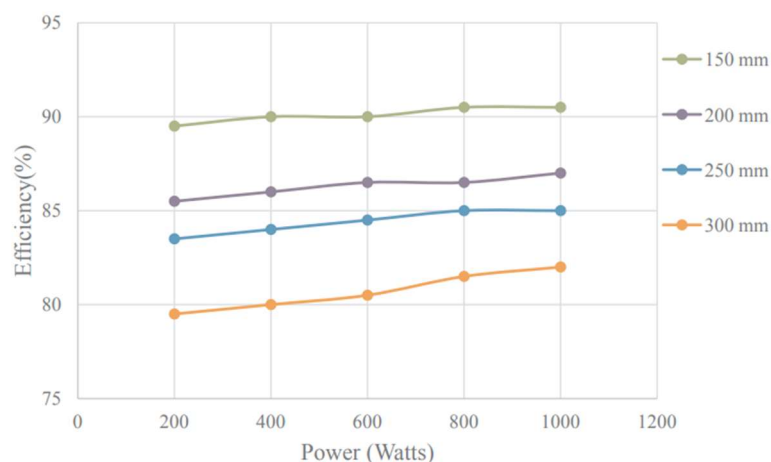


Figura 4.1-Rendimento de um sistema TEAI com distâncias ao solo entre 150 mm e 300 mm [36].

O desalinhamento horizontal entre as bobinas também afeta o rendimento do sistema, um desalinhamento de 25% entre as duas bobinas implica uma queda de rendimento para 83,5%. No entanto quando estas estão desalinhadas horizontalmente a mais de 35-40% do tamanho da bobina secundária, o rendimento da transferência de energia diminui para 72%. Quando o desalinhamento se torna maior do que metade do tamanho da bobina, o rendimento torna-se inferior a 50%. Na Tabela 4.1 é mostrada uma comparação de rendimentos consoante o dimensionamento da bobina, distância ao solo e desalinhamento [36].

Tabela 4.1-Comparação entre diversos sistemas TEAI, adaptado de [36].

<b>Geometria</b>	<b>Tamanho [mm]</b>	<b>Distância entre bobinas [mm]</b>	<b>Rendimento [%]</b>	<b>Tolerância ao desalinhamento [%]</b>
<b>Circular</b>	800	360	>80	Negligenciável
<b>Forma H</b>	320 x 320	160	89	25-30
<b>DDQ</b>	570 x 410	125	>90	35
<b>Quadrangular</b>	400 x 400	150	90	40

A velocidade a que um veículo se desloca também tem o seu impacto no rendimento do sistema. Quanto maior a velocidade menor vai ser eficiência na transferência de energia. A tecnologia *Primove* da *Bombardier*, que conta com projetos já existentes na Alemanha, constatou que a uma velocidade de 80 km/h num sistema com uma potência de 180 kW é atingida uma eficiência de 90% na transferência de energia [1], [37].

### 4.3. Estradas eletrificadas

Uma *e-road* é considerada uma infraestrutura de transporte que pode fornecer energia elétrica para carregar VE enquanto estes estão parados ou em movimento, utilizando sistemas de carga condutivos ou indutivos. Funciona como uma estrada normal para veículos convencionais, mas também disponibilizando carregamento para VE. Contudo, para que a *e-road* seja implementada de forma sustentável, são necessários vários avanços técnicos, incluindo soluções de carregamento adequadas, uma integração bem-sucedida na infraestrutura rodoviária existente e uma gestão de manutenção eficaz. Atualmente, a implementação de estradas eletrificadas ainda se encontra numa fase muito inicial e as infraestruturas rodoviárias tradicionais não respondem às

necessidades dos VE. O desenvolvimento destas é um campo de investigação multidisciplinar onde um esforço coletivo é crucial para o seu sucesso [2].

#### **4.3.1. Técnicas de carga condutiva**

O método de carga condutiva para VE envolve uma ligação física entre este e a *e-road*. Este método é semelhante ao sistema pantográfico utilizado para comboios elétricos, elétricos e tróleys. Existem três tipos principais de carga condutora: aérea, rodoviária e à beira da estrada, Figura 4.2 [1].

A carga condutiva aérea envolve a utilização de duas linhas de alimentação de energia localizadas por cima do veículo na estrada. O veículo está equipado com um dispositivo de ligação que lhe permite compensar os movimentos verticais e horizontais. Este método é tipicamente utilizado para autocarros e camiões e é uma evolução da tecnologia de autocarros de tróley. A energia é transferida através de um pantógrafo no tejadilho do veículo, que faz contacto com as linhas aéreas de alimentação [1].

A carga condutora na estrada envolve a utilização de um braço condutor equipado com um contacto magnético no veículo. Quando o veículo é posicionado sobre o condutor de energia na estrada, o campo elétrico carrega a bateria [1].

A carga condutora à beira da estrada envolve a utilização de condutores de energia colocados na berma da estrada, o que permite não só a utilização desta tecnologia por autocarros e camiões, mas também por automóveis de passageiros. Uma das vantagens deste método é que não requer modificações na própria estrada, o que facilita a sua manutenção e instalação [1].

Os sistemas de carga condutora podem ser afetados pelas condições meteorológicas. Em áreas com fortes nevões, pode ser necessário uma manutenção preventiva regular para limpar a superfície da estrada e o carril condutor. Em regiões frias, o carril condutor pode precisar de ser aquecido eletricamente para evitar a formação de gelo. É importante fazer uma manutenção adequada aos sistemas de carga condutora para evitar os riscos de incêndio ou de choque elétrico [1].

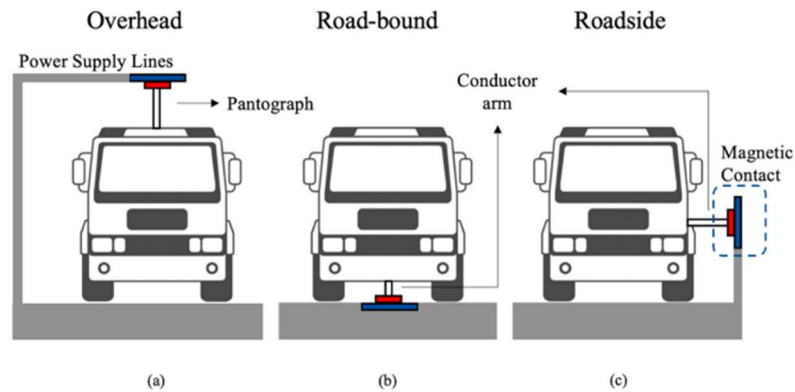


Figura 4.2-Ilustração dos diferentes tipos de carga condutiva nas estradas eletrificadas: (a) por cima; (b) por baixo; e (c) ao lado [1].

### 4.3.2. Técnicas de transferência de energia indutiva

A tecnologia TEI permite que os VE sejam carregados sem necessidade de contacto físico. O sistema de TEI consiste num transmissor incorporado no pavimento e um recetor no veículo que capta a energia transmitida [1].

Existem três requisitos principais para uma TEI: potência e frequência elevadas e uma distância entre o solo e o veículo viável. O tempo de carga depende da potência e da frequência da transferência de energia, que é afetada pelo dimensionamento do circuito elétrico e pelo espaço aéreo. A eficiência da transferência de energia também depende da frequência de funcionamento e é maximizada no caso da frequência de ressonância [1].

O carregamento sem fios pode ser estacionário, o que ocorre quando os VE estão estacionados sobre uma placa de carga, ou dinâmica, o que permite a carga contínua enquanto o veículo está em movimento. O carregamento sem fios dinâmico depende de um módulo de carga incorporado no pavimento que não afeta o movimento do veículo [1].

Há várias tecnologias disponíveis para transferência de energia sem fios, incluindo micro-ondas, capacitivo, acoplamento magnético e TEAI. A TEAI é considerada a solução mais bem-sucedida para a carga sem fios de VE devido às suas potência e frequência elevadas, como também por ter a capacidade de operar em aberturas de ar variáveis [1].

## 4.4. Projetos existentes

### 4.4.1. On-Line Electric Vehicle

Na Coreia do Sul, a investigação e desenvolvimento relacionados com a TEI dinâmica começou por volta de 2008, liderada pelo grupo de investigação do Instituto Avançado de Ciência e Tecnologia da Coreia (KAIST). Este trabalho resultou em múltiplos projetos de demonstração e na instalação nos veículos em várias cidades da Coreia do Sul. A tecnologia foi parcialmente transferida para a empresa *Green Power*, que é responsável pelo desenvolvimento comercial e construção de sistemas baseados nesta tecnologia [38].

O conceito OLEV enfrentou várias iterações durante o seu desenvolvimento, com vários protótipos a serem testados para a instalação à beira da estrada. Estes desenhos têm características e desempenhos diferentes, e a tecnologia OLEV de terceira geração é utilizada em, pelo menos, seis autocarros atualmente em funcionamento, como também em três comboios ligeiros na capital Seoul. Esta foi também desenvolvida em cooperação com o Instituto Coreano de Investigação Ferroviária (KRRI) para atingir um nível de potência de cerca de 800 kW, e que foi demonstrada para a potencial aplicação a um comboio de alta velocidade [38].

As tecnologias OLEV de quarta e quinta gerações, desenvolvidas pela KAIST, utilizam uma abordagem diferente para o dimensionamento das bobinas primárias, com secções curtas e de polaridade alternada. Um desenvolvimento adicional da quinta geração, chamada de carril de potência tipo S, tem um desenho ultrafino, com uma secção transversal de apenas 4 cm de largura [38].

Todas as tecnologias OLEV desenvolvidas até agora funcionam a uma frequência de 20 kHz, mas está a ser desenvolvida uma sexta geração da tecnologia para cumprir com a nova norma SAE J2954 para transferência de energia indutiva estacionária de veículos elétricos. Esta nova geração funcionará a uma frequência de 85 kHz e espera-se que seja compatível tanto com a TEI estacionária como com a TEI dinâmica para VE [38].

A Tabela 4.2 mostra um sumário das características das diferentes fases de desenvolvimento do projeto OLEV.

Tabela 4.2-Sumário do desenvolvimento do projeto OLEV, adaptado de [38].

	<b>1<sup>a</sup> geração</b>	<b>2<sup>a</sup> geração</b>	<b>3<sup>a</sup> geração</b>	<b>3<sup>a</sup> geração</b>	<b>3<sup>a</sup> geração</b>	<b>4<sup>a</sup> geração</b>
<b>Data</b>	Fevereiro, 2009	Julho, 2009	Agosto, 2009	Janeiro, 2010	Março, 2010	2010-
<b>Tipo de Veículo</b>	Carro	Autocarro	SUV	Autocarro	Comboio	Autocarro
<b>CEM (mG)</b>	10	51	50	50	50	<10
<b>Largura da calha elétrica (cm)</b>	20	140	80	80	80	10
<b>Potência (kW)</b>	3	6	15	15	15	25
<b>Peso (kg)</b>	20	80	110	110	110	80
<b>Dimensões (cm)</b>	55x18x4	160x60x11	170x80x8	170x80x8	170x80x8	80x100x8
<b>Distância ao solo (cm)</b>	10	17	17	20	12	20
<b>Rendimento (%)</b>	80	72	71	83	74	80

#### 4.4.2. Electreon

A *Electreon* é a principal fornecedora de soluções de carregamento sem fios para VE. Conta com 60 parceiros a nível mundial, que inclui grandes nomes como a *Volkswagen*, *IVECO* e o grupo *Stellantis* [39].

Oferece três tipos de soluções de carregamento: sem fios estático nas paragens de autocarros, cais de carga e parques de estacionamento; sem fios semi-dinâmico para veículos em marcha lenta como táxis à espera de passageiros, portagens, semáforos entre outros e, por fim, dinâmico para carregamento enquanto os veículos se deslocam no seu quotidiano [40].

O primeiro projeto conta com uma solução de carregamento sem fios estático, com parceria da cidade de Telavive e da *Dan Bus Company*. Em setembro de 2020 lançaram o seu primeiro sistema público de estradas eletrificadas num ambiente urbano em Israel. O projeto inclui uma estação de carregamento sem fios na paragem de autocarros da Universidade de Telavive, que carrega o autocarro enquanto os passageiros entram e saem. Este método de carregamento aproveita o tempo de inatividade na primeira paragem do itinerário para carregar o autocarro. Atualmente, o projeto conta também com um troço de 700 metros, na rota de 5 quilómetros do autocarro, que contém tecnologia de carregamento sem fios dinâmico [41].

A Administração Sueca de Transportes adjudicou ao consórcio *Smart Road Gotland*, liderado pela *Electreon*, um contrato para a demonstração de um sistema rodoviário elétrico sem fios na ilha de *Gotland*, na Suécia. O projeto, que começou no início de 2020, visa produzir conhecimento e preparar o caminho para o

desenvolvimento em larga escala de estradas eletrificadas em todo o país. É um dos quatro projetos de demonstração de estradas eletrificadas financiados pela administração central, com o objetivo de instalar 2.000 km de estradas eletrificadas na Suécia até 2030 e alcançar emissões zero até 2045. O projeto mostrará como os autocarros e camiões elétricos podem carregar sem fios enquanto são conduzidos na estrada e demonstrará que a TEI é uma forma prática e rentável de transição para o transporte elétrico nas cidades [42].

O primeiro troço da estrada elétrica na Suécia foi concluído em dezembro de 2020, após a implantação inicial da infraestrutura em novembro de 2019. Desde então, um camião totalmente elétrico de 40 toneladas equipado com baterias ião de lítio testou a estrada com sucesso, atingindo velocidades até 80 km/h e recebendo uma potência média de 70 kW a partir da *e-road* num troço de 1,65 km entre o aeroporto e o centro da cidade de Visby. A estrada está também a ser utilizada por uma linha de autocarro equipado com supercapacitores que transporta passageiros no mesmo trajeto. O projeto é considerado um marco fundamental no desenvolvimento de estradas eletrificadas em grande escala para outras partes da Suécia, cujo custo está estimado em cerca de 3 mil milhões de euros, uma vez que o mercado de camiões elétricos de longo curso continua a crescer rapidamente [42].

Para além destes projetos, podem referir-se também o troço de 1km numa autoestrada na Lombardia em Itália, onde são testados VE citadinos e um troço de 100 metros na Alemanha, alimentado exclusivamente com fontes de energia renovável, onde vai ser estudada a integridade física da estrada [43].

#### **4.4.3. Bombardier**

A *Bombardier* na Alemanha tem vindo a trabalhar na tecnologia de TEI desde 2010, concentrando-se principalmente no carregamento sem fios estacionário para sistemas de transporte público como elétricos e autocarros. A tecnologia tem sido demonstrada em vários locais na Alemanha e os autocarros com carregamento indutivo em rota estão agora em funcionamento em pelo menos quatro locais na Alemanha e em Södertälje, na Suécia. O princípio de funcionamento desta tecnologia pode ser adaptado para um carregamento dinâmico, o que a *Bombardier* demonstrou com um troço de 800 metros em Augsburg, Alemanha, como parte do projeto *Slide-in Electric Road System* sueco. Embora a informação sobre a tecnologia da *Bombardier* seja limitada, sabe-se que o sistema funciona a uma frequência de 20 kHz e é capaz de transferir 200 kW para o veículo. A distância entre a infraestrutura de carga e o sistema de recolha do veículo parece estar na gama de 6 cm para os elétricos e até cerca de 10 cm para a aplicação no camião. Para VE, a distância é controlada mecanicamente pelo sistema de recolha no

veículo. As dimensões dos sistemas de captação de bordo são de 2x1 m para uma unidade de 200 kW [44].

Embora a informação sobre a instalação do sistema da *Bombardier* seja limitada, sabe-se que utiliza enrolamentos trifásicos e que os laços têm 20 metros de comprimento. A pista de ensaio contém quatro laços, cada um alimentado por um inversor trifásico de um sistema de distribuição de 750 V DC regulado. A disposição dos enrolamentos do sistema é composta por um padrão trifásico distribuído, ou bobina do tipo "meandro", sem necessidade de múltiplas voltas em cada polo magnético do enrolamento. A instalação tem cerca de 20 cm de profundidade, incluindo uma camada asfáltica de 4 cm, e 80 cm de largura. De salientar que secções mais longas (>25m) podem reduzir o custo do sistema [44].

#### **4.4.4. Qualcomm Halo**

A *Qualcomm* é uma empresa líder em tecnologias de TEI que tem estado envolvida na série de corridas da *Federation Internationale de l'Automobile* (FIA), Formula E, como parceiro oficial de tecnologia e fundador desde o seu início há três anos. Como parte da parceria, a *Qualcomm* integrou a sua tecnologia de carregamento sem fios, a *Qualcomm Halo WEVC*, nos *safety cars* da Fórmula E. Isto permite que os veículos sejam carregados sem fios, assegurando que estão sempre prontos para serem utilizados em caso de emergência [45].

Recentemente, a *Qualcomm* fez progressos significativos no desenvolvimento da sua tecnologia de carregamento sem fios ao testar com sucesso um sistema chamado *Qualcomm Halo DEVC*, que permite que os veículos elétricos sejam carregados sem fios enquanto estão em movimento. A tecnologia foi capaz de carregar VE a velocidades superiores a 100 km/h e com uma potência de 20 kW, e com dois veículos a carregar em simultâneo [45].

Esta tecnologia foi baseada na investigação conduzida nas instalações da *Qualcomm* em Auckland e foi concebida para demonstrar a viabilidade da utilização de carregamento sem fios para carregamento dinâmico de VE. As demonstrações da tecnologia tiveram lugar na pista de ensaio FABRIC de 100 metros composta por 4 laços de 25 metros, onde cada um deles é alimentado através da sua própria fonte de alimentação. Cada uma das 4 placas de ensaio inclui um sistema de 14 blocos magnéticos que transmitem energia a dois blocos localizados sob os VE [45].

A energia é transmitida, através de uma distância compreendida de ar, a duas placas localizadas debaixo do VE. Estas placas, conhecidas como placas do veículo, têm uma potência de saída de 10 kW. O sistema, no interior do VE, converte a corrente

alternada (CA) a uma frequência de 85 kHz e fornece energia em corrente contínua (CC) ao sistema de gestão de baterias do VE, conforme necessário [45].

A tecnologia *Qualcomm Halo* foi concebida para ser interoperável, o que significa que pode ser utilizada com qualquer VE e fornecedor de *hardware*. Os blocos magnéticos utilizados no sistema são capazes de acomodar uma vasta gama de níveis de transferência de energia e de distâncias entre o solo e o veículo, e a tecnologia é adequada para instalação em várias superfícies, incluindo instalações embutidas e enterradas. Isto faz da *Qualcomm Halo* uma solução versátil e potencialmente amplamente aplicável para o carregamento sem fios de VE [45].

#### **4.5. Desafios a serem ultrapassados**

Apesar de ser uma tecnologia promissora e capaz de atrair as massas para o mercado de VE, é necessário ultrapassar inúmeros desafios, tais como:

- **Custo:** Um dos maiores desafios das estradas eletrificadas é o custo de instalação e manutenção, pois estas exigem uma quantidade significativa de infraestruturas como placas de carregamento, cablagem, sistemas de controlo, conversores, entre outros. Os custos totais de troços de teste estão compreendidos entre 1 e 1.5 milhões por cada 1.6 quilómetros para potências entre 20 e 50 kW. Podem atingir os 4 a 6 milhões para potências de 200 kW [1].
- **Compatibilidade:** As estradas eletrificadas devem ser compatíveis com uma ampla gama de modelos de veículos elétricos e sistemas de carregamento para se tornarem práticas e úteis. É necessário então o desenvolvimento de sistemas normalizados [46].
- **Segurança:** A fim de garantir a segurança e saúde dos seres humanos, é importante considerar a potencial exposição aos campos eletromagnéticos (CEM) durante o desenvolvimento de qualquer atividade. A utilização de sistemas de TEI suscita preocupações quanto aos efeitos no corpo humano, uma vez que níveis de energia mais elevados e distâncias de transmissão mais longas podem resultar na exposição a campos elétricos, magnéticos e CEM potencialmente nocivos. De salientar que em frequências inferiores a 100 KHz, os efeitos dominantes tendem a ser a electroestimulação, enquanto em frequências mais altas, os efeitos de aquecimento tornam-se mais prevacentes [26].
- **Durabilidade:** A unidade de carga sem fios para a *e-road* deve ser colocada na camada do pavimento. No entanto, a conceção do pavimento deve assegurar que

a unidade de carga seja protegida das tensões do tráfego, das flutuações de temperatura, do congelamento e da humidade. É importante considerar que a incorporação da unidade de carga no pavimento asfáltico pode resultar em deformação desigual ou concentração de tensões devido às diferenças de rigidez entre a embalagem de proteção da unidade de carga e o material do pavimento circundante. O desalinhamento e o ângulo de desfasamento entre os planos das bobinas primária e secundária podem levar ao aumento das perdas de transferência de energia, o que pode aumentar a temperatura no pavimento, podendo esta chegar aos 87 °C, levando ao amolecimento do material e ao *stress* térmico [1], [47].

## Capítulo 5

# Dimensionamento dos sistemas de carregamento sem fios

### 5.1. Metodologia

Para ser possível a simulação dos sistemas de carregamento sem fios, foi necessário a utilização de dois *softwares*, o *Magnet* e o *Matlab* juntamente com o *Simulink*.

Desenvolvido pela *Infolytica*, o *MagNet* é um software de simulação 2D e 3D de campos magnéticos que permite criar protótipos de dispositivos eletromagnéticos e eletromecânicos simples ou complexos. Permite a conceção de transformadores, solenoides, bobinas, motores, atuadores, sensores, entre outros.

Desenvolvido pela *MathWorks*, o *Simulink* é um *software* que permite simular, testar e verificar sistemas embutidos e dinâmicos. Está integrado no *Matlab*, o que possibilita incorporar algoritmos em modelos e exportar resultados de simulações de forma a analisá-los posteriormente.

Com o objetivo de o sistema ser o mais próximo possível das condições reais de trabalho, foram tomados em consideração vários fatores como a distância ao solo de diversos tipos de veículos elétricos e a largura dos mesmos. De seguida, foram analisadas, com base na literatura, as restrições de conceção das bobinas.

Com todos os parâmetros definidos, foi feita a construção do sistema no *MagNet* para obter resultados tais como a indutância, a indutância mútua, a força segundo as componentes x, y e z, a energia e a co-energia. Com o auxílio do *Matlab* foi criado um algoritmo para ler os ficheiros dos resultados provenientes do *MagNet* para poderem ser inseridos no circuito do modelo dinâmico no *Simulink*, para, posteriormente, transformá-los em gráficos para uma melhor visualização, tais como o fator de acoplamento em função das distâncias e dos ângulos de deslocação axial. A Figura 5.1 mostra o fluxograma adotado na metodologia de dimensionamento do sistema.

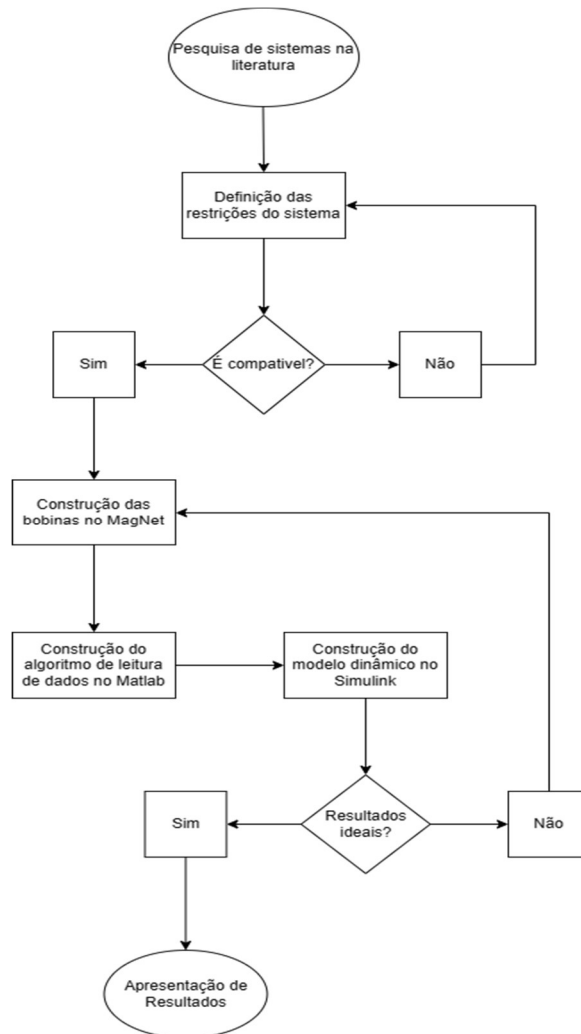


Figura 5.1-Fluxograma da Metodologia de Dimensionamento

### 5.1.1. Formulação do problema

Neste estudo, são comparados três tipos de geometria de bobinas: quadrada, circular e hexagonal, com núcleo de ar e com núcleo ferromagnético.

O mercado dos veículos elétricos oferece diversos segmentos de veículos, desde os mais desportivos, como o *Porsche Taycan* com uma altura máxima ao solo de 127 mm, os *sedans* como o *Polestar 2* com uma altura ao solo de 151 mm, até aos SUVs como o *Jaguar I-Pace* com uma altura ao solo de 174 mm [48][49][50]. É então estudado o comportamento do sistema para distâncias entre as duas bobinas de 100 mm até 175 mm, variando o valor dessa distância em intervalos de 5 mm.

Por fim, é analisado o comportamento de cada tipo de par de bobinas para diversos ângulos de defasamento axial, e para cada distância, visto que o alinhamento perfeito das duas bobinas pode não acontecer. Posto isto, é analisado o comportamento do sistema para desalinhamentos entre  $0^{\circ}$  e  $20^{\circ}$ , com variação em intervalos de  $5^{\circ}$ .

### 5.1.2. Dimensionamento

Na literatura é aceite que o processo de dimensionamento de uma bobina começa pela definição do valor do seu diâmetro externo. Este pode ser decidido tendo por base a distância de ar entre a bobina primária e a bobina secundária, Figura 5.2.

É estabelecido que a altura do percurso do fluxo  $l_{ag}$  numa bobina circular é cerca de um quarto do diâmetro da bobina  $D_{out}$  [51], de acordo com a equação (5.1).

$$D_{out} \geq 4l_{ag} \quad (5.1)$$

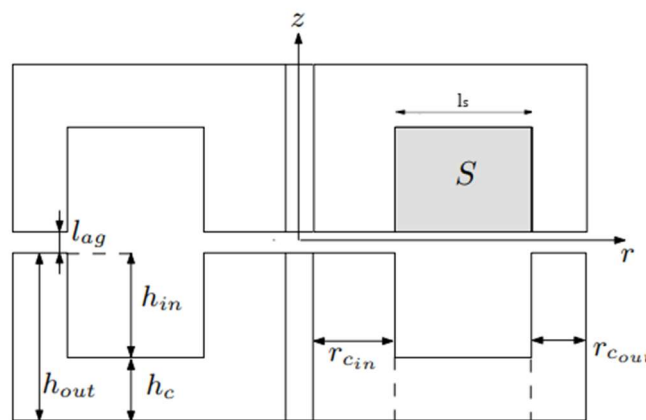


Figura 5.2-Geometria do pot core [52].

Para garantir que existe menor relutância no percurso entre os dois núcleos, é necessário garantir a relação da equação (5.2), com  $l_s$  o comprimento da secção transversal do enrolamento.

$$2l_{ag} < l_s \quad (5.2)$$

A relação entre os comprimentos radiais interior  $r_{cin}$  e exterior  $r_{cout}$ , bem como a parte inferior do núcleo é fixa, com base nas dimensões dos núcleos “pot core” [52]:

$$r_{cout} = 0.55 r_{cin} \quad (5.3)$$

Tendo em conta as equações (5.2) e (5.3), juntamente com a distância máxima entre bobinas de 175 mm, é definido o valor máximo de 1400 mm para o diâmetro

externo da bobina, um valor possível tendo em conta a largura da vasta maioria dos VE. No entanto, como existe uma vasta amplitude de distâncias (100 a 175 mm), consideraram-se 3 segmentos de veículos, com correspondentes alturas. Assim, analisaram-se os sistemas com distâncias máximas entre bobinas de: entre 100 e 125 mm para os veículos mais baixos, onde é necessário um diâmetro máximo de 1000 mm; entre 125 e 150 mm, onde é necessário um diâmetro máximo de 1200 mm; e por fim entre 150 e 175 mm, onde é necessário um diâmetro máximo de 1400 mm. De forma que as comparações entre geometrias sejam relevantes, assume-se tamanhos idênticos para as bobinas quadradas e hexagonais.

O diâmetro do fio condutor  $d_{wire}$  é calculado em função do valor máximo estipulado para a corrente elétrica  $I_{max}$  e da densidade da corrente  $J$  admissível. A área da secção transversal do fio condutor  $A_{wire}$  é dada pela expressão (5.4) [53].

$$A_{wire} = \frac{\pi d_{wire}^2}{4} \quad (5.4)$$

Sendo a densidade de corrente  $J$ , calculada através da equação (5.5), [53].

$$J = \frac{I_{max}}{A_{wire}} \quad (5.5)$$

Combinando as equações (5.4) e (5.5) é obtido o diâmetro mínimo para a secção do fio condutor, de acordo com a equação (5.6), [53].

$$d_{wire} = \sqrt{\frac{4I_{max}}{\pi J}} \quad (5.6)$$

Geralmente, os fios utilizados para aplicações eletromagnéticas encontram-se disponíveis em diâmetros normalizados. Por esta razão, dentro das dimensões disponíveis comercialmente, deve ser selecionado o diâmetro imediatamente superior ao calculado através da equação (5.6).

O comprimento do fio condutor necessário para cada enrolamento  $l_{wire}$  é calculado com base no seu volume aparente  $V_{coil}$ , equação (5.7), sendo o volume calculado através da (5.8), [54].

$$l_{wire} = \frac{V_{coil}}{A_{wire}} \quad (5.7)$$

$$V_{coil} = A_{sc} h_{coil} \quad (5.8)$$

onde  $A_{cs}$  é a área da secção anelar da bobina e  $h_{coil}$  a altura, [54].

A área da secção anelar é, por sua vez, calculada através da equação (5.9), [54].

$$A_{sc} = \pi(r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (5.9)$$

A Figura 5.3 mostra as topologias das bobinas analisadas.

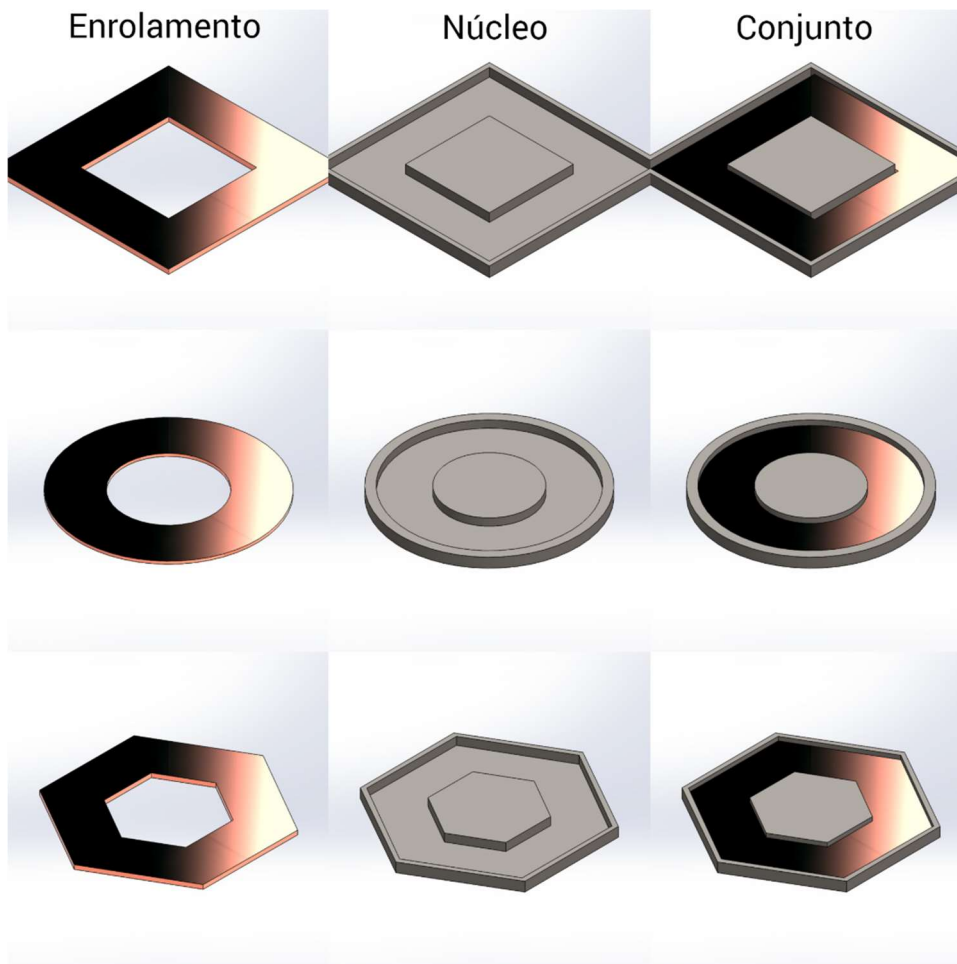


Figura 5.3-Vista geral das bobinas a serem simuladas.

### 5.1.3. Materiais

O núcleo ferromagnético é construído com laminados de aço silício, a fim de reduzir as perdas do núcleo. As laminações com secção transversal variável não são práticas de fabricar e é necessário utilizar aço elétrico laminado convencional. Neste trabalho, o aço silício M19 é considerado como o material do núcleo ferromagnético [53]. Este núcleo é desenhado para a bobina poder “encaixar” nele, ficando assim abraçada pelo material ferromagnético. É composto por uma chapa por baixo da bobina, uma protuberância no meio e um anel exterior com a mesma altura para maximizar o fluxo. A estrutura adotada foi inspirada nos núcleos “*pot core*” apresentados em [52].

Tabela 5.1- Propriedades do material ferromagnético, adaptado de [53].

<b>Aço M19</b>	
<b>Densidade de fluxo magnético de saturação</b> $B_{sat}$ [T]	<b>Massa específica</b> $\rho_{M19}$ [kg/m <sup>3</sup> ]
1.6	7650

Os enrolamentos de dispositivos eletromagnéticos são, em geral, construídos por fio de bobinagem. Este tipo de fio apresenta um núcleo sólido de cobre com secção circular, o qual é revestido por uma, ou várias, camadas de material isolante. O fio de bobinagem encontra-se disponível, comercialmente, em diâmetros normalizados sendo a norma AWG (Anexo A) um dos sistemas adotados para o efeito [53]. Na Tabela 5.2 encontram-se indicadas as propriedades elétricas do fio condutor de cobre.

Tabela 5.2-Propriedades elétrica do cobre [53].

<b>Densidade de corrente máxima admissível</b> $J$ [A/mm <sup>2</sup> ]	<b>Resistividade elétrica a 20°C</b> $\rho_{cu}$ [Ω×m]
5	$1.724 \times 10^{-8}$

### 5.1.4. Características das bobinas

Após o dimensionamento das bobinas, obtiveram-se as características das topologias consideradas, ilustradas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Características das bobinas a serem simuladas.

	<i>Quadrada</i>			<i>Circular</i>			<i>Hexagonal</i>		
<i>Diâmetro Exterior [mm]</i>	<i>1000</i>	<i>1200</i>	<i>1400</i>	<i>1000</i>	<i>1200</i>	<i>1400</i>	<i>1000</i>	<i>1200</i>	<i>1400</i>
<i>Diâmetro Interior [mm]</i>	500	600	700	500	600	700	500	600	700
<i>Espessura [mm]</i>	26.23	26.23	26.23	26.23	26.23	26.23	26.23	26.23	26.23
<i>Enrolamentos</i>	50	50	50	50	50	50	50	50	50
<i>Resistência Interna da bobina [<math>\Omega</math>]</i>	2.0531	2.9565	4.0241	2.0531	2.9565	4.0241	2.0531	2.9565	4.0241

### 5.2. Carregamento indutivo sem topologia de compensação série-série

Por forma a simular o sistema de transferência de energia sem fios, considera-se o circuito elétrico equivalente da Figura 5.4. Neste circuito  $r_p$  e  $r_s$  representam as resistências internas das bobinas primária e secundária, respetivamente, e  $R$  a resistência de carga;  $L_p$  e  $L_s$  são as indutâncias próprias das bobinas primária e secundária, respetivamente;  $M$  é a indutância mútua entre as duas bobinas;  $V_p$  é a tensão de alimentação da bobina primária e  $V_s$  é a tensão de saída do circuito.

Aplicando a lei de *Kirchhoff*, obtém-se as equações (5.10) e (5.11).

$$V_p = r_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt} \quad (5.10)$$

$$V_s = (r_s + R) i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{di_p}{dt} \quad (5.11)$$

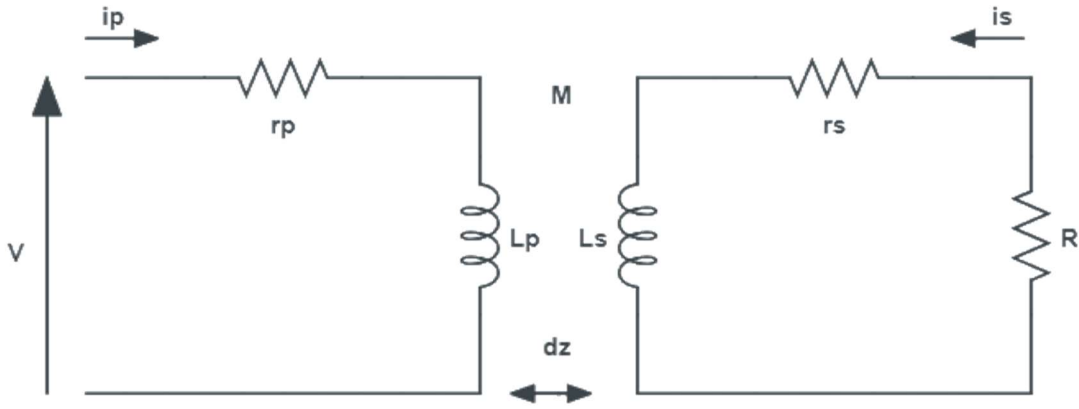


Figura 5.4-Circuito equivalente

Através das equações (5.10) e (5.11), obtêm-se as equações (5.12) e (5.13).

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_p} \left( -M \frac{di_s}{dt} + V_p - i_p r_p \right) \quad (5.12)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( -M \frac{di_p}{dt} + V_s - i_s (r_s + R) \right) \quad (5.13)$$

O fator de acoplamento entre as duas bobinas é dado pela expressão (5.14).

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (5.14)$$

O software *MagNet* permite calcular os valores das indutâncias de cada bobina ( $L_p$  e  $L_s$ ) e a respetiva indutância mútua ( $M$ ), para diferentes geometrias, tipos de núcleos (núcleo de ar e núcleo ferromagnético) distâncias ( $l_{ag}$ ) entre bobinas e desfasamento angular axial ( $a$ ), para cada par de bobinas.

Através das equações do circuito acima descritas, é possível construir o modelo do circuito não ressonante no *Simulink*, Figura 5.5. Para a solução do sistema, foi utilizado o método de integração Dormand-Prince, com um passo máximo de  $1 \times 10^{-8}$  com uma tolerância relativa de  $1 \times 10^{-3}$  e com uma duração de simulação de 0.025 segundos. Para precisões superiores, não se verificou uma diferença de resultados significativa que justificasse o aumento do tempo de simulação.

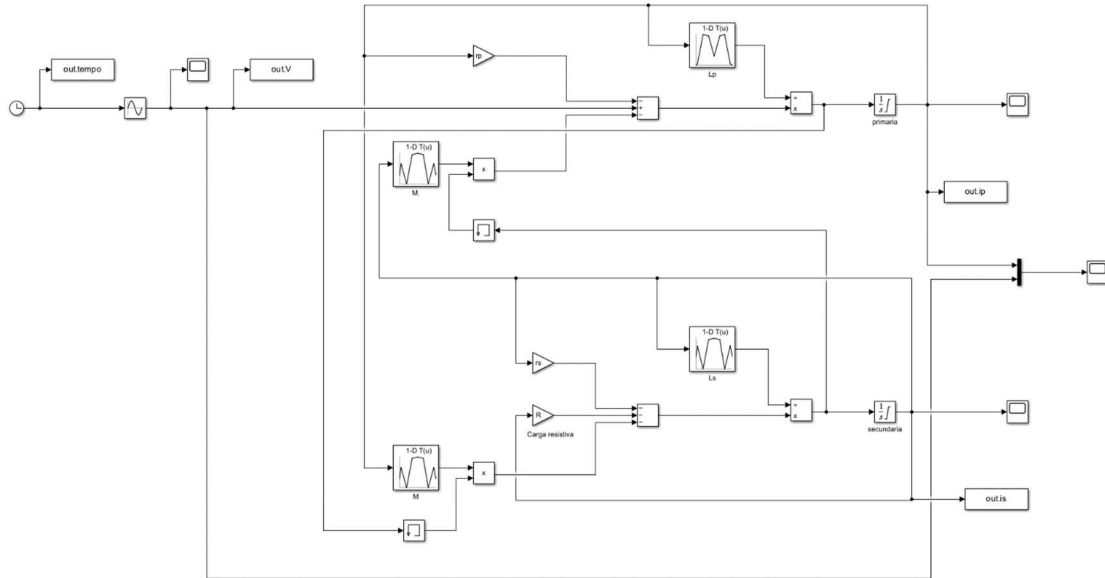


Figura 5.5-Modelo do circuito indutivo no *Simulink*.

### 5.3. Carregamento indutivo com topologia de compensação série-série

Com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema, foi considerado um sistema de acoplamento indutivo com topologia ressonante SS, Figura 5.6. Neste circuito,  $C_p$  e  $C_s$  representam os condensadores primário e secundário, respectivamente;  $r_p$  e  $r_s$  representam as resistências primária e secundária, respectivamente;  $L_p$  e  $L_s$  as indutâncias próprias da bobina primária e secundária, respectivamente;  $M$  a indutância mútua entre as bobinas;  $V$  a tensão de alimentação do circuito e  $R$  a resistência da carga, que representa a bateria do veículo elétrico. As capacidades dos condensadores são calculadas através das equações (5.15) e (5.16), nas condições de ressonância com as indutâncias das bobinas, sendo a frequência angular de referência dada pela equação (5.17).

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L_p} \quad (5.15)$$

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

$$\omega = 2\pi f \quad (5.17)$$

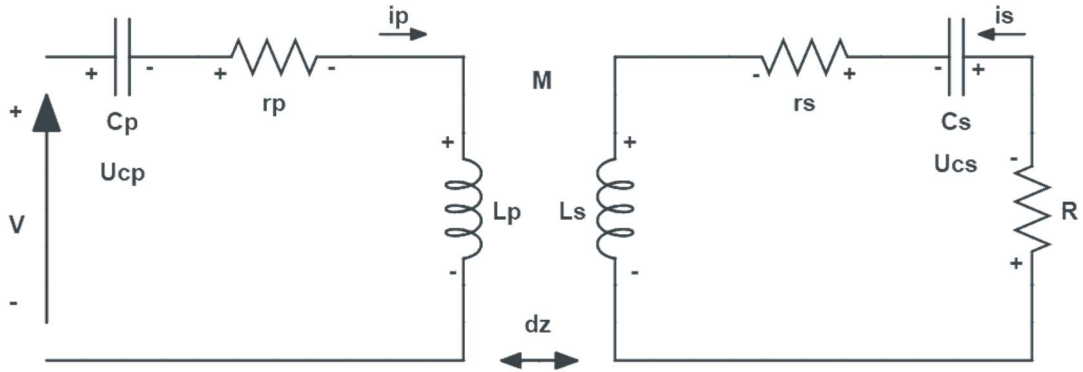


Figura 5.6-Circuito equivalente com topologia ressonante SS.

As equações (5.18) e (5.19) regem o comportamento dinâmico do sistema.

$$-V + U_{cp} + i_p r_p + L_p \frac{di_p}{dt} + M \frac{di_s}{dt} = 0 \quad (5.18)$$

$$i_s R + U_{cs} + i_s r_s + L_s \frac{di_s}{dt} + M \frac{di_p}{dt} = 0 \quad (5.19)$$

A manipulação das equações (5.18) e (5.19), conduz às equações (5.20) e (5.21).

$$\frac{\partial^2 U_{cp}}{\partial t^2} = \frac{V - U_{cp} - i_p r_p - M \frac{C_s \partial^2 U_{cs}}{\partial t^2}}{L_p C_p} \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial^2 U_{cs}}{\partial t^2} = \frac{i_s R - U_{cs} - i_s r_s - M \frac{C_p \partial^2 U_{cp}}{\partial t^2}}{L_s C_s} \quad (5.21)$$

Através das equações do circuito acima descritas, é possível construir o modelo do circuito ressonante no *Simulink*, Figura 5.7. Para a solução do sistema, foi utilizado o método de integração *Dormand-Prince*, com um passo máximo de  $1 \times 10^{-9}$  com uma tolerância relativa de  $1 \times 10^{-3}$  e com uma duração de simulação de 0.025 segundos. Para precisões superiores não se verificou uma diferença de resultados significativa que justificasse o aumento do tempo de simulação.

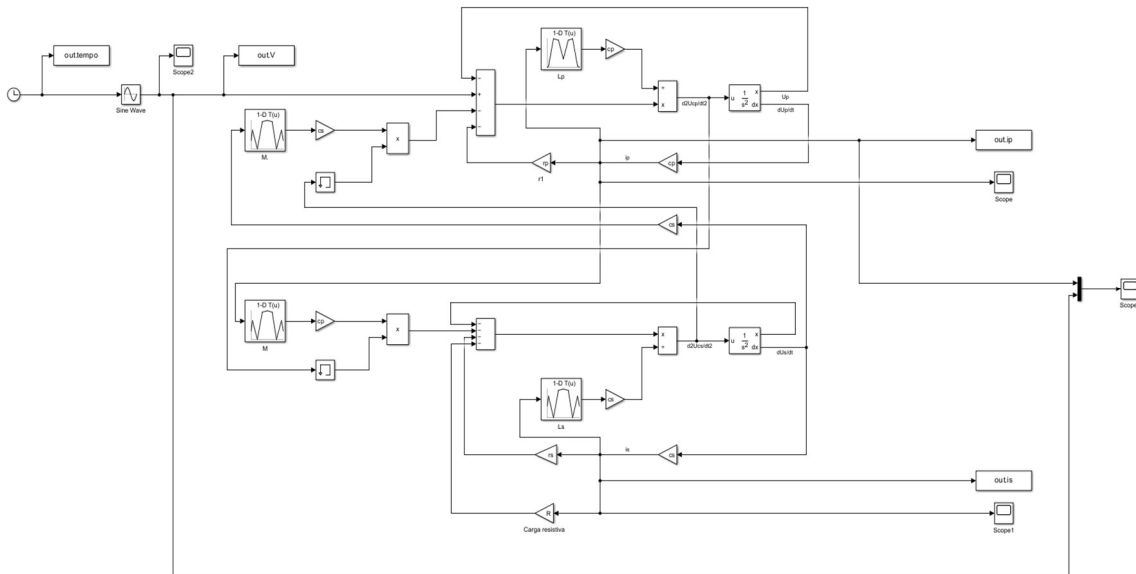


Figura 5.7-Modelo do circuito indutivo ressonante no *Simulink*.

## 5.4. Resultados

Para todas as avaliações através do método de elementos finitos, foi considerada uma malha de elementos triangulares. Para cada solução numérica, a malha é estabelecida automaticamente, à qual é aplicado um refinamento adaptativo do tipo  $h$  (por subdivisão) com uma tolerância de 0.5 % e um número máximo de 20 passos. A cada passo, o refinamento adaptativo é aplicado a 10 % dos elementos que requererem maior precisão de cálculo. Para cada solução, foram utilizados o método de *Newton-Raphson* com uma tolerância de 1 % e o valor de 20 para o número máximo de iterações. Em cada iteração do método de *Newton-Raphson*, é aplicado o método do Gradiente Conjugado com uma tolerância de 0.01 % para resolver o sistema de equações que regem os fenômenos eletromagnéticos analisados no modelo numérico. Os valores referidos foram selecionados com base nos resultados das várias simulações efetuadas ao longo deste trabalho. Para precisões superiores não se verificou uma diferença de resultados significativa que justificasse o aumento do tempo de simulação.

Os valores obtidos, através da simulação no *software MagNet*, da indutância do primário e secundário, indutância mútua e fator de acoplamento, encontram-se presentes no Anexo B.

Nas Figuras 5.8-5.10 é possível observar a interação do campo magnético entre duas bobinas com geometria circular a uma distância entre as mesmas de 100 mm e perceber o diferente comportamento entre elas consoante a escolha do núcleo a utilizar.

Neste caso, podemos observar um aumento significativo do campo magnético ( $B$ ) após a inserção do núcleo ferromagnético. É também possível constatar uma restrição do campo magnético ao espaço de ar entre as duas bobinas após a introdução do núcleo.

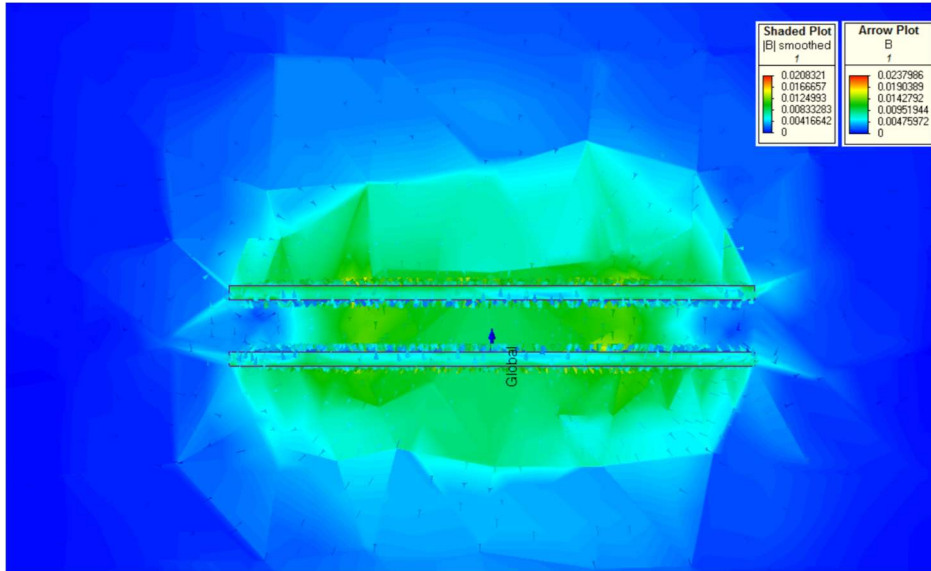


Figura 5.8- Interação do campo magnético para uma bobina com geometria circular, com núcleo de ar, a 100 mm de distância.

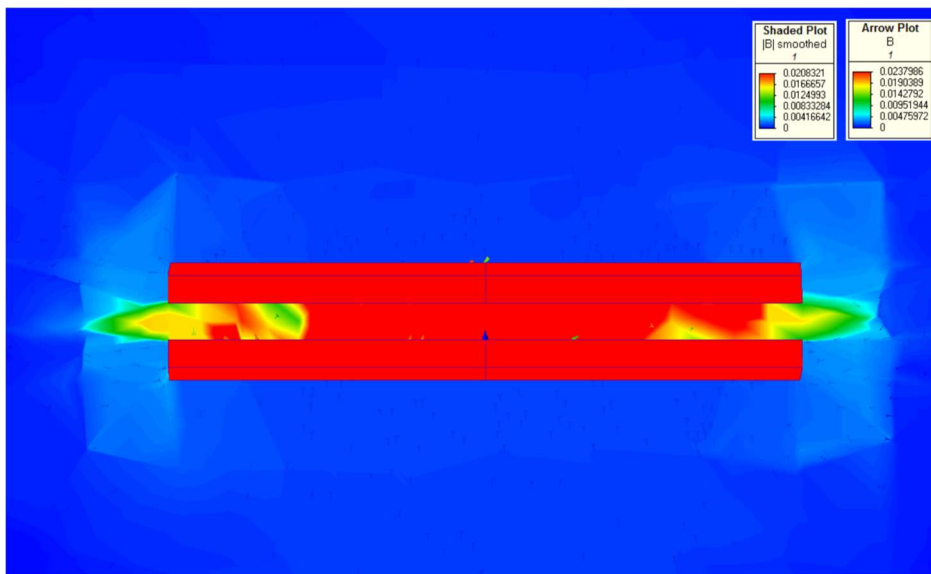


Figura 5.9-Interação do campo magnético para um par de bobinas com geometria circular, com núcleo ferromagnético, a 100 mm de distância entre as mesmas.

A Figura 5.10 encontra-se nas mesmas condições de simulação da anterior, no entanto, para uma melhor observação da interação do campo magnético foi necessário ampliar a escala do campo magnético.

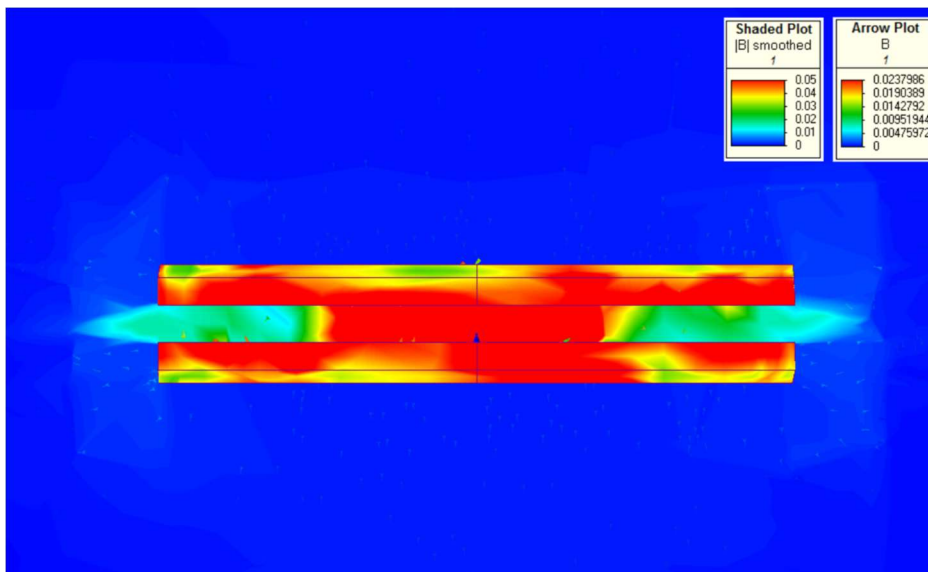


Figura 5.10-Interação do campo magnético para um par de bobinas com geometria circular, com núcleo ferromagnético, a 100 mm de distância entre as mesmas. Com escala B ampliada para melhor detalhe.

O fator de acoplamento,  $k$ , é um valor adimensional compreendido entre 0 e 1, onde 0 é indicativo de não existir acoplamento magnético e 1 indica um acoplamento perfeito. A Figura 5.11 mostra as características de variação do fator de acoplamento, para bobinas com núcleo de ar, em função de  $D_{out}$  e do ângulo de desfasamento axial entre bobinas.

Primeiramente, pode-se observar que com o aumento da distância entre as bobinas o fator de acoplamento tende a diminuir, enquanto com o aumento do tamanho da bobina ( $D_{out}$ ) este tende a ser reajustado para valores mais elevados. A uma distância de, por exemplo, 150 mm, a bobina circular com um  $D_{out}$  de 1200 mm apresenta um  $k$  de aproximadamente 0,5. Para a mesma distância, mas com um  $D_{out}$  de 1400 mm, o fator de acoplamento aumenta para aproximadamente 0,54. Assim, é comprovada a relação entre o diâmetro externo da bobina e a distância entre as mesmas. O comportamento para bobinas quadradas e hexagonais é semelhante.

A bobina circular, apenas simulada para um desfasamento axial de 0 graus, é a que tem melhor comportamento em relação às outras geometrias e esse desempenho é mais notável quanto maior a distância entre as mesmas.

Comparando as três geometrias, a hexagonal é a que oferece pior desempenho, no entanto, quando é simulado um ângulo de desfasamento é muito menos suscetível a perder desempenho do que a quadrada. Podemos observar que, por exemplo, a uma distância de 135 mm, com um ângulo 0, a bobina quadrada tem um fator de acoplamento de aproximadamente 0,52 e a hexagonal de 0,5. Mantendo a distância e aplicando um ângulo de, por exemplo, 20 graus, o fator de acoplamento da bobina quadrada desce para 0,48 e o da hexagonal mantém-se sensivelmente o mesmo. A geometria hexagonal

apresenta também um comportamento mais linear que a quadrada, que apresenta por vezes uma amplitude de valores muito grande.

De forma geral, pode-se afirmar que para a bobina hexagonal a condição limitante do seu desempenho é a distância entre as mesmas e na bobina quadrada o ângulo de desfasamento é muito mais impactante do que a distância.

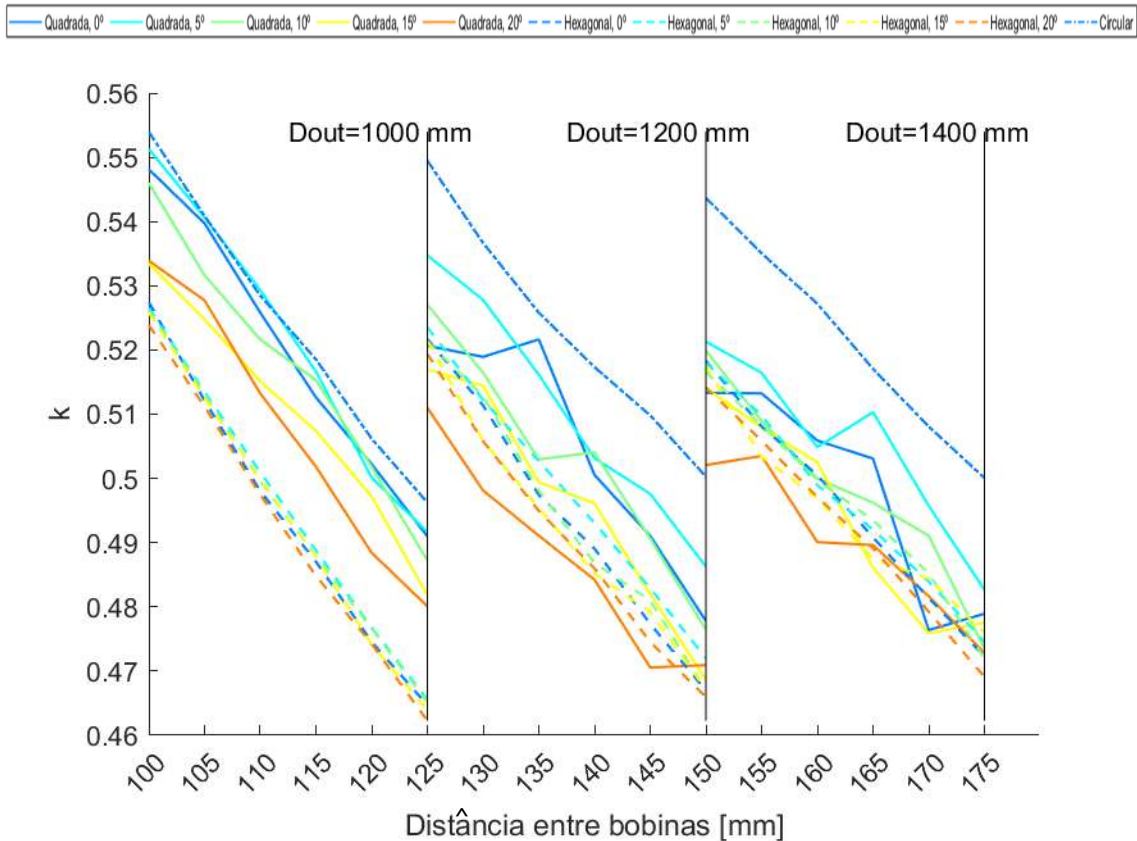


Figura 5.11-Fator de acoplamento para bobinas de núcleo de ar em função da distância entre as mesmas.

Aplicando o núcleo ferromagnético observa-se que os valores do fator de acoplamento são muito superiores do que no caso do núcleo de ar. No cenário de bobina quadrada, a 125 mm de distância com um ângulo de 0 graus, o fator de acoplamento passa de cerca de 0,55 para um valor de aproximadamente 0,83, Figura 5.12.

O fator de acoplamento para bobinas de núcleo de ar (Figura 5.11) apresenta, considerando todos os cenários, uma amplitude de valores entre aproximadamente 0.55 e 0.46 e com a introdução de um núcleo ferromagnético esses valores sobem para valores entre aproximadamente 0,84 e 0,66, Figura 5.12.

Para um núcleo de ar, o aumento do  $D_{out}$  tinha um grande impacto no fator de acoplamento ao longo do aumento de distância entre bobinas. Esse mesmo comportamento não se verifica para bobinas com núcleo ferromagnético, onde é evidente um menor aumento do fator de acoplamento.

A tendência na diminuição do fator de acoplamento com o aumento da distância mantém-se e a relação entre bobinas é semelhante ao cenário sem núcleo ferromagnético.

Após a introdução do núcleo ferromagnético, repara-se que as bobinas com geometria quadrada passam a ser as que têm melhor desempenho, ultrapassando as circulares no cenário de núcleo de ar para um ângulo de  $0^\circ$ . No entanto, com o aumento do desfasamento axial são as que apresentam uma maior descida no valor de  $k$ , (Figuras 5.12-5.16). Continuam a apresentar uma maior variabilidade nos valores obtidos, não variando linearmente com o aumento da distância entre elas. Se analisarmos do ponto de vista da introdução de um desfasamento axial, são as que perdem rendimento mais rapidamente, sendo que para um ângulo de  $0^\circ$  variam entre um fator de acoplamento de 0,84 e 0,72 (Figura 5.12). Se for provocado um ângulo de 20 graus entre o par de bobinas, o seu fator de acoplamento baixa para valores entre 0,78 e 0,68 (Figura 5.16). O mesmo comportamento não se observa nas bobinas circulares devido à sua natureza geométrica, onde a variação no fator de acoplamento se mantém para diferentes ângulos.

Quando uma corrente passa por uma bobina, ela gera um campo magnético ao seu redor. Se existir outra próxima, parte desse campo magnético pode acoplar-se à segunda bobina. A quantidade de fluxo magnético que consegue acoplar-se à segunda bobina depende de vários fatores, incluindo a distância entre as bobinas, o número de espiras em cada bobina e a corrente que passa pela bobina primária.

A corrente na primeira bobina é importante porque determina a força do campo magnético gerado. Um campo magnético mais forte pode acoplar-se mais facilmente à segunda bobina, aumentando o fator de acoplamento. No entanto neste sistema, o aumento de corrente de 15 A para 50 A, apresenta benefícios residuais do ponto de vista do fator de acoplamento. Pontualmente, uma corrente maior apresenta um fator de acoplamento mais elevado (bobina quadrada, a 115 mm para  $0^\circ$ ; bobina quadrada, a 155 mm para  $5^\circ$ ), (Figura 5.12-5.13).

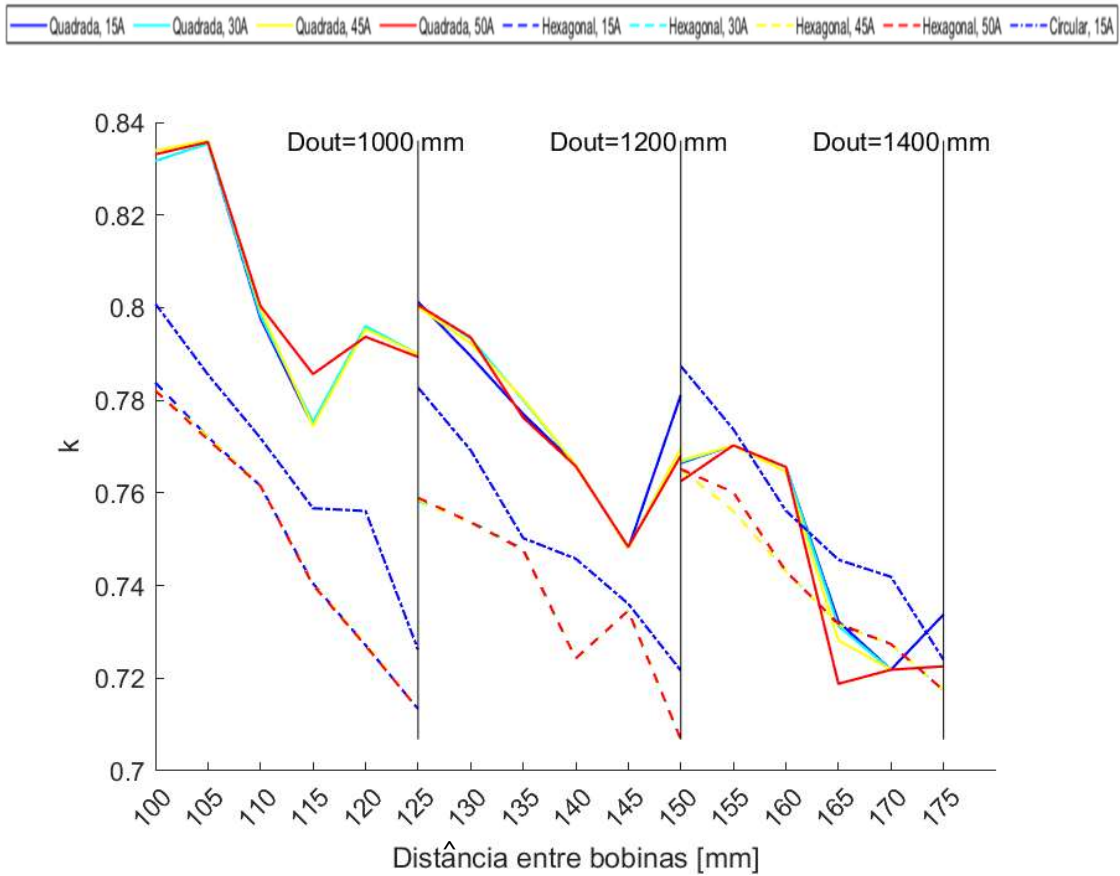


Figura 5.12-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de  $0^\circ$ .

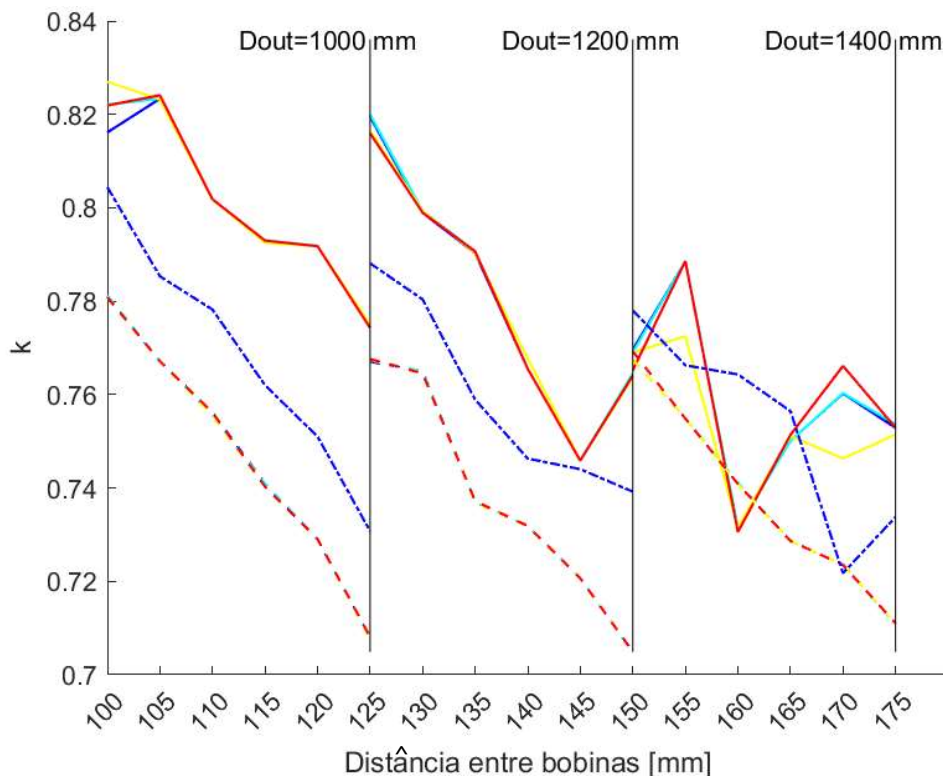


Figura 5.13-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de  $5^\circ$ .

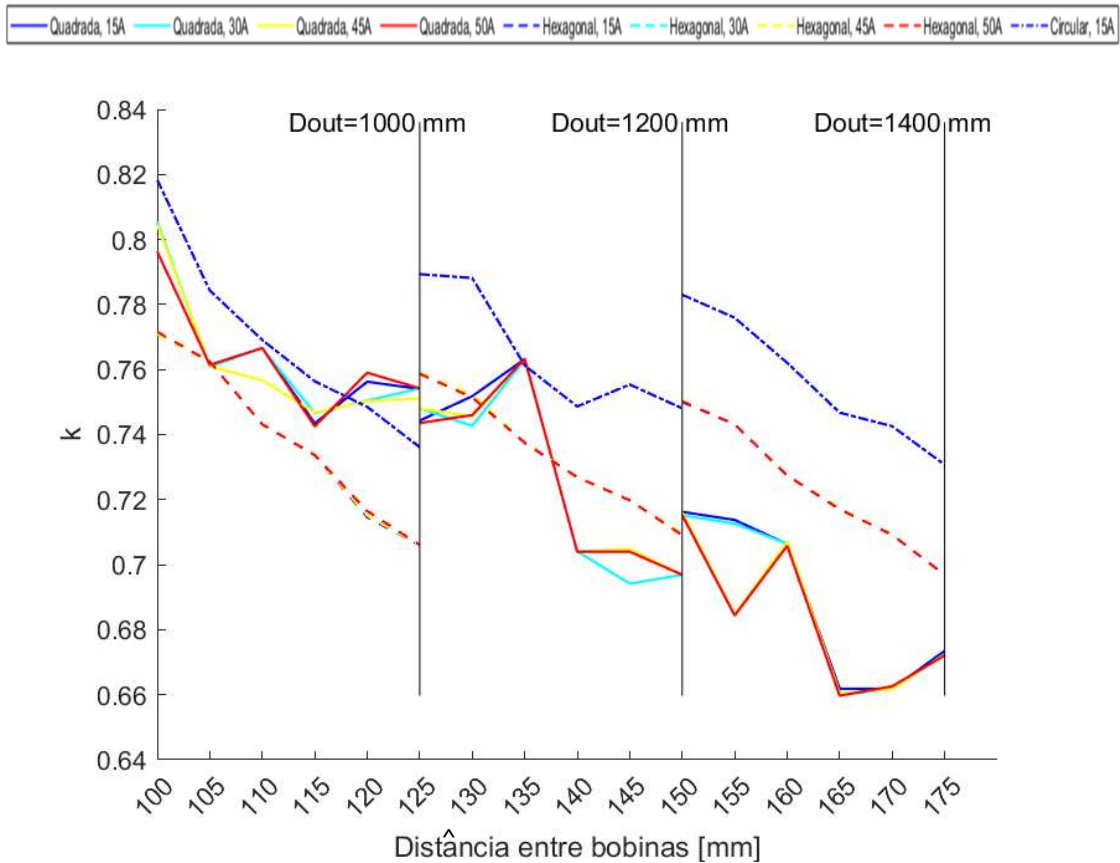


Figura 5.14-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de  $10^\circ$ .

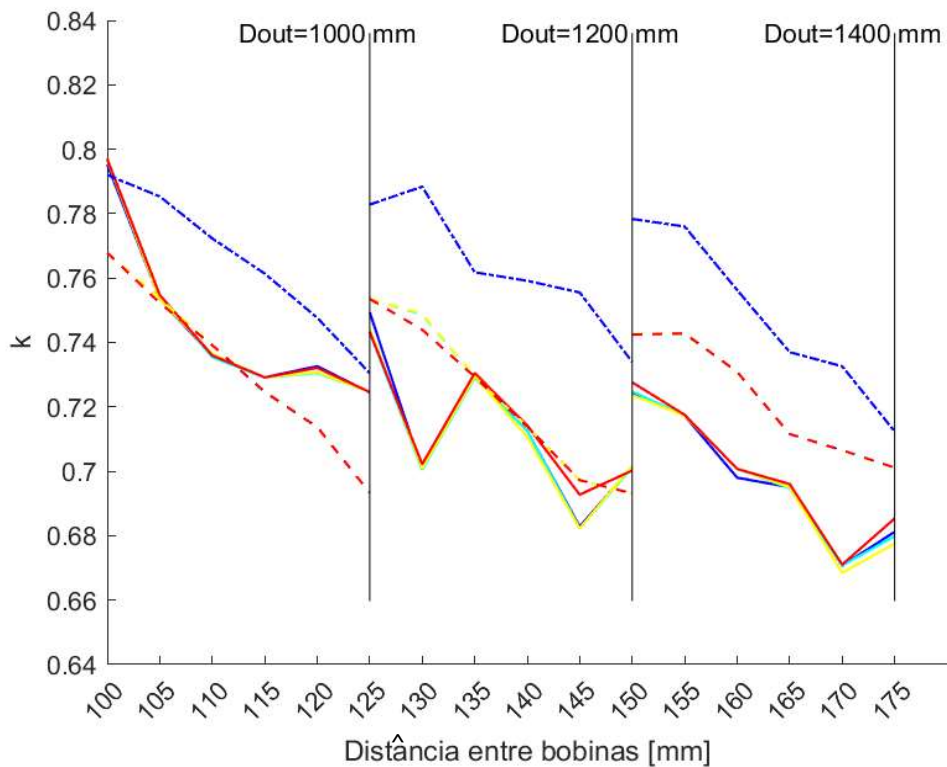


Figura 5.15-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de  $15^\circ$ .

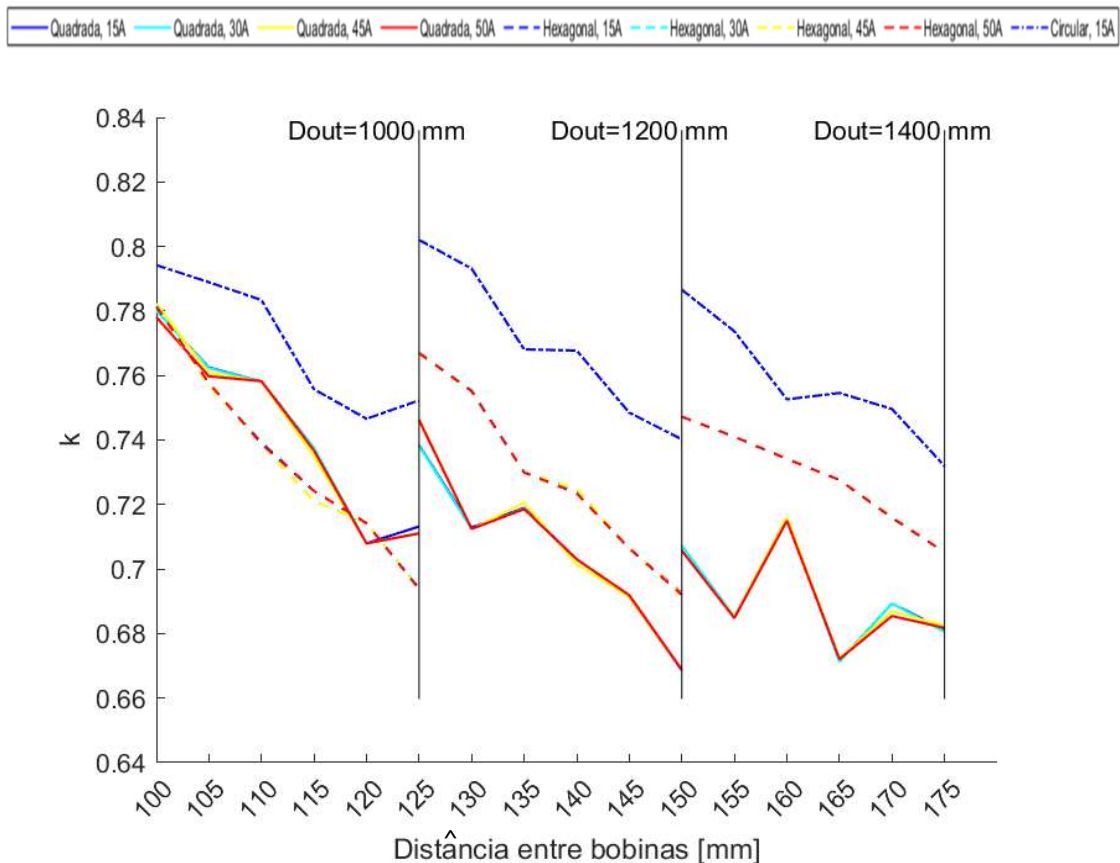


Figura 5.16-Variação do fator de acoplamento em função da distância entre as bobinas com núcleo ferro magnético para um ângulo de desfasamento de 20°.

Os valores do fator de acoplamento obtidos neste trabalho, com a introdução desta metodologia de análise e com o dimensionamento experimental do núcleo ferromagnético, foram comparados com os presentes na literatura, tendo-se verificado que são superiores. Apesar de não ser possível realizar uma comparação direta, devido à utilização de sistemas com escala reduzida, é possível enquadrar os valores obtidos com os de diversos autores, Tabela 5.4.

Tabela 5.4- Comparação do valor de fator de acoplamento entre este estudo e a literatura.

Referências	Dimensões [mm]	Tipologia de Núcleo	Distância entre bobinas [mm]	Fator de Acoplamento (k)
[55]	600×500	Placa	150	0.21-0.23
[56]	400×400	Placa	0-50	0.45-0.28
[57]	330×330	Barras	100-180	0.27-0.125
[58]	170×170	Barras	50-100	0.33-0.11
[59]	500×500	Nanocrystalline Ribbon	100-300	0.35-0.075
[60]	220×220	Arco	40	0.5
[61]	432	UU	160	0.07-0.04
<b>Este trabalho</b>	1000×1000	Pot core	100-125	0.84-0.7
	1200×1200	Pot core	125-150	0.82-0.66
	1400×1400	Pot core	150-175	0.79-0.66

Para um sistema não ressonante, a bobina circular, em comparação com as bobinas quadradas e hexagonais, é a que apresenta melhores resultados de energia. Esta, naturalmente, diminui o seu desempenho com o aumento da distância entre bobinas, sendo o impacto do desfasamento axial negligenciável.

Para todos os pares de bobinas, distâncias e ângulos foram simuladas quatro frequências: 15 kHz; 20 kHz; 25 kHz e 30 kHz, (Figuras 5.17-5.21). Com o aumento da frequência observa-se uma diminuição de energia entregue à carga. Para uma distância de 100 mm, obtiveram-se valores de 250 Wh para a frequência de 15kHz, de 150 Wh para a frequência de 20 kHz e de 100Wh para a frequência de 25 kHz. Os valores para as bobinas quadradas e hexagonais são anormalmente baixos.

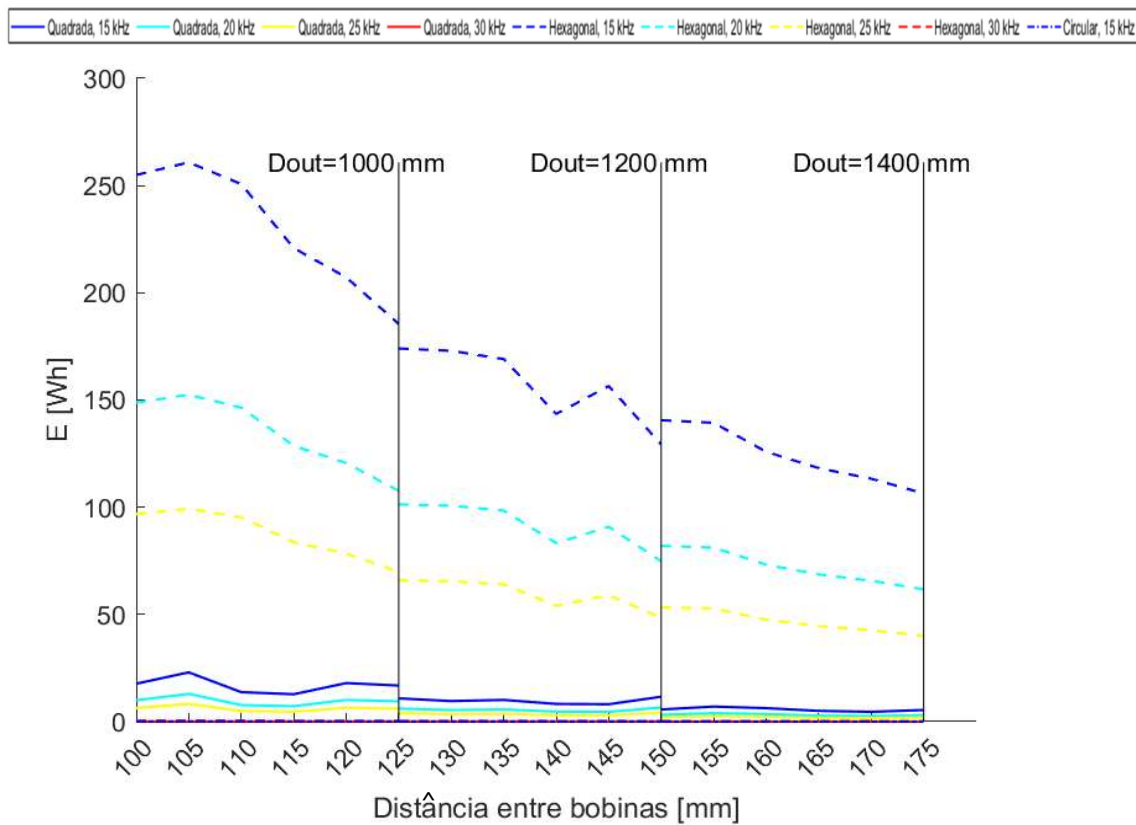


Figura 5.17-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de 0°.

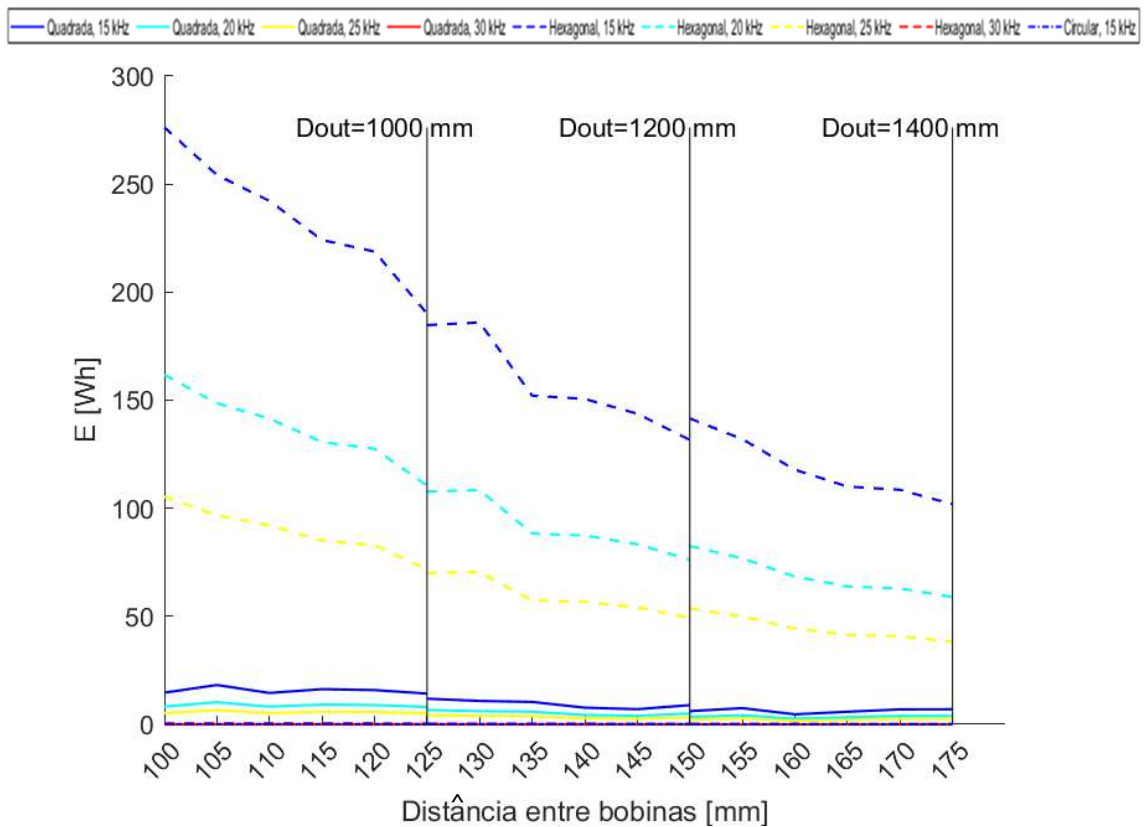


Figura 5.18-Varição da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de  $5^\circ$ .

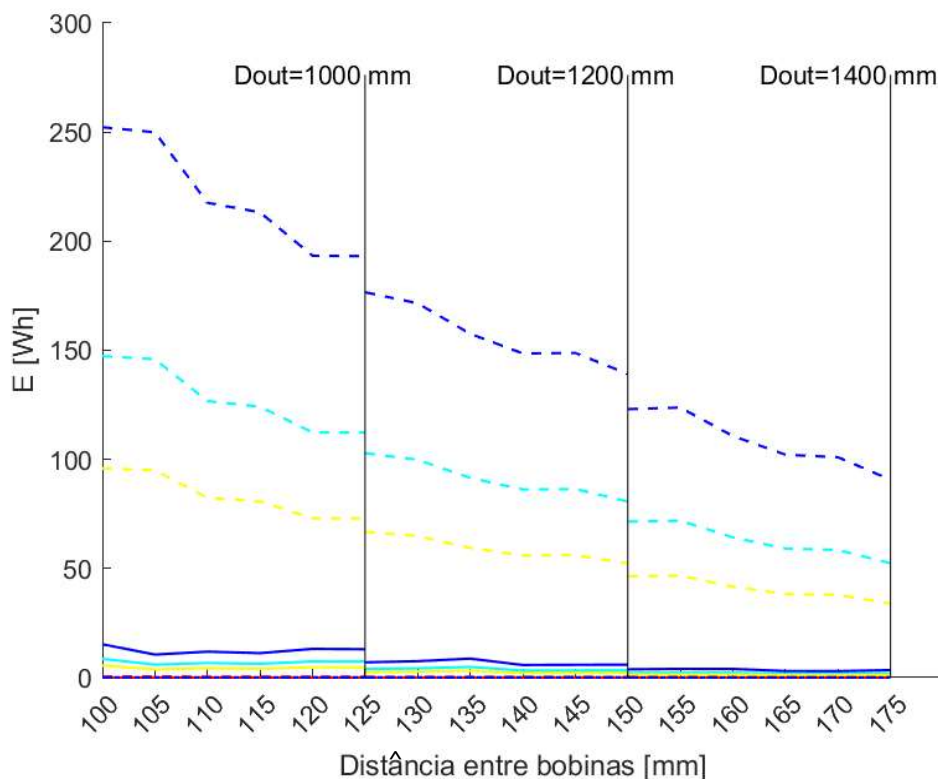


Figura 5.19-Varição da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de  $10^\circ$ .

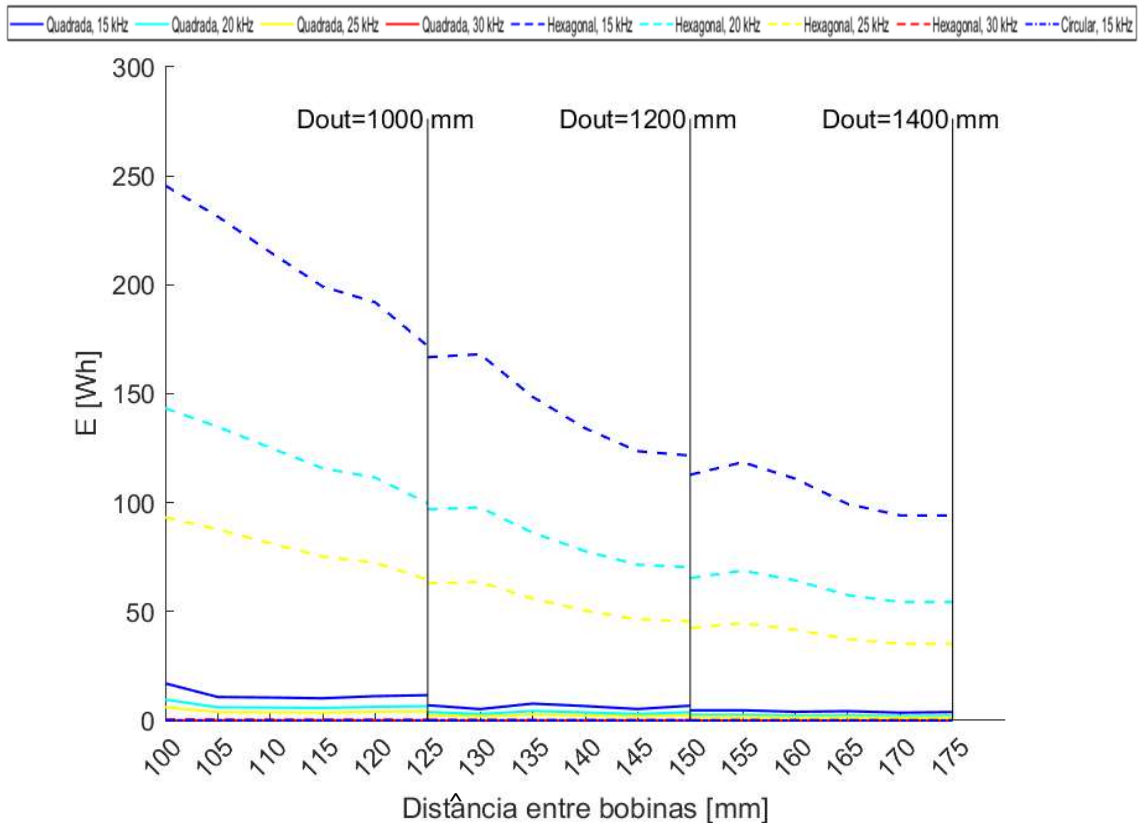


Figura 5.20-Varição da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de 15°.

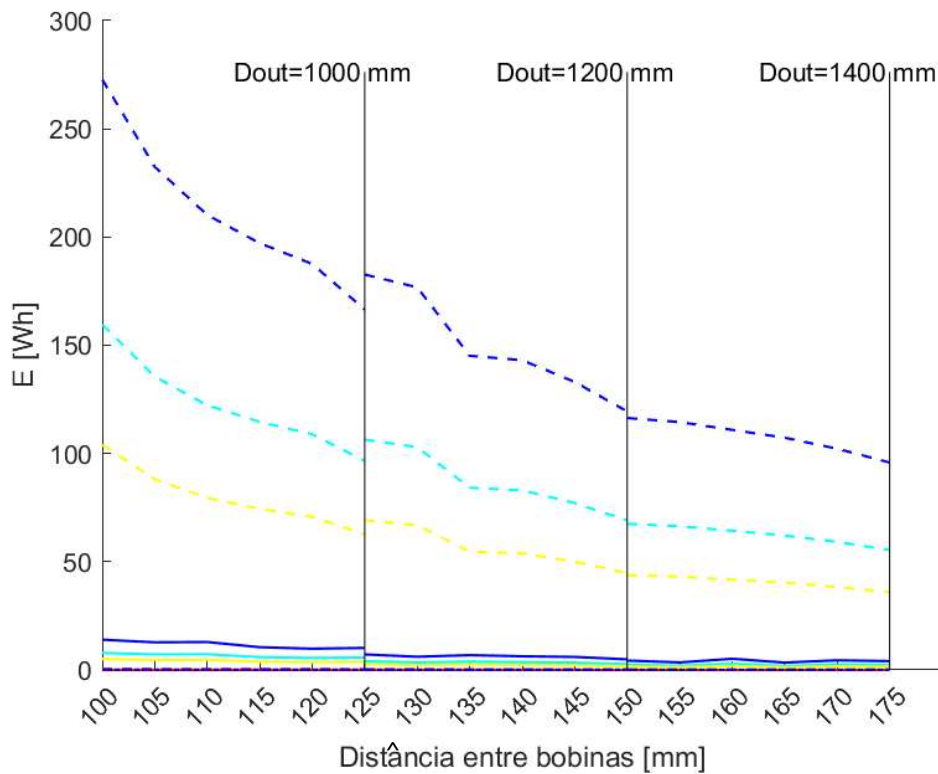


Figura 5.21-Varição da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito não ressonante com um ângulo de desfasamento de 20°

Após a introdução do sistema ressonante com topologia SS, podemos observar que existe um aumento considerável da energia entregue à carga, (Figuras 5.22-5.25). É possível observar um aumento positivo da energia nas geometrias hexagonal e quadrada, passando-se de valores residuais para valores de 2500 Wh e de cerca de 1000 Wh, respetivamente. Mais uma vez, tal como no fator de acoplamento, as bobinas de geometria quadrada são as que sofrem maiores perdas. Com o aumento do desfasamento axial, com valores cerca de 2000 Wh para uma geometria quadrada, distância de 105 mm e ângulo de  $0^\circ$  (Figura 5.22), obtém-se valores de aproximadamente 500 Wh com a introdução de um ângulo de  $20^\circ$ , (Figura 5.26). O mesmo acontece nas outras geometrias, mas não de uma forma tão impactante. A geometria hexagonal é a mais linear no seu comportamento. O mesmo não acontece com as quadradas, que variam bastante, e com as circulares, que por vezes apresentam picos de energia anómalos. De salientar que o fator de acoplamento não sofre qualquer alteração na topologia ressonante, pois é um parâmetro do próprio sistema de bobinas e não da parte dinâmica do sistema.

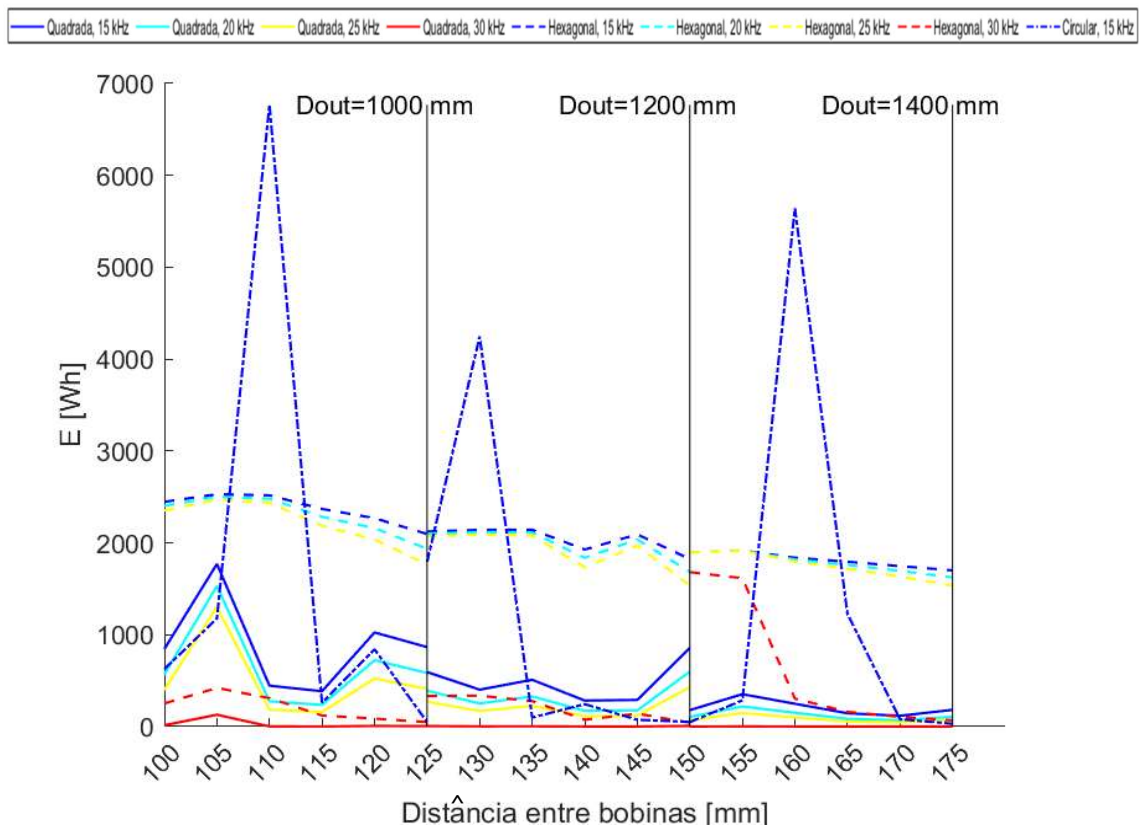


Figura 5.22-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de desfasamento de  $0^\circ$ .

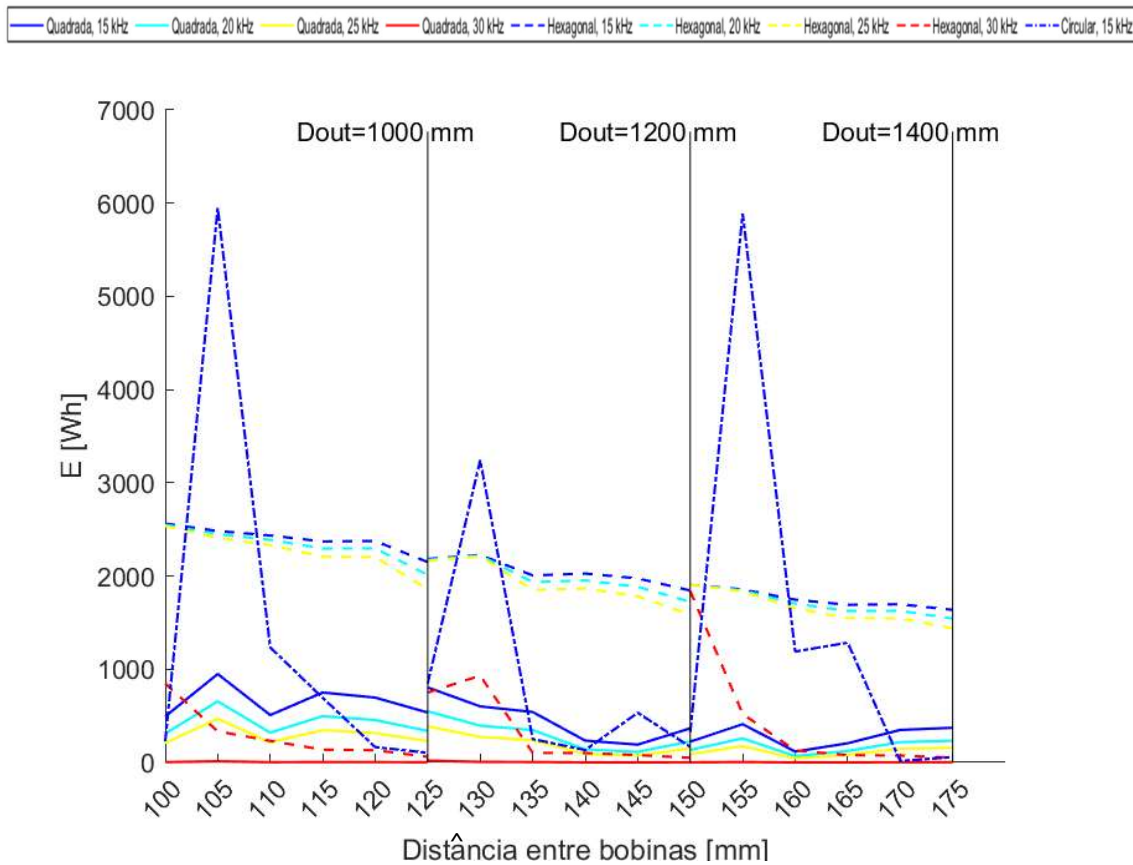


Figura 5.23-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de defasamento de  $5^\circ$ .

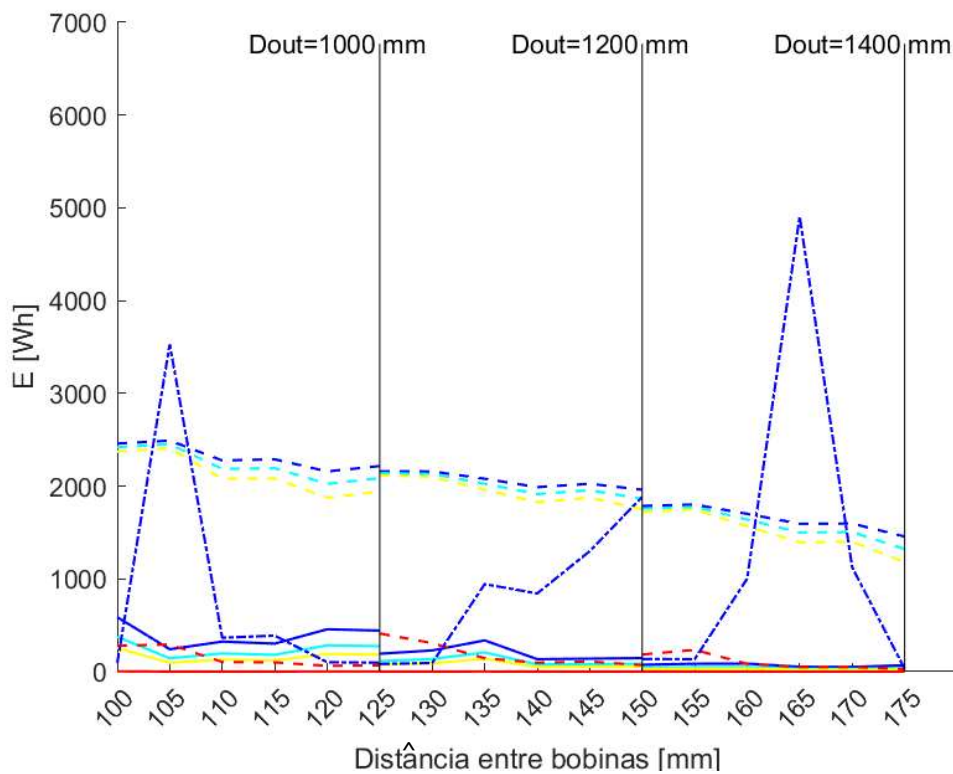


Figura 5.24-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de defasamento de  $10^\circ$ .

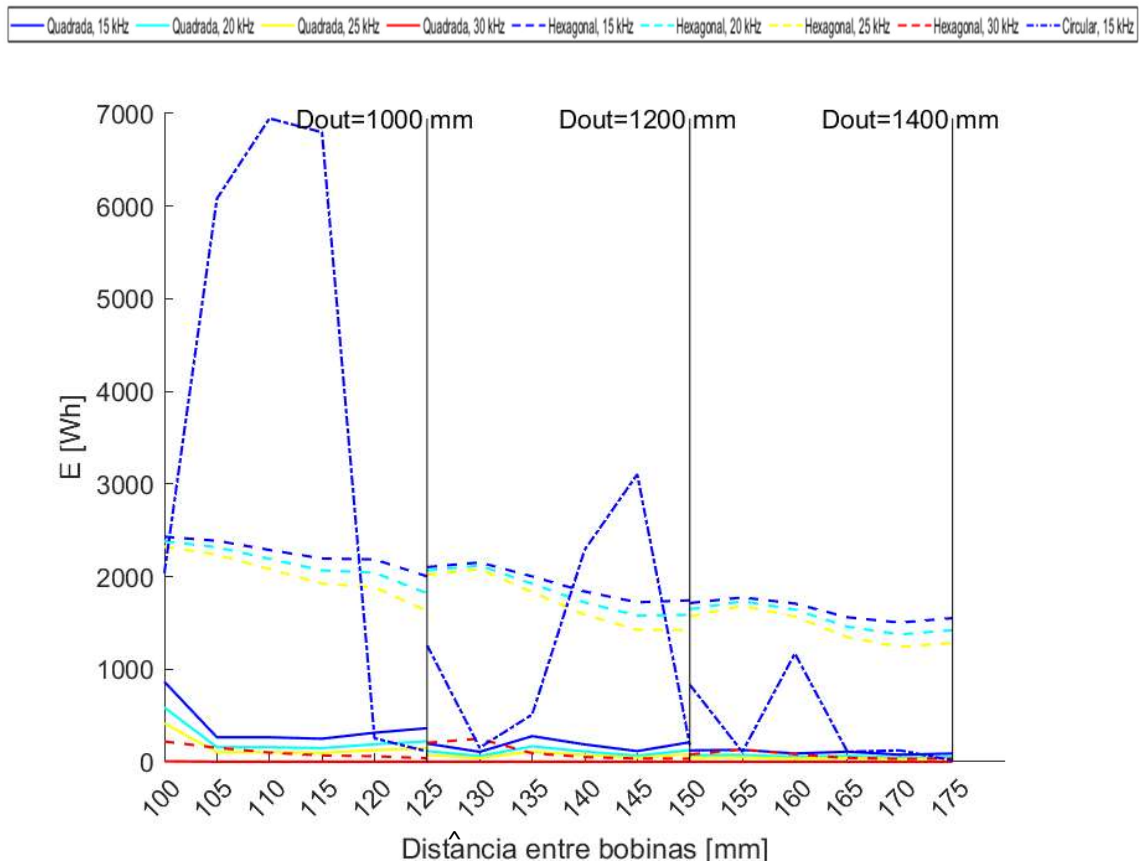


Figura 5.25-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de defasamento de 15°.

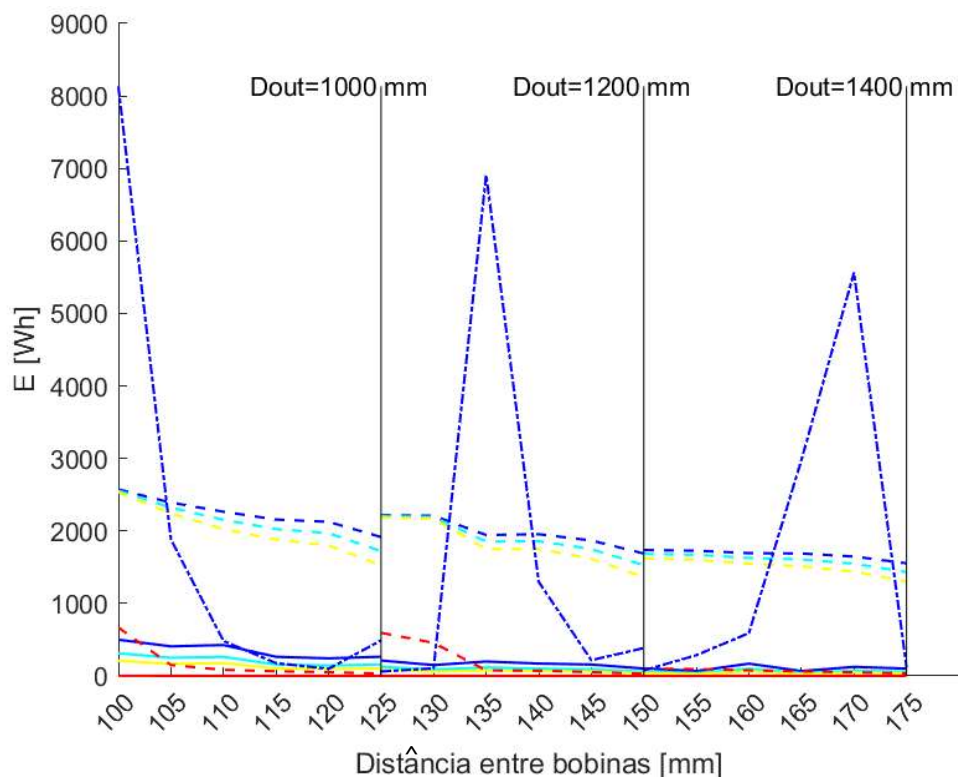


Figura 5.26-Variação da Energia entregue à carga em função da frequência para bobinas inseridas num circuito ressonante com um ângulo de defasamento de 20°.

Podemos então concluir que, apesar das bobinas com geometria quadrada e circular apresentarem os melhores valores de fator de acoplamento, as bobinas com geometria hexagonal, perante os inúmeros cenários, tais como a alteração da distância, ângulos de defasamento e alteração de frequência, apesar de por vezes apresentarem valores inferiores de fator de acoplamento e de energia, são bastante lineares e previsíveis, tornando-as boas candidatas a serem adotadas em situações com cenários semelhantes aos deste trabalho.

A inserção do núcleo ferromagnético demonstrou ser muito positiva como também em comparação com outras tipologias de núcleo presentes na literatura.

Por fim, a introdução de uma topologia ressonante aprimora ainda mais o desempenho do sistema.

## Capítulo 6

### Considerações finais e estudos futuros

Esta dissertação teve como objetivo verificar o impacto do dimensionamento e análise de um sistema de transferência de energia indutiva. Tendo como principal objetivo o dimensionamento da bobina e do núcleo ferromagnético, o estudo da interação entre o par de bobinas centrou-se nos conceitos fundamentais necessários à realização da transferência de energia.

Inicialmente, foi feito o enquadramento dos diversos tipos de transferência de energia com e sem fios, onde se verificou o elevado potencial associado ao carregamento sem fios indutivo com topologia ressonante. Sendo o funcionamento do sistema condicionado por fatores externos como a alteração de comportamento a diversas distâncias e ângulos de defasagem, o uso de núcleo ferromagnético e topologias de compensação, houve necessidade de adquirir conhecimento sobre estes tópicos com a finalidade de, não só, quantificar a transferência de energia como também avaliar a sua influência no comportamento dinâmico do sistema.

Recorreu-se à realização do dimensionamento das bobinas bem como do núcleo ferromagnético de acordo com as restrições presentes na literatura científica encontrada. Para além de verificar a variação do fator de acoplamento para os diversos cenários presentes no trabalho, procurou-se também avaliar o impacto do núcleo ferromagnético no sistema, verificando e validando a presença deste. Por fim, foi estudada a inserção de uma topologia ressonante com compensação série-série (SS), onde foi verificado que existe um aumento considerável na energia entregue à carga e que, consecutivamente, o rendimento do sistema é substancialmente superior quando comparada com a ausência dessa compensação. É imprescindível o uso destas topologias para se obter uma boa eficiência na transferência de energia.

A análise de elementos finitos foi efetuada no software comercial *MagNet* e os modelos matemáticos avaliados foram implementados em ambiente *Simulink*. Todo o processo de cálculo computacional apresentado neste trabalho, assim como a execução e controlo das ferramentas de análise, foram realizados em linguagem própria da plataforma *Matlab*.

Considera-se que o trabalho foi executado e concluído com sucesso, onde os objetivos propostos foram atingidos.

## **6.1. Limitações**

Em geral esta dissertação apresentou um balanço positivo e não apresentou muitas limitações e/ou dificuldades.

### **6.1.1. Limitações externas**

Na literatura os valores do fator de acoplamento apresentam valores bastantes díspares entre autores. As distâncias entre bobinas e o próprio tamanho das mesmas frequentemente não correspondem à realidade, adotando valores que não são encontrados nos veículos elétricos. Outro aspeto, algo importante, é a falta de unanimidade na escolha do tipo de núcleo ferromagnético, como também a falta de metodologias e critérios para o dimensionamento do mesmo, criando uma incerteza na escolha da melhor tipologia.

### **6.1.2 Limitações internas**

Uma das limitações encontradas diz respeito às possibilidades infundáveis de cenários, portanto, devido a restrições impostas pelo *hardware*, *software* e tempo disponível, tendo sido necessário estabelecer limites. No entanto, é importante ter em consideração que os resultados deste estudo foram obtidos a partir de cenários que se consideram relevantes.

## **6.2. Estudos futuros**

Em primeiro lugar seria valoroso a realização de um protótipo com escala reduzida para a verificação experimental dos dimensionamentos propostos. Seria também de extremo interesse a análise de outras tipologias ressonantes, como a LCC e o uso de inteligência artificial para um controlo ótimo, a fim de maximizar o desempenho do sistema. Também relevante seria o estudo comparativo entre diversas tipologias de núcleos ferromagnéticos e o seu impacto no sistema, como também o uso de alumínio para uma maior proteção contra os seres humanos, analisando-se se o impacto é muito negativo na transferência de energia. Outro ponto a abordar poderia ser a análise da influência da variável de desalinhamento horizontal, aliando-se ao desfasamento vertical e axial por forma a serem estudadas todas as variáveis presentes no sistema. Para além disso, também seria relevante avaliar o comportamento das diferentes topologias num

cenário de carregamento sem fios dinâmico a fim de estudar o impacto da velocidade do veículo no seu carregamento.

# Bibliografia

- [1] L. Soares and H. Wang, “A study on renewed perspectives of electrified road for wireless power transfer of electric vehicles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158. Elsevier Ltd, Apr. 01, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112110.
- [2] F. Chen, N. Taylor, and N. Kringos, “Electrification of roads: Opportunities and challenges,” *Applied Energy*, vol. 150. Elsevier Ltd, pp. 109–119, Jul. 05, 2015. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.03.067.
- [3] A. Ajanovic, “The future of electric vehicles: Prospects and impediments,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 4, no. 6. John Wiley and Sons Ltd, pp. 521–536, Nov. 01, 2015. doi: 10.1002/wene.160.
- [4] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, “A review on electric vehicles: Technologies and challenges,” *Smart Cities*, vol. 4, no. 1. MDPI, pp. 372–404, Mar. 01, 2021. doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [5] A. Mahmoudzadeh Andwari, A. Pesiridis, S. Rajoo, R. Martinez-Botas, and V. Esfahanian, “A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78. Elsevier Ltd, pp. 414–430, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.138.
- [6] J. Lach, K. Wróbel, J. Wróbel, P. Podsadni, and A. Czerwiński, “Applications of carbon in lead-acid batteries: a review,” *Journal of Solid State Electrochemistry*, vol. 23, no. 3. Springer New York LLC, pp. 693–705, Mar. 12, 2019. doi: 10.1007/s10008-018-04174-5.
- [7] G. J. May, A. Davidson, and B. Monahov, “Lead batteries for utility energy storage: A review,” *Journal of Energy Storage*, vol. 15. Elsevier Ltd, pp. 145–157, Feb. 01, 2018. doi: 10.1016/j.est.2017.11.008.
- [8] ATSDR, “Toxicological Profile for Lead,” 2020.
- [9] J. Decicco, J. Kliesch, and M. Thomas, *ACEEE’s green book: The environmental guide to cars and trucks, Model year 2000*. 2007.
- [10] Z. Abdin and K. R. Khalilpour, “Nickel Cadmium Battery Single and Polystorage Technologies for Renewable-Based Hybrid Energy Systems.”
- [11] K. Ogura and M. L. Kolhe, “Battery technologies for electric vehicles,” in *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, Elsevier Inc., 2017, pp. 139–167. doi: 10.1016/B978-0-12-803021-9.00004-5.
- [12] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, “The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89. Elsevier Ltd, pp. 292–308, Jun. 01, 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.002.
- [13] University of Cambridge, “Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS)- Battery characteristics.” Accessed: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery\\_characteristics.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/battery_characteristics.php)
- [14] R. C. Bansal, *Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives*. Chicago, Illinois: Taylor & Francis, 2005.
- [15] T. F. C. Nabais, “Sistemas de carregamentos de veículos elétricos wireless,” Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2017.
- [16] M. Murnane and A. Ghazel, “A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries.”

- [17] Q. Lin, J. Wang, R. Xiong, W. Shen, and H. He, "Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries," *Energy*, vol. 183, pp. 220–234, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.128.
- [18] R. Velho, M. Beirão, M. Do Rosário Calado, J. Pombo, J. Fermeiro, and S. Mariano, "Management system for large li-ion battery packs with a new adaptive multistage charging method," *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 5, 2017, doi: 10.3390/en10050605.
- [19] Chun-Liang Liu, Shun-Chung Wang, Shao-Shan Chiang, Yi-Hwa Liu, and H. Chien-Hung, "PSO-Based Fuzzy Logic Optimization of Dual Performance Characteristic Indices for Fast Charging of Lithium-Ion Batteries," 2013.
- [20] Schneider Electric, "Electric Vehicle and EV charging fundamentals." Accessed: Nov. 12, 2022. [Online]. Available: [https://www.electrical-installation.org/en/wiki/Electric\\_Vehicle\\_and\\_EV\\_charging\\_fundamentals](https://www.electrical-installation.org/en/wiki/Electric_Vehicle_and_EV_charging_fundamentals)
- [21] WiTricity Corporation, "The Electric Car Unplugged How Wireless Charging Transforms the EV Experience," 2022. Accessed: Jan. 05, 2023. [Online]. Available: <https://witricity.com/wp-content/uploads/2022/05/The-Electric-Car-Unplugged-Final.pdf>
- [22] 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," *Applied Energy*, vol. 179. Elsevier Ltd, pp. 413–425, Oct. 01, 2016. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.003.
- [23] C. H. Lin *et al.*, "Comprehensive analysis of ipt v/s cpt for wireless ev charging and effect of capacitor plate shape and foreign particle on cpt," *Processes*, vol. 9, no. 9, Sep. 2021, doi: 10.3390/pr9091619.
- [24] K. A. Kalwar, M. Aamir, and S. Mekhilef, "Inductively coupled power transfer (ICPT) for electric vehicle charging - A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47. Elsevier Ltd, pp. 462–475, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.040.
- [25] M. Lu, A. Junussov, and M. Bagheri, "Analysis of resonant coupling coil configurations of EV wireless charging system: a simulation study," *Frontiers in Energy*, vol. 14, no. 1, pp. 152–165, Mar. 2020, doi: 10.1007/s11708-019-0615-1.
- [26] 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," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51. Elsevier Ltd, pp. 1525–1552, Aug. 03, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.031.
- [27] F. Musavi and W. Eberle, "Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 1, pp. 60–66, 2014, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0047.
- [28] M. Kavitha, P. Babu Bobba, and D. Prasad, "Effect of Coil Geometry and Shielding on Wireless Power Transfer System," 2016.
- [29] S. Yuvaraja, R. Narayanamoorthi, J. Sathik Mohamed Ali, and D. Almkhles, "A Comprehensive Review of the On-Road Wireless Charging System for E-Mobility Applications," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10. Frontiers Media S.A., Jul. 07, 2022. doi: 10.3389/fenrg.2022.926270.
- [30] I. Okasili, A. Elkhateb, and T. Littler, "A Review of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle Battery Charging with a Focus on Inductive

- Coupling,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 9. MDPI, May 01, 2022. doi: 10.3390/electronics11091355.
- [31] S. A. Kashani, A. Soleimani, A. Khosravi, and M. Mirsalim, “State-of-the-Art Research on Wireless Charging of Electric Vehicles Using Solar Energy,” *Energies*, vol. 16, no. 1. MDPI, Jan. 01, 2023. doi: 10.3390/en16010282.
- [32] K. Zhou, Y. Liu, and X. Wu, “Research on Wide Input Voltage LLC Resonant Converter and Compound Control Strategy,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 20, Oct. 2022, doi: 10.3390/electronics11203379.
- [33] W. Li, H. Zhao, J. Deng, S. Li, and C. C. Mi, “Comparison Study on SS and double-sided LCC compensation topologies for EV/PHEV Wireless Chargers,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 65, no. 6, pp. 4429–4439, Jun. 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2479938.
- [34] A. El-Shahat, E. Ayisire, Y. Wu, M. Rahman, and D. Nelms, “Electric vehicles wireless power transfer state-of-the-art,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 24–37. doi: 10.1016/j.egypro.2019.04.004.
- [35] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, and C. C. Mi, “A Dynamic Charging System with Reduced Output Power Pulsation for Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6580–6590, Oct. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2563380.
- [36] K. A. Kalwar, M. Aamir, and S. Mekhilef, “A design method for developing a high misalignment tolerant wireless charging system for electric vehicles,” *Measurement (Lond)*, vol. 118, pp. 237–245, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.12.013.
- [37] IPT Technology GmbH, “Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles in Motion.” Accessed: Jan. 12, 2023. [Online]. Available: <https://ipt-technology.com/e-mobility-wireless-dynamic-charging/>
- [38] Y. J. Jang, S. Jeong, and Y. D. Ko, “System optimization of the On-Line Electric Vehicle operating in a closed environment,” *Comput Ind Eng*, vol. 80, pp. 222–235, 2015, doi: 10.1016/j.cie.2014.12.004.
- [39] Electreon, “Wirelessly charge electric vehicles- anytime, anywhere.” Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: <https://electreon.com/>
- [40] Electreon, “Shared, invisible wireless charging infrastructure.” Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: <https://electreon.com/what-we-do>
- [41] Electreon, “Tel Aviv University Station.” Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: <https://electreon.com/projects/tel-aviv>
- [42] Electreon, “Smartroad Gotland.” Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: <https://electreon.com/projects/gotland>
- [43] Electreon, “Arena of the Future (Arena del Futuro).” Accessed: Feb. 03, 2023. [Online]. Available: <https://electreon.com/projects/arena-of-the-future>
- [44] J. Are Suul and G. Guidi, “Technology for dynamic on-road power transfer to electric vehicles Overview and electro-technical evaluation of the state-of-the-art for conductive and inductive power transfer technologies,” 2018.
- [45] G. Davison, “From wireless to dynamic electric vehicle charging: The evolution of Qualcomm Halo.” Accessed: Jan. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/05/wireless-dynamic-ev-charging-evolution-qualcomm-halo>
- [46] M. Taljegard, L. Thorson, M. Odenberger, and F. Johnsson, “Large-scale implementation of electric road systems: Associated costs and the impact on CO2 emissions,” *Int J Sustain Transp*, vol. 14, no. 8, pp. 606–619, Jun. 2020, doi: 10.1080/15568318.2019.1595227.

- [47] M. Amirpour, S. Kim, M. P. Battley, P. Kelly, S. Bickerton, and G. Covic, "Coupled electromagnetic-thermal analysis of roadway inductive power transfer pads within a model pavement," *Appl Therm Eng*, vol. 189, May 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116710.
- [48] S. A. Porsche Ibérica, "Taycan." Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.porsche.com/portugal/models/taycan/taycan-models/taycan/>
- [49] Polestar, "Polestar." Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.polestar.com/pt/polestar-2/specifications/#dimensions>
- [50] JAGUAR LAND ROVER LIMITED 2023, "Jaguar I-PACE Especificações." Accessed: Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.jaguarportugal.pt/jaguar-range/i-pace/specifications/index.html>
- [51] K. Aditya, "Design and Implementation of an Inductive Power Transfer System for Wireless Charging of Future Electric Transportation," 2016.
- [52] J.P.C. Smeets, D.C.J. Krop, J.W. Jansen, M.A.M. Hendrix, and E.A. Lomonova, "Optimal Design of a Pot Core Rotating Transformer," 2010.
- [53] R. Mendes, "Desenvolvimento de Tecnologias de Relutância Variável Comutada para Geração de Energia Eléctrica a Partir da Energia das Ondas," Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2018.
- [54] R. P. G. Mendes, M. R. A. Calado, and S. J. P. S. Mariano, "Electromagnetic design method for a TLSRG with application in ocean wave energy conversion," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 121, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106097.
- [55] M. Bensetti, K. Kadem, Y. Pei, Y. Le Bihan, E. Labouré, and L. Pichon, "Parametric Optimization of Ferrite Structure Used for Dynamic Wireless Power Transfer for 3 kW Electric Vehicle," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16145439.
- [56] N. Benalia, K. Laroussi, and I. Benlaloui, "Improvement of the Magnetic Coupler design for Wireless Inductive Power Transfer," in *Proceedings - 2022 5th International Conference on Power Electronics and their Applications, ICPEA 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ICPEA51060.2022.9791150.
- [57] Y. Yang, J. Cui, and X. Cui, "Design and analysis of magnetic coils for optimizing the coupling coefficient in an electric vehicle wireless power transfer system," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 6, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13164143.
- [58] D. Ongayo and M. Hanif, "Comparison of circular and rectangular coil transformer parameters for wireless Power Transfer based on Finite Element Analysis," in *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference, COBEP/SPEC 2016*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. doi: 10.1109/COBEP.2015.7420222.
- [59] W. Zhang, Q. Yang, Y. Li, Z. Lin, M. Yang, and M. Mi, "Comprehensive Analysis of Nanocrystalline Ribbon Cores in High-Power-Density Wireless Power Transfer Pads for Electric Vehicles," *IEEE Trans Magn*, vol. 58, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.1109/TMAG.2021.3092173.
- [60] D. Wang, S. Cui, J. Zhang, Z. Bie, K. Song, and C. Zhu, "A Novel Arc-Shaped Lightweight Magnetic Coupler for AUV Wireless Power Transfer," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 58, no. 1, pp. 1315–1329, 2022, doi: 10.1109/TIA.2021.3109839.
- [61] T. Somsak, A. Namin, W. Tammawam, J. Thongpron, W. Tippachon, and K. Oranpiroj, "A prototype of block UU shape ferrite cores inductive wireless power transfer for EV charger," in *ECTI-CON 2021 - 2021 18th International*

*Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology: Smart Electrical System and Technology, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 2021, pp. 930–935. doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454859.

# **Anexos**

# Anexo A. Tabela AWG para fios condutores

## American Wire Gauge Conductor Size Table

American wire gauge (AWG) is a standardized wire gauge system for the diameters of round, solid, nonferrous, electrically conducting wire. The larger the AWG number or wire gauge, the smaller the physical size of the wire. The smallest AWG size is 40 and the largest is 0000 (4/0). AWG general rules of thumb - for every 6 gauge decrease, the wire diameter doubles and for every 3 gauge decrease, the cross sectional area doubles. **Note** - W&M Wire Gauge, US Steel Wire Gauge and Music Wire Gauge are different systems.

### American Wire Gauge (AWG) Sizes and Properties Chart / Table

Table 1 lists the AWG sizes for electrical cables / conductors. In addition to wire size, the table provides values load (current) carrying capacity, resistance and skin effects. The resistances and skin depth noted are for copper conductors. A detailed description of each conductor property is described below Table 1.

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
28	0.0126	0.32004	0.081	64.9	212.872	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22606	0.0404	130.1	426.728	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	0.032	164.1	538.248	0.091	430 kHz
33	0.0071	0.18034	0.0254	206.9	678.632	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.14224	0.016	329	1079.12	0.044	870 kHz
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1360	0.035	1100 kHz
37	0.0045	0.1143	0.01	523.1	1715	0.0289	1350 kHz
38	0.004	0.1016	0.00797	659.6	2163	0.0228	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	0.00632	831.8	2728	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	0.00501	1049	3440	0.0137	2900 kHz

**Table 1: American Wire Gauge (AWG) Cable / Conductor Sizes and Properties**

**AWG Notes:** American Wire Gauge (AWG) is a standardized wire gauge system used predominantly in the United States to note the diameter of electrically conducting wire. The general rule of thumb is for every 6 gauge decrease the wire diameter doubles and every 3 gauge decrease doubles the cross sectional area.

**Diameter Notes:** A mil is a unit of length equal to 0.001 inch (a "milli-inch" or a "thousandth of one inch") ie. 1 mil = 0.001".

**Resistance Notes:** The resistance noted in the table above is for copper wire conductor. For a given current, you can use the noted resistance and apply [Ohms Law](#) to calculate the voltage drop across the conductor.

**Current (ampacity) Notes:** The current ratings shown in the table are for power transmission and have been determined using the rule of 1 amp per 700 circular mils, which is a very conservative rating. For reference, the National Electrical Code (NEC) notes the following ampacity for copper wire at 30 Celsius:

14 AWG - maximum of 20 Amps in free air, maximum of 15 Amps as part of a 3 conductor cable;

12 AWG - maximum of 25 Amps in free air, maximum of 20 Amps as part of a 3 conductor cable;

10 AWG - maximum of 40 Amps in free air, maximum of 30 Amps as part of a 3 conductor cable.

**Check your local electrical code for the correct current capacity (ampacity) for mains and in wall wiring.**

**Skin Effect and Skin Depth Notes:** Skin effect is the tendency of an alternating electric current (AC) to distribute itself within a conductor so that the current density near the surface of the conductor is greater than that at its core. That is, the electric current tends to flow at the "skin" of the conductor. The skin effect causes the effective resistance of the conductor to increase with the frequency of the current. The maximum frequency show is for 100% skin depth (ie. no skin effects).

## How to Convert From Copper to Aluminum Conductors

Ampacities based upon Table 310-16 of the National Electrical Code.

A commonly used rule-of-thumb for converting the two conductor metals is to have aluminum two AWG sizes larger than copper for equivalency. This works in most cases when one is working inside the American Wire Gauge system. One example where the two AWG size rule may not be appropriate is for a 90 ampere circuit which could be served with 75°C rated conductors (provided equipment is so marked). From NEC Table 310-16, the selection could be a No. 3 AWG copper or No. 2 aluminum conductor provided voltage drop is not a factor. Also, with conductor sizes 250 kcmil and larger we are no longer in the American Wire Gauge system; therefore, the two AWG size rule can no longer apply.

The technically correct way to make these conversions is to select an equivalent or higher ampacity rating while maintaining the same conductor temperature rating. For example, replace a No. 6 AWG, copper, type TW conductor with an aluminum conductor. Table 310-16 lists the ampacity of No. 6 copper TW (60°C column) at 55 amperes. Now select an aluminum conductor from the 60°C column that has an ampacity of 55 amperes or higher. A No. 4 aluminum would be used to replace the No. 6 copper TW conductor. This aluminum

conductor does not have to be type TW, it could have a higher temperature designation such as THW or THHN; however, the ampacity must be based upon a 60°C rated conductor.

Notice that a No. 6 aluminum type THHN conductor has an ampacity rating of 60 amperes which is higher than the 55 ampere rating for No. 6 copper TW. It may seem logical that No. 6 aluminum THHN could replace No. 6 copper TW based upon the ampacity rating alone; however, it is not correct. Difference in voltage drop is one consideration opposing a size-for-size replacement but the main reason lies with equipment ratings. A conductor must terminate at the equipment it serves and this equipment is tested and listed with definite conductor types. Equipment rated 100 amperes or less is tested and listed for use with 60°C rated conductors unless marked otherwise and to connect a conductor to be used at 90°C ampacity effectively voids the listing. It would also violate section 110-3 (b) of the NEC because this section states that equipment shall be installed according to any instructions in the listing or labeling. To repeat, always make conversions from aluminum to copper or copper to aluminum by selecting equivalent or larger ampacity while maintaining the same conductor temperature rating.



Your Solar Energy Supply Store

<https://www.solaris-shop.com>

## **Anexo B. Resultados obtidos através da simulação no *MagNet***

Neste Anexo encontram-se as tabelas com os resultados obtidos através da simulação no *software MagNet*. Nomeadamente o valor da indutância da bobina primária e secundária, a indutância mútua e por fim o valor do fator de acoplamento para as diversas distâncias e ângulos.

## B.1. Bobina quadrada com núcleo de ar

Tabela B. 1-Resultados obtidos através do *software MagNet* para bobinas quadradas com núcleo de ar.

<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Distância [mm]</b>	<b>Ângulo [°]</b>	<b>Lp [H]</b>	<b>Ls [H]</b>	<b>M [H]</b>	<b>k</b>
<b>1000</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	0.000734	0.000725	0.000400	0.548142
		<b>5</b>	0.000729	0.000728	0.000401	0.551300
		<b>10</b>	0.000730	0.000729	0.000398	0.545971
		<b>15</b>	0.000735	0.000738	0.000393	0.533466
		<b>20</b>	0.000730	0.000727	0.000389	0.533900
	<b>105</b>	<b>0</b>	0.000734	0.000729	0.000394	0.539724
		<b>5</b>	0.000730	0.000728	0.000394	0.540646
		<b>10</b>	0.000735	0.000730	0.000389	0.53163
		<b>15</b>	0.000733	0.000733	0.000385	0.52479
		<b>20</b>	0.000732	0.000728	0.000385	0.52771
	<b>110</b>	<b>0</b>	0.000736	0.000727	0.000384	0.525824
		<b>5</b>	0.000734	0.000730	0.000387	0.529333
		<b>10</b>	0.000734	0.000735	0.000383	0.521627
		<b>15</b>	0.000736	0.000736	0.000379	0.515117
		<b>20</b>	0.000735	0.000727	0.000375	0.513213
	<b>115</b>	<b>0</b>	0.000736	0.000727	0.000375	0.512609
		<b>5</b>	0.000734	0.000729	0.000378	0.516643
		<b>10</b>	0.000733	0.000738	0.000379	0.515290
		<b>15</b>	0.000735	0.000732	0.000372	0.507376
		<b>20</b>	0.000736	0.000728	0.000367	0.501810
<b>120</b>	<b>0</b>	0.000734	0.000728	0.000367	0.502222	
	<b>5</b>	0.000733	0.000730	0.000366	0.500103	
	<b>10</b>	0.000731	0.000735	0.000368	0.501818	
	<b>15</b>	0.000732	0.000732	0.000364	0.497193	
	<b>20</b>	0.000736	0.000733	0.000359	0.488397	
<b>125</b>	<b>0</b>	0.000736	0.000732	0.000360	0.490947	
	<b>5</b>	0.000732	0.000729	0.000359	0.491667	
	<b>10</b>	0.000732	0.000734	0.000357	0.487168	
	<b>15</b>	0.000739	0.000740	0.000356	0.481780	
	<b>20</b>	0.000738	0.000730	0.000352	0.480068	
<b>1200</b>	<b>125</b>	<b>0</b>	0.000933	0.000920	0.000482	0.520641
		<b>5</b>	0.000908	0.000907	0.000485	0.534734
		<b>10</b>	0.000924	0.000913	0.000484	0.527059
		<b>15</b>	0.000925	0.000916	0.000475	0.516971
		<b>20</b>	0.000918	0.000914	0.000468	0.51099
	<b>130</b>	<b>0</b>	0.000917	0.000916	0.000475	0.518932
		<b>5</b>	0.000912	0.000911	0.000481	0.527790
		<b>10</b>	0.000920	0.000921	0.000475	0.516464
		<b>15</b>	0.000922	0.000915	0.000472	0.514396
		<b>20</b>	0.000927	0.000909	0.000457	0.498108
	<b>135</b>	<b>0</b>	0.0009082	0.000892	0.000469	0.521642
		<b>5</b>	0.000923	0.000916	0.000474	0.516152
		<b>10</b>	0.000926	0.0009219	0.000464	0.502963
		<b>15</b>	0.000931	0.000920	0.000462	0.499384
		<b>20</b>	0.000925	0.000910	0.000450	0.491067
	<b>140</b>	<b>0</b>	0.000908	0.000905	0.000453	0.500538
		<b>5</b>	0.000918	0.000917	0.000461	0.503129
		<b>10</b>	0.000928	0.000912	0.000464	0.504033
		<b>15</b>	0.000923	0.000899	0.000452	0.496130
		<b>20</b>	0.000921	0.000909	0.000443	0.484213
<b>145</b>	<b>0</b>	0.000908	0.000905	0.000453	0.500538	
	<b>5</b>	0.000919	0.000912	0.000449	0.491039	
	<b>10</b>	0.000911	0.000900	0.000450	0.497591	
	<b>15</b>	0.000928	0.000919	0.000453	0.490634	
	<b>20</b>	0.000929	0.000916	0.000444	0.4819927	
<b>150</b>	<b>0</b>	0.000931	0.000927	0.000437	0.470532	
	<b>5</b>	0.0009297	0.0009026	0.0004376	0.477781	
	<b>10</b>	0.0009102	0.0009036	0.0004409	0.486246	
	<b>15</b>	0.0009267	0.00091622	0.0004390	0.476433	
	<b>20</b>	0.0009228	0.0009230	0.0004325	0.468661	
<b>1400</b>	<b>150</b>	<b>0</b>	0.0009290	0.0009156	0.0004343	0.470909
		<b>5</b>	0.001088	0.001088	0.000558	0.513329
		<b>10</b>	0.001083	0.001086	0.000565	0.521297
		<b>15</b>	0.001087	0.001075	0.000562	0.519905
		<b>20</b>	0.001077	0.001078	0.000554	0.514071
	<b>155</b>	<b>0</b>	0.001083	0.001085	0.000544	0.502068
		<b>5</b>	0.001098	0.001079	0.000558	0.513226
		<b>10</b>	0.001067	0.001084	0.000555	0.516417
		<b>15</b>	0.001070	0.001115	0.000556	0.508924
		<b>20</b>	0.001069	0.001087	0.000547	0.507898
	<b>160</b>	<b>0</b>	0.001074	0.001073	0.000540	0.503488
		<b>5</b>	0.001081	0.001089	0.000549	0.505879
		<b>10</b>	0.001075	0.001097	0.000548	0.504859
		<b>15</b>	0.001084	0.001101	0.000546	0.499973
		<b>20</b>	0.001076	0.001076	0.000540	0.502483
	<b>165</b>	<b>0</b>	0.001089	0.001096	0.000535	0.490069
		<b>5</b>	0.001097	0.001066	0.000544	0.503083
		<b>10</b>	0.001083	0.001054	0.000545	0.510299
		<b>15</b>	0.001082	0.001094	0.000540	0.496200
		<b>20</b>	0.001081	0.001106	0.000531	0.486077
<b>170</b>	<b>0</b>	0.001078	0.001076	0.000527	0.489595	
	<b>5</b>	0.001094	0.001138	0.000531	0.476365	
	<b>10</b>	0.001086	0.001075	0.000535	0.495732	
	<b>15</b>	0.001092	0.001068	0.000530	0.491042	
	<b>20</b>	0.001086	0.001109	0.000522	0.475855	
<b>175</b>	<b>0</b>	0.001080	0.001084	0.000521	0.481623	
	<b>5</b>	0.001084	0.001091	0.000521	0.478907	
	<b>10</b>	0.001088	0.001083	0.000524	0.482644	
	<b>15</b>	0.001104	0.001096	0.000521	0.473466	
	<b>20</b>	0.001071	0.001090	0.000516	0.477522	
			0.001084	0.001077	0.000511	0.472790

## B.2. Bobina circular com núcleo de ar

Tabela B. 2-Resultados obtidos através do *software MagNet* para bobinas circulares com núcleo de ar.

<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Distância [mm]</b>	<b>Ângulo [°]</b>	<b>Lp [H]</b>	<b>Ls [H]</b>	<b>M [H]</b>	<b>k</b>
<b>1000</b>	<b>100</b>	0	0.000404	0.000401	0.000222	0.553441
		5	0.000404	0.000401	0.000222	0.552791
		10	0.000405	0.000402	0.000222	0.551633
		15	0.000405	0.000400	0.000222	0.551186
		20	0.000404	0.000401	0.000223	0.553969
	<b>105</b>	0	0.000404	0.000400	0.000218	0.542175
		5	0.000404	0.000401	0.000218	0.541728
		10	0.000403	0.000400	0.000218	0.541962
		15	0.000404	0.000402	0.000218	0.541755
		20	0.000404	0.000401	0.000217	0.540884
	<b>110</b>	0	0.000403	0.000401	0.000213	0.529167
		5	0.000404	0.000401	0.000213	0.528749
		10	0.000405	0.000400	0.000213	0.529342
		15	0.000405	0.000402	0.000213	0.528352
		20	0.000405	0.000401	0.000213	0.528475
	<b>115</b>	0	0.000403	0.000400	0.000207	0.517495
		5	0.000402	0.000400	0.000208	0.517783
		10	0.000403	0.000399	0.000208	0.518957
		15	0.000402	0.000399	0.000207	0.517615
		20	0.000401	0.000400	0.000208	0.518523
<b>120</b>	0	0.000404	0.000400	0.000204	0.506823	
	5	0.000402	0.000399	0.000203	0.506967	
	10	0.000404	0.000399	0.000203	0.506711	
	15	0.000402	0.000400	0.000203	0.506212	
	20	0.000403	0.000400	0.000203	0.506176	
	25	0.000404	0.000400	0.000204	0.506823	
<b>125</b>	0	0.000403	0.000400	0.000198	0.494616	
	5	0.000402	0.000402	0.000198	0.493790	
	10	0.000401	0.000398	0.000198	0.496949	
	15	0.000403	0.000400	0.000199	0.496939	
	20	0.000404	0.000399	0.000199	0.496235	
<b>1200</b>	<b>125</b>	0	0.000491	0.0004897	0.0002699	0.550419
		5	0.0004922	0.000488	0.0002689	0.548670
		10	0.0004923	0.000488	0.0002677	0.546160
		15	0.0004927	0.0004891	0.0002697	0.549391
		20	0.0004924	0.0004894	0.0002697	0.549489
	<b>130</b>	0	0.0004911	0.0004885	0.0002635	0.537979
		5	0.0004913	0.000488	0.0002637	0.538556
		10	0.0004926	0.0004895	0.0002631	0.535870
		15	0.0004928	0.0004877	0.0002637	0.537835
		20	0.0004925	0.0004873	0.0002629	0.536671
	<b>135</b>	0	0.0004911	0.0004885	0.0002583	0.527445
		5	0.0004913	0.0004861	0.000258	0.527885
		10	0.0004914	0.0004892	0.0002584	0.527058
		15	0.0004934	0.0004888	0.0002596	0.528636
		20	0.0004924	0.0004863	0.0002573	0.525813
	<b>140</b>	0	0.0004911	0.0004887	0.0002536	0.517739
		5	0.0004922	0.0004847	0.0002531	0.518218
		10	0.0004939	0.0004876	0.0002536	0.516774
		15	0.0004936	0.0004871	0.0002545	0.518947
		20	0.0004918	0.000488	0.0002535	0.517332
25		0.0004911	0.0004887	0.0002536	0.517739	
<b>145</b>	0	0.0004915	0.0004879	0.0002488	0.508067	
	5	0.000489	0.0004857	0.0002478	0.508378	
	10	0.0004908	0.0004867	0.0002492	0.509779	
	15	0.0004952	0.0004879	0.0002487	0.506074	
	20	0.0004917	0.0004898	0.0002502	0.509813	
<b>150</b>	0	0.0004929	0.0004863	0.000243	0.496400	
	5	0.0004907	0.000487	0.0002439	0.498884	
	10	0.0004905	0.0004871	0.0002445	0.500113	
	15	0.0004922	0.0004858	0.0002447	0.500506	
	20	0.0004913	0.0004887	0.0002451	0.500274	
<b>1400</b>	<b>150</b>	0	0.0005801	0.0005794	0.0003148	0.542912
		5	0.0005792	0.0005747	0.0003136	0.543500
		10	0.0005806	0.0005779	0.0003137	0.541547
		15	0.0005802	0.0005759	0.0003142	0.543562
		20	0.0005778	0.0005789	0.0003144	0.543683
	<b>155</b>	0	0.0005802	0.0005776	0.0003092	0.534195
		5	0.0005806	0.0005744	0.0003095	0.535840
		10	0.0005791	0.0005744	0.0003087	0.535148
		15	0.0005811	0.0005756	0.0003098	0.535627
		20	0.000581	0.0005792	0.0003104	0.535051
	<b>160</b>	0	0.0005798	0.0005765	0.000304	0.525788
		5	0.0005811	0.0005732	0.0003042	0.527023
		10	0.0005805	0.0005768	0.0003044	0.526008
		15	0.0005811	0.0005749	0.0003031	0.524441
		20	0.0005778	0.0005775	0.0003045	0.527208
	<b>165</b>	0	0.0005783	0.0005755	0.000299	0.518238
		5	0.000581	0.0005733	0.0002994	0.518847
		10	0.0005817	0.0005774	0.0002995	0.516740
		15	0.0005803	0.0005737	0.0002996	0.519271
		20	0.000578	0.0005749	0.0002981	0.517046
<b>170</b>	0	0.0005806	0.000574	0.0002933	0.508041	
	5	0.0005814	0.0005749	0.0002942	0.508867	
	10	0.0005815	0.0005747	0.0002936	0.507910	
	15	0.0005782	0.0005755	0.0002937	0.509213	
	20	0.0005797	0.0005747	0.0002933	0.508070	
<b>175</b>	0	0.0005805	0.0005758	0.000289	0.499873	
	5	0.0005798	0.0005754	0.0002888	0.500058	
	10	0.0005824	0.0005745	0.0002881	0.498022	
	15	0.0005808	0.0005703	0.0002889	0.502034	
	20	0.0005794	0.0005747	0.0002886	0.500056	

## B.3. Bobina hexagonal com núcleo de ar

Tabela B. 3-Resultados obtidos através do software MagNet para bobinas hexagonais com núcleo de ar.

<i>D</i> âmetro [mm]	<i>D</i> istância [mm]	Ângulo [°]	<i>L</i> p [H]	<i>L</i> s [H]	<i>M</i> [H]	<i>k</i>
<b>1000</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	0.0002063	0.0002063	0.0001088	0.5274406
		<b>5</b>	0.0002066	0.0002052	0.0001084	0.5265413
		<b>10</b>	0.0002061	0.0002061	0.0001084	0.5261099
		<b>15</b>	0.0002062	0.0002061	0.0001084	0.5258445
		<b>20</b>	0.0002064	0.000206	0.000108	0.5238604
	<b>105</b>	<b>0</b>	0.0002065	0.0002052	0.0001054	0.5121332
		<b>5</b>	0.0002061	0.0002055	0.0001057	0.5134519
		<b>10</b>	0.0002061	0.0002053	0.0001056	0.5131312
		<b>15</b>	0.0002057	0.0002053	0.0001053	0.5124953
		<b>20</b>	0.0002063	0.0002055	0.0001053	0.5112002
	<b>110</b>	<b>0</b>	0.0002067	0.0002053	0.0001026	0.4980359
		<b>5</b>	0.0002063	0.000205	0.000103	0.5009835
		<b>10</b>	0.0002062	0.0002053	0.0001028	0.4995752
		<b>15</b>	0.0002058	0.0002047	0.0001026	0.499848
		<b>20</b>	0.0002064	0.0002048	0.0001023	0.4974508
	<b>115</b>	<b>0</b>	0.0002062	0.0002044	0.0001	0.4870208
		<b>5</b>	0.0002064	0.0002052	0.0001006	0.4887768
		<b>10</b>	0.0002062	0.0002048	0.0001003	0.4878733
		<b>15</b>	0.0002062	0.0002054	0.0001004	0.4878323
		<b>20</b>	0.0002066	0.000205	0.0000998	0.4848144
<b>120</b>	<b>0</b>	0.0002066	0.0002041	0.0000974	0.4745448	
	<b>5</b>	0.0002063	0.0002041	0.0000978	0.4767599	
	<b>10</b>	0.0002061	0.0002046	0.0000979	0.4766031	
	<b>15</b>	0.000206	0.0002042	0.0000972	0.4741336	
	<b>20</b>	0.000206	0.0002045	0.0000973	0.4742103	
<b>125</b>	<b>0</b>	0.0002066	0.0002041	0.0000974	0.4745448	
	<b>5</b>	0.0002063	0.0002041	0.0000978	0.4767599	
	<b>10</b>	0.0002061	0.0002046	0.0000979	0.4766031	
	<b>15</b>	0.000206	0.0002042	0.0000972	0.4741336	
	<b>20</b>	0.000206	0.0002045	0.0000973	0.4742103	
<b>1200</b>	<b>125</b>	<b>0</b>	0.0002493	0.0002516	0.0001307	0.5216911
		<b>5</b>	0.0002491	0.0002513	0.000131	0.5235439
		<b>10</b>	0.000249	0.0002516	0.0001305	0.5212895
		<b>15</b>	0.000249	0.0002516	0.0001305	0.5214533
		<b>20</b>	0.0002496	0.0002521	0.0001303	0.5193857
	<b>130</b>	<b>0</b>	0.0002493	0.0002519	0.0001281	0.5113568
		<b>5</b>	0.0002488	0.0002517	0.0001282	0.5122131
		<b>10</b>	0.0002488	0.0002527	0.0001286	0.5128411
		<b>15</b>	0.0002525	0.000251	0.0001274	0.5058655
		<b>20</b>	0.0002526	0.0002521	0.0001276	0.5057939
	<b>135</b>	<b>0</b>	0.0002522	0.0002506	0.0001251	0.4974255
		<b>5</b>	0.0002486	0.0002513	0.0001257	0.5026724
		<b>10</b>	0.000252	0.0002505	0.0001251	0.4980599
		<b>15</b>	0.0002517	0.00025	0.0001243	0.4954139
		<b>20</b>	0.0002515	0.0002497	0.000124	0.4949499
	<b>140</b>	<b>0</b>	0.0002491	0.0002497	0.000122	0.4890713
		<b>5</b>	0.000249	0.0002515	0.0001234	0.4930518
		<b>10</b>	0.000252	0.0002509	0.0001224	0.4868492
		<b>15</b>	0.0002518	0.0002504	0.0001218	0.4851471
		<b>20</b>	0.0002513	0.0002505	0.0001219	0.4859719
<b>145</b>	<b>0</b>	0.0002491	0.0002497	0.000122	0.4890713	
	<b>5</b>	0.000249	0.0002515	0.0001234	0.4930518	
	<b>10</b>	0.000252	0.0002509	0.0001224	0.4868492	
	<b>15</b>	0.0002518	0.0002504	0.0001218	0.4851471	
	<b>20</b>	0.0002513	0.0002505	0.0001219	0.4859719	
<b>150</b>	<b>0</b>	0.0002516	0.0002492	0.0001195	0.4773324	
	<b>5</b>	0.0002489	0.0002502	0.0001205	0.4829033	
	<b>10</b>	0.0002493	0.0002499	0.0001201	0.4809785	
	<b>15</b>	0.000249	0.000251	0.0001198	0.4792412	
	<b>20</b>	0.000252	0.0002503	0.0001192	0.4745142	
<b>1400</b>	<b>150</b>	<b>0</b>	0.0002523	0.0002496	0.0001172	0.466951
		<b>5</b>	0.0002492	0.0002495	0.0001177	0.4719742
		<b>10</b>	0.0002521	0.0002492	0.000117	0.4669781
		<b>15</b>	0.0002522	0.0002498	0.0001172	0.4671078
		<b>20</b>	0.0002525	0.0002501	0.0001171	0.4659294
	<b>155</b>	<b>0</b>	0.0002938	0.0002993	0.0001537	0.518302
		<b>5</b>	0.0002943	0.0002978	0.0001534	0.518038
		<b>10</b>	0.0002943	0.0002971	0.0001527	0.516570
		<b>15</b>	0.0002942	0.0002977	0.0001531	0.517511
		<b>20</b>	0.0002941	0.0002972	0.000152	0.514157
	<b>160</b>	<b>0</b>	0.000295	0.0002981	0.0001507	0.508075
		<b>5</b>	0.0002939	0.0002978	0.0001508	0.509798
		<b>10</b>	0.0002937	0.0002977	0.0001503	0.508233
		<b>15</b>	0.0002943	0.0002978	0.000149	0.503383
		<b>20</b>	0.0002945	0.0002968	0.0001495	0.505849
	<b>165</b>	<b>0</b>	0.000294	0.000298	0.0001481	0.500485
		<b>5</b>	0.000294	0.0002972	0.0001475	0.498927
		<b>10</b>	0.0002942	0.000298	0.000148	0.499784
		<b>15</b>	0.000294	0.0002971	0.0001469	0.496931
		<b>20</b>	0.000294	0.0002971	0.0001469	0.497083
<b>170</b>	<b>0</b>	0.0002935	0.0002969	0.0001449	0.490804	
	<b>5</b>	0.0002932	0.0002958	0.0001449	0.492006	
	<b>10</b>	0.0002934	0.0002929	0.0001447	0.493452	
	<b>15</b>	0.0002933	0.0002952	0.0001435	0.487511	
	<b>20</b>	0.0002927	0.0002955	0.0001438	0.489100	
<b>175</b>	<b>0</b>	0.0002929	0.0002951	0.0001415	0.481360	
	<b>5</b>	0.0002929	0.0002966	0.0001426	0.483912	
	<b>10</b>	0.0002935	0.0002919	0.000142	0.485187	
	<b>15</b>	0.0002933	0.0002912	0.0001415	0.484385	
	<b>20</b>	0.000293	0.0002957	0.0001411	0.479215	
<b>180</b>	<b>0</b>	0.0002935	0.0002956	0.0001391	0.472231	
	<b>5</b>	0.0002935	0.0002956	0.0001398	0.474561	
	<b>10</b>	0.0002941	0.0002962	0.0001393	0.471909	
	<b>15</b>	0.0002923	0.000291	0.0001388	0.475956	
	<b>20</b>	0.0002933	0.0002957	0.0001382	0.469080	

## B.4. Bobina quadrada com núcleo ferromagnético

Tabela B. 4-Resultados obtidos através do *software MagNet* para bobinas quadradas com núcleo ferromagnético.

<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Distância [mm]</b>	<b>Ângulo [°]</b>	<b>Lp [H]</b>	<b>Ls [H]</b>	<b>M [H]</b>	<b>k</b>
<b>1000</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	0.0054235	0.0055238	0.0045566	0.832496
		<b>5</b>	0.0054701	0.0054274	0.0044741	0.821127
		<b>10</b>	0.0050141	0.0049824	0.0040137	0.803015
		<b>15</b>	0.0044258	0.0045033	0.003555	0.796315
		<b>20</b>	0.0044662	0.0046443	0.003553	0.780127
	<b>105</b>	<b>0</b>	0.0049186	0.0049342	0.0041165	0.835599
		<b>5</b>	0.0050793	0.0051554	0.0042139	0.823486
		<b>10</b>	0.0049119	0.0046123	0.0036222	0.760996
		<b>15</b>	0.0045128	0.0045498	0.0034168	0.754051
		<b>20</b>	0.0042936	0.0044251	0.0033204	0.761750
	<b>110</b>	<b>0</b>	0.0049458	0.0051541	0.0040334	0.798873
		<b>5</b>	0.0050567	0.0050113	0.0040364	0.801830
		<b>10</b>	0.0047308	0.004472	0.003516	0.764425
		<b>15</b>	0.0042429	0.0042058	0.0031086	0.735893
		<b>20</b>	0.0042192	0.0042608	0.0032144	0.758126
	<b>115</b>	<b>0</b>	0.0047933	0.0044967	0.0036079	0.777124
		<b>5</b>	0.0045137	0.0045335	0.0035868	0.792905
		<b>10</b>	0.0043362	0.0041509	0.0031594	0.744685
		<b>15</b>	0.0041744	0.0041569	0.0030374	0.729162
		<b>20</b>	0.0042572	0.0041734	0.0031046	0.736542
<b>120</b>	<b>0</b>	0.0043314	0.0044188	0.0034795	0.795346	
	<b>5</b>	0.0045226	0.004583	0.0036048	0.791795	
	<b>10</b>	0.0041204	0.0041902	0.0031342	0.754276	
	<b>15</b>	0.0040638	0.0040003	0.0029496	0.731574	
	<b>20</b>	0.0039171	0.0038278	0.0027414	0.707977	
<b>125</b>	<b>0</b>	0.0043314	0.0044188	0.0034795	0.795346	
	<b>5</b>	0.0042567	0.0044906	0.0034532	0.789839	
	<b>10</b>	0.0043474	0.0044114	0.0033917	0.774499	
	<b>15</b>	0.0041626	0.0041084	0.0031158	0.753441	
	<b>20</b>	0.0038094	0.0038217	0.0027646	0.724571	
<b>1200</b>	<b>125</b>	<b>0</b>	0.0059151	0.0056943	0.0046471	0.800713
		<b>5</b>	0.0059328	0.0061718	0.0049484	0.817760
		<b>10</b>	0.005327	0.0054405	0.004015	0.745808
		<b>15</b>	0.005356	0.0053092	0.0039712	0.744711
		<b>20</b>	0.0050991	0.0052702	0.0038458	0.741866
	<b>130</b>	<b>0</b>	0.0059828	0.0058048	0.0046693	0.792333
		<b>5</b>	0.0057425	0.0057276	0.0045829	0.799100
		<b>10</b>	0.0054469	0.0053122	0.0040187	0.747105
		<b>15</b>	0.0050716	0.0052183	0.003606	0.700952
		<b>20</b>	0.0050126	0.0050305	0.0035782	0.712571
	<b>135</b>	<b>0</b>	0.0053755	0.0053433	0.0041729	0.778618
		<b>5</b>	0.0055141	0.0056583	0.0044153	0.790449
		<b>10</b>	0.0053811	0.0052138	0.0040427	0.763226
		<b>15</b>	0.0047335	0.0048123	0.0034816	0.729485
		<b>20</b>	0.0048621	0.0049214	0.0035185	0.719285
	<b>140</b>	<b>0</b>	0.0056611	0.005345	0.0042137	0.766013
		<b>5</b>	0.005709	0.0056688	0.0043578	0.766016
		<b>10</b>	0.0050038	0.0049325	0.0034976	0.704019
		<b>15</b>	0.004928	0.0046352	0.0034046	0.712360
		<b>20</b>	0.0047154	0.0047525	0.0033265	0.702697
<b>145</b>	<b>0</b>	0.0056611	0.005345	0.0042137	0.766013	
	<b>5</b>	0.0052435	0.0049399	0.0038075	0.748119	
	<b>10</b>	0.005592	0.0052734	0.0040503	0.745865	
	<b>15</b>	0.0048828	0.0050226	0.0034776	0.702229	
	<b>20</b>	0.0047986	0.0047509	0.0032697	0.684790	
<b>150</b>	<b>0</b>	0.0045543	0.004699	0.0031989	0.691481	
	<b>5</b>	0.0048929	0.0050679	0.0038498	0.773110	
	<b>10</b>	0.0051929	0.0053099	0.0040118	0.763990	
	<b>15</b>	0.0047219	0.0049245	0.0033617	0.697137	
	<b>20</b>	0.0044904	0.0045703	0.0031765	0.701180	
<b>1400</b>	<b>150</b>	<b>0</b>	0.0064666	0.0047119	0.003129	0.668723
		<b>5</b>	0.0067669	0.0065789	0.0051091	0.765730
		<b>10</b>	0.0064836	0.0065503	0.0050073	0.768368
		<b>15</b>	0.0064633	0.0064717	0.0046292	0.715753
		<b>20</b>	0.0060304	0.0059897	0.0043571	0.724981
	<b>155</b>	<b>0</b>	0.0058123	0.005915	0.0041418	0.706371
		<b>5</b>	0.0060552	0.0061541	0.0047021	0.770273
		<b>10</b>	0.0062531	0.0067539	0.0051016	0.785016
		<b>15</b>	0.00621	0.0064175	0.0044203	0.700199
		<b>20</b>	0.0058309	0.0058012	0.004172	0.717320
	<b>160</b>	<b>0</b>	0.0059459	0.0059373	0.0040706	0.685111
		<b>5</b>	0.006278	0.0063147	0.0048195	0.765456
		<b>10</b>	0.0065704	0.0059662	0.0045788	0.731314
		<b>15</b>	0.005949	0.0061507	0.0042732	0.706425
		<b>20</b>	0.0057476	0.0058807	0.0040689	0.699874
	<b>165</b>	<b>0</b>	0.0053185	0.0057604	0.0039617	0.715747
		<b>5</b>	0.0061334	0.0058949	0.0043782	0.728128
		<b>10</b>	0.0062879	0.0058621	0.004557	0.750578
		<b>15</b>	0.0059009	0.0057869	0.003861	0.660724
		<b>20</b>	0.0055862	0.0055146	0.0038585	0.695193
<b>170</b>	<b>0</b>	0.0056126	0.0057421	0.0038131	0.671678	
	<b>5</b>	0.006064	0.0059633	0.0043407	0.721833	
	<b>10</b>	0.0058997	0.0057432	0.0044151	0.758482	
	<b>15</b>	0.0059254	0.0057796	0.0038739	0.661971	
	<b>20</b>	0.0055096	0.0054874	0.0036855	0.670279	
<b>175</b>	<b>0</b>	0.0052095	0.0054555	0.0036673	0.687919	
	<b>5</b>	0.0058075	0.0059733	0.0042774	0.726240	
	<b>10</b>	0.005591	0.0056722	0.004239	0.752729	
	<b>15</b>	0.0055512	0.0058261	0.0038258	0.672723	
	<b>20</b>	0.0054046	0.0055876	0.003742	0.680934	
						0.681390

## B.5. Bobina circular com núcleo ferromagnético

Tabela B. 5-Resultados obtidos através do *software MagNet* para bobinas circulares com núcleo ferromagnético.

<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Distância [mm]</b>	<b>Ângulo [°]</b>	<b>Lp [H]</b>	<b>Ls [H]</b>	<b>M [H]</b>	<b>k</b>
<b>1000</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	0.0019525	0.0019474	0.0015616	0.800826
		<b>5</b>	0.0019531	0.0019707	0.0015811	0.805917
		<b>10</b>	0.0019821	0.0019892	0.0016207	0.816235
		<b>15</b>	0.0019319	0.0019292	0.0015337	0.794427
		<b>20</b>	0.0019505	0.001949	0.0015492	0.794584
	<b>105</b>	<b>0</b>	0.0018395	0.0018323	0.0014447	0.786907
		<b>5</b>	0.0018542	0.0018549	0.0014565	0.785380
		<b>10</b>	0.0018624	0.0018273	0.0014481	0.784984
		<b>15</b>	0.0018417	0.0018508	0.0014473	0.783900
		<b>20</b>	0.0018903	0.0018577	0.0014795	0.789530
	<b>110</b>	<b>0</b>	0.0017693	0.0017651	0.001364	0.771821
		<b>5</b>	0.001765	0.001772	0.0013761	0.778105
		<b>10</b>	0.0018234	0.0018002	0.0013927	0.768715
		<b>15</b>	0.0017802	0.0017587	0.0013669	0.772520
		<b>20</b>	0.0017771	0.0018044	0.0014067	0.785564
	<b>115</b>	<b>0</b>	0.0017484	0.0017289	0.0013151	0.756387
		<b>5</b>	0.0017289	0.0017498	0.0013252	0.761928
		<b>10</b>	0.0017262	0.0017072	0.0013012	0.758001
		<b>15</b>	0.0016826	0.0016974	0.0012882	0.762280
		<b>20</b>	0.0017774	0.001742	0.0013298	0.755725
<b>120</b>	<b>0</b>	0.001699	0.0017218	0.0012957	0.757521	
	<b>5</b>	0.0017417	0.0017235	0.0013022	0.751582	
	<b>10</b>	0.0017153	0.0017466	0.0012955	0.748492	
	<b>15</b>	0.0016787	0.0016719	0.0012517	0.747177	
	<b>20</b>	0.0017222	0.0017214	0.0012862	0.746981	
<b>125</b>	<b>0</b>	0.001699	0.0017218	0.0012957	0.757521	
	<b>5</b>	0.001699	0.0017218	0.0012957	0.757521	
	<b>10</b>	0.001699	0.0017218	0.0012957	0.757521	
	<b>15</b>	0.001699	0.0017218	0.0012957	0.757521	
	<b>20</b>	0.001699	0.0017218	0.0012957	0.757521	
<b>1200</b>	<b>125</b>	<b>0</b>	0.0022041	0.0022343	0.0017367	0.782591
		<b>5</b>	0.0022704	0.0022152	0.0017649	0.786972
		<b>10</b>	0.0021793	0.0021287	0.0017008	0.789661
		<b>15</b>	0.0022092	0.0022046	0.0017259	0.782071
		<b>20</b>	0.0022314	0.0022653	0.0018008	0.800973
	<b>130</b>	<b>0</b>	0.0021432	0.0021243	0.0016405	0.768827
		<b>5</b>	0.0022319	0.0021966	0.0017311	0.781827
		<b>10</b>	0.0021392	0.0021467	0.0016883	0.787824
		<b>15</b>	0.0021753	0.0021766	0.0017142	0.787814
		<b>20</b>	0.0021606	0.0021734	0.0017128	0.790377
	<b>135</b>	<b>0</b>	0.002095	0.002105	0.0015753	0.750147
		<b>5</b>	0.0021515	0.0021061	0.0016166	0.759447
		<b>10</b>	0.0020968	0.0021187	0.0016068	0.762324
		<b>15</b>	0.0021319	0.0021252	0.0016232	0.762589
		<b>20</b>	0.0020916	0.0021068	0.0016105	0.767179
	<b>140</b>	<b>0</b>	0.0019869	0.0020312	0.0014976	0.745465
		<b>5</b>	0.0020605	0.0020594	0.001539	0.747104
		<b>10</b>	0.0020834	0.0019824	0.001525	0.750387
		<b>15</b>	0.0020144	0.0019891	0.0015175	0.758109
		<b>20</b>	0.0020631	0.0021099	0.0016027	0.768174
<b>145</b>	<b>0</b>	0.0019869	0.0020312	0.0014976	0.745465	
	<b>5</b>	0.0020265	0.0020474	0.0015065	0.739592	
	<b>10</b>	0.0019724	0.0019493	0.0014573	0.743190	
	<b>15</b>	0.0019966	0.0019647	0.0014975	0.756081	
	<b>20</b>	0.0020123	0.0019536	0.0014964	0.754716	
<b>150</b>	<b>0</b>	0.0020467	0.0020822	0.001551	0.751304	
	<b>5</b>	0.0019261	0.0019432	0.0013968	0.721994	
	<b>10</b>	0.0019507	0.0019811	0.0014507	0.737967	
	<b>15</b>	0.0019372	0.0019023	0.0014361	0.748061	
	<b>20</b>	0.0019536	0.0019058	0.0014143	0.732980	
<b>1400</b>	<b>150</b>	<b>0</b>	0.0019512	0.0019278	0.0014337	0.739248
		<b>5</b>	0.0024443	0.002509	0.0019499	0.787370
		<b>10</b>	0.0025244	0.0025016	0.0019551	0.778005
		<b>15</b>	0.0025236	0.0025198	0.0019746	0.783032
		<b>20</b>	0.0025866	0.0025461	0.0019971	0.778216
	<b>155</b>	<b>0</b>	0.0025001	0.0024668	0.0019509	0.785568
		<b>5</b>	0.0024549	0.0024651	0.0019039	0.773927
		<b>10</b>	0.0024916	0.0024527	0.0018959	0.766905
		<b>15</b>	0.00246	0.0024349	0.0018985	0.775700
		<b>20</b>	0.0024251	0.0024236	0.0018812	0.775983
	<b>160</b>	<b>0</b>	0.0024575	0.0024545	0.0019006	0.773867
		<b>5</b>	0.0023572	0.0023848	0.0017947	0.756961
		<b>10</b>	0.0024180	0.0023955	0.0018391	0.764172
		<b>15</b>	0.0024058	0.0023623	0.001817	0.762157
		<b>20</b>	0.0024439	0.0023699	0.0018202	0.756354
	<b>165</b>	<b>0</b>	0.0024355	0.0023418	0.0017977	0.752738
		<b>5</b>	0.0023151	0.0023075	0.001724	0.745885
		<b>10</b>	0.0023922	0.0023409	0.0017827	0.753323
		<b>15</b>	0.0023173	0.0023204	0.0017434	0.751848
		<b>20</b>	0.0023563	0.0022806	0.0017085	0.737014
<b>170</b>	<b>0</b>	0.0023269	0.0023377	0.0017599	0.754600	
	<b>5</b>	0.0023518	0.002345	0.0017334	0.738112	
	<b>10</b>	0.0023818	0.002383	0.0017187	0.721428	
	<b>15</b>	0.0023231	0.00225	0.0017004	0.743762	
	<b>20</b>	0.0022799	0.0022669	0.0016655	0.732632	
<b>175</b>	<b>0</b>	0.002346	0.0022997	0.0017431	0.750481	
	<b>5</b>	0.0022676	0.0023609	0.0016757	0.724209	
	<b>10</b>	0.0023392	0.0022731	0.0016869	0.731545	
	<b>15</b>	0.0024183	0.002329	0.0017338	0.730565	
	<b>20</b>	0.002335	0.0022947	0.0016481	0.712010	
			0.0022436	0.0022436	0.0016368	0.729848

## B.6. Bobina hexagonal com núcleo ferromagnético

Tabela B. 6-Resultados obtidos através do *software* MagNet para bobinas hexagonais com núcleo ferromagnético.

<b>Diâmetro [mm]</b>	<b>Distância [mm]</b>	<b>Ângulo [°]</b>	<b>Lp [H]</b>	<b>Ls [H]</b>	<b>M [H]</b>	<b>k</b>
<b>1000</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	0.0010503	0.0010401	0.0008181	0.782678
		<b>5</b>	0.0009855	0.0009883	0.0007708	0.781021
		<b>10</b>	0.0009856	0.0009817	0.0007587	0.771305
		<b>15</b>	0.0009819	0.0009777	0.0007523	0.767839
		<b>20</b>	0.0009904	0.0010023	0.0007787	0.781544
	<b>105</b>	<b>0</b>	0.0009658	0.0009742	0.0007488	0.771970
		<b>5</b>	0.0009586	0.0009579	0.0007351	0.767142
		<b>10</b>	0.0009406	0.0009483	0.0007201	0.762485
		<b>15</b>	0.000942	0.0009432	0.0007101	0.753361
		<b>20</b>	0.0009542	0.0009578	0.0007239	0.757177
	<b>110</b>	<b>0</b>	0.0009308	0.0009464	0.0007147	0.761515
		<b>5</b>	0.000932	0.000929	0.0007034	0.755885
		<b>10</b>	0.0009317	0.0009185	0.0006875	0.743201
		<b>15</b>	0.0009152	0.0009116	0.0006751	0.739160
		<b>20</b>	0.0009247	0.0009263	0.0006839	0.738975
	<b>115</b>	<b>0</b>	0.0009003	0.0009131	0.0006712	0.740300
		<b>5</b>	0.0008985	0.0009033	0.0006672	0.740639
		<b>10</b>	0.0008956	0.0008939	0.0006565	0.733767
		<b>15</b>	0.0008899	0.0008888	0.0006444	0.724573
		<b>20</b>	0.0009014	0.0008874	0.0006465	0.722835
<b>120</b>	<b>0</b>	0.0008798	0.0008838	0.0006412	0.727183	
	<b>5</b>	0.0008577	0.0008701	0.0006298	0.729049	
	<b>10</b>	0.0008645	0.000863	0.0006178	0.715263	
	<b>15</b>	0.0008585	0.0008714	0.0006173	0.713746	
	<b>20</b>	0.0008744	0.0008799	0.0006264	0.714217	
	<b>25</b>	0.0008798	0.0008838	0.0006412	0.727183	
<b>125</b>	<b>0</b>	0.0008786	0.0008795	0.000627	0.713317	
	<b>5</b>	0.0008467	0.0008464	0.0005992	0.707837	
	<b>10</b>	0.0008267	0.00084	0.0005884	0.706046	
	<b>15</b>	0.0008388	0.000841	0.0005823	0.693338	
	<b>20</b>	0.000861	0.0008504	0.0005938	0.693905	
<b>1200</b>	<b>125</b>	<b>0</b>	0.00112	0.0011046	0.0008437	0.758483
		<b>5</b>	0.0011305	0.0011223	0.0008643	0.767343
		<b>10</b>	0.0011101	0.0011055	0.0008407	0.758892
		<b>15</b>	0.0011147	0.0011092	0.0008379	0.753521
		<b>20</b>	0.0011267	0.0011407	0.0008695	0.766946
	<b>130</b>	<b>0</b>	0.0010952	0.001089	0.0008231	0.753726
		<b>5</b>	0.0011044	0.0011143	0.0008484	0.764755
		<b>10</b>	0.0010855	0.0010925	0.000819	0.752094
		<b>15</b>	0.0010765	0.0010878	0.0008092	0.747770
		<b>20</b>	0.0010779	0.0010966	0.0008211	0.755270
	<b>135</b>	<b>0</b>	0.0010718	0.0010749	0.0008026	0.747706
		<b>5</b>	0.0010831	0.0010743	0.000795	0.737004
		<b>10</b>	0.001058	0.0010644	0.0007826	0.737474
		<b>15</b>	0.0010542	0.0010549	0.0007691	0.729321
		<b>20</b>	0.0010772	0.0010639	0.0007814	0.729908
	<b>140</b>	<b>0</b>	0.0010586	0.0010399	0.0007599	0.724267
		<b>5</b>	0.0010564	0.0010626	0.0007753	0.731828
		<b>10</b>	0.0010472	0.0010382	0.0007579	0.726895
		<b>15</b>	0.0010493	0.0010278	0.0007413	0.713881
		<b>20</b>	0.0010531	0.0010528	0.0007628	0.724403
<b>25</b>		0.0010586	0.0010399	0.0007599	0.724267	
<b>145</b>	<b>0</b>	0.0010434	0.001059	0.0007722	0.734580	
	<b>5</b>	0.0010302	0.0010335	0.0007436	0.720665	
	<b>10</b>	0.0010078	0.0010105	0.0007264	0.719807	
	<b>15</b>	0.0010245	0.0009927	0.000703	0.697160	
	<b>20</b>	0.0010117	0.0010074	0.0007132	0.706403	
<b>150</b>	<b>0</b>	0.001028	0.0010265	0.0007261	0.706807	
	<b>5</b>	0.0010134	0.0010043	0.0007111	0.704888	
	<b>10</b>	0.0009925	0.0010033	0.0007077	0.709202	
	<b>15</b>	0.0010033	0.0009984	0.0006937	0.693153	
	<b>20</b>	0.0010186	0.0009966	0.0006976	0.692354	
<b>1400</b>	<b>150</b>	<b>0</b>	0.0012767	0.0012822	0.000979	0.765133
		<b>5</b>	0.0012834	0.0012968	0.0009907	0.767907
		<b>10</b>	0.0012788	0.0012701	0.000956	0.750167
		<b>15</b>	0.0012865	0.0012899	0.0009566	0.742547
		<b>20</b>	0.0012969	0.0012939	0.000968	0.747219
	<b>155</b>	<b>0</b>	0.0012425	0.0012618	0.0009495	0.758344
		<b>5</b>	0.0012568	0.0012582	0.0009493	0.754893
		<b>10</b>	0.0012329	0.0012254	0.0009134	0.743149
		<b>15</b>	0.0012518	0.0012579	0.0009321	0.742767
		<b>20</b>	0.0012695	0.0012668	0.0009397	0.740994
	<b>160</b>	<b>0</b>	0.001214	0.0012224	0.0009052	0.743116
		<b>5</b>	0.0012572	0.0012424	0.0009261	0.741007
		<b>10</b>	0.001216	0.0012074	0.0008814	0.727391
		<b>15</b>	0.0012296	0.0012302	0.0008989	0.730847
		<b>20</b>	0.0012528	0.0012455	0.000917	0.734143
	<b>165</b>	<b>0</b>	0.0011878	0.0011986	0.000873	0.731622
		<b>5</b>	0.0012273	0.001219	0.0008912	0.728646
		<b>10</b>	0.001221	0.0011966	0.0008669	0.717230
		<b>15</b>	0.0012105	0.0011813	0.0008509	0.711588
		<b>20</b>	0.001226	0.0012429	0.0008982	0.727629
<b>170</b>	<b>0</b>	0.0011941	0.0012005	0.0008709	0.727356	
	<b>5</b>	0.001202	0.0012063	0.0008713	0.723558	
	<b>10</b>	0.0011834	0.0011632	0.000832	0.709167	
	<b>15</b>	0.0012128	0.0011953	0.0008507	0.706519	
	<b>20</b>	0.0011909	0.0012111	0.0008598	0.715878	
<b>175</b>	<b>0</b>	0.0011738	0.001193	0.0008489	0.717386	
	<b>5</b>	0.0011739	0.0011818	0.0008374	0.710949	
	<b>10</b>	0.0011908	0.001164	0.0008203	0.696732	
	<b>15</b>	0.0011673	0.0011876	0.0008255	0.701110	
	<b>20</b>	0.0011847	0.0011881	0.0008367	0.705207	