

TECNOLOGIAS WIRELESS DE TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA: SUCINTA REVISÃO APLICADA AO CARREGAMENTO DE BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

TATIANA S. MACEDO, TIARA R. S. FREITAS, WALBERMARK M. DOS SANTOS, *DENIZAR C. MARTINS

LEPAC - Laboratório de Eletrônica de Potência e Aacionamento Elétrico, Universidade Federal do Espírito Santo; *INEP-Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina

E-mails: saviato@gmail.com; tiara.freitas@ufes.br; walbermark.santos@ufes.br; denizar@inep.ufsc.br.

Abstract— Encouraged by the Paris agreement, much research has been directed at reducing costs and increasing the efficiency of electric vehicle battery charging systems, which have been identified as the main barriers to the massive use of this type of transport. In pursuit of greater efficiency, research has also focused on designing systems that are safer and more convenient for vehicle owners. Among the wireless technologies, inductive power transfer is currently the most used in electric vehicle applications due to its convenience. It does not use cables, and it is safe because it eliminates the risk of electric shock associated with electrical contacts. This work aims to review the latest research in the field of power electronics aimed at increasing the efficiency of inductive power transfer systems, mainly regarding the different topologies of coil couplings and compensation meshes. Two geometries are studied, circular and square coils. The results demonstrate that circular coils transfer power more efficiently but are more sensitive to misalignment between them than the square ones, most used in dynamic loading systems. The series-series compensation is the most used in electric vehicles applications because it is independent of load variations.

Keywords— Wireless power transfer, Inductive power transfer, Compensation, Coil design.

Resumo— Fomentadas pelo acordo de Paris, muitas pesquisas têm sido direcionadas a reduzir custos e aumentar a eficiência dos sistemas de carregamento de baterias dos veículos elétricos, apontados como as principais barreiras ao uso massivo desse tipo de transporte. Na busca por maior eficiência as pesquisas têm também se concentrado em projetar sistemas mais seguros e convenientes para os proprietários dos veículos. Dentre as tecnologias *wireless*, a transferência indutiva de potência é atualmente a mais utilizada em aplicações de veículos elétricos devido a sua conveniência, não utiliza cabos, e segurança, pois elimina o risco de choque elétrico associado aos contatos elétricos. Esse trabalho tem como objetivo revisar as últimas pesquisas no campo da eletrônica de potência direcionadas a aumentar a eficiência dos sistemas de transferência indutiva de potência, principalmente no que tange as diferentes topologias de acoplamento de bobinas e malhas de compensação. São exploradas as duas geometrias, circular e quadrangular. Os resultados demonstram que bobinas circulares transferem potência com mais eficiência, porém são mais sensíveis aos desalinhamentos entre elas do que as quadrangulares, mais utilizadas em sistemas de carregamento dinâmico. A compensação série-série é a mais utilizada nas aplicações de veículos elétricos por ser independente das variações na carga.

Palavras-chave— Transferência de potência sem fio, Transferência indutiva de potência, Compensação, Projeto de bobinas.

1 Introdução

Impulsionadas pelo acordo de Paris assinado em 2015, as pesquisas direcionadas a transformar a maneira como consumimos e geramos energia avançaram rapidamente com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Os transportes representam a segunda maior fonte de emissão de CO₂ e respondem por 15% do total, o que naturalmente coloca esse setor no foco das pesquisas para buscar alternativas para reduzir as emissões de carbono (MMA, 2018; Delgado et al., 2017).

Grandes empresas da indústria automotiva têm investido milhões em pesquisas direcionadas à substituição dos veículos de combustão interna (VCI) por alternativas que ofereçam um impacto menor ao meio ambiente. Uma dessas alternativas são os veículos elétricos que já estão disponíveis comercialmente, porém, devido às barreiras econômicas, tecnológicas e de infraestrutura, ainda não têm uma participação relevante na frota mundial de automóveis. Apesar de todo o investimento, a tecnologia ainda não avançou ao ponto de disponibilizar a mesma autonomia e agilidade no carregamento que os veículos à combustão

oferecem. Dentro das barreiras de infraestrutura existe a insegurança dos proprietários com relação à disponibilidade de pontos de carregamento ao longo dos seus trajetos, a necessidade de possuir um ponto de abastecimento em suas residências e lembrar de conectar o carro à noite, por exemplo, para que suas baterias sejam carregadas. O esquecimento de conectar o carro na tomada todas às noites é um dos principais motivos de indisponibilidade dos veículos elétricos uma vez que o tempo de carga das baterias é longo. A tecnologia *wireless* oferece justamente essa conveniência ao proprietário que não precisa lembrar de conectar o seu veículo e quando aplicada aos eletropostos oferece uma estrutura melhor para lidar com problemas como desgaste dos contatos, riscos de choques elétricos, etc (Delgado et al., 2017).

Desde 2013 foram homologadas mais de 427 mil patentes relacionadas ao tema veículos elétricos, sendo que a referência ao tema carregamento *wireless* aparece em 70% desses registros (USPTO, 2018).

O volume de pesquisas sobre topologias e estratégias de carregamento de veículos elétricos (EV) tem trazido avanços para o campo industrial uma vez que equipamentos e veículos tais como empilhadeiras também podem se beneficiar de novas formas de carregamento aumentando tanto a disponibilidade desses

ativos quanto a segurança para quem os opera. Além disso, novas topologias de conversores e substituição de *plugs* conectivos por sistemas sem contato elétrico também trazem benefícios tanto para a sua eficiência quanto financeiros. Em outras palavras o uso da tecnologia de transferência de potência sem contato elétrico reduz o desgaste do *plugs* devido ao contato elétrico e consequentemente todos os custos associados à sua manutenção e substituição.

Dentro desse contexto, esse artigo traz uma concisa e objetiva revisão dos sistemas de transferência de potência para veículos elétricos sem contato elétrico, destacando as faixas de distância e frequência, as geometrias de bobinas e os principais desafios e alternativas de soluções aplicadas a esta vertente de pesquisa, direcionado especialmente à tecnologia de acoplamento indutivo.

2 Estado-da-arte dos sistemas de transferência de potência sem contato elétrico

A tecnologia de transferência de potência sem contato elétrico pode ser classificada em duas categorias: com acoplamento capacitivo (que utiliza o campo elétrico) e com acoplamento indutivo (que utiliza o campo magnético) (Patil, McDonough, Miller, Fahimi & Balsara, 2018). Na Figura 1 comparam-se as duas categorias, capacitiva e indutiva, conforme o tipo de aplicação, faixa de frequência e distância de alcance do sinal.

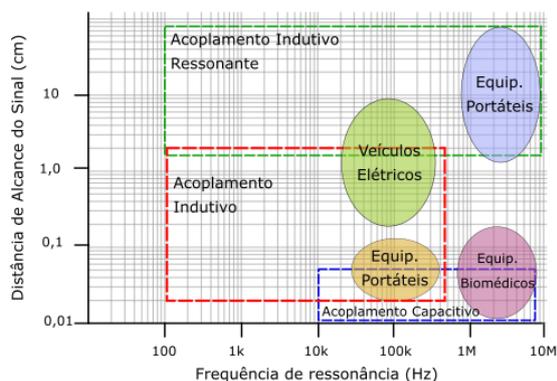


Figura 1. Comparação das tecnologias de transferência de potência sem contato elétrico quanto à frequência de operação, o alcance do sinal (distância entre o receptor e o emissor, faixas definidas na Tabela 1) e os tipos de aplicações. Fonte: Adaptado de Patil, McDonough, Miller, Fahimi e Balsara (2018) e Fernandes e de Oliveira Jr (2014).

Analisando a Figura 1 pode-se concluir que nas aplicações para carregamento de baterias de veículos elétricos predomina a tecnologia de acoplamento indutivo compreendida em uma faixa de frequência entre 20kHz e 150kHz. Visando a interoperabilidade entre esses sistemas, a SAE J2954/1 especifica a frequência nominal de 85kHz para veículos leves. Segundo a literatura, a maior incidência do uso da tecnologia indutiva em aplicações de veículos elétricos se justifica pela maior potência de saída, necessária para reduzir o tempo de carregamento das baterias. Além

disso, conforme apresentado na Figura 2, essa tecnologia transfere potência a distâncias maiores se comparada à tecnologia de acoplamento capacitivo. (Elliott, Boys & Green, 1995; Wang, Covic & Stielau, 2004; Covic, Boys, Kissin & Lu, 2007; Raabe, Boys & Covic, 2008; Villa, Sallán, Osório & Llombart, 2012; Fernandes & de Oliveira Jr, 2014; Kalwar, 2017; Patil, McDonough, Miller, Fahimi & Balsara, 2018; Venugopal et al., 2018).

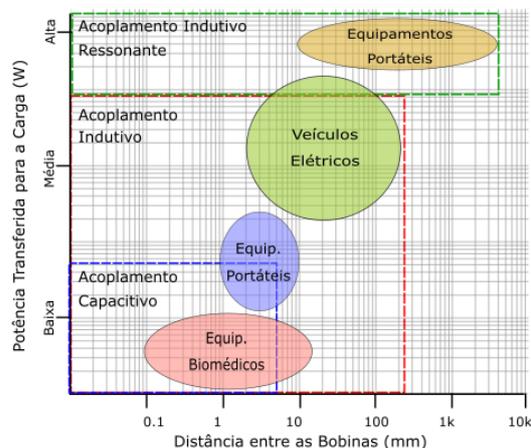


Figura 2 - Comparação das tecnologias de transferência de potência sem contato elétrico quanto à potência transferida para a carga, o alcance do sinal (distância entre o receptor e o emissor) e os tipos de aplicações. Fonte: Adaptado de Patil, McDonough, Miller, Fahimi e Balsara (2018) e Fernandes e de Oliveira Jr (2014).

Na Tabela 1 apresenta-se um breve comparativo entre as tecnologias capacitiva e indutiva. Do ponto de vista de alcance do sinal, ou seja, distância entre o receptor e o emissor observando a Tabela 1 podemos concluir que a tecnologia capacitiva não é adequada, por exemplo, para o carregamento de veículos elétricos em movimento (tecnologia de carregamento dinâmico), pois só é capaz de transferir potência a curtas distâncias, até 5 mm, enquanto que a indutiva consegue transferir potência em distâncias de até 2 metros (Kazmierkowski & Moradewicz, 2012).

Tabela 1. Comparativo entre as características das tecnologias de acoplamento indutivo e capacitivo.

Características	Acoplamento Capacitivo	Acoplamento Indutivo
Potência Transmitida (W)	1-50	1 – 200k
Eficiência η (%)	50 - 80	80 - 90
Distância entre o emissor e o receptor (cm)	0,01-0,05 (Curta)	0,02-200 (Média)
Frequência de chaveamento do conversor	De 100k até MHz	De 20k até MHz
Propriedades	Capaz de penetrar em metais Perdas de Potência Reduzida EMI Curtas Distâncias	Não penetra em metais Alta eficiência Alta EMI Médias Distâncias

A maioria dos estudos para aplicações em carregamento de baterias para veículos elétricos utiliza a distância média de 150 mm entre o receptor e o emissor (Sallán, Villa, Llombart & Sanz, 2009; Park, Lee, Jeong, Cho & Rim, 2015; Lu, Zhang, Hofmann & Mi, 2016). Em (Lu, Zhang, Hofmann & Mi, 2016) é transmitida uma potência de 2,84 kW a uma distância de 150 mm, com eficiência de 94,5% combinando as tecnologias capacitiva e indutiva. Os resultados dessa referência mostram que sistemas indutivos-capacitivos são uma solução em potencial para aplicações de carregamento de baterias de veículos elétricos, pois são capazes de transferir potência com alta eficiência, devido ao seu fator de potência ser quase unitário, independentemente das condições da carga. Isso ocorre porque o circuito ressonante dessa topologia funciona como uma fonte de corrente, não sendo afetado por variações na tensão da bateria, por exemplo. Li, Tang, Dai, Deng e Su (2018) também conduziram estudos combinando as duas tecnologias, porém cada uma com objetivos distintos e operando de forma paralela. A tecnologia indutiva foi utilizada para transmissão de potência e a capacitiva para transmissão de dados. Os resultados mostram que a transferência de dados não interfere na transmissão de potência, resultado que demonstra um potencial para o uso de sistemas de comunicação e carregamento sem fio permitindo a comunicação entre o sistema *off-board* e *on-board* paralelamente ao processo de carga.

Devido à tecnologia indutiva predominar atualmente em aplicações de carregamento de baterias de veículos elétricos o presente artigo abordará unicamente essa tecnologia.

2.1 Introdução à Teoria do Acoplamento Indutivo

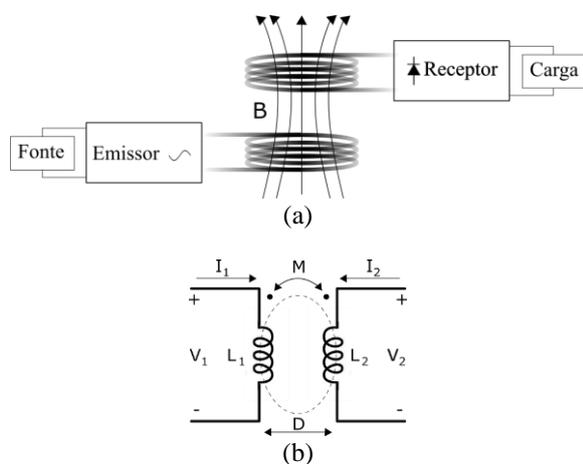


Figura 3 - Sistema de Transferência Indutiva de Potência (TIP) (a) esquema simplificado, onde B é o fluxo magnético; (b) Indutância mútua M em um transformador TIP. D é a distância entre as bobinas.

O princípio básico de funcionamento da transferência indutiva de potência (TIP) pode ser explicado a partir da teoria de transformadores. Um transformador ideal transfere potência do enrolamento primário para o enrolamento secundário através de um núcleo

magnético. Em um sistema TIP o núcleo magnético é removido e a transferência de potência ocorre através do ar conforme apresentado na Figura 3.

O comportamento do sistema de transferência indutiva de potência da Figura 3 pode ser analisado através do modelo de acoplamento indutivo para o transformador TIP apresentado na Figura 4. No modelo, o enrolamento do primário (emissor) do transformador TIP está representado pela resistência R_1 em série com a indutância L_1 , assim como o enrolamento do secundário (receptor) está representado pela resistência R_2 e pela indutância L_2 conectadas em série. R_L é a resistência da carga e V_2 é a tensão nos terminais da carga.

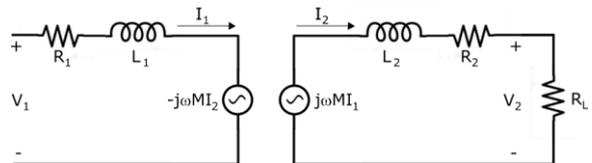


Figura 4 - Modelo de Acoplamento Indutivo para o transformador TIP.

Assumindo-se que a tensão e a corrente são senoidais, as fontes $-j\omega MI_2$ e $+j\omega MI_1$ representam o acoplamento entre os circuitos do emissor (1) e do receptor (2). Onde as correntes I_1 e I_2 representam, respectivamente, os fasores corrente do emissor e do receptor, ω é a frequência angular da fonte de tensão V_1 e M a indutância mútua entre as bobinas. Devido ao núcleo de ar entre os circuitos, a indutância mútua M é um importante fator de análise dos sistemas TIP, pois representa a quantidade de potência transferida entre as bobinas. A indutância mútua M entre dois circuitos elétricos, C_1 e C_2 , pode ser calculada a partir da equação de Neumann (Pichorim & Abatti, 2004; Sallán, Villa, Llombart & Sanz, 2009).

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{dl_1 dl_2}{|R_{12}|} \quad (1)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do meio, no caso o vácuo, dl_1 e dl_2 são os segmentos infinitesimais de cada circuito e R_{12} é a distância entre circuito primário e o secundário.

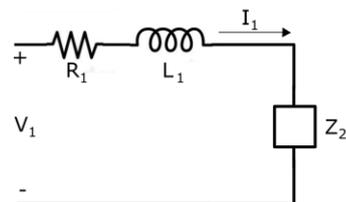


Figura 5 - Circuito equivalente do transformador TIP com a impedância do secundário refletida para o circuito do primário.

Para se verificar como o circuito primário influencia o secundário, o modelo da Figura 4 é substituído por um circuito equivalente, calculando-se a impedância equivalente do circuito secundário, Z_2' , vista pelo primário.

$$Z_2' = \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} \quad (2)$$

Onde Z_2 é dado pela equação (3).

$$Z_2 = R_2 + R_L + j\omega L_2 \quad (3)$$

Substituindo Z_2 no circuito do primário obtém-se o circuito equivalente da Figura 5.

A impedância equivalente do circuito da Figura 5 pode ser obtida através da equação (4).

$$Z_{eq} = R_1 + j\omega L_1 + Z_2 \quad (4)$$

Substituindo (2) e (3) em (4), obtém-se a equação da impedância equivalente Z_{eq} .

$$Z_{eq} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L + j\omega L_2} \quad (5)$$

Uma análise do circuito da Figura 4, considerando que no secundário a relação entre a corrente I_2 e a indutância mútua M é dada pela equação (6), mostra que uma redução em M reduz a corrente I_2 que flui através do circuito do secundário afetando a potência transferida para a carga R_L .

$$I_2 = \frac{j\omega M I_1}{R_2 + R_L + j\omega L_2} = \frac{j\omega M I_1}{Z_2} \quad (6)$$

A máxima potência ativa (P_2) que pode ser transferida para a carga R_L por um sistema TIP depende da corrente de curto circuito (I_{CC}) e da tensão de circuito aberto (V_{CA}) no circuito do receptor. Os valores de V_{CA} , I_{CC} e P_2 podem ser calculados, respectivamente, pelas equações (7), (8) e (9).

$$V_{CA} = \omega M I_1 \quad (7)$$

$$I_{CC} = \frac{M I_1}{L_2} \quad (8)$$

$$P_2(\omega) = \frac{1}{2} V_{CA} I_{CC} \quad (9)$$

Se o circuito possuir uma compensação LC (ressonante), a potência poderá ser escrita em função do fator de qualidade Q do circuito receptor, identificado por Q_2 neste trabalho. Esse fator representa a razão entre a energia armazenada e a energia dissipada no circuito quando este estiver operando na frequência de ressonância ω_0 . Quanto maior for o valor de Q , maior será a capacidade do circuito de armazenar energia e menores serão as suas perdas. Em outras palavras, quanto maior for o valor de Q mais eficiente será o sistema TIP (Covic & Boys, 2013; Fernandes, 2015). A equação (9) apresenta potência P_2 escrita em função do fator Q_2 .

$$P_2(\omega_0) = Q_2 V_{CA} I_{CC} \quad (10)$$

Substituindo-se (7) e (8) em (10), obtém-se o valor da potência P_2 em função dos parâmetros Q_2 , M , L_2 da frequência de ressonância ω_0 .

$$P_2(\omega_0) = (\omega_0 M I_1) \left(\frac{M I_1}{L_2} \right) Q_2 = \frac{\omega_0 M^2 I_1^2}{L_2} Q_2 \quad (11)$$

Conforme apresentado na equação (11) a máxima potência transferida por um sistema TIP para uma carga R_L , por exemplo, é inversamente proporcional ao valor da autoindutância do receptor, L_2 . Assim, uma forma de aumentar a eficiência do sistema é maximizar a potência transferida minimizando o valor de L_2 . É importante considerar o valor de M como uma restrição, uma vez que uma redução no valor de L_2 reduz o valor de M e consequentemente a potência transferida. Em Azambuja (2012), simulações mostram que a indutância M controla a tensão V_2 nos terminais da carga independentemente do valor de R_L . Isso ocorre porque a partir de um determinado valor de carga, V_2 tem uma relação linear com a indutância M . Em outras palavras é como se não houvesse carga.

De um modo geral, os sistemas de transferência indutiva de potência típicos são compostos por uma fonte de tensão, uma ponte H, um par de bobinas, um inversor e uma carga, portanto, para projetar sistemas com alta eficiência é necessário definir os parâmetros de cada um desses elementos tais como: distância entre o emissor e o receptor; máxima frequência de operação; tensão no primário; tensão e potência a serem entregues na carga além das dimensões e formato das bobinas. Sendo que a indutância mútua M entre as bobinas depende exclusivamente das propriedades geométricas do circuito (Bueno & Assis, 1998).

2.2 Geometria das Bobinas

Em aplicações de carregamento de baterias de veículos elétricos (EV) utilizam-se basicamente dois formatos de bobinas, circular e quadrangular.

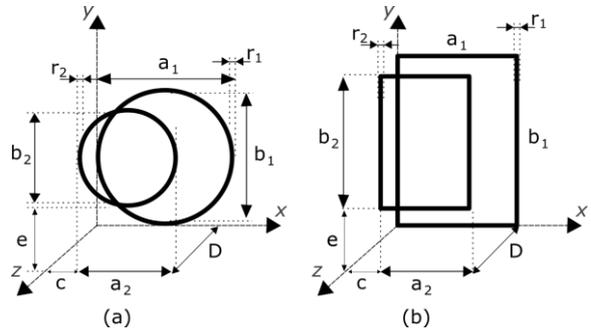


Figura 6 - Topologias básicas de bobinas para sistemas TIP (a) bobina circular adaptado de (Luo & Wei, 2018a) (b) bobina quadrangular adaptado de (Sallán, Villa, Llombart & Sanz, 2009).

Se comparadas as duas topologias, a bobina quadrangular apresenta uma área indutiva maior do que a circular se ambas forem do mesmo tamanho, ou seja, o comprimento do lado quadrado é igual ao diâmetro do círculo. Por outro lado, a geometria circular apresenta uma vantagem em relação à quadrangular por possuir uma simetria cilíndrica que permite uma distribuição uniforme do fluxo magnético e, portanto, um acoplamento melhor entre as bobinas. O formato circular, segundo a literatura, é o mais utilizado

justamente devido a esse melhor acoplamento entre as bobinas, o que resulta numa maior eficiência na transferência de potência (Fernandes, 2015, Godoy et al., 2016; Venugopal et al., 2018).

Enrolamentos quadrangulares apesar de ser menos eficientes apresentam maior tolerância a desalinhamentos entre o emissor e o receptor. Essa característica representa uma vantagem dessa geometria quando aplicada a sistemas de carregamento dinâmicos onde o receptor, que está em movimento, varia sua posição em relação ao emissor. (Sallán, Villa, Llombart & Sanz, 2009; Bi et al., 2016; Lu, Zhang, Hofmann & Mi, 2016; Luo & Wei, 2018a).

A escolha do formato das bobinas irá influenciar nos principais parâmetros de um sistema TIP, como por exemplo a sua eficiência (Chen, Liu, Lee & Shan, 2016). Uma vez definido o formato da bobina o próximo passo é calcular o valor da indutância mútua M.

A partir da fórmula de Neumann, equação (1), o valor de M pode ser calculado conforme aproximação proposta por Sallán, Villa, Llombart e Sanz (2009).

$$M = k\sqrt{L_1L_2} \quad (12)$$

Onde a variável k é o coeficiente de acoplamento magnético e o seu valor depende tanto da distância D entre as bobinas quanto da sua geometria. L₁ e L₂ são as autoindutâncias dos enrolamentos e o seu valor varia, assim como k, com os parâmetros geométricos das bobinas.

a. Bobinas Circulares

Considerando que as duas bobinas da Figura 6a são concêntricas e circulares, os valores das autoindutâncias L₁ e L₂ podem ser calculados a partir da equação (13).

$$L_i = \frac{\mu_o\pi N_i^2 a_i^2}{4l_i} \quad (13)$$

Onde o coeficiente i quando igual a 1, representa a autoindutância do emissor L₁ e quando igual a 2, a autoindutância do receptor L₂. l_i é a altura da casca cilíndrica. N_i é o número de enrolamentos e a_i o diâmetro externo da bobina. μ_o a permeabilidade magnética do meio, no caso o vácuo.

A partir da equação (14) é possível determinar o fator de acoplamento k entre duas bobinas circulares (Kim et al., 2018).

$$k = \frac{\mu_o\pi N_1N_2(a_1a_2)^2}{8\left(\left(\frac{a_1}{2}\right)^2 + D^2\right)^{3/2}\sqrt{L_1L_2}} \quad (14)$$

Onde D é a distância entre o emissor e o receptor e a₁ e a₂ são os diâmetros externos das bobinas. Nos transformadores com núcleo de ar, o valor de k não ultrapassa 0,5 enquanto que nos transformadores com núcleo magnético k têm valor próximo a 1 (Peschiera & Williamson, 2013; Fernandes & de Oliveira Jr, 2014; Murliky, 2017).

b. Bobinas Quadrangulares

Utilizando-se como referência os parâmetros da Figura 6b, o valor da autoindutância pode ser calculado para o formato quadrangular conforme a equação (15).

$$L_i = \frac{\mu_o}{\pi} N_i^2 \left[a_i \cdot \ln \frac{2a_i b_i}{r_i (a_i + \sqrt{a_i^2 + b_i^2})} + b_i \cdot \ln \frac{2a_i b_i}{r_i (b_i + \sqrt{a_i^2 + b_i^2})} - 2\left(a_i + b_i - \sqrt{a_i^2 + b_i^2}\right) + 0,25(a_i + b_i) \right] \quad (15)$$

Onde o coeficiente i indica se a bobina é do emissor (1) ou do receptor (2). μ_o é a permeabilidade no vácuo e N_i o número de espiras da bobina. As dimensões a_i, b_i e r_i representam, nessa ordem, largura externa, comprimento externo e espessura do enrolamento. A equação (15) foi proposta por Sallán, Villa, Llombart e Sanz (2009) a partir da equação de Neumann.

Na literatura foram encontrados diversos estudos comparativos entre as duas geometrias. Em Nataraj, Khan, Habaebi e Muthalif (2017) foram comparadas três estruturas: circular, quadrada e retangular. Os resultados tanto experimentais quanto de simulação mostram que as bobinas circulares possuem um desempenho melhor em termos de parâmetros de bobina, tais como indutância mútua, coeficiente de acoplamento, fluxo magnético e campo magnético. Luo e Wie (2018a) compararam o desempenho de estruturas circulares e quadradas em condições de desalinhamento. Os resultados das análises das duas estruturas mostram que em situações onde o desalinhamento lateral é significativo, o coeficiente de acoplamento k sofre um declínio maior nas bobinas quadradas do que nas circulares. Entretanto, o parâmetro k pode ser incrementado quando barras de ferrite são inseridas nessas estruturas, o que resulta num aumento da indutância mutua M em 71,5% e 76%, respectivamente, nas bobinas circulares e nas quadradas. Os autores concluem com base nos parâmetros das duas estruturas que as bobinas quadradas são mais adequadas para aplicações onde há o uso de bases, por exemplo, localizadas no piso para carregamento *wireless* de veículos elétricos.

A análise dos parâmetros que definem a geometria das bobinas mostra que o valor da indutância está diretamente relacionado à quantidade de potência reativa que irá circular tanto no lado do emissor quanto no lado do receptor. Para reduzir essa potência reativa e, portanto, aumentar a eficiência do circuito, são utilizadas malhas de compensação que serão discutidas na próxima sessão (Sallán, Villa, Llombart & Sanz, 2009; Duan, Guo & Kwong, 2012; Zhong, Lee & Hui, 2012; Zhao, Huang & Wang, 2015; Zhang et al., 2016; Ziegler, Weber, Heiland & Kraus, 2017; Luo & Wei, 2018a; Luo & Wei, 2018b).

2.3 Topologias de Compensação

Circuitos TIP utilizados para aplicações de carregamento de baterias de veículos elétricos utilizam frequências de operação ω da ordem de quilohertz (kHz) para compensar o baixo acoplamento magnético entre as bobinas, o que resulta numa forte característica indutiva desses circuitos e consequentemente numa alta reatância indutiva circulando tanto pelo lado do emissor quanto do receptor. Pela Lei de Faraday, emissor e receptor operam na mesma frequência. (Fernandes, 2015; Bi et al., 2016; Kim et al., 2018).

A circulação de energia reativa impacta negativamente na eficiência do sistema ao reduzir o nível de potência entregue à carga para o mesmo nível de potência no emissor. Como alternativa para melhorar a eficiência são inseridos elementos capacitivos com o objetivo de compensar esse efeito indutivo e melhorar a sua eficiência. A compensação também permite que o circuito forneça um sinal de tensão ou corrente com valor fixo, além de facilitar a comutação suave dos transistores de potência, o que resulta na redução das perdas devido ao chaveamento e uma consequente melhoria do rendimento dos conversores (Sallán, Villa, Llombart & Sanz, 2009; Bi et al., 2016).

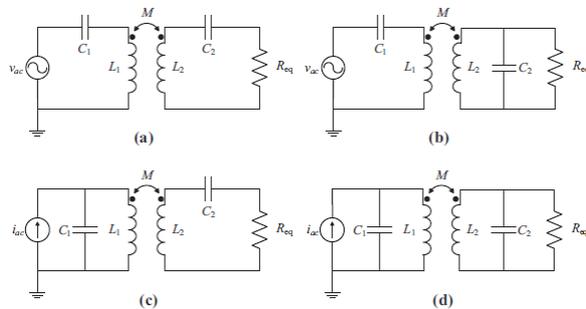


Figura 7 - Topologias de Compensação: (a) SS - Série-Série, (b) SP - Série-Paralelo, (c) PS - Paralelo-Série e (d) PP - Paralelo-Paralelo. (Bi et al., 2016)

Os sistemas TIP podem ser divididos em quatro categorias de acordo com a topologia do circuito de compensação conforme apresentado na Figura 7. Sallán, Villa, Llombart e Sanz (2009) conduziram estudos comparativos entre as quatro categorias e demonstraram que as topologias SS e SP são as de menor custo financeiro para os sistemas de alta potência, pois demandam menos massa de cobre, um metal de alto custo, para os enrolamentos das bobinas. Se comparadas as topologias PS e PP, as compensações SS e SP demandam 20% a menos de massa de cobre do que as primeiras para o mesmo nível de eficiência η (98%). Os resultados também indicaram que para baixos níveis de potência, onde a seção do fio do enrolamento não é um limitador, as topologias PP e PS podem transmitir a distâncias mais longas com a mesma frequência de operação. Segundo Wang, Covic e Stielau (2004) essas mesmas topologias, PP e PS, apresentam uma dependência das condições da carga conectada ao circuito secundário. Isso significa que o cálculo da capacitância da malha de compensação no circuito do primário, chamada de capacitância primária, depende

das condições da carga. Essa dependência do estado da carga não ocorre com as topologias SS e SP.

Os resultados dos estudos anteriores sugerem que a compensação SS, é a mais adequada para aplicações de carregamento de veículos elétricos devido a três fatores principais: 1) sendo garantidas as condições de ressonância, é indicada para cargas variáveis (Peschiera & Williamson, 2013); 2) menor custo em função da menor massa de cobre (Sallán, Villa, Llombart & Sanz, 2009) e 3) conforme a Tabela 2, na topologia SS o cálculo da capacitância primária C_1 é o único que não depende do coeficiente de acoplamento, sendo esta indiferente às variações da distância entre o emissor e o receptor. (Wang, Covic & Stielau, 2004; Fernandes, 2015; Bi et al., 2016; Kim et al., 2018).

Tabela 2. Cálculo das capacitâncias do primário C_1 para as diferentes topologias apresentadas na Figura 5. Adaptado de Wang, Covic e Stielau (2004).

Topologias	Capacitância Primária C_1
SS - Série-Série	$\frac{L_2 C_2}{L_1}$
SP - Série-Paralelo	$\frac{L_2^2 C_2}{L_1 L_2 - M^2}$
PS - Paralelo-Série	$\frac{L_2 C_2}{L_1 + \frac{M^4}{L_1 L_2 C_2 R_L^2}}$
PP - Paralelo-Paralelo	$\frac{L_2^2 C_2 (L_1 L_2 - M^2)}{(L_1 L_2 - M^2)^2 + \frac{M^4 C_2 R_L^2}{L_2}}$

A compensação em série (S), devido à natureza do seu elemento capacitivo, requer tensões mais altas e correntes mais baixas se comparada à compensação em paralelo (P). Combinações série-paralelo de capacitores permitem adequar os níveis de tensão e corrente dos circuitos (Azambuja, 2012; Villa, Sallan, Osorio & Llombart, 2012; Li et al., 2015; Murliky, 2017).

Propostas de topologias de compensação alternativas às apresentadas na Figura 7 foram preconizadas por diversos autores com o objetivo de aumentar a eficiência e a energia disponível para a carga. O trabalho de Villa, Sallan, Osorio e Llombart (2012) propôs uma topologia alternativa para melhorar os parâmetros do sistema TIP mesmo quando há um grande desalinhamento entre as bobinas. A proposta combina as topologias SS e SP, resultando numa compensação com três capacitores série-paralelo-série (SPS), sendo dois capacitores no primário e um no secundário. A compensação SPS, se comparada a SS, transfere a mesma potência para carga mesmo para um desalinhamento de 25% da largura da bobina receptora. Em Azambuja (2012) foi proposta uma topologia de compensação com quatro capacitores. Os resultados para essa configuração apresentaram um desempenho 20% melhor, do ponto de vista de potência e eficiência, do que as topologias tradicionais com dois capacitores. Murliky (2017) também propôs uma topologia de

compensação com quatro capacitores na configuração PSSP, dois no primário e dois no secundário. A metodologia proposta tem o objetivo de rastrear a máxima potência entregue à carga variando os valores da frequência e da capacitância em série no primário conforme a variação do desalinhamento entre as bobinas, assim como ocorre quando o receptor está em movimento em relação ao emissor. Os resultados mostram que o método proposto mantém o fator de acoplamento k constante para diferentes alinhamentos entre as bobinas.

3 Conclusão

Este artigo teve como objetivo explorar dois importantes aspectos da tecnologia de transferência indutiva de potência: a geometria das bobinas, que influencia tanto na quantidade de potência transferida para a carga quanto na tolerância aos desalinhamentos entre as bobinas; e a topologia de compensação do circuito, que afeta a eficiência do sistema. Esses dois aspectos contribuem para o melhor entendimento do maior desafio de um sistema TIP, que é transferir potência para a carga com o máximo de eficiência, com o máximo de tolerância a possíveis desalinhamentos entre as bobinas e respeitando os limites construtivos dos circuitos. Dentro dos parâmetros de um sistema TIP a indutância mútua M é o mais importante. O seu comportamento pode ser analisado, através da equação de Neumann, para cada geometria de bobina.

Tendo em vista os aspectos analisados neste artigo, pode-se concluir que as estruturas circulares são mais eficientes, porém menos tolerantes ao desalinhamento entre as bobinas do que as estruturas quadrangulares. Assim, em aplicações onde o receptor está em movimento em relação ao emissor, as bobinas quadrangulares apresentam melhores resultados em relação às circulares.

A análise das diferentes topologias tanto das bobinas quanto das malhas de compensação, sugere que para aplicações de carregamento das baterias dos veículos elétricos a compensação SS é a mais adequada devido, principalmente, à sua independência do valor da carga.

Referências Bibliográficas

Azambuja, R. (2012). Avanços no desempenho de circuitos acoplados indutivamente com compensação capacitiva e ajuste da frequência. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.

Bi, Z., Kan, T., Mi, C. C., Zhang, Y., Zhao, Z., & Keoleian, G. A. (2016). A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility. *Applied Energy*, 179, 413-425.

Bueno, M., & Assis, A. K. T. (1998). Cálculo de indutância e de força em circuitos elétricos. Editora da UFSC/Editora da UEM, Florianópolis/Maringá.

Chen, W., Liu, C., Lee, C. H., & Shan, Z. (2016). Cost-effectiveness comparison of coupler designs of wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging. *Energies*, 9(11), 906.

Covic, G. A., Boys, J. T., Kissin, M. L., & Lu, H. G. (2007). A three-phase inductive power transfer system for roadway-powered vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(6), 3370-3378.

Covic, G. A., & Boys, J. T. (2013). Inductive power transfer. *Proceedings of the IEEE*, 101(6), 1276-1289.

Delgado, F., Resende, L., Abreu, M. W. D., Silva, T. D. F. B. D., Freitas, B. M. R. D., Roitman, T., ... & Silva, J. F. F. G. D. (2017). Caderno de Carros Elétricos. FVG ENERGIA, ANO 4. Nº 7. ISSN 2358-5277. Maio 2017

Duan, Z., Guo, Y. X., & Kwong, D. L. (2012). Rectangular coils optimization for wireless power transmission. *Radio Science*, 47(3).

Elliott, G. A. J., Boys, J. T., & Green, A. W. (1995). Magnetically coupled systems for power transfer to electric vehicles. In *Power Electronics and Drive Systems, Proceedings of 1995 International Conference on IEEE*, 797-801).

Fernandes, R. C., de Oliveira Jr., A. A., (2014). Tópicos Seleccionados sobre o Estado-da-Arte em Transferência Indutiva de Potência. *Revista Eletrônica de Potência*, 19(1), 058-071.

Fernandes, R. C. (2015). Elementos magnéticos fracamente acoplados para aplicação em transferência indutiva de potência: procedimentos e critérios de projeto, análise de sensibilidade e condições de bifurcação. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil.

Godoy, R. B., Maddalena, E. T., Lima, G. F., Ferrari, L. F., Torres, V. L. V., & Pinto, J. O. P. (2016). Wireless charging system with a non-conventional compensation topology for electric vehicles and other applications. *Eletrônica de Potência*, 21(1), 42-51.

Kalwar, K. A. (2017). A design method for developing a high misalignment tolerant wireless charging system for Electric vehicles. *Measurement*.

Kazmierkowski, M. P., & Moradewicz, A. J. (2012). Unplugged but connected: Review of contactless energy transfer systems. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 6(4), 47-55.

Kim, D., Abu-Siada, A., & Sutinjo, A. (2018). State-of-the-art literature review of WPT: Current limitations and solutions on IPT. *Electric Power Systems Research*, 154, 493-502.

- Kim, J., Kim, J., Kong, S., Kim, H., Suh, I. S., Suh, N. P., ... & Ahn, S. (2013). Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system. *Proceedings of the IEEE*, 101(6), 1332-1342.
- Li, X., Tang, C., Dai, X., Deng, P., & Su, Y. (2018). An inductive and capacitive combined parallel transmission of power and data for wireless power transfer systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(6), 4980-4991.
- Li, W., Zhao, H., Li, S., Deng, J., Kan, T., & Mi, C. C. (2015). Integrated LCC Compensation Topology for Wireless Charger in Electric and Plug-in Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(7), 4215-4225.
- Lu, F., Zhang, H., Hofmann, H., & Mi, C. C. (2016). An inductive and capacitive combined wireless power transfer system with LC-compensated topology. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(12), 8471-8482.
- Luo, Z. & Wei, X. (2018a). Analysis of Square and Circular Planar Spiral Coils in Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 331 - 341.
- Luo, Z., & Wei, X. (2018b). Theoretical Analysis of Planar Spiral Coils between Two Multilayer Media for Electric Vehicle Wireless Charging. *Energies*, 11(4), 693.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto>>. Acesso em: 22 Mar. 2018.
- Murliky, L. (2017). Estudo de compensação de desalinhamentos de bobinas em um sistema de transmissão de energia sem fios. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Brasil.
- Nataraj, C., Khan, S., Habaebi, M. H., & Muthalif, A. G. (2017). Analysis of mutual inductance and coupling factor of inductively coupled coils for wireless electricity. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(13), 4007-4012.
- Park, C., Lee, S., Jeong, S. Y., Cho, G. H., & Rim, C. T. (2015). Uniform power I-type inductive power transfer system with DQ-power supply rails for on-line electric vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11), 6446-6455.
- Patil, D., McDonough, M. K., Miller, J. M., Fahimi, B., & Balsara, P. T. (2018). Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 3-37.
- Peschiera, B., & Williamson, S. S. (2013, November). Review of inductive power transfer technology for electric and plug-in hybrid electric vehicles. In *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE* (pp. 4672-4677). IEEE.
- Pichorim, S. F., & Abatti, P. J. (2004). Design of coils for millimeter-and submillimeter-sized biotelemetry. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(8), 1487-1489.
- Raabe, S., Boys, J. T., & Covic, G. A. (2008, June). A high power coaxial inductive power transfer pickup. In *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE* (pp. 4320-4325). IEEE.
- Sallán, J., Villa, J. L., Llombart, A., & Sanz, J. F. (2009). Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6), 2140-2149.
- USPTO. United States Patent and Trademark Office. Disponível em: <<https://www.uspto.gov/>>. Acesso em: 16 Fev. 2018.
- Venugopal, P., Shekhar, A., Visser, E., Scheele, N., Mouli, G. R. C., Bauer, P., & Silvester, S. (2018). Roadway to self-healing highways with integrated wireless electric vehicle charging and sustainable energy harvesting technologies. *Applied Energy*, 212, 1226-1239.
- Villa, J. L., Sallan, J., Osorio, J. F. S., & Llombart, A. (2012). High-misalignment tolerant compensation topology for ICPT systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 945-951.
- Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2013). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151-2169.
- Wang, C. S., Covic, G. A., & Stielau, O. H. (2004). Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems. *IEEE transactions on industrial electronics*, 51(1), 148-157.
- Zhao, J. F., Huang, X. L., & Wang, W. (2015). Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with three-dimensional transmitters. *Journal of Applied Physics*, 117(17), 17B516.
- Zhang, X., Yuan, Z., Yang, Q., Li, Y., Zhu, J., & Li, Y. (2016). Coil design and efficiency analysis for dynamic wireless charging system for electric vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(7), 1-4.
- Zhong, W. X., Lee, C. K., & Hui, S. Y. (2012). Wireless power domino-resonator systems with noncoaxial axes and circular structures. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(11), 4750-4762.
- Ziegler, C., Weber, S., Heiland, G., & Kraus, D. (2017, May). Influences of WPT-Coil Losses and Coupling Coefficient on the Resonance Circuits of Wireless Power Transfer Systems. In *PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of* (pp. 1-7). VDE.