

Universidade Federal de Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia

Graduação em Engenharia Elétrica - Energia

Breno Barbosa de Miranda

Estudo sobre Transferência Indutiva de Potência: estado da arte e aplicações.

Juiz de Fora

2017

Breno Barbosa de Miranda

Estudo sobre Transferência Indutiva de Potência: estado da arte e aplicações.

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. M. Eng. Israel Filipe Lopes

Juiz de Fora

2017

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Miranda, Breno Barbosa de.

Estudo sobre Transferência Indutiva de Potência: estado da arte e aplicações. / Breno Barbosa de Miranda. -- 2017.

83 p. : il.

Orientador: Israel Filipe Lopes

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Transferência Indutiva de Potência. 2. Transferência sem fio de energia elétrica. 3. Veículos Elétricos. 4. Dispositivos eletroeletrônicos portáteis. 5. Dispositivos biomédicos implantáveis.

I. Lopes, Israel Filipe, orient. II. Título.

Breno Barbosa de Miranda

Estudo sobre Transferência Indutiva de Potência: estado da arte e aplicações.

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Israel Filipe Lopes, M. Eng. (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Cristiano Gomes Casagrande, Dr. Eng.
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me proporcionado o dom da Vida e por sempre iluminar o meu caminho.

Agradeço aos meus pais, Maria Aparecida e Edison, por todo amor e confiança, e por serem meus maiores exemplos. Ao meu irmão, Hugo, pelo companheirismo de sempre. A todos os meus familiares, por serem o meu refúgio de alegria e carinho, e por sempre me apoiarem na busca dos meus objetivos.

Agradeço a todos meus amigos de infância e de colégio, por sempre me proporcionarem momentos felizes e divertidos. A todos meus amigos de faculdade, por todos ensinamentos, discussões e momentos de alegria vividos.

Agradeço aos meus professores e mestres, por todo ensinamento e experiência passada ao longo da graduação. Em especial, à professora Janaína Gonçalves pelas oportunidades que me proporcionou durante o curso, sempre com muita sabedoria e bondade; e ao meu orientador Israel Lopes, por toda paciência e ajuda no desenvolver deste trabalho.

E também a todos aqueles que contribuíram de algum modo para execução deste trabalho ou que em algum momento marcaram a minha vida.

*“O sucesso é uma consequência e não um
objetivo”*

Gustave Flaubert

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a tecnologia de transferência indutiva de potência. Inicialmente, é feita uma introdução ao tema de transferência de energia elétrica sem contato, abordando marcos históricos no desenvolver da área, assim como uma breve descrição dos principais tipos de transferência sem fios encontradas na literatura. Em seguida, há a descrição de um sistema típico de transferência indutiva, ressaltando os principais componentes que fazem parte desse sistema: o transformador de núcleo separado, os conversores utilizados tanto no lado primário quanto no lado secundário do sistema e a carga. Posteriormente, o trabalho apresenta uma revisão bibliográfica da tecnologia, observando as principais aplicações desenvolvidas em trabalhos científicos, assim como suas características de operação, níveis de potência típicos, distanciamentos característicos e faixas de frequência. Nesta parte, também são explicitados alguns resultados de trabalhos publicados, além de uma abordagem sobre o desenvolvimento da tecnologia no mundo e de algumas normas e padrões que estão sendo desenvolvidos para o uso da tecnologia. Por fim, são realizadas considerações finais sobre o tema, apontando as principais áreas que estão em destaque nas pesquisas e desenvolvimentos científicos, assim como possíveis temas para trabalhos futuros.

Palavras-chaves: Transferência indutiva de potência; transferência de potência sem fios; transformador de núcleo separado; veículos elétricos.

ABSTRACT

This work presents a study on inductive power transfer technology. Initially, an introduction to the theme of contactless electric energy transfer is presented, addressing some historical landmarks in the area's development, as well as a brief description of the main types of wireless power transmission. Then, there is a description of a typical inductive transfer system, highlighting the main components that are part of this system: the transformer (with separate core), the converters used on both the primary and the secondary side of the system and the load. Subsequently, the work presents a literature review of the technology, observing the main applications developed in scientific works, as well as their operation characteristics, typical power levels, common distances and frequency bands. In this part, some results of published works are also explained, as well as an approach on the development of technology in the world and some norms and standards that are being developed for the use of technology. Finally, considerations are made on the theme, pointing out the main areas that are prominent in scientific research and development, and possible themes for future work.

Keywords: inductive power transfer; wireless power transmission; contactless electrical energy power transfer; transformer with separated core; electric vehicles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Subdivisões da tecnologia de Transferência de Potência sem fios (WPT).	20
Figura 2 – Sistema base para transmissão de potência por micro-ondas.	21
Figura 3 – Circuito básico de um sistema de transferência capacitiva de potência.	23
Figura 4 – Esquema simplificado de um sistema de transmissão indutiva de potência.	25
Figura 5 – Diagrama simplificado de um sistema de transferência indutiva de potência.	28
Figura 6 - Sistema simplificado, modelo de acoplamento mútuo de indutâncias.	30
Figura 7 – Tipos de núcleos utilizados em sistemas IPT: a) UU; b) EE; c) “pot core”.	32
Figura 8 – Estágios Inversores alimentados em corrente, a) full-bridge e b)push-pull	34
Figura 9 – Topologia básica de um conversor Phase-shifted Full Bridge.....	35
Figura 10 – Sistema de controle baseado na regulação da frequência no circuito primário.	37
Figura 11 – Topologias básicas de compensação da reatância indutiva para o sistema de transferência indutiva de potência.	38
Figura 12 – Produto para a recarga de até 5 dispositivos simultaneamente.	43
Figura 13 – Transmissor Qi formado por apenas 1 bobina.....	44

Figura 14 – Exemplo de produto para carregamento de dispositivos utilizando transmissor de 1 bobina e imãs para auxílio de posicionamento.	45
Figura 15 – Sistema transmissor com múltiplas bobinas para a) conveniência de posicionamento para o usuário e b) liberdade de design do próprio dispositivo.	45
Figura 16 – Construção da bobina segundo ASTRID et al. (2014).....	47
Figura 17 – Configuração de um sistema típico de transferência indutiva para aplicações biomédicas.	50
Figura 18 - Diagrama de blocos de um sistema geral para carregamento de veículos elétricos através da tecnologia IPT.	55
Figura 19 – Ônibus elétrico para transporte público com e sem a oportunidade de recargas por sistemas WPT.	58
Figura 20 - Apresentação de algumas aplicações de acordo com a potência da carga e a eficiência do processo de transferência de potência da tecnologia IPT.....	62
Figura 21 - a) Visão geográfica geral de algumas publicações da tecnologia IPT aplicada a veículos elétricos; b) Número de publicações de IPT ao longo dos anos.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelagem do circuito secundário de um sistema IPT de acordo com o tipo de compensação utilizada.	40
Tabela 2 – Parâmetros do circuito secundário refletidos no lado primário do sistema e fator de qualidade, de acordo com o tipo de compensação utilizada.	41
Tabela 3 – Referência dos artigos utilizados na Figura 20.	62
Tabela 4 – Referências dos artigos utilizados para a construção da Figura 21-a.....	66
Tabela 5 – Publicações de pesquisadores brasileiros sobre o tema de transferência indutiva de potência.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AUV	Veículos autônomos subaquáticos (do inglês, <i>Autonomous Underwater Vehicles</i>)
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEET	Sistema de transmissão de Energia Elétrica sem contato (do inglês, <i>Contactless Electrical Energy Transmission System</i>)
CPT	Transmissão de Potência sem contatos (do inglês, <i>Contactless Power Transmission – CPT</i>)
EMC	Compatibilidade eletromagnética (do inglês, <i>Electromagnetic compatibility</i>)
EMF	Campos eletromagnéticos (do inglês, <i>Electromagnetic field</i>)
EMI	Interferência eletromagnética (do inglês, <i>Electromagnetic interference</i>)
ICNIRP	Comissão Mundial referente à proteção contra radiações (do inglês, <i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>)
ICPT	Transferência Indutiva Acoplada de Potência (do inglês, <i>Inductively Coupled Power Transfer</i>)
IGBT	<i>Insulated-gate bipolar transistor</i>
IPT	Transferência indutiva de potência (do inglês, <i>Inductive Power Transfer</i>)
LCIPT	Sistema fracamente acoplado de Transferência Indutiva de Potência (do inglês, <i>Loosely Coupled Inductive Power Transfer System</i>)
MEF	Modelagem de elementos finitos
MOSFET	<i>Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>

PATH	<i>The Partner for Advanced Transit Highways</i>
PWM	Modulação por largura de pulso (do inglês, <i>Pulse Width Modulation</i>)
RFID	Identificação de rádio-frequência (do inglês, <i>Radio Frequency Identification</i>)
RLC	Resistor – indutor – capacitor
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SCR	Retificador controlado de silício (do inglês, <i>Silicon Controlled Rectifier</i>)
SOBRAEP	Associação Brasileira de Eletrônica de Potência
SOC	Estado de carga da bateria (do inglês, <i>State of charge</i>)
SPS	<i>Solar Power Satellite</i>
TET	Transferência de Energia Transcutânea (do inglês, <i>Transcutaneous Energy Transfer</i>)
TIP	Transferência indutiva de potência
TNS	Transformador de núcleo separado
UAV	Veículos aéreos não-tripulados (do inglês, <i>Unmanned Aerial Vehicles</i>)
VE	Veículos Elétricos
VF	Frequência variável (do inglês, <i>variable-frequency</i>)
WPT	Transmissão de potência sem fios (do inglês, <i>Wireless Power Transmission</i>)
ZCS	Comutação por corrente nula (do inglês, <i>Zero Current Switching</i>)
ZVS	Comutação por tensão nula (do inglês, <i>Zero Voltage Switching</i>)

SUMÁRIO

Capítulo 1	16
1.1 Introdução ao tema.....	16
1.2 Tecnologias e suas classificações.....	19
1.2.1 Transferência de potência por micro-ondas.....	21
1.2.2 Transferência de potência por laser.....	22
1.2.3 Transferência Capacitiva de potência.....	22
1.2.4 Transferência Indutiva de Potência.....	23
1.3 Nomenclaturas.....	25
1.4 Motivação.....	26
1.5 Objetivo.....	27
1.6 Estrutura do Trabalho.....	27
Capítulo 2	28
2.1 Fundamentos Teóricos.....	28
2.1.1 Transformador de núcleo separado ou bobinas acopladas.....	29
2.1.2 Conversores.....	32
2.1.2.1 Conversor CC-CA Primário.....	33
2.1.2.2 Conversores no circuito secundário.....	35
2.1.2.3 Controle.....	36
2.1.3 Carga.....	37
2.1.4 Compensadores.....	38
Capítulo 3	42

3.1 Dispositivos Eletroeletrônicos portáteis	42
3.2 Dispositivos Biomédicos	48
3.3 Veículos Elétricos	52
3.3.1 Veículos Elétricos Não-tripulados.....	53
3.3.2 Veículos Elétricos Tripulados.....	54
3.4 Faixas de operação.....	60
3.5 Normas	62
3.6 Desenvolvimento no mundo	65
Capítulo 4	71
4.1 Considerações finais	71
4.2 Trabalhos futuros.....	72
Referências Bibliográficas	73

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO AO TEMA

Todos os tipos de equipamentos elétricos se baseiam na transformação de energia elétrica em trabalho útil, em diferentes tipos de aplicações que vão desde poucos watts de potência, como dispositivos eletroeletrônicos, até centenas e milhares de watts, como em máquinas industriais. Ao longo de anos essa transferência de energia vem sendo feita através de contatos sólidos como cabos, conectores ou diferentes tipos de contatos elétricos, conectando a fonte de energia ao próprio dispositivo elétrico, habilitando-o de operar corretamente. Entretanto, nas últimas décadas, tecnologias de transferência de potência alternativas sem conexões mecânicas vêm ganhando destaque em pesquisas e se desenvolvendo tecnologicamente. A chamada transferência de potência elétrica "sem fios" (*Wireless Power Transmission* - WPT), embora seja considerada um grande avanço tecnológico e uma tecnologia do futuro, já foi investigada no século XIX.

Os primeiros experimentos de indução eletromagnética são datados do ano de 1832 em que Faraday realizou testes de transmissão de energia através de fluidos (FARADAY, 1832). No ano de 1895, Hertz investigou as chamadas radiofrequências para aplicações da área de comunicação e transmissão de dados (CICHON e WIESBECK, 1995). Porém, o principal experimento realizado na época foi feito pelo grande cientista Nikola Tesla que investigou a transmissão de energia elétrica sem fios através de longas distâncias e apresentou um sistema experimental na exposição mundial de Chicago (*World Exposition of Chicago*) no ano de 1893 (TESLA, 1904). Alguns anos depois, Tesla obteve a patente pela transmissão de energia sem contatos utilizando indutores desacoplados a longas distâncias (U.S. Patent 649 621).

Segundo LI (2011) e SHADID, NOGHANIAN, NEJADPAK (2016), as pesquisas associadas à transmissão de potência sem fios se desenvolveram historicamente da seguinte maneira:

- 1864: James C. Maxwell previu a existência de ondas de rádio;
- 1884: John H. Poynting desenvolveu o vetor *Poynting* para quantificar a energia eletromagnética;
- 1888: Heinrich Hertz mostrou experimentalmente evidências de ondas de rádio;
- 1889: Torre de transmissão de energia (*Wardenclyffe Tower*) proposta por Tesla;
- 1899: Marchese G. Marconi e Reginald Fessenden implementaram uma comunicação sem fio através de ondas de rádio;
- 1893-1904: Nikola Tesla conduziu o primeiro experimento relacionado à transmissão de potência sem fio;
- Segunda Guerra Mundial: invenção do conversor de energia através de micro-ondas;
- 1964: Willian C. Brown desenvolveu a primeira transmissão de potência por meio de micro-ondas;
- 1940-50s: Desenvolvimento da célula Fotovoltaica;
- 1968: Peter Glaser propôs o sistema “*Solar Power Satellite*” (SPS);
- 1973: primeiro sistema passivo receptor de radiofrequência (*Radio Frequency Identification – RFID*) foi energizado pela indução eletrodinâmica através de uma pequena distância no laboratório “*Los Alamos National Lab*”.

De acordo com COVIC e BOYS (2013), experimentos de transferência de potência sem fio, submetidos a diferentes tipos de ambientes (sujeira, água, entre outros) e com tolerância para desalinhamentos e distanciamento de entreferrões de ar (“*air gaps*”), eram tratados como mitos e que não seriam possíveis na prática. Apenas

a área de sinais era dita como factível, com diversos desenvolvimentos no meio de sistemas de comunicações e antenas. Até o final do século XIX, poucas ideias surgiram para o desenvolvimento da tecnologia de transferência de potência sem fios.

Embora as pesquisas na área de transferência de energia sem fios tenham se iniciado há um considerável tempo, existiam algumas barreiras que impediram o avanço tecnológico na época. Por exemplo, devido às características de acoplamento e baixos níveis de eficiência, era necessário que o sistema operasse em níveis altos de frequência e para isso era preciso chaves semicondutoras que operassem em tais níveis de frequência, tanto quanto conversores de energia, o que não era possível na época. No entanto, com o desenvolvimento de tecnologias de materiais, chaves semicondutoras e capacitores, foi possível continuar as pesquisas e desenvolver sistemas factíveis em diversas áreas e aplicações.

Contudo, no ano de 1894, Hutin e Le-Blanc (U.S. Patent 527 857) propuseram um método para fornecer potência a um veículo elétrico de forma indutiva, através de um gerador CA operando a uma frequência próxima de 3 kHz. Mais recentemente, no ano de 1972, Otto (Provisional Patent NZ19720167422, JP49063111 (A)) propôs a carga de um outro veículo utilizando geração de potência a 10 kHz através do chaveamento de retificadores controlados de silício (*Silicon Controlled Rectifier* - SCR). Esse trabalho foi abandonado dois anos depois, mas serviu como ponto inicial para a ideia de que era possível transferir potência através de acoplamentos magnéticos para corpos móveis. Após os anos de 1970, a academia começou a desenvolver um maior interesse na tecnologia de transferência indutiva de potência (do inglês, *Inductive Power Transfer* – IPT), principalmente na área de carregamento de veículos elétricos. Um dos principais projetos foi desenvolvido nos anos de 1980, pela *The Partner for Advanced Transit and Highways* (PATH) no Canadá, o qual consiste em uma rodovia para abastecimento de veículos com uma tolerância de espaçamento variável entre as bobinas (entre 50 – 100 mm quando acoplado para transferência de potência). Outros detalhamentos sobre o desenvolvimento das tecnologias de transferência de energia sem contato,

principalmente relacionada à tecnologia IPT podem ser encontrados no trabalho de COVIC e BOYS (2013).

1.2 TECNOLOGIAS E SUAS CLASSIFICAÇÕES

O termo transferência de energia "sem fios", ou WPT, engloba diversas formas de transmissão de energia sem a utilização de cabos e não é idealizado apenas para condições em que a conexão mecânica é considerada complicada, perigosa ou pouco manejável. Muito pelo contrário, em certas aplicações como no caso de veículos elétricos, que será tratado com mais detalhe no decorrer deste trabalho, diversas pesquisas vêm mostrando como uma das principais vantagens da tecnologia o fato de proporcionar maior comodidade para o usuário, assim como o aumento da confiabilidade do sistema como um todo. De acordo com FERNANDES e JUNIOR (2014), a inexistência de contatos elétricos mecânicos por onde se estabeleceria o fluxo de potência implica na impossibilidade de existência de futuros problemas relacionados às falhas elétricas de contatos ou perda de isolamento de cabos, minimizando também a possibilidade de choques elétricos aos usuários. Além disso, existe uma questão muito importante que é a diminuição da produção de equipamentos tóxicos para contatos e cabos/fios, o que impacta diretamente em questões envolvendo o meio ambiente e o nível de poluição global (KHENG, 2013).

Para FERNANDES (2015) o desenvolvimento atual em transferência de energia "sem fios" está voltado, principalmente, para quatro tecnologias. São elas: a transmissão de potência por micro-ondas, por laser, transferência capacitiva de potência e transferência indutiva. A Figura 1 ilustra essa subdivisão de tecnologias da transferência de potência "sem fios", assim como a faixa de frequência de operação utilizada nas respectivas aplicações. De acordo com HUI, ZHONG e LEE (2014), os sistemas WPT podem ser classificados em duas categorias distintas de acordo com o mecanismo de transferência de potência: não-radiativo e radiativo. As tecnologias de transferência indutiva ou capacitiva de potência são intituladas como não radiativas,

ou também "campos próximos" (*near field*), e operam para distâncias pequenas e médias, não superiores ao comprimento de onda do sinal transmitido. Já as nomeadas como radiativas, ou também como transferência de potência a campos distantes (do inglês, *far-field power transfer*), operam para distâncias muito maiores que o comprimento de onda do sinal transmitido, através de uma alta frequência de operação que chega na casa dos giga hertz, como é o caso de tecnologias de micro-ondas e laser.



Figura 1 – Subdivisões da tecnologia de Transferência de Potência sem fios (WPT).

(Adaptado de CIRIMELE, FRESCHI, MITOLO, 2016)

Nos tópicos seguintes, serão descritas algumas características dos principais tipos de tecnologias *wireless* mencionados.

1.2.1 TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA POR MICRO-ONDAS

Essa tecnologia baseia-se, em linhas gerais, em um circuito emissor composto por: uma fonte de micro-ondas alimentada por uma fonte CC e uma antena transmissora, podendo ser de diferentes formatos como parabólicos, cônicos, entre outros; um circuito receptor, composto por uma antena receptora (também chamada de *rectenna*) que receberá a potência em micro-onda transmitida; e um conversor de radiofrequência – corrente contínua (RF-DC) que adequará a energia de acordo com a carga que deverá ser alimentada. A Figura 2 ilustra o circuito base para esse tipo de tecnologia. Essa tecnologia caracteriza-se por operar em frequências na faixa dos giga hertz, podendo transmitir potência de até 1 MW em quilômetros de distância (LAKHAL et al., 2013).

As principais aplicações estão nas áreas aeroespaciais, com desenvolvimentos de diversos projetos práticos, como mencionados nos trabalhos de MIYAKAWA et. al (2011) e SHINOHARA e ISHIKAWA (2011), em que há um maior detalhamento do sistema.

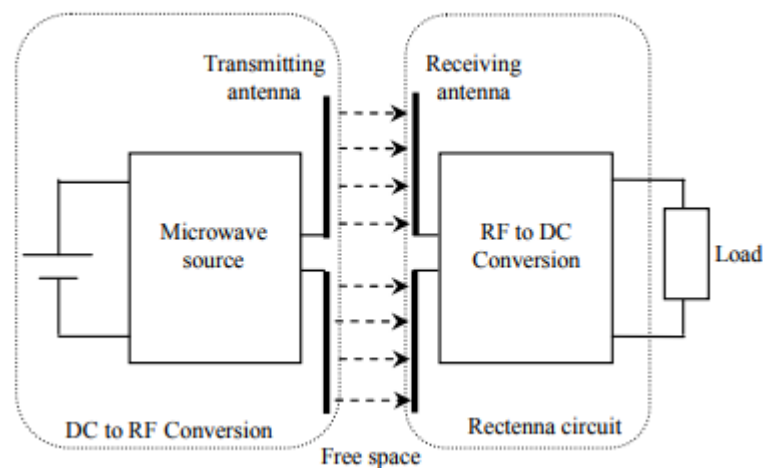


Figura 2 – Sistema base para transmissão de potência por micro-ondas.
(LAKHAL et al., 2013)

1.2.2 TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA POR LASER

A transmissão de potência por laser caracteriza-se por um emissor de ondas eletromagnéticas com comprimento de onda conhecido, normalmente na faixa do infravermelho (850 a 3800 nm), com o objetivo de atingir um alvo a uma longa distância. Este alvo é constituído por elementos fotovoltaicos especiais, com dispositivos semicondutores aprimorados quando comparados com os elementos fotovoltaicos convencionais de painéis solares, para que haja uma máxima eficiência de conversão de energia para o comprimento de onda recebido. As principais aplicações são carregamento de aeronaves e veículos aéreos não tripulados (*Unmanned Aerial Vehicle* – UAV), como analisado por MASON (2011).

1.2.3 TRANSFERÊNCIA CAPACITIVA DE POTÊNCIA

A transferência capacitiva de potência (*Capacitive Power Transfer* – CPT), ou também chamada de indução eletrostática, é um método de transferência de potência através de duas ou mais placas metálicas desacopladas, sendo a primeira placa fixa e a segunda apresentando um certo grau de liberdade, com um princípio de funcionamento similar aos capacitores convencionais. A Figura 3 ilustra o circuito típico de um sistema CPT. O lado primário é composto por uma fonte de tensão V_s associado a um inversor operando em alta frequência, para suprir energia à primeira placa de metal. Quando uma segunda placa metálica for posicionada próximo à primeira, um campo elétrico variante no tempo irá surgir no interior das placas, criando um fluxo de corrente devido ao “acoplamento” capacitivo. Como resultado, uma potência pode ser transferida do lado primário até uma carga conectada no lado secundário do sistema. Como forma de garantir uma transferência de potência segura e uma considerável isolação elétrica, materiais dielétricos são normalmente utilizados nas superfícies das chapas metálicas. Uma característica importante é a possibilidade de transferência de potência através de objetos metálicos, o que se torna uma grande vantagem quando comparado a outros tipos de tecnologias WPT, como o caso de carregamento de “pads” com múltiplas cargas

(eletroeletrônicos, celulares, notebooks, entre outros), conforme mencionado por LIU (2011).

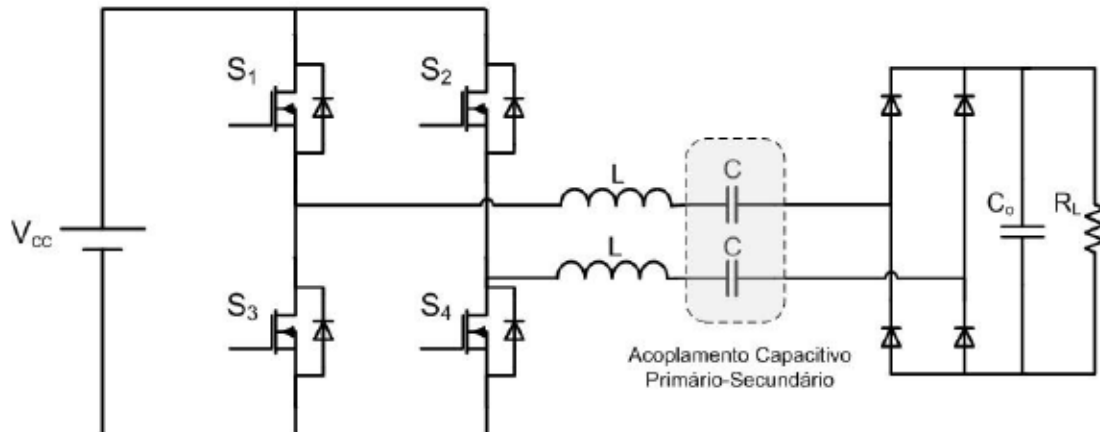


Figura 3 – Circuito básico de um sistema de transferência capacitiva de potência.
(FERNANDES, 2015)

Como destaca FERNANDES (2015), essa tecnologia requer tensões elevadas, o que pode resultar em campos elétricos perigosos, podendo superar o limite de rigidez dielétrica do ar de 30 kV/cm, causando problemas como arcos elétricos e centelhamentos.

Diferentes métodos de controle estão sendo desenvolvidos para melhorar a eficiência do sistema, levando em consideração níveis de potência e frequências de operação, como por exemplo o controle para sistemas de pequeno porte implementado por LIU e HU (2009). Maiores detalhes referentes a essa tecnologia, como a descrição de topologias de circuito, tipos de controle e outras análises do sistema de transferência capacitivos podem ser encontrados em LIU (2011).

1.2.4 TRANSFERÊNCIA INDUTIVA DE POTÊNCIA

A transferência indutiva de potência (*Inductive Power Transfer - IPT*) tem seu princípio de funcionamento semelhante ao de transformadores de potência comumente

utilizados nos sistemas elétricos de potência, em segmentos de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Basicamente, os transformadores operam segundo o princípio de indução magnética, de acordo com duas leis: a Lei de Ampère e a da Indução de Faraday. A primeira explica a produção de um campo magnético quando uma corrente percorre um fio condutor. No caso de uma corrente alternada, $i_p(t)$, percorrendo uma bobina A (primária), cria-se um campo magnético variante no tempo ao redor dessa bobina. Se houver linhas de fluxo magnético envolvendo uma outra espira de fio condutor, ou no caso uma bobina B (secundária), então uma força eletromotriz será induzida, sendo diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo magnético em relação ao tempo, segundo a Lei de Faraday. Dito isso, o fluxo magnético mútuo, concatenado pela bobina secundária, $\Phi_m(t)$, induz uma tensão nessa bobina e, conseqüentemente, cria-se uma corrente no lado secundário $i_s(t)$. Assim, a potência elétrica fornecida por uma fonte no lado primário do circuito é transferida a uma carga conectada ao circuito secundário, como pode ser visto na Figura 4. Em transformadores comuns, existe um elemento de permeabilidade magnética maior que o meio circundante unindo mecanicamente os dois enrolamentos, como é o caso de núcleos ferromagnéticos, com o objetivo de aumentar o acoplamento magnético k entre os dois circuitos, tornando-o próximo da unidade (CHAPMAN, 2013).

De acordo com FERNANDES (2015), esse elemento de elevada permeabilidade magnética que une as bobinas favorece a transferência de potência de um circuito para o outro, porém inviabiliza a liberdade de posicionamento espacial dos enrolamentos. Já no caso dos sistemas IPT, a ausência de núcleos magnéticos ligando mecanicamente as bobinas proporciona mobilidade dos circuitos, porém com uma considerável redução do coeficiente de acoplamento k , o qual se torna tipicamente menor que 0,5. Por isso, essa tecnologia é também chamada de elementos *fracamente acoplados*. Com isso, o fluxo mútuo $\Phi_m(t)$ e o fluxo de dispersão $\Phi_d(t)$ acabam se tornando da mesma ordem de grandeza, o que diminui drasticamente a eficiência do processo de transferência de

energia, uma vez que as perdas se elevam devido à dispersão do campo magnético. Para minimizar esse problema, diversas técnicas de controle e topologias de circuitos vem sendo desenvolvidas, o que será discutido posteriormente no Capítulo 2.

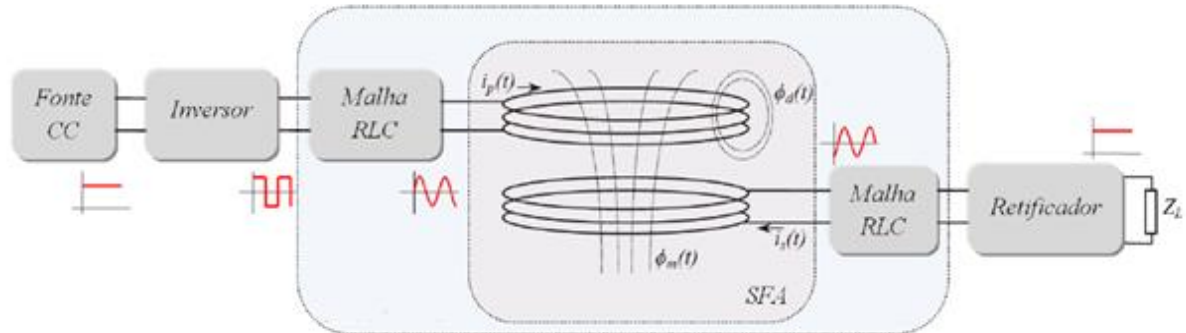


Figura 4 – Esquema simplificado de um sistema de transmissão indutiva de potência. (FERNANDES, 2015).

1.3 NOMENCLATURAS

É importante ressaltar que o termo “transferência de energia elétrica sem contato” pode ser utilizado para qualquer tipo de transformador, porém vem ganhando destaque para descrever aplicações em que o núcleo envolvido pelas bobinas está separado, de tal maneira que uma das bobinas estará no circuito externo junto à fonte externa, para alimentação do sistema, e a outra fará parte do próprio dispositivo a ser carregado, ou seja, a carga. É possível encontrar diferentes denominações para esse tipo de tecnologia de acordo com cada aplicação desenvolvida na literatura. Algumas das intitulações mais comuns podem ser vistas a seguir:

- Transferência de potência sem fios (do inglês, *Wireless Power Transmission* – WPT);
- Transferência Indutiva de Potência (do inglês, *Inductive Power Transfer* – IPT);

- Sistema de transmissão de Energia Elétrica sem contato (do inglês, *Contactless Electrical Energy Transmission System – CEET*); (JANG e JOVANOVIC, 2003);
- Transmissão de Potência sem contatos (do inglês, *Contactless Power Transmission – CPT*) (YAN et al., 2016);
- Transferência Indutiva Acoplada de Potência (do inglês, *Inductively Coupled Power Transfer – ICPT*) (WANG et al., 2005);
- Sistema fracamente acoplado de Transferência Indutiva de Potência (do inglês, *Loosely Coupled Inductive Power Transfer System – LCIPT*) (ZHIXIN et al., 2010);
- Transferência de Energia Transcutânea (do inglês, *Transcutaneous Energy Transfer – TET*) (DISSANAYAKE et al., 2009).

Geralmente, as aplicações que utilizam o modelo clássico de transformador tratam as bobinas com os nomes "primário" e "secundário", ao passo que as aplicações que empregam o modelo por indutância mútua se referem às bobinas como "emissor" (que seria a bobina primária) e receptor (bobina secundária).

1.4 MOTIVAÇÃO

É evidente que as tradicionais formas de fornecimento de energia para equipamentos elétricos funcionam de maneira muito eficiente. Porém, diversos trabalhos da comunidade científica vêm ganhando destaque no desenvolvimento de técnicas de transferência de energia sem contato, como a chamada transferência indutiva de potência. Muitos pesquisadores tratam esse método como solução para alguns problemas relacionados aos contatos elétricos, além de proporcionarem uma maior praticidade para a fase de carregamento dos dispositivos e tornarem o sistema muito mais seguro e confiável em diversas aplicações.

O grande foco no mundo atual relacionado a essa tecnologia se tornou então a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho, uma vez que engloba

diversas possibilidades de aplicações em vários seguimentos do mercado. Por exemplo, em veículos elétricos, tema este discutido em algumas disciplinas ao longo do curso de engenharia elétrica, e que vem sendo destaque no cenário mundial, visando substituir a forma tradicional de veículos.

1.5 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema de Transferência Indutiva de Potência (TIP), analisando o princípio de funcionamento dessa tecnologia, assim como as principais aplicações e desenvolvimentos científicos atuais do tema em questão.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 é feita uma descrição mais detalhada sobre o sistema de transferência indutiva de potência, abordando os principais componentes do sistema separadamente.

No capítulo 3 é feita a revisão bibliográfica propriamente dita sobre o tema de transferência indutiva de potência, através da exemplificação das características referentes a cada aplicação, como níveis de potência, faixas de frequências de operação, distanciamentos típicos e também técnicas de controle utilizadas. Além disso, serão abordados alguns pontos em relação à padronização da tecnologia, assim como o seu desenvolvimento no mundo.

Por fim, no capítulo 4 é feita uma conclusão sobre o trabalho apresentado, explicitando algumas áreas possíveis para desenvolvimentos e trabalhos futuros.

TRANSFERÊNCIA INDUTIVA DE POTÊNCIA

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Um sistema de transferência indutiva de energia elétrica pode ser representado de forma simplificada pela Figura 5. Como pode ser visto, ele é composto basicamente por uma fonte de alimentação alternada externa, um conversor CA-CC (retificador) e um conversor CC-CA (inversor) no circuito primário, o transformador de núcleo separado (TNS), um conversor CA-CC (retificador) conectado à bobina secundária, um conversor CC-CC para controle de energia entregue à carga do sistema (bateria) e por último a própria bateria. Em algumas aplicações, dependendo do objetivo a ser alcançado ou de características específicas da aplicação, podem existir malhas ressonantes nos circuitos primário e secundário do sistema por meio da inclusão de capacitores.

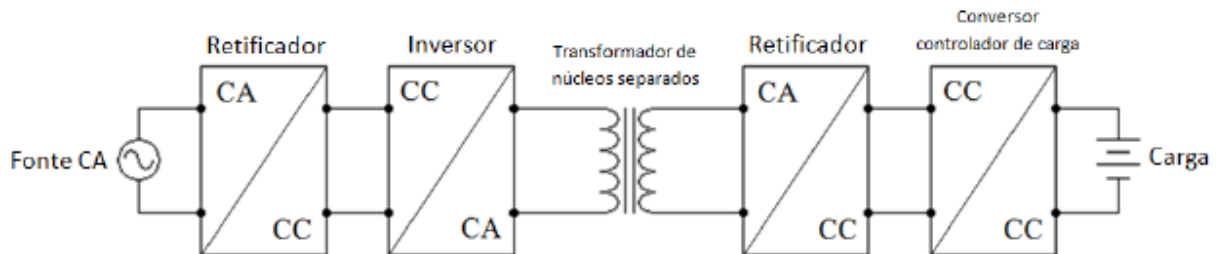


Figura 5 – Diagrama simplificado de um sistema de transferência indutiva de potência.
(LOPES, 2013)

Nas seções seguintes, será feito o detalhamento de cada estágio ilustrado na Figura 5, para uma maior compreensão e análise dos principais componentes que constituem o sistema IPT.

2.1.1 TRANSFORMADOR DE NÚCLEO SEPARADO OU BOBINAS ACOPLADAS

Este é o principal componente de um sistema de transferência indutiva de potência. É por meio dele que ocorre o acoplamento eletromagnético entre os dois circuitos do sistema e, assim, torna-se possível transferir uma certa quantidade de energia de um circuito para o outro, mesmo que esses circuitos estejam separados por alguma distância ou algum elemento físico.

O transformador de núcleo separado é composto basicamente por duas bobinas acopladas magneticamente com um certo espaçamento (conhecido como entreferro, *gap* ou *z-gap*) entre si. A bobina primária, intitulada também de “emissor”, deve ser excitada por correntes de amplitude e frequência suficientes para compensar o baixo acoplamento magnético entre as bobinas do sistema. A frequência de operação típica da transferência indutiva de potência é de algumas dezenas a centenas de quilo hertz, variando de acordo com cada aplicação. A bobina secundária ou “receptor” (também chamada de “*pickup*” na literatura), compõe o estágio receptor do sistema, sendo implementada no próprio dispositivo a ser alimentado, como será mostrado na seção de aplicações no próximo capítulo. Esse dispositivo, que caracteriza a carga do sistema, pode ser de natureza de corrente alternada ou contínua. No caso de corrente contínua, utiliza-se um conversor retificador entre o estágio secundário e a carga, como mostrado na Figura 5, para adequar as condições de tensão e corrente necessitadas pela carga.

A eficiência da transferência de potência em sistemas não-radiativos depende diretamente da indutância mútua entre as bobinas do sistema, do fator de qualidade Q e do coeficiente de acoplamento k . A indutância mútua de um par de bobinas indica o quanto a variação do fluxo magnético em uma bobina influencia a tensão induzida na outra. Já o fator de qualidade Q é definido como a razão entre a energia armazenada no elemento ressonante através do receptor pela energia gerada no emissor (LU, WANG, NIYATO et al., 2016). De acordo com ASTRID, LI e LIANG (2014), o fator Q é baseado na razão entre energia entregue ao sistema receptor pela energia perdida

no sistema. Assim, quanto menor for a porcentagem de energia dissipada na bobina primária, maior será a transferência de energia para o sistema.

O coeficiente de acoplamento, k , expressa a quantidade de fluxo magnético que enlaça a bobina receptora do sistema comparada com o fluxo total gerado pela bobina emissora. Ou seja, como o próprio nome já diz, representa o quão acoplado estará o sistema de transmissão de potência. Por isso, esse fator irá depender da distância de separação entre o circuito emissor e receptor, e do alinhamento entre as bobinas. Assim, se o valor de k for próximo de 1, diz-se que o sistema é francamente acoplado, como no caso de transformadores tradicionais. No entanto, quanto menor o valor desse coeficiente, mais desacoplado se torna o sistema e menor é a eficiência de transmissão de energia entre as bobinas.

Utilizando o modelo de acoplamento mútuo de indutâncias, cada circuito pode ser modelado de acordo com a Figura 6, e o coeficiente de acoplamento pode ser relacionado à indutância mútua do sistema, M , de acordo com a equação (1), em que L_p representa a indutância primária e L_s a indutância do lado secundário. Analogamente, pode ser utilizado a modelagem clássica de um transformador convencional para o sistema, conforme pode ser encontrado em CHAPMAN (2013).

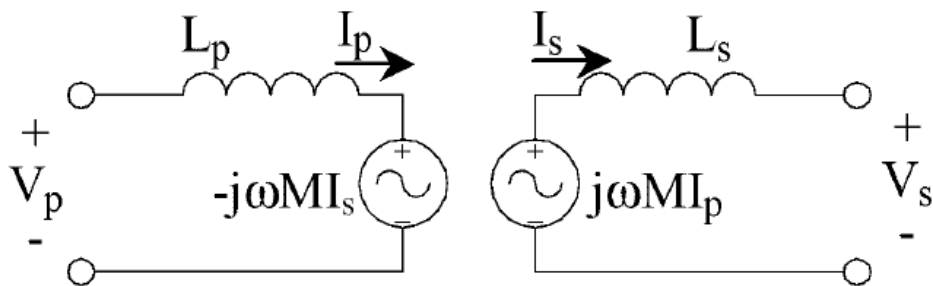


Figura 6 - Sistema simplificado, modelo de acoplamento mútuo de indutâncias.

(WANG, STIELAU, COVIC, 2005)

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (1)$$

As distâncias de *gaps* em sistemas IPT variam de acordo com a aplicação proposta, desde milímetros até alguns centímetros de distância. Essa distância influencia diretamente no fator de correspondência de carga, ou seja, como a frequência de operação está sintonizada com a frequência de ressonância do sistema. (LU, WANG, NIYATO et al., 2016). Nas aplicações reais, o posicionamento entre o lado primário da bobina e o secundário estão sujeitos a diferentes tipos de movimentações e deslocamentos. Isso causa um desalinhamento (linear e/ou angular) entre as bobinas do sistema, reduzindo assim o coeficiente de acoplamento e fazendo com que as linhas de fluxo magnético da bobina primária não enlacem verticalmente a outra bobina, diminuindo a eficiência do sistema (ZHIXIN et al., 2010).

Algumas pesquisas se concentram na área de otimização dos variados tipos e geometrias de bobinas, de forma a maximizar a potência transmitida através da implementação de bobinas de alta qualidade e que proporcionem altos fatores de acoplamento. As bobinas de geometria circular são mais comumente utilizadas, pois apresentam uma alta eficiência em relação às demais e uma distribuição uniforme do campo magnético. Além disso, essa topologia apresenta outras vantagens como um baixo custo de produção, modelagem considerada rápida e fácil, e está disponível em diferentes tamanhos (KALLEL, KANOUN e TRABELSI, 2016). Diversos autores utilizam métodos computacionais para estimar os parâmetros (elétricos e magnéticos) do transformador de núcleo separado, otimizar projetos do transformador de acordo com suas dimensões, formato das bobinas e tipos de núcleos empregados (LOPES, 2013). Um dos métodos mais utilizados nas pesquisas relacionadas ao tema é o da modelagem de elementos finitos (MEF), podendo ser utilizado em diferentes softwares livres ou pagos. Alguns exemplos de softwares encontrados para a simulação em ambiente de três dimensões e pagos são: Ansys, IMAG e COMSOL. Existe também o software livre FEMM, porém só é possível realizar estudos e análises em duas dimensões (2D) quando o problema apresentar simetria planar. No entanto, é possível simular problemas com bobinas circulares em 3D, desde que emissor e receptor sejam concêntricos e estejam em planos paralelos entre si (MEEKER, 2013).

Na transferência sem fio de potência, as bobinas podem ser construídas sem a presença de núcleos (ar). No entanto, a maioria das aplicações utilizam núcleos ferromagnéticos separados fisicamente (ao contrário de transformadores comuns), feitos normalmente de material ferrite e em diferentes formatos, escolhidos de acordo com a potência da carga e a disponibilidade de tamanho, entre outros fatores (LOPES, 2013). Os tipos de núcleos mais utilizados podem ser vistos na Figura 7

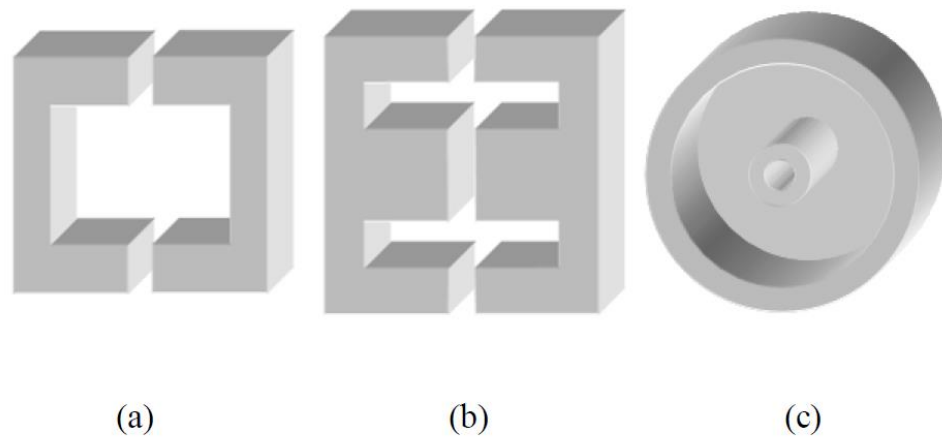


Figura 7 – Tipos de núcleos utilizados em sistemas IPT: a) UU; b) EE; c) “*pot core*”.

(LOPES, 2013)

2.1.2 CONVERSORES

O primeiro estágio é representado pela fonte de alimentação externa em conjunto com um conversor CA-CC retificador (no caso de essa fonte ser de natureza de corrente alternada), normalmente constituído de uma ponte retificadora de onda completa a diodos, conectada a um capacitor de filtro. No entanto, é possível utilizar como fonte externa uma bateria ou uma fonte em corrente contínua. Nesse caso, o uso do retificador não é necessário, e pode-se utilizar um conversor CC-CC para controle da tensão de entrada do sistema de acordo com a bateria que será utilizada. O estágio inversor tem o objetivo de converter a energia do barramento CC para CA novamente e assim gerar um campo magnético variante no tempo na bobina primária do circuito.

2.1.2.1 CONVERSOR CC-CA PRIMÁRIO

O inversor utilizado no estágio emissor do sistema pode ser alimentado em tensão ou em corrente. Existem diferentes tipos de conversores utilizados nas aplicações de transferência indutiva de potência. Na grande maioria dos casos, capacitores são inseridos no circuito emissor (entre conversor e primário), produzindo uma malha RLC que pode operar na frequência de ressonância (imposta pelo conversor). A escolha do conversor pode, então, ser feita de acordo com a topologia da malha ressonante conectada à saída do mesmo. Conversores intitulados ressonantes operam idealmente na frequência de ressonância do sistema. Assim, a impedância vista pelo conversor apresentará características puramente resistivas e, com isso, o conversor irá fornecer apenas potência ativa ao circuito. A seguir, serão descritos alguns tipos principais de conversores utilizados, sendo que informações mais aprofundadas sobre os tipos de conversores podem ser encontradas na tese de FERNANDES (2015).

Um dos tipos de conversores mais utilizados é o “*Inversor Full-Bridge e Push-Pull Paralelo*” (Figura 8), o qual caracteriza-se por ser um conversor ressonante alimentado em corrente. Para fornecer a alimentação em corrente ao estágio inversor, utiliza-se um indutor consideravelmente grande, L_E , no barramento CC. Outra característica é a inserção de diodos, indicados por D_a , em série com cada chave semicondutora do circuito a fim de evitar a condução do diodo intrínseco à chave (em anti-paralelo), permitindo assim uma comutação suave dos transistores. Se não for possível utilizar esses diodos, deve-se necessariamente utilizar a técnica de ZVS (*zero voltage switching*) para que o capacitor C_p não seja curto-circuitado durante algum ciclo de operação (FERNANDES, 2015).

A condição de ZVS estabelece que a mudança de estado das chaves ocorre apenas quando a tensão alternada estiver em seu valor nulo, garantindo a não dissipação de potência durante o chaveamento. Para obter esse tipo de chaveamento, deve-se utilizar uma modulação por deslocamento de fase e um pequeno capacitor em paralelo para habilitar a circulação de reativos. Os conversores que utilizam essa técnica apresentam

como vantagem um menor nível de interferência magnética, além da redução das perdas, o que permite que o conversor opere em altas frequências e, conseqüentemente, os demais componentes passivos do sistema podem ser reduzidos (SOUZA, ANDRADE, JUNIOR et al., 2017). Além disso, essa técnica garante um aumento da densidade de potência e a eficiência no conversor (SULTANBECK et al., 2017). Existe também a chamada ZCS (*zero current switching*), que se baseia no mesmo propósito, porém garantindo a comutação das chaves no valor nulo de corrente.

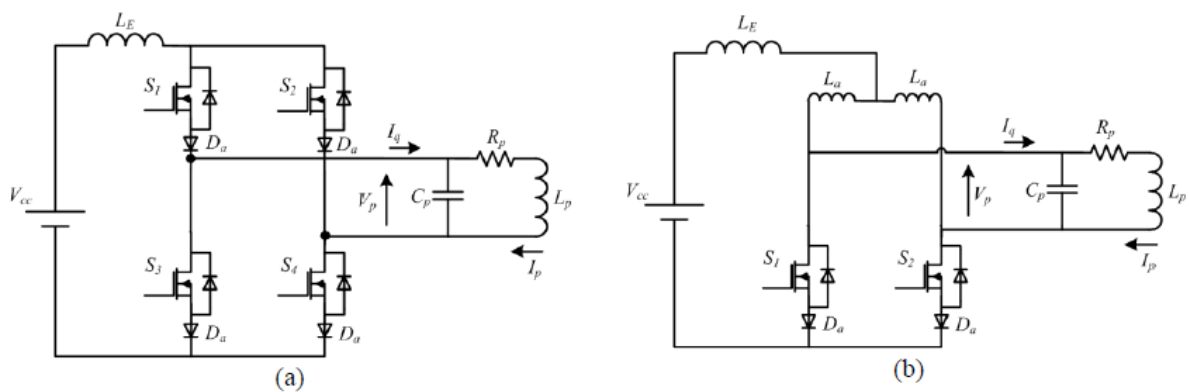


Figura 8 – Estágios Inversores alimentados em corrente, a) *full-bridge* e b) *push-pull*

(FERNANDES, 2015)

Outro conversor também utilizado em aplicações de transferência indutiva de potência é o conversor em ponte completa com mudança de fase (do inglês, *Phase-shifted Full Bridge Converter*). Segundo SULTANBECK et al. (2017), esse conversor é comumente utilizado em aplicações que requerem altos níveis de potência, como no caso de veículos elétricos. A condição de ZVS é atingida através da mudança de fase nos terminais dos transistores do conversor, permitindo a condução dos diodos anti-paralelos e reduzindo o stress nos respectivos transistores. A topologia básica deste conversor está ilustrada na Figura 9.

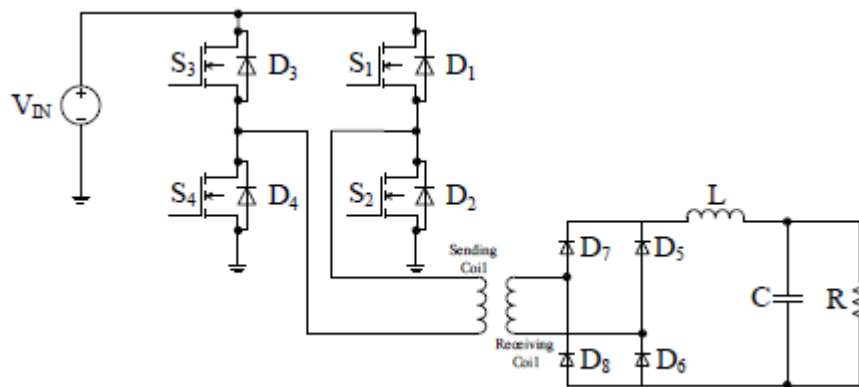


Figura 9 – Topologia básica de um conversor *Phase-shifted Full Bridge*.

(SULTANBECK et al., 2017)

2.1.2.2 CONVERSORES NO CIRCUITO SECUNDÁRIO

O conjunto de conversores utilizados no lado secundário do sistema irá depender muita das vezes da carga que será conectada à saída do sistema, uma vez que na bobina secundária será induzida uma tensão de natureza alternada. Quando a carga do sistema for em corrente alternada, ou sem muita importância, como o caso de aplicações voltadas ao aquecimento de um fluido, não é necessário o uso de conversores. Assim, a carga ficaria conectada diretamente à bobina receptora.

No caso de cargas em corrente contínua, como por exemplo baterias de veículos elétricos, torna-se necessário a utilização de um conversor retificador (CA-CC) para converter a energia em corrente alternada do receptor em corrente contínua. Esse retificador pode ser controlado (constituído de transistores controlados, normalmente MOSFETs e IGBTs) ou não controlado (chaves passivas, como por exemplo diodos), de acordo com o interesse da aplicação. Posteriormente, utiliza-se normalmente um conversor CC-CC (normalmente *buck* ou *buck-boost*) para regular a tensão e corrente que será utilizada para o carregamento da bateria, por exemplo. Essa configuração típica de um sistema IPT aplicada no carregamento de veículos elétricos está ilustrada na Figura 5. Entre o estágio retificador e o conversor CC-CC, pode ser utilizado ainda um componente para regulação do fator de potência do circuito, o qual contribuirá para

adequar a energia no sistema de forma satisfatória, uma vez que os conversores utilizados apresentam características não lineares.

2.1.2.3 CONTROLE

Diferentes metodologias e estratégias de controle são propostas para controlar a potência transferida do sistema. Os métodos são classificados de acordo com o local de ação do controle, ou seja, o controle primário ocorre quando o sistema de controle se encontra no circuito transmissor, através da variação de frequência do conversor primário, por exemplo. Já o método de controle secundário apresenta o circuito de controle no lado receptor do sistema. Existem também o controle em ambos lados do sistema, dependendo da necessidade da aplicação. Na maioria dos casos, o controle secundário não é utilizado para não aumentar o tamanho do dispositivo e o calor gerado no circuito receptor do sistema. Porém, no caso de aplicações que envolvem múltiplos receptores, como em carregamento de celulares, o controle normalmente se encontra no lado secundário (LI e MI, 2015).

Existem dois principais métodos de controle utilizados em sistemas IPT: por ajuste da frequência e pelo ajuste da tensão de entrada. O primeiro método baseia-se no controle dinâmico da impedância do sistema, através da inserção de uma capacitância variável no circuito (Figura 10), por meio do chaveamento de transistores controlados, podendo ser implementado no lado primário ou secundário. Assim, é possível sintonizar a frequência de operação do sistema com a frequência de ressonância do circuito e controlar a potência entregue à carga. Já o segundo método caracteriza-se por controlar a tensão de entrada do circuito primário para suprir as variações que podem ocorrer no circuito receptor, de acordo com o estado que a carga se encontra.

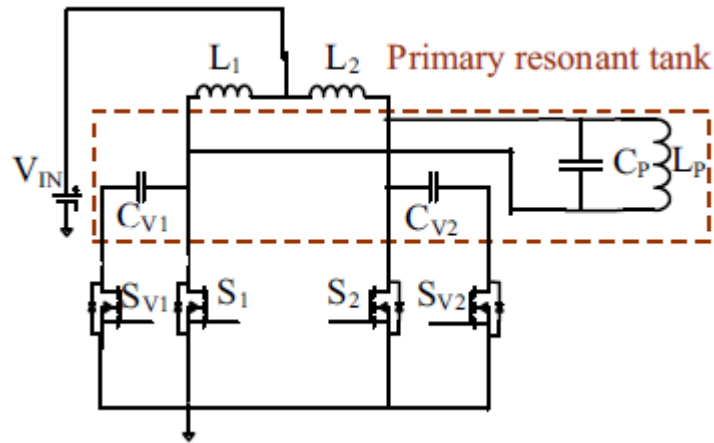


Figura 10 – Sistema de controle baseado na regulação da frequência no circuito primário.

(DISSANAYAKE et al., 2009)

Para que o sistema de controle utilizado funcione de maneira correta, respondendo de acordo com as variações do circuito secundário, é preciso um sistema de controle em malha fechada. Por isso, deve-se implementar um dispositivo de monitoramento da carga, para que seja possível enviar um feedback do sistema implementado na respectiva aplicação ao circuito de controle primário, fechando a malha de controle. Assim, há a comparação de um valor de referência com o sinal de estado da carga, para gerar os sinais de controles adequados para comandar o circuito de controle do sistema.

2.1.3 CARGA

A carga, na maioria das vezes, é representada em sistemas WPT como uma simples fonte de tensão conectada à bobina secundária do sistema. Em outros casos, o estágio formado pelos dois conversores (retificador e conversor CC-CC) mais a fonte, como mostrado na Figura 5, podem ser representados por uma ponte retificadora simples mais uma impedância (ou até mesmo uma simples resistência) conectada em série. Para fins de análise, essa simplificação pode ser satisfatória tendo em vista que quando o sistema opera em ressonância, a carga é vista como uma impedância conectada em série.

Porém, esse estágio apresenta uma complexidade um pouco maior de acordo com cada aplicação. Por exemplo, em sistemas de carregamento de baterias elétricas, a presença de conversores CC-CC se torna fundamental para um correto controle de seu estado de carregamento, como ilustrado na Figura 5.

2.1.4 COMPENSADORES

Devido à natureza indutiva do circuito, normalmente utilizam-se compensações capacitivas em ambos os estágios para compensar as reatâncias introduzidas no sistema e com isso, elevar a potência ativa entregue ao circuito. Segundo WANG, STIELAU e COVIC (2015), essa compensação pode ser feita em quatro topologias básicas como mostrada na Figura 11, em que a primeira letra S ou P representa a compensação série ou paralelo no lado primário, e a segunda letra S ou P refere-se à compensação série ou paralela no secundário, respectivamente. Na figura, foram desconsideradas as resistências séries dos enrolamentos e a resistência R no lado receptor representa a carga do sistema. A frequência de operação do circuito receptor é a mesma da frequência da corrente primária I_p de acordo com a já mencionada Lei de Faraday, embora seja possível desenvolver receptores com múltiplas frequências ressonantes. Porém na maioria dos casos de aplicações de IPT, esse tipo de receptor não foi discutido.

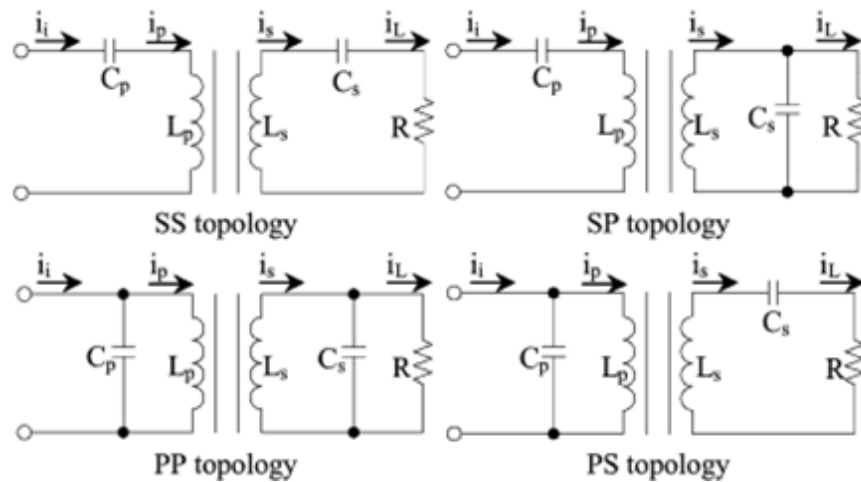


Figura 11 – Topologias básicas de compensação da reatância indutiva para o sistema de transferência indutiva de potência.

(WANG, STIELAU, COVIC, 2005)

Algumas características do sistema como a potência transferida do lado primário para o secundário, corrente que circula na bobina secundária, tensões nas bobinas podem ser determinadas pelas eq. 2,3,4 e 5, respectivamente.

$$P = (\text{Re}\{Z_r\})I_p^2 \quad (2)$$

$$I_s = \frac{j\omega MI_p}{Z_s} \quad (3)$$

$$V_p = j\omega L_p I_p - j\omega M I_s \quad (4)$$

$$V_s = j\omega M I_p - j\omega L_s I_s \quad (5)$$

Em que $\text{Re}\{Z_r\}$ representa a parte real da impedância refletida.

A equação (6) relaciona a frequência angular de ressonância natural, ω_0 , com os parâmetros de indutância própria do primário e secundário (ou emissor e receptor, nesta ordem), L_p e L_s , e as capacitâncias de compensação, C_p e C_s . Assim, é possível encontrar a capacitância do circuito secundário para compensar o sistema se f_0 e L_s for conhecido. Porém, realizando esse mesmo método para o cálculo de C_p , apenas a reatância indutiva do lado emissor seria compensada. Por isso, para uma completa compensação, utiliza-se a impedância própria do circuito refletida no lado primário, por meio de equação (7).

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} \quad (6)$$

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (7)$$

Segundo FERNANDES (2015), algumas considerações devem ser feitas a respeito de Z_r : se Z_s for um resistor puro, a impedância refletida também será; se for indutiva, a impedância Z_r terá características capacitivas, e vice-versa.

A impedância de carga vista pela fonte de alimentação primária do sistema, Z_t , pode ser determinada combinando os circuitos primário e secundário. Para uma compensação série primária, a impedância é dada pela equação (8); já para uma compensação paralela, também no lado primário, a impedância é modelada pela equação (9) (WANG, STIELAU, COVIC, 2005).

$$Z_t = \frac{1}{j\omega C_p} + j\omega L_p + Z_r \quad (8)$$

$$Z_t = \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + Z_r}} \quad (9)$$

Alguns outros parâmetros do circuito básico de transferência indutiva podem ser vistos nas tabelas a seguir, de acordo com o tipo de compensação proposta. A Tabela 1 relaciona a impedância e os níveis de tensão e corrente no circuito secundário do sistema. Já a Tabela 2 representa os valores de impedância do lado secundário refletidas no lado primário do sistema, além do fator de qualidade, Q_s , o qual refere-se à razão entre potência reativa e potência ativa de acordo com WANG, STIELAU, COVIC (2005).

Tabela 1 – Modelagem do circuito secundário de um sistema IPT de acordo com o tipo de compensação utilizada.

(WANG et al., 2005)

Parâmetros do Circuito	Tipo de Compensação	
	Série	Paralelo
Impedância Secundária Z_s	$j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R$	$j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R}}$
Tensão na carga V_L	$I_s R$	V_s
Corrente na carga I_L	I_s	$\frac{V_s}{R}$

Tabela 2 – Parâmetros do circuito secundário refletidos no lado primário do sistema e fator de qualidade, de acordo com o tipo de compensação utilizada.

(WANG et al., 2005)

Parâmetros do Circuito	Tipo de Compensação	
	Série	Paralelo
Resistência refletida	$\frac{(\omega_0^2 M^2)}{R}$	$\frac{M^2 R}{L_s^2}$
Reatância refletida	0	$-\frac{\omega_0 M^2}{L_s}$
Fator de Qualidade no secundário Q_s	$\frac{\omega_0 L_s}{R}$	$\frac{R}{\omega_0 L_s}$

É importante ressaltar que também são encontradas aplicações nas quais o projeto da compensação tenha como objetivo maximizar algum parâmetro no sistema, como, por exemplo, rendimento do transformador e tensão eficaz de saída (LOPES, 2013).

APLICAÇÕES

A tecnologia IPT é uma das mais desenvolvidas até hoje quando comparadas com os outros sistemas *wireless*. Suas aplicações vão desde pequenas cargas, como o caso de dispositivos biomédicos, como marca-passos, com potências requeridas de no máximo algumas dezenas de Watts, até aplicações em veículos elétricos, com grandes quantidades de transferências de potência, o qual vem sendo o grande foco de estudos e desenvolvimentos científicos atualmente. Outra área de aplicação, que já está sendo desenvolvida e produzida comercialmente por diversas marcas líderes de mercado, é a de carregamento de dispositivos eletroeletrônicos como notebooks e celulares. A seguir serão discutidos os principais aspectos relacionados a cada aplicação, apresentando o estado da arte e as diversas características de operação e controle desenvolvidos na literatura.

3.1 DISPOSITIVOS ELETROELETRÔNICOS PORTÁTEIS

Os aparelhos portáteis se tornaram extremamente populares para a comunicação pessoal e diferentes propósitos computacionais nos últimos anos, principalmente com o desenvolvimento de smartphones e computadores pessoais. Esses dispositivos necessitam de uma recarga diária devido ao constante consumo de energia para sua operação. A tecnologia de carregamento sem fio (*“contactless charging”*) vem se tornando uma área de interesse das principais indústrias do setor, uma vez que traz uma grande vantagem em relação à forma tradicional de carregamento, que é a possibilidade de carregamento simultâneo de múltiplos dispositivos utilizando o mesmo sistema de “fonte” de carregamento (Figura 12). Além disso, há a possibilidade de instalar os sistemas de carregamento em mesas e bancadas de diversos tipos de locais e ambientes (restaurantes, shoppings, etc), facilitando o acesso ao público, fornecendo uma simplicidade de uso por não utilizar nenhum acessório para recarga e nenhuma

incompatibilidade de marcas de dispositivos como carregadores, cabos e/ou conectores (CHEN e LIANG, 2013). Outro tipo de dispositivo eletroeletrônico que apresenta desenvolvimentos em tecnologia IPT para seu carregamento são as escovas de dente elétricas (STRATMANN e TRAWINSKI, 2002)

No ano de 2009, algumas companhias e indústrias formaram o consórcio intitulado como “*Wireless Power Consortium*” (WPC) e anunciaram uma especificação para a transferência elétrica de potência através do carregamento indutivo. Intitulada como “*Qi inductive charging*” (o nome Qi tem origem chinesa e significa “fluxo de energia”), representa um padrão universal de carregamento sem fio de baterias de dispositivos eletroeletrônicos como celulares, *iPods*, *MP3 players* e câmeras. (QInside, 2017), caracterizado por uma transferência de 5 W de potência, a uma distância de até 4 cm entre o sistema emissor e o receptor, que no caso é o próprio dispositivo eletroeletrônico. (CHEN e LIANG, 2013). Outras versões de Qi estão sendo desenvolvidas, para proporcionar um aumento de potência e com isso, diminuição do tempo de carregamento dos dispositivos.



Figura 12 – Produto para a recarga de até 5 dispositivos simultaneamente.

(LIU, 2015)

De acordo com LIU (2015) existem duas configurações básicas do padrão de recarga Qi. A forma mais básica, formada por apenas uma bobina transmissora (Figura 13), representa o tipo mais simples, barato e com boa eficiência de transferência de potência. Porém, a grande desvantagem é a necessidade de o usuário posicionar o dispositivo a ser carregado exatamente na posição especificada, para obter eficiência no processo de carregamento. Os dispositivos eletroeletrônicos podem apresentar diferentes posicionamentos das bobinas receptoras de acordo com cada design de fabricação, o que pode gerar um certo problema para posicioná-los no “*pad*” (superfície do dispositivo de carregamento). Existem então algumas técnicas como a utilização de ímãs próximo ao circuito receptor para tentar solucionar esse problema de desalinhamento, como ilustrado na Figura 14. Contudo, foi desenvolvida uma configuração mais complexa para contornar essa dificuldade, utilizando para isso múltiplos transmissores. Com isso, a topologia oferece uma certa liberdade de posicionamento espacial, tanto no eixo X quanto no Y, para que o dispositivo possa ser carregado devidamente, tornando mais prático e conveniente o uso do sistema do ponto de vista do usuário. A Figura 15 ilustra um sistema Qi com múltiplas bobinas, em que os círculos marcados em cada aparelho representam a bobina receptora implantada no dispositivo eletroeletrônico.

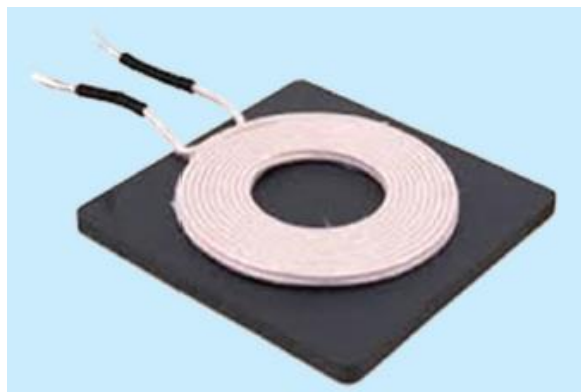


Figura 13 – Transmissor Qi formado por apenas 1 bobina.

LIU (2015)



Figura 14 – Exemplo de produto para carregamento de dispositivos utilizando transmissor de 1 bobina e ímãs para auxílio de posicionamento.

LIU (2015)

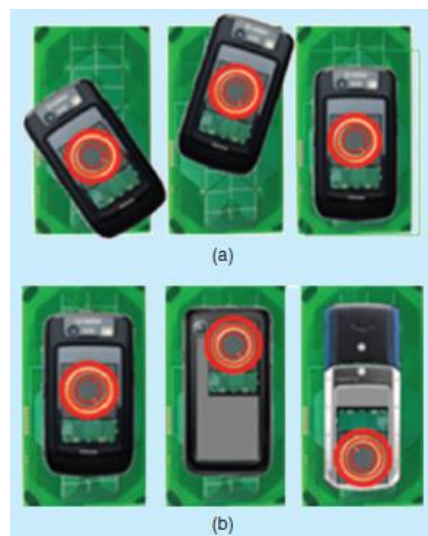


Figura 15 – Sistema transmissor com múltiplas bobinas para a) conveniência de posicionamento para o usuário e b) liberdade de design do próprio dispositivo.

LIU (2015)

JANG e JOVANOVIĆ (2003) descrevem um sistema bidirecional de transferência de potência adequado para aplicações em dispositivos eletroeletrônicos. O sistema consiste em um inversor ressonante operando em alta frequência no circuito primário e um retificador controlado no lado secundário, para regular o fluxo de potência no transformador de núcleo separado. Segundo os autores, com a capacidade de fluxo bidirecional torna-se possível que a energia armazenada na indutância de dispersão seja transferida tanto para a entrada quanto para a saída do sistema, de acordo com a exigência da carga conectada ao receptor. A regulação da potência transferida é feita por dois tipos de controle: a modulação local de frequência variável

(do inglês, “*local variable-frequency* – VF) utilizada no lado primário para manter constante a potência transferida para uma variação no circuito de entrada, variando a frequência de operação do inversor de acordo com a tensão de entrada; e modulação por largura de pulso (*Pulsewidth Modulation* – PWM) para controlar o conversor retificador e assim regular a potência de saída de acordo com as variações de carga. Os resultados experimentais mostraram que a frequência de operação do circuito experimental variou de 65 a 140 kHz. A eficiência medida, excluindo as perdas no retificador, foram de 60 a 70% em condição de carga total, para diferentes valores de tensão de entrada.

KIM et al. (2001) desenvolveram um sistema para carregamento sem contato de uma bateria de íon Lítio, com potência igual a 3.3 W, para um aparelho celular. A distância de entreferro entre a bobina primária (fonte de carregamento) e a bobina secundária (celular) é de 3 mm, caracterizada apenas pela espessura das duas “capas” que envolvem cada parte do sistema. Através de uma comparação entre dois tipos de núcleos de bobinas (UU e EE) em relação ao coeficiente de acoplamento, os autores chegam a conclusão de que o tipo UU é mais eficiente ($k = 0.57$), para um mesmo tamanho de núcleo. Foi utilizado uma compensação primária série para compensar o circuito, além de um conversor ressonante no lado primário. Resultados mostram que para uma variação da tensão de entrada do sistema, a eficiência varia entre 72 e 75% (desconsiderando as perdas no circuito de controle). Além disso, os autores verificaram a performance do conversor para uma variação do entreferro de 20% do seu valor nominal (3 mm), em que o coeficiente de acoplamento cai cerca de 10%, fazendo com que a eficiência reduza para 65%. O artigo descreve também algumas características do controle de carregamento da bateria, o que não será discutido neste trabalho.

ASTRID et al. (2014) propuseram um sistema de carregamento de baterias de celulares utilizando uma metodologia específica para o desenvolvimento da bobina, para alcançar um alto fator de qualidade Q. Basicamente, os autores propõem a construção de uma bobina ressonante que consiste em finas camada condutoras (condutor de cobre

em formato C) separadas por finas camadas dielétricas sobrepostas de acordo com a Figura 16. A bobina construída foi analisada e constataram um valor de Q igual a 1300. Os resultados experimentais mostram que a máxima eficiência medida do sistema foi de 73% quando as bobinas estão posicionadas em contato, sem nenhum distanciamento. A máxima distância em que há transferência de potência ocorre em 12 cm, porém com uma queda drástica da eficiência do sistema, que se aproxima de 2%. Quando a distância está entre 0 a 2 cm, a eficiência do sistema reduz a 53%. Por isso, os autores recomendam um distanciamento de entreferro de no máximo 6 cm (eficiência de $\pm 25\%$) para este sistema.

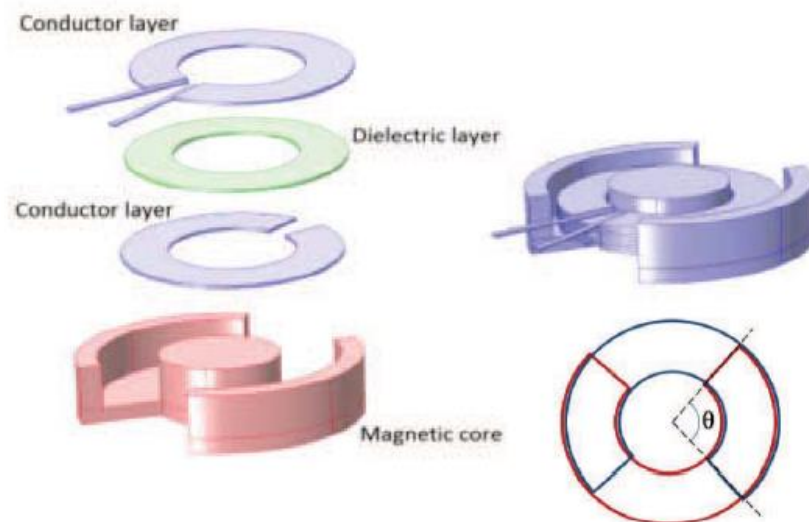


Figura 16 – Construção da bobina segundo ASTRID et al. (2014)

CHEN e LIANG (2013) analisaram um sistema para carregamento de celulares construído em laboratório. Este sistema é caracterizado por permitir a transferência de energia para uma distância de gap de até 3 cm entre as bobinas, as quais foram construídas com 20 voltas de fio condutor na bobina primária e 15 voltas para a bobina secundária. Os resultados mostraram que o sistema apresenta uma eficiência de até 45%, com a capacidade de fornecimento de até 150 mA de corrente para o carregamento da bateria. Os autores destacam que a eficiência pode ser elevada adicionando um sistema de controle no lado secundário, como por exemplo um conversor CC-CC.

Mais informações sobre desenvolvimentos científicos da tecnologia IPT aplicada a dispositivos eletroeletrônicos podem ser encontrados nos trabalhos de HUI e HO (2005), WAFFENSCHMIDT e STARING (2009), LIU (2015).

3.2 DISPOSITIVOS BIOMÉDICOS

Dispositivos biomédicos implantáveis ganharam ao longo dos anos uma grande variedade de aplicações nas áreas da medicina, como é o caso de marca-passos, simuladores elétricos funcionais, dispositivos de assistência ventricular, corações artificiais, próteses implantadas na retina e diversos dispositivos de monitoramento interno. Tradicionalmente, são utilizadas baterias implantadas nos próprios dispositivos ou até métodos de carregamento transcutâneo, utilizando uma fonte externa, para suprir a energia necessária para o funcionamento desses equipamentos. Porém, algumas desvantagens estão associadas a esse tipo de fornecimento de energia, como a queda da vida útil do implante devido ao limite de armazenamento de energia das baterias e/ou riscos de infecções causados pelo método de carregamento por meio de conexões elétricas diretas através da pele do paciente. Os sistemas sem fio de transmissão de energia se tornaram, então, um grande desenvolvimento para esses sistemas, pois além da possibilidade de fornecimento de energia através de distanciamentos aceitáveis, os dispositivos implantados podem ser muito menores e mais leves, especialmente quando quantidades maiores de potência de saída são demandadas pela carga (SI, HU, HSU et al., 2007).

De acordo com JOUNG e CHO (1998), a distância típica entre os enrolamentos das bobinas do sistema é aproximadamente igual à espessura da pele do paciente, normalmente de 1 a 2 cm. Vale ressaltar que esse espaçamento não pode ser assumido constante, pois tanto o alinhamento quanto o próprio espaçamento entre as bobinas irão variar durante a operação do sistema. Isso se torna um grande impasse envolvendo esse tipo de tecnologia, além das mudanças de carga durante a operação do dispositivo. Por isso, a regulação do fluxo de potência se torna fundamental em aplicações práticas.

Segundo WANG, LIU, SIVAPRAKASAM et al. (2005), se não houver esse controle de fluxo de energia, a potência necessária não será transmitida ao implante para suprir as variações de acoplamento e carga, implicando em duas consequências diretas: diminuição dos níveis de tensão/corrente no implante devido a uma transferência insuficiente de potência, causando uma operação inapropriada do dispositivo, ou até um desligamento momentâneo (“shutdown”); e o aumento de temperatura devido a um possível excesso de potência transmitida, causando problemas no tecido humano com o passar do tempo. Além disso, os tecidos e órgãos do corpo humano estariam expostos, desnecessariamente, a fortes campos eletromagnéticos, colocando em risco a saúde do paciente.

No caso dos dispositivos biomédicos, são utilizadas técnicas de controle principalmente no lado primário do sistema, pois a regulação secundária implica no aumento de peso e tamanho do dispositivo a ser implantado, além do possível aumento de geração de calor no interior do corpo, podendo causar danos aos tecidos e órgãos nas proximidades do sistema. De acordo com SI, HU, MALPAS et al. (2008), a regulação de potência através do controle de magnitude da tensão do lado primário é a mais popular, porém deve-se garantir que o sistema irá operar na condição de sintonização completa (do inglês, “*full tuning*”), ou muito próximo, para que esse método seja eficiente. Ou seja, a frequência de operação do lado primário deve casar com a frequência de ressonância do lado secundário. Contudo, na prática ocorrem diversas variações de carga, acoplamento, entre outros parâmetros do circuito, que fazem com que essas frequências fiquem incompatíveis e necessite de uma alta magnitude de tensão para que esse tipo de controle responda corretamente. É possível realizar então um outro tipo de controle, o chamado método de controle de frequência, para controlar de maneira dinâmica a frequência de operação do sistema e ajustá-la de acordo com a frequência de ressonância do circuito receptor, através do chaveamento de capacitores no circuito primário. Um sistema típico de controle de frequência aplicado a dispositivos biomédicos pode ser visto na Figura 17.

Para que o sistema de controle utilizado funcione de maneira correta, respondendo de acordo com as variações do circuito secundário, é preciso um sistema de controle em malha fechada, como mencionado na seção de controle do capítulo 2. Como pode ser visto na Figura 17, no circuito “*Biomedical Circuitry*”, há a comparação de um valor de referência com o sinal de estado da carga, para gerar os sinais de controles adequados para comandar o controle de capacitância no caso exemplificado. Neste caso, o feedback é realizado a partir das medições na carga do sistema e a transmissão de dados da carga até o circuito primário é feita sem fios. Essa característica não se restringe somente a essa aplicação, mas ocorre também em todas as outras aplicações mencionadas neste documento.

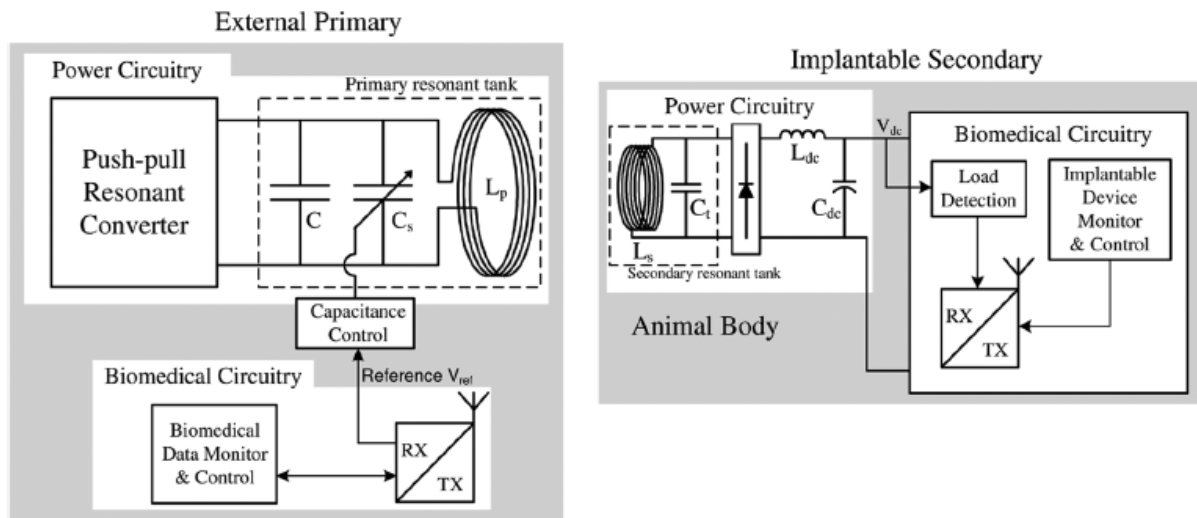


Figura 17 – Configuração de um sistema típico de transferência indutiva para aplicações biomédicas.

(SI, HU, MALPAS et al., 2008)

SI et al. (2008) propuseram um método de controle do fluxo de potência através do chaveamento de capacitores para variar a capacitância efetiva vista pelo conversor de potência primário. O conversor utilizado foi o conversor ressonante “*Push-pull*” alimentado por corrente (Seção 2.1.2.1, pág. 33), operando em condição de ZVS. Os autores utilizaram o software PSpice para analisar e validar o método de controle de frequência proposto. Foi construído um circuito capaz de suprir 12 W de potência, com uma distância de entreferro de até 4.5 cm. Os resultados experimentais mostraram que

a condição de total sintonização ocorre para uma frequência de 78.5 kHz, a qual se difere da condição simulada em 3.5 kHz. Além disso, para uma operação em sobrecarga, fornecendo 15 W de potência, o sistema obteve uma eficiência de até 80% para distanciamentos de entreferro de 10 mm. A geração de calor no lado secundário foi monitorada e foi observado que não superou o valor limite de 2 °C.

DISSANAYAKE et al. (2009) implementaram um sistema para transferirem uma potência de 5 W a 25 W utilizando o mesmo método de controle e conversor alimentado por corrente do trabalho descrito anteriormente. O dispositivo foi implantado em uma ovelha para a realização dos testes e experimentos. O sistema de controle foi ajustado para controlar a transferência de potência em 10 W, para distanciamentos típicos de *gap* de 10 mm a 20 mm. Os resultados mostraram que o controle é eficaz, sendo que a frequência de operação variou de 163 kHz para a condição de nenhuma sintonização (acoplamento “ótimo” do sistema, no caso 10 mm) a 173 kHz para a condição de sintonização completa (acoplamento fraco, 20 mm ou mais) do circuito. Os pesquisadores implantaram junto ao circuito secundário três termistores para controle de temperatura do dispositivo implantado, e observaram uma temperatura máxima de 38.1 °C num período de operação de 24 horas do sistema, sendo que o máximo aumento de temperatura no interior do corpo da ovelha foi de 3.8 °C (termostato logo abaixo da pele). Os outros termostatos, posicionados a 1 cm e 2 cm do circuito secundário, sofreram aumentos não superiores a 2 °C.

SI et al. (2007) analisam um sistema com um controle de transmissão de potência através do controle de magnitude da tensão de alimentação do conversor primário (conversor, alimentado por corrente cc, do tipo “*Push-Pull*”). Através do monitoramento da tensão da bobina secundária, a regulação de tensão em malha fechada ajusta automaticamente a tensão de alimentação primária de 10 a 35 V, através de um conversor cc-cc (por exemplo, um conversor *buck-boost*). Assim, a corrente que circula no circuito irá aumentar de acordo com o estado da carga e, conseqüentemente, a densidade de fluxo de potência irá se adequar ao valor requerido. Os resultados

analíticos mostraram que a capacidade máxima de transferência de potência é, aproximadamente, proporcional à voltagem de entrada do conversor primário se o coeficiente de acoplamento do sistema for menor que 0,1.

WANG et al. (2005) apresentaram um sistema de transmissão indutiva de potência para alimentar um dispositivo de prótese de retina, o qual necessita de, aproximadamente, 7 V para estimular as células da retina. O sistema é caracterizado por transmitir um máximo de 250 mW de potência, com um espaçamento entre as bobinas de 0,7 a 1,5 cm, que corresponde a um coeficiente de acoplamento entre 0,08 e 0,17. Para realizar a compensação de variações de carga ou acoplamento, foi implementado um sistema de controle primário por meio de um amplificador “*Class-E*” (escolhido para controlar o transmissor devido à alta eficiência desse dispositivo), em que utiliza o mesmo par de bobinas para transmitir as informações de potência na carga para o sistema de controle externo. Este artigo descreve detalhadamente o sistema de comunicação entre os dois circuitos, abordando temas de modulação de dados, interferência de sinais e do sistema de controle. Os resultados experimentais foram mostrados para 4 diferentes possibilidades de cargas e distanciamentos de *gap*, sendo que para o distanciamento mínimo de 7 mm, foi obtido uma eficiência de 25,6 % com o sistema operando sem controle e 65,8 % com o controle proposto.

Outras informações a respeito do desenvolvimento da tecnologia IPT na área biomédica podem ser encontradas nos trabalhos de LI e BASHIRULLAH (2007), NG et al. (2011) e ZHAO et al. (2012).

3.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS

A área de veículos elétricos pode ser dividida basicamente em dois grupos de veículos: os tripulados e os não tripulados. No caso de veículos não tripulados, se enquadram todos os veículos que não são comandados e tripulados por seres humanos, como, por exemplo, em veículos autônomos subaquáticos (*Autonomous Underwater Vehicles – AUV*) (LOPES, 2013). Já os veículos ditos como tripulados, são todos

aqueles que são comandados por alguma pessoa em seu interior. Representam então todas as formas de automóveis desenvolvidos para auxiliar no deslocamento de pessoas e/ou objetos, como ônibus, trens, carros e veículos transportadores elétricos em indústrias, por exemplo. Esse tipo de veículo elétrico será destaque nesta seção, devido ao maior número de trabalhos científicos encontrados do tema.

3.3.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS NÃO-TRIPULADOS

Como mencionado no início da seção, os veículos elétricos não tripulados caracterizam-se por um comportamento autônomo, não necessitando de ações humanas em seu interior para uma operação adequada. Atualmente, diversos tipos de veículos não tripulados, como por exemplo veículos aéreos (do inglês, *Unmanned Aerial Vehicles* – UAV), veículos autônomos subaquáticos (AUV), entre outros veículos militares de alta inteligência, são empregados em muitas aplicações. O carregamento desse tipo de veículos, em sua forma tradicional, apresenta diversos empecilhos. Por exemplo no caso de AUV's, utilizados para pesquisas oceânicas, é necessário que o veículo interrompa sua operação para voltar à base para realizar o seu carregamento, o que causa perda de tempo em missões, eleva custos operacionais, além de ser um procedimento trabalhoso (LOPES, 2013). Mediante a essas questões, a transferência de energia através do acoplamento indutivo é considerada uma grande alternativa para evitar todo esse trabalho tradicional de carregamento, e uma forma de tornar o procedimento muito mais prático, podendo ser realizado de forma submersa.

YAN et al. (2016) propuseram analisar através de simulações e experimentos em laboratório um sistema de carregamento de bateria para um veículo autônomo marinho. No trabalho, são apresentados em detalhes a modelagem e o equacionamento do sistema para a análise teórica. Os resultados experimentais obtidos estão de acordo com os resultados de simulação e cálculo, e mostraram que a máxima eficiência do sistema foi de 82% operando em uma frequência próxima de 100 kHz, com um *gap* igual a 5 mm.

Outros detalhamentos mais aprofundados na área de veículos autônomos não-tripulados podem ser encontrados nos trabalhos de HOBSON et al. (2007), (LOPES (2013), MANIKANDAN et al. (2015).

3.3.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS TRIPULADOS

Para CARMELI, CASTELLI-DEZZA, MAURI et al. (2015) o crescimento do número de veículos elétricos (VE) no mundo atual evidencia a necessidade de um meio efetivo e seguro para o carregamento de suas baterias. Para esses autores, o uso de sistemas sem fios evita temores por parte dos usuários diante de manobras e manuseio de cabos para conexões elétricas, assim como possíveis problemas por falta de isolamento e choques. Além disso, simplifica a fase de carregamento por eliminar a conexão de cabos e impede futuros problemas como seu rompimento.

Outro ponto apresentado é que a evolução dos componentes do sistema e a redução de custos são fundamentais para que haja uma maior inserção desse tipo de veículo no mercado. Assim, o carregamento desses veículos se tornaria tão simples quanto a recarga de combustível atualmente em uso nos sistemas de transporte. Contudo, os VE's passariam a ser utilizados em todos os propósitos em que os veículos de combustão interna são empregados, desde que haja um carregamento rápido, eficiente e automático, a qualquer hora do dia (DAGA, MILLER, LONG et al., 2017).

De acordo com DAGA et al. (2017), a expectativa de analistas do setor industrial para a introdução de sistemas WPT para veículos elétricos leves (do inglês, *light vehicles* – LD) é de poucos anos, de 2018 até 2021. Segundo os autores, o carregamento sem fios representa uma oportunidade para que os VE's tenham mais experiências de recargas durante o dia (cerca de quatro a cinco vezes), em diferentes locais, principalmente aqueles que não são residenciais e que o veículo fica estacionado por um período pequeno de tempo (menor que 2 horas), como em shoppings e restaurantes. Porém, existem alguns obstáculos para a inserção dessa tecnologia no mercado como o aumento da infraestrutura de energia elétrica nas cidades, além de melhorias da própria tecnologia,

em questões de eficiência, interoperabilidade, segurança, tolerâncias de desalinhamento e espaçamentos de entreferro, comunicação de dados, entre outros.

O diagrama de blocos de um sistema IPT para o carregamento de veículos elétricos pode ser visto na Figura 18, que é exatamente igual ao sistema base mostrado na Seção 2.1, pág. 28. Como pode ser visto, o circuito receptor se encontra instalado no interior do chassi do veículo, no qual pode apresentar um circuito de compensação também do lado secundário do sistema.

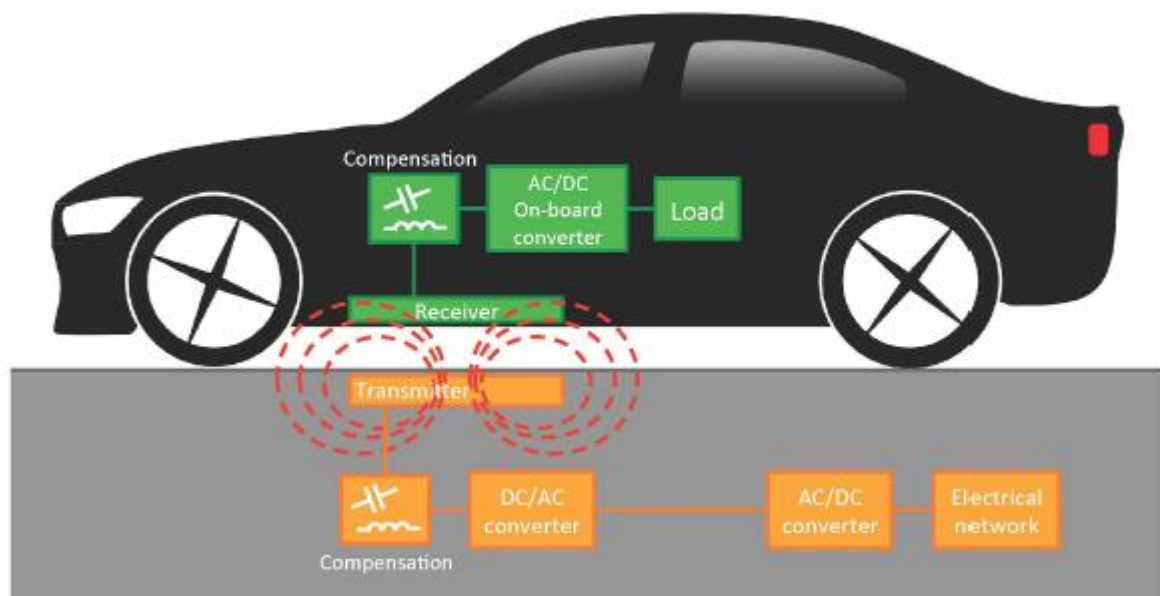


Figura 18 - Diagrama de blocos de um sistema geral para carregamento de veículos elétricos através da tecnologia IPT.

(CIRIMELE, FRESCHI e MITOLO, 2016)

A tecnologia IPT aplicada a veículos elétricos pode ser dividida em duas vertentes segundo a literatura. Na forma estática, necessita-se que o veículo pare sobre o circuito transmissor para que ocorra a transferência de potência. Essa forma é considerada como substituto direto para os sistemas tradicionais de transmissão de energia por condutores físicos. Porém, a ausência de restrições mecânicas do sistema sem fio abre a possibilidade de transferência de potência para o veículo quando este

estiver em movimento, como mencionado na introdução deste trabalho. Define-se então o tipo dinâmico de transferência indutiva, que pode por exemplo ser instalado na infraestrutura de rodovias, o que eliminaria a necessidade de parada do veículo para seu carregamento. Conseqüentemente, é possível reduzir o dimensionamento da bateria instalada no VE, diminuindo sua capacidade de armazenamento de energia, o que impacta diretamente no custo final do produto. A implementação desse tipo de tecnologia é tida como uma forma de aumentar a aceitação desses veículos no mercado mundial, uma vez que soluciona o problema relacionado à autonomia das baterias elétricas. Uma terceira forma de aproveitamento é a combinação entre a tecnologia estática e dinâmica, chamada de “estacionária” ou “em rota estática” (do inglês, *stationary* ou *en-route static IPT*). Nesse caso, o carregamento da bateria ocorre durante a parada do veículo em sua rotina normal, em pontos oportunos para carregamento como por exemplo em sinais de trânsito, pontos de ônibus ou outros pontos de paradas convencionais, no caso de transportes públicos elétricos (CIRIMELE, FRESCHI e MITOLO, 2016). Com esse aproveitamento, os operadores de transportes públicos podem reduzir o número de veículos de suas frotas e os custos operacionais relacionados, uma vez que o tempo de permanência do veículo para carregamento em um depósito seria reduzido (BOSSHARD e KOLAR, 2016 a).

Outra vantagem da ausência de contatos elétricos e de instalações externas é que o processo de recarga pode iniciar automaticamente sem que haja a necessidade de uma interação humana, sendo necessário apenas o alinhamento entre o circuito receptor, implantado no veículo, com o circuito emissor. Isso aumenta a segurança das operações como já mencionado, diminuindo os problemas devido à corrosão de contatos e acumulação de poeiras e sujeiras, reduzindo assim custos de manutenção e proporcionando um sistema mais robusto e com uma vida útil maior. Além disso, é prevista uma possível redução do número de vandalismos em relação a sistemas de carregamento do tipo *plug-in* (CIRIMELE, FRESCHI e MITOLO, 2016).

Uma questão importante e que deve ser desenvolvida é a autonomia de VE devido ao sistema de armazenamento de energia por baterias, que ainda é considerada baixa. Para CIRIMELE, FRESCHI e MITOLO (2016) as tecnologias WPT representam um meio efetivo de reduzir os problemas de gestão e custo das baterias instaladas nesses veículos, reduzindo assim a principal barreira da difusão da chamada mobilidade elétrica. Além disso, com uma recarga frequente é possível reduzir a profundidade de descarga da bateria, o que eleva sua vida útil (MAGNOR, GERSCHLER, ECKER et al., 2009).

Para analisar essa questão, DAGA, MILLER, LONG et al. (2017) ilustra o seguinte exemplo prático considerando o impacto de um sistema IPT “*en-route*” em uma típica área metropolitana de transição de ônibus elétricos: um ônibus elétrico com um banco de baterias de 350 kWh operando no verão, com ar condicionado, consumo específico de 2.25 kWh/milhas (cerca de 1.3981 kWh/km) e em uma rota de 139 milhas (aproximadamente 223.7 km), não consegue tipicamente realizar diversas rotas diárias com energia de reserva suficiente para sua segurança. Esse problema acaba piorando com o passar do tempo, devido ao desgaste excessivo da bateria por causa da chamada descarga profunda diária. No entanto, uma possível solução seria manter o estado de carga da bateria, *state-of-charge* (SOC), em um nível médio como forma de preservar a vida útil da bateria. A oportunidade de carregamento ao longo da rota do veículo faz com que seja adicionada energia de forma intermitente ao longo do dia, prevenindo esse ciclo profundo de descarga. Sem o sistema WPT, após cerca de 14 paradas em pontos durante o percurso, a bateria do ônibus se apresenta em um estado próximo do crítico (312.75 kWh consumido, resultando SOC em 11%), sendo obrigatório a sua parada para recarga. Incorporando o sistema de recarga sem fio em pontos de parada, com capacidade de aproximadamente 3.3 kWh/min de recarga, a capacidade operacional do ônibus pode ser significativamente elevada. Por exemplo, em uma típica parada de 5 minutos, é possível recuperar, aproximadamente, 16.5 kWh, sendo que no fim dessa rota o sistema de bateria estaria em seu nível médio (312.75 kWh consumido, 231 kWh carregado, SOC em 76%). Esse cenário pode ser visto na Figura 19, em que a curva

inferior (azul) representa o sistema sem a possibilidade de carregamento em rota, e a curva superior (vermelha) representa o estado da bateria quando submetida a carregamentos periódicos ao longo da rota diária. Fica evidente, então, que o sistema WPT traz uma grande vantagem para o setor de transporte, uma vez que garante um aumento da vida útil do sistema de armazenamento e, conseqüentemente, uma diminuição nos custos operacionais devido a postergação da troca de suas baterias, que ocorre aproximadamente de seis a dez anos nos dias atuais, de acordo com o tipo e tamanho do veículo.

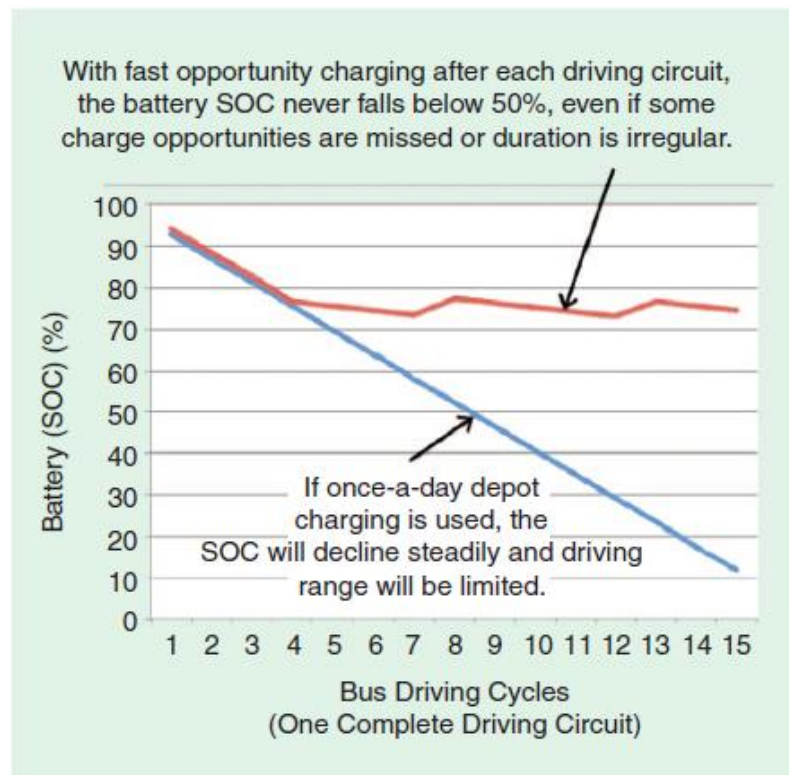


Figura 19 – Ônibus elétrico para transporte público com e sem a oportunidade de recargas por sistemas WPT.

(DAGA, MILLER, LONG et al., 2017)

Contudo, ainda existe a dúvida de qual método de carregamento do veículo elétrico é mais eficiente. No trabalho de BOSSHARD e KOLAR (2016, a) é feita uma comparação entre a tecnologia tradicional de carregamento e a tecnologia IPT. Segundo os autores, a comparação feita estabelece que a eficiência dos carregamentos sem fios para VE sofre normalmente uma redução de aproximadamente 5 % comparada com a

forma tradicional. A principal razão apontada no artigo é a imposição de um limite de volume para a construção da bobina receptora implantada no veículo, por razões de aumento de peso e volume do veículo. De tal modo, receptores menores levam a um menor acoplamento magnético do TNS, mesmo que uma bobina transmissora de tamanho elevado seja usada no sistema e, por isso, uma eficiência de transmissão ligeiramente menor deve ser aceita para o carregamento sem fios.

No que diz respeito aos veículos elétricos, uma das grandes preocupações está relacionada com a padronização do sistema de carregamento. Neste sentido, BOSSHARD e KOLAR (2016, a) discutem em seu trabalho a importância de padronizar o sistema para que seja possível tanto o carregamento tradicional quanto o carregamento sem contato para todos os veículos, propiciando a interação de diferentes tipos de produtos e marcas. No caso dos sistemas IPT, um requisito chave para uma operação contínua é o estabelecimento de uma frequência de transmissão padrão, que possivelmente será definida no valor de 85 kHz na próxima norma SAE J2954. Adicionalmente, devido ao nível de potência requerido por esse tipo de aplicação, campos eletromagnéticos com altas frequências são necessários para a transmissão de potência. Como o processo de carga será feito muitas das vezes em locais com acesso livre ao público, esses campos devem respeitar os limites de segurança estabelecidos nas normas para que as pessoas não estejam expostas e possam sofrer danos à saúde.

Outra preocupação dos pesquisadores é permitir o processo de carregamento de forma automática, sem a necessidade de uma alta interação humana. Assim, SULTANBECK et al. (2017) analisam um sistema IPT inteligente (*Semi-smart Wireless Charging Station* – SSWCS) para este propósito. O objetivo principal é desenvolver um dispositivo capaz de alinhar automaticamente o sistema receptor implantado no veículo com o circuito transmissor construído na superfície do solo, acabando assim com a necessidade de o condutor alinhar quase que perfeitamente o VE no local adequado (o que, segundo os autores, existe 95 % de chances de ocorrer um erro humano). Para o desenvolvimento do sistema, foi utilizado um conversor em

ponte completa com mudança de fase (do inglês, *Phase-shifted Full Bridge Converter*) composto por transistores do tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), além de compensações capacitivas para obter uma frequência de ressonância no circuito igual a 72.5 kHz. Simulações mostraram que o sistema é capaz de transferir uma potência de até 3.5 kW na frequência de ressonância. O trabalho descreve o sistema de carregamento inteligente, especificando algumas técnicas disponíveis de localização, assim como os principais critérios utilizados em um projeto nessa área.

Mais informações sobre o desenvolvimento de sistemas para carregamento sem fio de veículos elétricos tripulados podem ser encontradas nas publicações de MISKIEWICZ et al. (2011), LI e MI (2015), DIEKHANS e DONCKER (2015), CHINTHAVALI et al. (2015), BOSSHARD e KOLAR (2016, b).

3.4 FAIXAS DE OPERAÇÃO

As aplicações em sistemas de transferência indutiva de potência podem ser classificadas de acordo com as regiões de operação, na qual existem quatro principais pontos a serem discutidos: potência demandada pela carga; frequência de operação do sistema; distanciamento entre as bobinas do sistema; e a eficiência do processo de transferência de energia.

No caso das aplicações de veículos elétricos tripulados, os desenvolvimentos científicos têm se concentrado em desenvolver projetos na frequência de 85 kHz que será estabelecida pela padronização mundial feita pela SAE (*Society of Automotive Engineers*). Porém, é possível encontrar em alguns trabalhos variações dessa frequência de operação, muita das vezes de acordo com o porte do veículo a ser carregado. Já no caso das outras aplicações, percebe-se que quanto menor a potência requerida pela carga, maior se torna a frequência de operação do sistema. Por exemplo, no caso de dispositivos biomédicos, que apresentam a menor potência de carga, as frequências podem chegar na casa dos Mega Hertz. Contudo, a frequência típica em que sistemas IPT operam está na faixa de 10 kHz a 200 kHz.

Em relação ao distanciamento da bobina transmissora para a bobina receptora, nota-se nos trabalhos que o aumento do espaçamento diminui consideravelmente a eficiência do processo. Com isso, essa distância não ultrapassa o valor de 1 metro para aplicações factíveis, sendo na maioria das vezes muito menores que esse valor. Em dispositivos biomédicos, como já mencionados, esse entreferro corresponde basicamente à espessura da pele do paciente, caracterizando por cerca de até 2 cm. No caso de dispositivos eletroeletrônicos, os circuitos receptor e transmissor são utilizados de maneira muito próxima, tornando essa distância igual a poucos milímetros. Porém, a transferência de potência ocorre de maneira satisfatória mesmo que o dispositivo a ser carregado fique posicionado a alguns centímetros de distância do “*pad*”. Já em VE, essa distância se torna um pouco maior, variando de cada aplicação e tipo de fabricação do veículo. Existem tecnologias de circuitos receptores “móveis”, os quais no momento de carga do veículo, saem da carcaça e se posicionam próximos ao sistema transmissor de energia elétrica, proporcionando poucos centímetros de *gap*. Em outros casos, essas distâncias ficam em torno de 10 a 30 centímetros normalmente.

Na Figura 20 é possível avaliar as aplicações em relação à faixa de potência requerida pela carga e a eficiência do processo de transmissão de energia para alguns exemplos de artigos pesquisados. Com o objetivo de proporcionar um maior entendimento da figura, algumas referências foram omitidas no gráfico e podem ser encontradas na Tabela 3. Nota-se que a maior faixa de potência das aplicações está voltada para a categoria de veículos elétricos, exceto para o caso de veículos elétricos não-tripulados, como por exemplo para o carregamento de AUV demonstrado no trabalho de HOBSON et al. (2007). Em relação à eficiência do sistema, fica evidente que quanto maior o nível de potência da aplicação, maior será a busca por um nível de eficiência satisfatório, o que explica os altos valores de eficiência encontrados nos trabalhos de VE. Entretanto, observa-se que é possível obter rendimentos superiores a 70 % para todas as classes de aplicações abordadas no presente trabalho. A menor eficiência encontrada foi de 11% no trabalho de NG et al. (2011), para alimentação de uma carga muito pequena (5 mW) referente a uma prótese de retina.

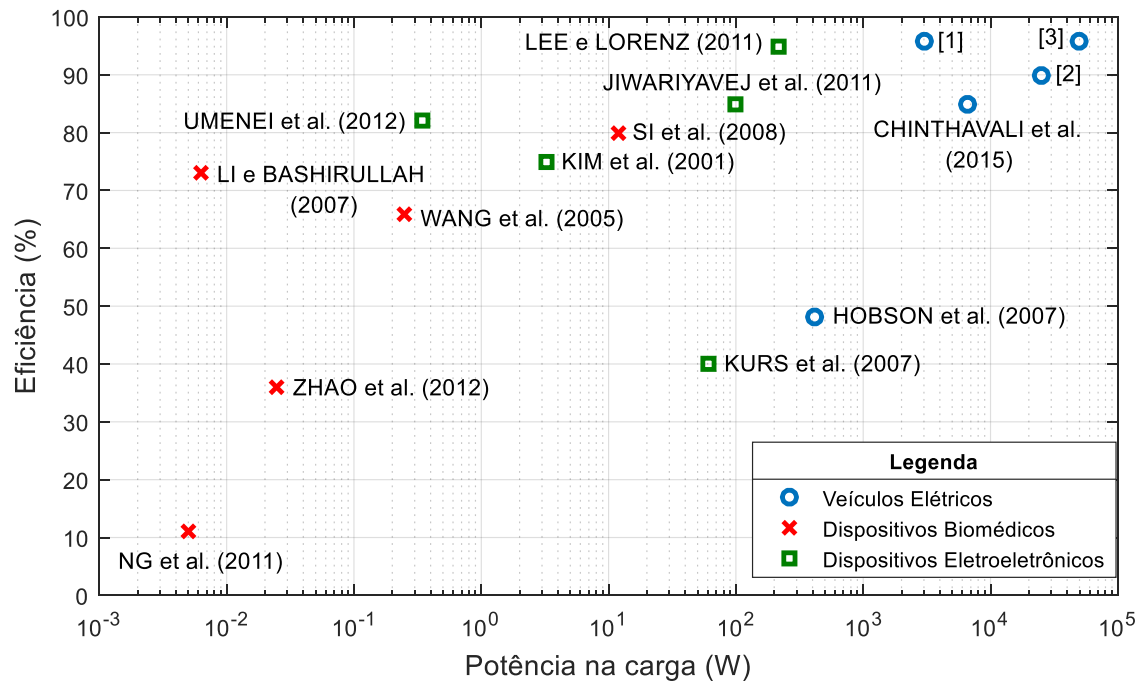


Figura 20 - Apresentação de algumas aplicações de acordo com a potência da carga e a eficiência do processo de transferência de potência da tecnologia IPT.

Tabela 3 – Referência dos artigos utilizados na Figura 20.

Referência numérica	Artigo (autores)
[1]	DIEKHANS e DONCKER (2015)
[2]	MISKIEWICZ et al. (2011)
[3]	BOSSHARD e KOLAR (2016, b)

3.5 NORMAS

Uma das principais preocupações envolvendo a tecnologia WPT segundo CAMPI, CRUCIANI, SANTIS et al. (2017) é a capacidade de manter os níveis de emissões de campos eletromagnéticos (*electromagnetic field* – EMF) dentro dos limites de segurança estabelecidos nas normas mundiais, principalmente em aplicações com altos níveis de potência (22 a 220 kW), como em veículos elétricos. Outro aspecto importante e que deve ser investigado é a compatibilidade eletromagnética (*electromagnetic compatibility* – EMC), ou também chamada de interferência

eletromagnética (*electromagnetic interference* – EMI), do sistema de carregamento sem contatos com outros sistemas eletrônicos presentes no veículo.

Para DAGA, MILLER, LONG et al. (2017), é possível determinar três regiões principais de exposição de EMF em aplicações envolvendo VE: a primeira região é caracterizada pela região ativa de transferência de potência, localizada entre o circuito receptor e o transmissor; a segunda região representa toda a região correspondente ao perímetro do veículo até o nível do solo; e a última região representa o interior do veículo, ou seja, a cabine de passageiros. Segundo os autores, durante os primeiros anos de padronização dos sistemas de transmissão sem fios, a comissão mundial referente à proteção contra radiações (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* – ICNIRP) adotou um nível máximo de campo magnético de $6.25 \mu T$, que precisou ser reavaliado já que a operação de sistemas WPT de potência de 3.3 a 7 kW já atingia esse limite. Atualmente, os níveis máximos são especificados em $15 \mu T_{rms}$ para as regiões 2 e 3. No caso da região 1, é aceitável um nível de EMF suficiente para transferir a potência necessária demandada pela carga, porém com a garantia de que os metais do veículo não serão aquecidos devido à interação eletromagnética e nem objetos estranhos como chaves, moedas ou outros objetos metálicos. O padrão ICNIRP 2010 estabeleceu um nível máximo de $27 \mu T_{rms}$, porém foi reduzido em SAE J2954-1 para $15 \mu T_{rms}$ como forma de entrar em conformidade com as recomendações da Associação Americana de Instrumentação Médica (*American Association for Medical Instrumentation*) para dispositivos biomédicos implantáveis.

A SAE *International* (*Society of Automotive Engineers*) representa uma associação profissional ativa para o desenvolvimento de normas e padronizações em diversos setores industriais, principalmente na área de transportes. De acordo com o site oficial da SAE, uma nova recomendação prática para a padronização de carregamentos sem contatos para veículos elétricos será realizada no ano de 2018. Segundo a associação, essas recomendações práticas devem ser utilizadas para realizar análises e testes referentes à interoperabilidade, desempenho e níveis de emissões de

acordo com cada classe padrão de sistemas WPT definidos. O objetivo principal é ter uma metodologia comum para validar a transferência de energia sem contato, alinhamentos, projetos para diferentes classes de potência e topologias tanto para veículos quanto para a infraestrutura do ambiente que será instalado a tecnologia [SAE Standards].

A título de exemplo, o trabalho de CAMPI et al. (2017) investiga numericamente a distribuição do campo magnético produzido num sistema de carregamento de bateria de um VE, para diferentes condições de alinhamento entre as bobinas do sistema. O sistema considerado para a análise apresenta uma compensação série-série e opera na frequência de 85 kHz, transferindo uma potência de 7.7 kW para uma bateria de *Li-ion* com tensão nominal igual a 200 V. Os autores propuseram duas situações para análise: perfeito alinhamento entre as bobinas do sistema e com o máximo de desalinhamento possível. Resultados obtidos mostraram que o sistema IPT está compatível com os limites impostos por ICNIRP mesmo sobre a pior condição de desalinhamento (condição que leva a um aumento considerável de corrente no circuito e, conseqüentemente, do fluxo eletromagnético). Os autores enfatizam que a carcaça do veículo serve como uma blindagem magnética e por isso, em seu interior, o campo magnético é drasticamente reduzido.

CIRIMELE, FRESCHI e MITOLO (2016) aponta que alguns sistemas estacionários de carregamento através de IPT já existem, mas a maioria não são compatíveis entre si devido à falta de padronização no momento de desenvolvimento desses sistemas. Contudo, alguns grupos ativos como o SAE vêm trabalhando para desenvolver a padronização da tecnologia.

Além de questões envolvendo a segurança do processo de carregamento, algumas normas servirão para padronizar o sistema como um todo para proporcionar uma maior compatibilidade entre os diferentes tipos de equipamentos e marcas que serão disponíveis no mercado. Portanto, à medida que a tecnologia IPT for se desenvolvendo, diversas características operativas como frequência, níveis de potência, protocolos de

comunicação de dados (entre infraestrutura IPT, veículos e os sistemas de potência), dispositivos de proteção, posicionamento dos circuitos receptores nos dispositivos, entre outros pontos, serão padronizadas para garantir uma interoperabilidade dos sistemas.

3.6 DESENVOLVIMENTO NO MUNDO

Observa-se que a maioria dos trabalhos e publicações científicas da tecnologia IPT aplicada a dispositivos biomédicos são de pesquisadores da Universidade de Auckland, na Nova Zelândia. Já na área de veículos elétricos, a pesquisa está mais diluída no mundo, porém é possível apontar algumas regiões que apresentam um maior interesse no desenvolvimento acadêmico. No trabalho de BOSSHARD e KOLAR (2016, a), é apresentada a Figura 21, na qual mostra que grande parte das referências utilizadas no artigo são obtidas de países da Europa e também nos Estados Unidos. Na Figura 21-a, é possível identificar os artigos presentes na Tabela 4 de acordo com a localização da instituição na qual foi publicado.

A área de aparelhos eletroeletrônicos mostra-se como uma das mais desenvolvidas tecnologicamente nos dias atuais, com diversos dispositivos para carregamento sem fios sendo disponibilizados comercialmente, principalmente para os smartphones. Isso se deve também ao fato de já existir uma padronização clara a ser seguida pelos fabricantes da tecnologia, a já mencionada norma Qi. Algumas marcas líderes do mercado de celulares e smartphones, como a Samsung e Apple, já comercializam versões de produtos com a possibilidade de carregamento sem fios.

Ainda na área de veículos elétricos, BOSSHARD e KOLAR (2016, a) apresentam o desenvolvimento do número de publicações científicas e de patentes ao longo dos anos, com base nos dados do Google Scholar (2014). Nota-se na Figura 21-b, que a partir do ano de 2010 há um grande aumento no número de pesquisas nessa área, principalmente devido ao fato da maior atenção mundial para o desenvolvimento deste tipo de veículo.

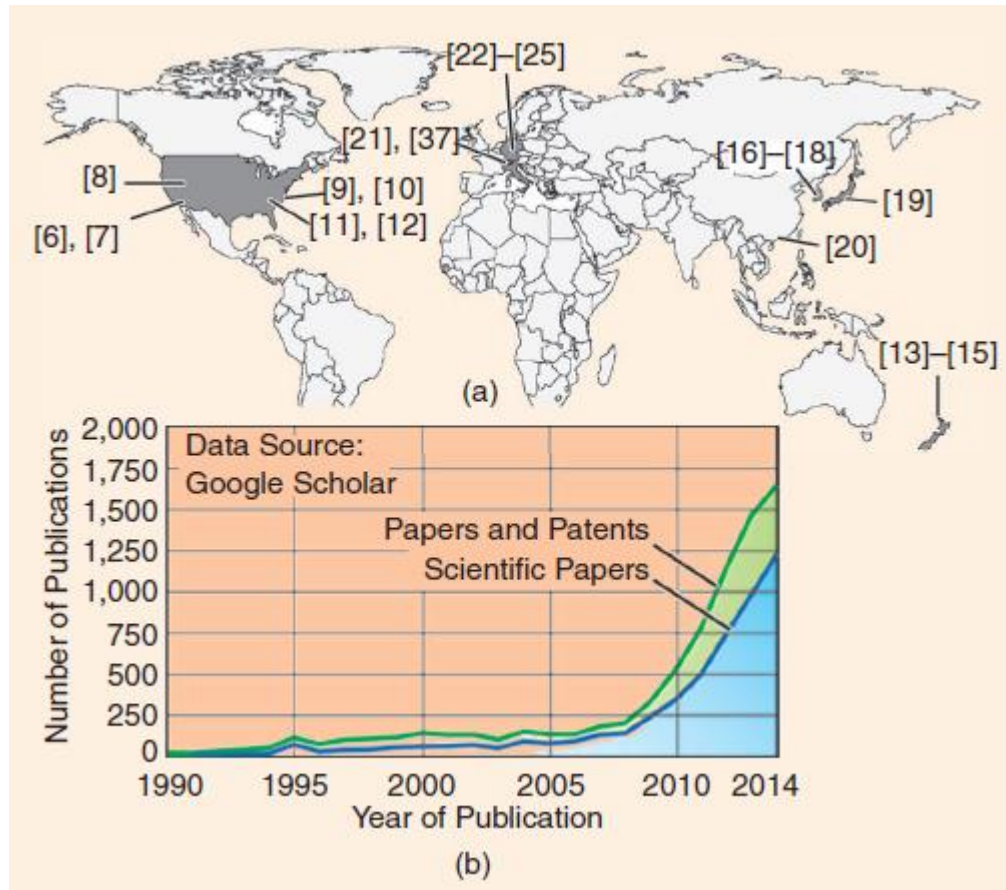


Figura 21 - a) Visão geográfica geral de algumas publicações da tecnologia IPT aplicada a veículos elétricos; b) Número de publicações de IPT ao longo dos anos.

BOSSHARD e KOLAR (2016, a)

Tabela 4 – Referências dos artigos utilizados para a construção da Figura 21-a.

Referência (número)	Artigo	Ano da Publicação
[6]	BOLGER e KIRSTEN. Inductive power coupling for an electric highway system	1978
[7]	LASHKARI et al. Inductive power transfer to an electric vehicle	1986
[8]	Wave IPT. Wirelessly charging electric vehicles.	-

[9]	KURS et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances.	2007
[10]	WiTricity Corp. Wit-3300 resonator pair R2.3 (data sheet).	2014
[11]	ONAR et al. Oak Ridge National Laboratory wireless power transfer development for sustainable campus initiative.	2013
[12]	CHINTHAVALI et al. Integrated charger with wireless charging and boost functions for PHEV and EV applications.	2015
[13]	GREEN e BOYS. 10 kHz inductively coupled power transfer - concept and control.	1994
[14]	BUDHIA et al. Development of a single sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems.	2013
[15]	COVIC e BOYS. Inductive power transfer.	2013
[16]	KIM et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system.	2013
[17]	CHOI et al. Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles.	2015

[18]	CHOI e RIM. Recent progress in developments of on-line electric vehicles.	2015
[19]	Toyota Motor Corp. Toyota to begin wireless vehicle charging verification testing	2014
[20]	HUT et al. A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer.	2014
[21]	Brusa Elektronik AG. Inductive charging system ICS115 (data sheet).	2014
[22]	Conductix Wampfler/Delachaux AS. 10 years of electric buses with IPT charge.	2012
[23]	GOELDI et al. Design and dimensioning of a highly efficient 22 kW bidirectional inductive charger for e-mobility.	2013
[24]	DIEKHANS e DONCKER. A dual-side controlled inductive power transfer system optimized for large coupling factor variations and partial load.	2015
[25]	Bombardier Transportation. Primove: Introducing true electric mobility for a sustainable future.	2013
[37]	BOSSHARD. Multi-objective optimization of inductive power transfer systems for EV charging.	2015

No Brasil, poucos trabalhos têm sido desenvolvidos no âmbito da tecnologia IPT. A maioria desses podem ser encontrados no banco de dados da SOBRAEP (Associação Brasileira de Eletrônica de Potência), como por exemplo o artigo de GODOY et al. (2016), da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, que analisa um sistema para carregamento de veículos elétricos utilizando uma topologia de compensação não convencional. Outros trabalhos como as dissertações de JORGETTO (2015), da UNESP (Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira), FERNANDES (2015) e LOPES (2013), abordam detalhadamente assuntos relacionados à tecnologia de transferência indutiva de energia. Na Tabela 5 podem ser vistos outras publicações de pesquisadores brasileiros no tema de transferência indutiva de potência.

Tabela 5 – Publicações de pesquisadores brasileiros sobre o tema de transferência indutiva de potência.

Artigo	Ano da publicação
FERNANDES e OLIVEIRA. Iterative Design Method of Weakly Coupled Magnetic Elements for Inductive Power Transfer	2013
FERNANDES e OLIVEIRA. Tópicos Seleccionados Sobre o Estado-da-Arte em Transferência Indutiva de Potência	2014
FERNANDES e OLIVEIRA. Theoretical bifurcation boundaries for Wireless Power Transfer converters	2014
FERNANDES e OLIVEIRA. Método de Projeto e Caracterização de Conversores Para Transferência Indutiva de Potência	2014
LOPES, VALLE, BARBOSA et al. Projeto e otimização da compensação de um transformador de núcleo separado	2014

usado para recarregar as baterias um veículo subaquático autônomo	
FERNANDES e OLIVEIRA. Exhaustive algorithms applied to the design of inductive power transfer couplers.	2015
FERNANDES e OLIVEIRA. Design Of Loosely Coupled Magnetic Systems Based On Finite Element Method For Inductive Power Transfer Applications	2015
FERNANDES e OLIVEIRA. Comparative performance evaluation of magnetic couplers for Wireless Power Transfer applications	2015

CONCLUSÃO

4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica do tema de transferência indutiva de potência, com o intuito de descrever o princípio de funcionamento básico de um sistema típico da tecnologia, além de abordar cada componente que compõe o sistema. As principais áreas de aplicações da tecnologia de IPT foram apresentadas, com diversos exemplos de trabalhos científicos desenvolvidos para cada aplicação especificada, determinando as principais características de cada sistema, além das normas e padrões que regem o funcionamento do mesmo.

As pesquisas e desenvolvimentos científicos relacionados à transferência de potência sem fios vem crescendo cada vez mais, principalmente aquelas voltadas para sistemas de potência mais elevada.

O estudo de diversos trabalhos científicos permitiu observar que a área em maior crescimento na comunidade acadêmica e com maior evidência nas pesquisas feitas foi a de veículos elétricos, principalmente a da classe de veículos terrestres tripulados para o transporte de cargas e/ou pessoas. É importante ressaltar que essa área de aplicação vem ganhando destaque no cenário mundial não só no desenvolvimento de pesquisas para o carregamento sem fio de suas baterias elétricas, mas de forma geral para sua inclusão no sistema elétrico de potência. Pouca ou nenhuma referência foram encontradas para aplicações em veículos elétricos marítimos ou subaquáticos com níveis de potência elevados, como por exemplo em navios ou submarinos.

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, durante a pesquisa realizada constatou-se que não foram encontrados trabalhos que mencionassem de forma

detalhada os estágios presentes pós-receptor (conversores controladores de carga), no que diz respeito a pré-reguladores de fator de potência e controle de carga da bateria conectado ao circuito de saída do sistema IPT.

4.2 TRABALHOS FUTUROS

Por fim, os resultados dessa pesquisa permitem apontar as seguintes propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Pesquisa bibliográfica sobre outras formas de transferência de energia sem fios, como por exemplo as de acoplamento capacitivo, micro-ondas e a laser;
- Desenvolvimento de um sistema de transferência indutiva de potência para demonstração de seu princípio de funcionamento;
- Pesquisa e desenvolvimento de um sistema IPT para aplicações marítimas e/ou subaquáticas com altos níveis de potência
- Pesquisa sobre os principais softwares que podem ser utilizados na modelagem de sistemas IPT (2D e/ou 3D);
- Estudo, modelagem e simulação de diferentes geometrias de sistemas IPT para verificação da capacidade de transferência de energia elétrica.
- Estudo detalhado sobre o estágio receptor do sistema, principalmente na área dos conversores utilizados e controle de carga de baterias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTRID; LI, Q.; LIANG, Y. C. Contactless Power Delivery for Mobile Device Charging Applications. IEEE, 2014.

BOLGER, J.; KIRSTEN, F.; NG, L. “Inductive power coupling for an electric highway system,” in Proc. 28th Vehicular Technology Conf., vol. 28, Denver, CO, Mar. 1978, pp. 137–144.

Bombardier Transportation. (2013). Primove: Introducing true electric mobility for a sustainable future. Disponível em: http://primove.bombardier.com/fileadmin/primove/content/MEDIA/Publications/BT_Brochure_PRIMOVE_210x280_2013_final_upd_110dpi_SP.pdf

BOSSHARD, R. “Multi-objective optimization of inductive power transfer systems for EV charging,” Ph.D. dissertation, ETH Zurich, Switzerland, 2015.

BOSSHARD, R.; KOLAR, J.K. a; Inductive Power Transfer for Electric Vehicle Charging. IEEE Power Electronics Magazine, p.22-30, September 2016.

BOSSHARD, R.; KOLAR, J.K. b; Multi-objective Optimization of 50 kW/85 kHz IPT System for Public Transport. IEEE Journal of emerging and selected topics in Power Electronics, vol. 4, no. 4, December 2016.

Brusa Elektronik AG. (2014). Inductive charging system ICS115 (data sheet). Disponível em: <http://www.brusa.biz>

BUDHIA, M.; BOYS, J.; COVIC, G.; HUANG, C. Y. “Development of a singlesided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 1, pp. 318–328, Jan. 2013.

CAMPI, T.; CRUCIANI, S.; DE SANTIS, V.; MARADEI, F.; FELIZIANI, M. EMC and EMF Safety Issues in Wireless Charging System for Electric Vehicle (EV). IEEE, 2017.

CARMELI, M.S; CASTELLI-DEZZA, F; MAURI, M.; FOGLIA, G.; Contactless Energy Transmission system for Electrical Vehicles batteries charging. IEEE, 2015.

CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Eléctricas, 5ª Edição. 2013.

CHEN, X.; LIANG, Y. C.; Contactless Power Delivery for Mobile Device Charging Applications. IEEE COMPEL 2013, pp. 1– 4, June 2013.

CHINTHAVALI, M.; ONAR, O.C.; CAMPBELL, S.L.; TOLBERT, L.M. Integrated Charger with Wireless Charging and Boost Functions for PHEV and EV Applications. IEEE, 2015.

CHOI, S. Y.; RIM, C. T. “Recent progress in developments of on-line electric vehicles,” in Proc. First Int. Conf. Power Electronics Systems Applications, Hong Kong, Dec. 2015, pp. 1–8.

CHOI, S.; GU, B.; JEONG, S.; RIM, C. “Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles,” IEEE J. Emerg. Select. Topics Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 18–36, 2015.

CICHON, D. J.; WIESBECK, W.; "The Heinrich Hertz wireless experiments at Karlsruhe in the view of modern communication," in 100 Years of Radio. Proceedings of the 1995 International Conference on. IET, 1995, pp. 1-6.

CIRIMELE, V; FRESCHI, F.; MITOLO, M. Inductive power transfer for automotive applications: State-of-the-art and future trends. IEEE 2016.

Conductix Wampfler/Delachaux SA. (2012, May 31). 10 years of electric buses with IPT charge. Disponível em: <http://www.conductix.us/en/news/2012-05-31/10-years-electric-buses-iptr-charge>

COVIC, G. A.; BOYS, J. T. Inductive Power Transfer. IEEE, 2013.

DAGA, A.; MILLER, J.M.; LONG, B.R.; KACERGIS, R.; SCHRAFEL, P.; WOLGEMUTH, J.; Electric Fuel Pumps for Wireless Power Transfer. IEEE Power Electronics Magazine, p. 24-35, June 2017.

DIEKHANS, T.; DONCKER, R.W. A dual-side controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 11, November 2015.

DISSANAYAKE, T.; BUDGETT, D.; HU, A. P.; MALPAS, S.; BENNET, L. Transcutaneous Energy Transfer System for Powering Implantable Biomedical Devices, 2009.

FARADAY, M.; "Experimental researches in electricity," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 122, pp. 125-162, 1832.

FERNANDES, R. C. Elementos Magnéticos Fracamente Acoplados para Aplicação em Transferência Indutiva de Potência: Procedimento e Critérios de Projeto, Análise de Sensibilidade e Condições de Bifurcação. Tese de doutorado, Programa de Engenharia Elétrica de São Carlos, 2015.

FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, A. A. Iterative Design Method of Weakly Coupled Magnetic Elements for Inductive Power Transfer. In: XII Brazilian Power Electronics Conference, 2013, Gramado, RS. Proceedings of COBEP 2013. NY: IEEE, 2013. v. 1. p. 1088-1094.

FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, A. A. Comparative performance evaluation of magnetic couplers for Wireless Power Transfer applications. In: 2015 IEEE 13th

Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, Fortaleza. 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015. p. 1-6.

FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, A. A. Design Of Loosely Coupled Magnetic Systems Based On Finite Element Method For Inductive Power Transfer Applications. *Eletrônica de Potência (Impresso)*, v. 20, p. 94-103, 2015. FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, A. A.

FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, A. A. Exhaustive algorithms applied to the design of inductive power transfer couplers. *Wireless Power Transfer*, v. 2, p. 107-120, 2015.

FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, A. A. Método de Projeto e Caracterização de Conversores Para Transferência Indutiva de Potência. In: XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014, Belo Horizonte. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática*, 2014. v. 1. p. 1004-1010.

FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, A. A. Theoretical bifurcation boundaries for Wireless Power Transfer converters. In: 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015, Fortaleza. 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). p. 1-4.

FERNANDES, R. C.; OLIVEIRA, A. A. Tópicos Seleccionados Sobre o Estado-da-Arte em Transferência Indutiva de Potência. *Eletrônica de Potência (Impresso)*, v. 19, p. 58-71, 2014.

GODOY, R. B.; MADDALENA, E. T.; LIMA, G. F.; FERRARI, L. F.; TORRES, V. L. V.; PINTO, J. O. P. Wireless Charging System with non-conventional compensation topology for electric vehicles and other applications. 2016.

GOELDI, B.; REICHERT, S.; TRITSCHLER, J. "Design and dimensioning of a highly efficient 22 kW bidirectional inductive charger for e-mobility," in Proc. Int. Exhibition Conf. Power Electronics, Nuremberg, Germany, 2013, pp. 1496–1503.

GREEN, A. W.; BOYS, J. T. "10 kHz inductively coupled power transfer concept and control," in Proc. Fifth Int. Conf. Power Electron. Variable-Speed Drives, London, U.K., Oct. 1994, pp. 694–699.

HOBSON, B. W. et al. The development and ocean testing of an AUV docking station for a 21" AUV. OCEANS 2007, vol., no., pp.1-6, Sept. 29 2007-Oct. 4 2007.

HUI, S.Y.R.; HO, W.W.C. A new generation of Universal Contactless Battery Charging Platform for Portable Consumer Electronic Equipment. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 3, May 2005.

HUI, S.Y.R.; ZHONG, W.; LEE, C.K.; "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, pp. 4500–4511, September 2014.

HUTIN; LE-BLANC. U.S. Patent 527 857, 1894.

JANG, Y.; JOVANOVIĆ, M. A Contactless Electrical Energy Transmission System for Portable-Telephone Battery Chargers. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 50, no. 3, June 2003.

JIWARIYAVEJ, V. et al. Basic experimental study on effect of bentonite to efficiency of wireless power transfer using magnetic resonance coupling method. IEEE International Telecommunications and Energy Conference, 2011.

JORGETTO, M. F. C. Transmissão indutiva de energia eletromagnética sem fios, para aplicações em postos de abastecimento de veículos elétricos puros: modelação para o elemento eletromagnético. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, UNESP – Ilha Solteira, 2015.

JOUNG, G.B.; CHO, B.H. Energy Transmission System for an Artificial Heart Using Leakage Inductance Compensation of Transcutaneous Transformer. IEEE Transactions on Power Electronics. 1998

KALLEL, B.; KANOUN, O.; TRABELSI, H.; Large air gap misalignment tolerable multi-coil inductive power transfer for wireless sensors. IET Power Electronic, vol. 9, Iss.8, p. 1768-1774, 2016.

KHENG, T. Y.; Energy Harvesting Autonomous Sensor Systems: Design, Analysis and Practical Implementation. CRC Press. 2013, pp. 181-182.

KIM, C. C.; SEO, D. H.; YOU, J. S.; PARK, J. H.; CHO, B. H. Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phone. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 6, December 2001.

KIM, J. et al. "Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system," Proc. IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1332–1342, June 2013.

KURS, A.; KARALTS, A.; MOFFATT, R.; JOANNOPOULOS, J. D.; FISHER, P.; SOLJACIC, M. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonance. Science Magazine, v. 317, p. 83-86, 2007.

LAKHAL, H.; DHIEB, M.; GHARIANI, H.; LAHIANI, M. Wireless Power Transmission Technologies and Applications. 2013.

LASHKARI, K.; SCHLADOVER, S. E.; LECHNER, E. H. "Inductive power transfer to an electric vehicle," in Proc. Eighth Int. Electric Vehicle Symp., Washington, D.C., Oct. 1986.

LEE, S. H.; LORENZ, R. D. Development and validation of model for 95%-efficiency 220-W wireless power transfer over a 30-cm air gap. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 47, n. 6, 2011.

LI, L. W. Wireless Power Transmission: State-of-the-arts in Technologies and Potential Applications. Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference, 2011.

LI, P.; BASHIRULLAH, R. A wireless power interface for rechargeable battery operated medical implants. IEEE Transactions on Circuits and Systems, v. 54, n.10, 2007.

LI, S.; MI, C.C. Wireless Power Transfer for Electric Vehicles Applications. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 3, no. 1, March 2015.

LIU, C. Fundamental study on capacitively coupled power transfer technology. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, 2011.

LIU, C; HU, A. P. Power Flow Control of a Capacitively Coupled Contactless Power Transfer System. IEEE, 2009

LIU, X. Qi Standard Wireless Power Transfer Technology Development Toward Spatial Freedom. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2015.

LOPES, I. F.; VALLE, R. L.; BARBOSA, P. G.; HONORIO, L. M.; MATOS, A. C.; CRUZ, N. A. Projeto e otimização da compensação de um transformador de núcleo separado usado para recarregar as baterias um veículo subaquático autônomo. Eletrônica de Potência (Impresso), v. 19, p. 97-109, 2014.

LOPES, I.F. “Projeto e Compensação de parâmetros de Transformador de Núcleo Separado destinado ao carregamento de baterias de Veículos Subaquáticos Autônomos”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.

LU, X.; WANG, P.; NIYATO, D.; KIM, D. I.; HAN, Z.; “Contactless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, Second Quarter 2016.

MAGNOR, D.; GERSCHLER, J.B.; ECKER, M.; MERK, P.; SAUER, D.U. "Concept of a battery aging model for lithium-ion batteries considering the lifetime dependency on the operation strategy," in Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conf., Hamburg, Germany, Sept. 2009, pp. 3128 – 3134.

MANIKANDAN, J.; AKASH, S.; VISHWANATH, A.; NANDAKUMAR, R.; AGRAWAL, V.K.; MANU, K. Design and development of contactless battery charger for underwater vehicles. Michael Faraday IET International Summit, 2015.

MASON, R. Feasibility of laser power transmission to a high-altitude unmanned aerial vehicle. 2011

MEEKER, D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual, version 4.2, August 25, 2013.

MISKIEWICZ, R. M.; MORADEWICZ, A. J.; KAZMIERKOWSKI, M. P. Contactless battery charger with bi-directional energy transfer for plug-in vehicles with vehicle-to-grid capability. Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on, vol., no., pp.1969-1973, 27-30 June 2011.

MIYAKAWA, T. et al. Development status of the beam steering control subsystem for the microwave power transmission ground experiment. IEEE Microwave Workshop series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems and Applications, p.231-234, 2011.

NG, D. C. et al. Wireless power delivery for retinal prostheses. IEEE Annual International Conference on Engineering in Medicine and Biology Society, 2011.

ONAR, O. C.; MILLER, J. M.; CAMPBELL, S. L.; COOMER, C.; WHITE, C. P.; SEIBER, L. E. "Oak Ridge National Laboratory wireless power transfer development for sustainable campus initiative," in Proc. IEEE Transportation Electrification Conf. Expo., Detroit, MI, June 2013, pp. 1–8.

OTTO. Provisional Patent NZ19720167422, JP49063111 (A), 1972.

QInside. Disponível em: <http://www.qinside.biz/en/support/what-is-wireless-charging>, 2017.

SAE Standards. Disponível em: <http://standards.sae.org/>

SHADID, R.; NOGHANIAN, S.; NEJADPAK, A. A Literature Survey of Wireless Power Transfer. IEEE, 2016.

SHINOHARA, N.; ISHIKAWA, T. High Efficient Beam Forming with High Efficient Phased Array for Microwave Power Transmission. IEEE, 2011.

SI, P.; HU, A. P.; MALPAS, S.; BUDGETT, D. A frequency Control Method for Regulating Wireless Power to Implantable Devices. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 2, no. 1, March 2008.

SI, P.; HU, A.P.; HSU, J.W.; CHIANG, M; WANG, Y; MALPAS, S; BUDGETT, D; Wireless Power Supply for Implantable Biomedical Device Based on Primary Input Voltage Regulation. IEEE Conference Paper – June 2007.

SOUZA, W. G.; ANDRADE, D. A.; JUNIOR, J. A. S.; SANTOS, F. L. A.; FILHO, M. J. M; OLIVEIRA, C. A; Wireless Power Transfer Using a Full Bridge Converter with Zero Voltage Switching, IEEE, 2017.

STRATMANN, M.; TRAWINSKI, P. Rechargeable toothbrushes with charging stations. United States Patent, US6798169, November 2002.

SULTANBECK, A.; KHASSENNOV, A.; KANAPYANOV, Y.; KENZHEGALIYEVA, M.; BAGHERI, M. Intelligent Wireless Charging Station for Electric Vehicles. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), IEEE 2017.

TESLA, N.; "The transmission of electrical energy without wires," *Electrical World and Engineer*, vol. I, 1904.

Toyota Motor Corp. (2014, Feb. 13). Toyota to begin wireless vehicle charging verification testing. Disponível em: <http://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/651273>

UMENEI, A. E. et al. Novel method for selective non-linear fluxguide switching for contactless inductive power transfer. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 48, n. 7, p. 2192-2195, 2012.

US Patent 649,621. "Apparatus for transmission of electrical energy." May 15, 1900. Disponível em: <https://www.google.com/patents/US649621>.

WAFFENSCHMIDT, E. STARING, T. Limitation of inductive power transfer for consumer applications. *IEEE Power Electronics and Applications*, 2009.

WANG, C.S.; STIELAU, O.H., COVIC, G.A. Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v.52, no 5, p. 1308-1314, 2005.

WANG, G; LIU, W.; SIVAPRAKASAM, M; KENDIR, G.A.; Design and Analysis of an Adaptive Transcutaneous Power Telemetry for Biomedical Implants. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 2005.

Wave IPT. Wirelessly charging electric vehicles. Disponível em: <http://wave-ipt.com/>

WiTricity Corp. (2014). WiT-3300 resonator pair R2.3 (data sheet). Disponível em: https://www.terraelectronica.ru/files/news/WiT-3300_R2_3_DS.pdf

YAN, Z.; ZHANG, K.; WEN, H.; SONG, B. Research on characteristics of contactless power transmission device for Autonomous Underwater Vehicle. *IEEE*, 2016.

ZHAO, Y. et al. High performance 3-coil wireless power transfer system for the 512-electrode epiretinal prosthesis. IEEE Annual International Conference on Engineering in Medicine and Biology Society, 2012.

ZHIXIN, M.; AMING, F.; HAIHONG, Q.; PINGYAN, P. Characteristics and design of transformer in loosely coupled inductive power transfer system. Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on, vol., no., pp.3454-3457, 25-27 June 2010.