

# Transmissão de energia sem fio multibobinas para dispositivos médicos implantáveis - revisão crítica

Eduardo Felipe Ardigo Braga  
CPGEI  
UTFPR  
Curitiba, Brasil  
ORCID: 0000-0002-2600-9498

Sérgio Francisco Pichorim  
CPGEI - DAELN  
UTFPR  
Curitiba, Brasil  
ORCID: 0000-0003-4380-7499

Caio Marcelo de Miranda  
CPGEI - DAELN  
UTFPR  
Curitiba, Brasil  
ORCID: 0000-0002-3147-2479

**Resumo**—Este trabalho apresenta uma revisão de artigos sobre aplicações de transferência de energia sem fio multibobinas para alimentação de dispositivos médicos implantáveis nos últimos dez anos. Para o levantamento destes artigos, diversas bases de dados foram utilizadas a fim de proporcionar uma consulta mais variada para a coleta dos dados. Uma tabela de comparação foi construída com os dados extraídos dos artigos analisados, assim como dois gráficos para mapeamento das aplicações mais efetivas. Os resultados desta tabela são utilizados para realizar comparações entre as diferentes abordagens utilizadas e para identificar os parâmetros e tecnologias que têm apresentado melhores resultados. Estas comparações podem ser utilizadas para auxiliar na definição de novos trabalhos a serem desenvolvidos. Os resultados obtidos demonstram que a frequência de 13,56 MHz foi a mais utilizada, e a distância mais utilizada está na faixa dos 10 mm. Já a melhor eficiência encontrada foi de 82,4%.

**Palavras-chave**—Transferência de energia sem fio, dispositivos médicos implantáveis, acoplamento indutivo, bobinas.

## I. INTRODUÇÃO

Muitos avanços foram feitos desde os estudos de Nikola Tesla acerca da transmissão de energia sem fio [1]. As pesquisas mais recentes têm demonstrado sistemas de transferência de energia com a aplicação de mais de 2 bobinas, desde que em [2] demonstrou-se que com a aplicação de sistemas multibobinas é possível se alcançar maiores distâncias. Exemplos destas aplicações podem ser vistos em [3]–[15]. No caso, estes sistemas conhecidos como multibobinas têm apresentado melhores resultados se comparados aos sistemas clássicos de duas bobinas, tanto na eficiência atingida, quanto na possibilidade de se operar a maiores distâncias. Porém, como dito em [8], fatores negativos a se considerar nestes novos sistemas, com o objetivo de alcançar a máxima transferência de potência possível, são as perdas nos circuitos intermediários.

Na última década foram desenvolvidas diversas tecnologias com a utilização do acoplamento indutivo para transferência de energia. Há uma extensa literatura de assuntos sobre o tema, desde fundamentações teóricas e equacionamentos, passando por estudos de eficiência em acoplamentos para os mais variados projetos, e chegando até as aplicações práticas das tecnologias propostas.

Surge então a proposta deste trabalho de apresentar as técnicas utilizadas, na última década, em transferência de energia sem fio para dispositivos médicos implantáveis com

sistemas multibobinas, com o objetivo de apresentar comparativos das diversas técnicas, para assim guiar o leitor no início de sua pesquisa nesta área.

Este trabalho contempla aplicações de sistemas com três ou quatro bobinas, a fim de se realizar uma comparação para análise dos melhores métodos e tecnologias para o alcance da máxima eficiência de transferência. O trabalho está organizado como segue. A Seção II apresenta a revisão da literatura utilizada para a fundamentação da pesquisa. A Seção III retrata os métodos utilizados para a realização da mesma. Já a Seção IV apresenta os resultados obtidos pelo levantamento bibliográfico refletidos em uma tabela de comparação que destaca os parâmetros mais importantes para a análise, e a Seção V apresenta a conclusão.

## II. REVISÃO DA LITERATURA

Os trabalhos utilizados nesta pesquisa apresentam diversas abordagens, parâmetros, tecnologias e aplicações em transferência de energia sem fio para dispositivos médicos implantáveis. Os sistemas para transferência sem fio podem ser categorizados em dois métodos: campo próximo e campo distante [16]. Normalmente as aplicações em campo próximo, as quais foram o foco deste trabalho, apresentam melhores resultados de eficiência.

Novas abordagens para esta área estão sempre sendo propostas e desenvolvidas, a fim de se alcançar os melhores resultados para as aplicações, desde que [2] escreveu sobre as vantagens de se utilizar o acoplamento indutivo em uma frequência de ressonância definida, o que gera notáveis melhorias no processo de transmissão de energia. É fato que dois objetos de mesma frequência de ressonância natural, oscilando nesta frequência, tendem a trocar energia de maneira mais eficiente do que quando estão vibrando em frequências diferentes [17]. Por isso, nas aplicações abordadas, os autores selecionam com base em vários fatores uma frequência de ressonância para o sistema operar. Desta forma os requisitos para a máxima transferência de potência são respeitados e a eficiência do sistema é aumentada.

A Figura 1 representa um circuito genérico com 3 bobinas e outro com 4 bobinas de um sistema de transferência de energia sem fio por acoplamento indutivo. Os parâmetros  $M$  representam a indutância mútua entre duas bobinas (a corrente em uma bobina produz uma tensão induzida na outra bobina),

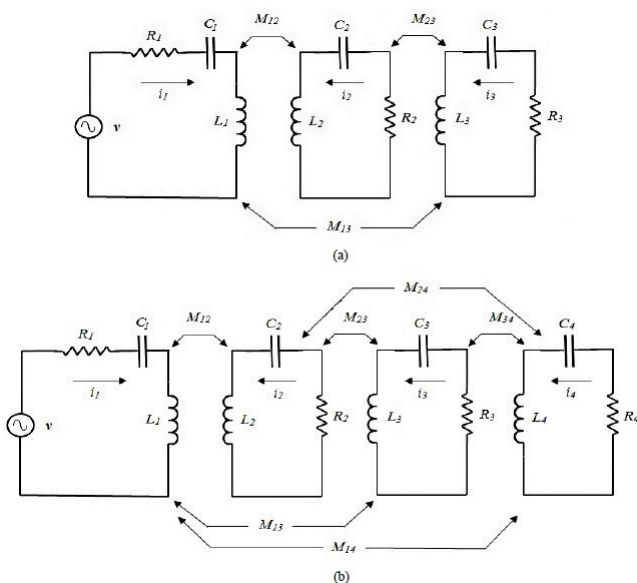


Figura 1. Sistema de transferência de energia sem fio (a) com 3 bobinas (b) com 4 bobinas [8]. Os circuitos mais a esquerda são os primários ou a excitação. Os circuitos mais a direita estão conectados à carga, representada por  $R_3$  ou  $R_4$ , respectivamente. Já os circuitos intermediários são para acoplamento e transferência de energia, e devem ter valores mínimos de resistência.

os parâmetros  $R$  nos circuitos transmissores representam a resistência total dos circuitos (ou seja, todas as perdas que ocorrem nestes circuitos), os parâmetros  $R$  nas bobinas intermediárias demonstram a resistência total existente nas bobinas (ou seja, todas as perdas que ocorrem nestes circuitos), e os parâmetros  $R$  nos circuitos receptores representam a resistência total dos circuitos (as quais englobam as perdas nos circuitos e a resistência das cargas alimentadas).

Na literatura existem estudos que abordam a utilização da autoressonância das bobinas envolvidas. As bobinas possuem indutância própria, que é a propriedade de um circuito elétrico de causar indução de uma tensão proporcional a variação no tempo da corrente [18]. Porém, devido à não-idealidade dos componentes, as bobinas possuem também resistência e capacitâncias parasitas. São essas capacitâncias que possibilitam que um circuito com acoplamento indutivo opere em uma determinada frequência de ressonância sem a necessidade da utilização de capacitores para o mesmo fim.

A transferência de energia sem fio possui uma ampla gama de aplicações onde pode ser utilizada, porém na área biomédica existem alguns desafios adicionais para o correto projeto de um sistema, como os materiais utilizados, frequência de ressonância dentro dos limites permitidos e dimensões dos componentes implantáveis. Nos exemplos citados os diâmetros das bobinas implantáveis variam desde 5 mm em [7] até 35 mm em [4]. Exemplos de utilização são: alimentação de órgãos artificiais [8], neuroestimuladores [6], [7], próteses de retina [3], [12] e dispositivos implantáveis de forma genérica [4], [5], [9]–[11], [13]–[15].

A validação dos resultados encontrados nos trabalhos ana-

lisados é feita, na maioria das vezes, de forma experimental. Normalmente o experimento é realizado utilizando o ar como meio de transmissão, como no caso dos trabalhos de [3], [4], [6]–[9], [11]–[15], pois assim melhores resultados são obtidos, sem a impedância dos tecidos vivos. Alguns autores no entanto realizam os experimentos utilizando tecidos mortos animais, como de bovinos e suínos, para simular uma impedância e tornar os resultados obtidos mais próximos de uma aplicação real, como em [5], [7]. A maioria dos trabalhos abordados apresentam simulação e experimentação, o que gera uma maior credibilidade aos resultados encontrados. Alguns autores apresentam apenas a experimentação, e outros apenas a simulação, como no caso de [10].

A proposta da utilização dos sistemas de transferência nessas aplicações se dá principalmente devido ao objetivo de se excluir as baterias dos dispositivos implantáveis. As baterias, apesar de amplamente utilizadas, são componentes perigosos para o corpo humano, podendo por exemplo ocorrer vazamentos, o que é prejudicial para o organismo do paciente. Outro obstáculo da utilização de baterias nestes sistemas é que, em dispositivos de uso contínuo, pode ser necessária a troca das baterias, acarretando muitas vezes em cirurgias para substituição dos componentes.

Novas pesquisas estão surgindo utilizando tecnologias de bobinas imersas em microfluidos. Estas tecnologias apresentam melhora na eficiência e possibilitam uma melhor adaptação ao corpo do paciente, pois na maioria das vezes são materiais flexíveis, como é exemplificado em [3].

Como pode ser observado na literatura utilizada, existem diversas abordagens para aplicações com multibobinas em dispositivos médicos implantáveis, como visto nos trabalhos de [3]–[15]. Por isso é importante compreender o funcionamento de diferentes abordagens e tecnologias, para que assim os novos autores possuam um cenário mais amplo do que já foi estudado, do que ainda não foi explorado e o que tem apresentado melhores resultados práticos.

Importante destacar que, toda essa fundamentação deriva justamente dos estudos iniciais de Tesla [1], os quais acarretaram em diversos trabalhos teóricos e práticos para chegar ao cenário atual.

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

Como esta revisão foi proposta para apresentar um estudo introdutório sobre o tema, existem dados adicionais que não são apresentados, como por exemplo a descrição correta das técnicas utilizadas em cada aplicação. Portanto, esta serve de base para facilitar e direcionar a uma consulta mais aprofundada sobre as abordagens que interessem ao leitor.

Para o desenvolvimento desta revisão foi realizada uma pesquisa em bases de dados como, Portal de Periódicos da CAPES, IEEE Xplore e SciELO, com buscas em português e em inglês, com o objetivo de se obter um levantamento dos artigos relacionados ao tema, publicados em periódicos e anais de conferências. Esta revisão foi realizada utilizando artigos publicados ao longo da última década, com o objetivo de apresentar um cenário mais recente desta área.

Dentre todos os trabalhos, foram selecionados apenas os que possibilitam sua implementação na área biomédica e que tiveram seus resultados validados através de experimentos e/ou simulações. Desta forma, o presente trabalho ganha uma maior credibilidade por apresentar apenas dados já validados experimentalmente.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da revisão crítica realizada pode ser visto na Tabela I, a qual reflete os dados essenciais para análise e comparação dos parâmetros físicos e elétricos das diferentes técnicas utilizadas. Uma comparação importante a ser observada é a relação entre a distância das bobinas e a eficiência atingida, sempre levando em consideração seus diâmetros, visto que os sistemas foram desenvolvidos para dispositivos implantáveis. As distâncias presentes na Tabela I representam as distâncias no *link* indutivo, ou seja a distância entre a bobina externa e a bobina implantável.

Outros resultados importantes estão representados nas Figuras 2 e 3, nas quais é possível efetuar um mapeamento dos resultados obtidos em trabalhos anteriores para alcançar um resultado satisfatório de comparação. Estes gráficos de dispersão retratam as faixas de distância e frequência que têm sido mais utilizadas e atingido melhores eficiências. A Figura 2 também demonstra que a eficiência não possui correlação com a distância.

Os resultados obtidos foram satisfatórios à proposta do trabalho, pois possibilitam a utilização da Tabela I para definir quais técnicas estão apresentando melhores resultados, e também apresentar nichos em técnicas que podem ser otimizadas com a utilização de outros componentes e parâmetros elétricos. Já as Figuras 2 e 3 apresentam-se como excelentes ferramentas para mapear de maneira clara os avanços obtidos nos últimos anos, e em conjunto com a Tabela I os valores físicos e elétricos que vêm apresentando melhores resultados.

A melhor eficiência encontrada foi no trabalho de [9], onde foi alcançado 82,4% a uma distância de 20 mm e utilizando o ar como meio de transmissão. Já no trabalho de [4] sua técnica foi aplicada para distâncias de 20 a 60 mm, sendo este o de maior distância entre os trabalhos utilizados na comparação, tendo ainda apresentado um resultado satisfatório inclusive na maior distância, onde uma eficiência de 45% foi atingida utilizando o ar como meio de transmissão.

Os dados gerados deixam claro que a distância de 10 mm é a mais utilizada para experimentos entre as abordagens analisadas. É claro que para determinadas aplicações a distância entre as bobinas será maior, porém pode ser observado que 10 mm é um bom índice para se utilizar nos experimentos e posteriormente adequar a cada aplicação específica. Algo semelhante ocorre se tratando da frequência utilizada, a maior parte dos trabalhos utilizou a frequência de 13,56 MHz, porém para cada aplicação uma frequência diferente pode ser exigida.

Os resultados obtidos com a realização deste trabalho foram extremamente satisfatórios com relação a sua proposta, e também com relação a relevância da contribuição que apresenta. Os dados obtidos podem ser utilizados como base para

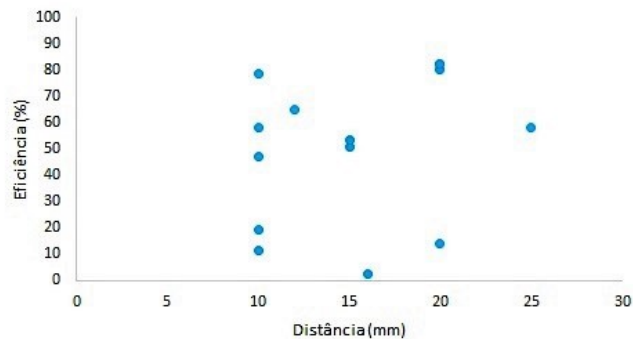


Figura 2. Relação entre eficiência e distância.

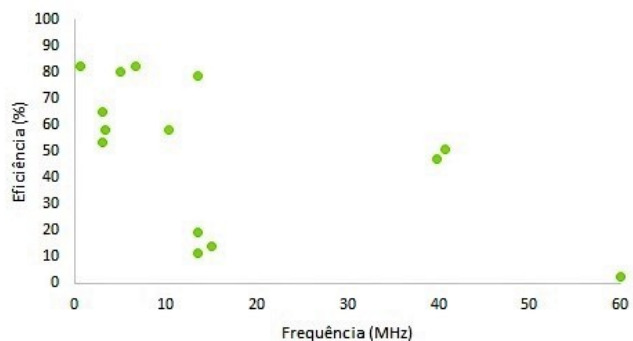


Figura 3. Relação entre eficiência e frequência.

a realização de trabalhos futuros com as mais diversas tecnologias. As análises realizadas devem facilitar muito na definição de pontos importantes para novos trabalhos. Além disso, a revisão bibliográfica apresenta várias tecnologias diferentes que, em conjunto com os resultados, pode direcionar novos autores a definirem e executarem projetos de formas mais condizentes com a aplicação desejada.

#### V. CONCLUSÃO

Neste artigo de revisão, com o objetivo de se obter ferramentas claras para comparação de parâmetros e resultados, foi apresentado um levantamento bibliográfico dos trabalhos relacionados ao tema publicados nos últimos dez anos. Os trabalhos selecionados tiveram seus dados extraídos e apresentados na Tabela I e nas Figuras 2 e 3.

Os resultados apresentados no trabalho demonstram, não apenas o avanço da área nos últimos anos, mas também orientam a uma pesquisa mais aprofundada sobre as abordagens e tecnologias que vêm apresentando melhores resultados. Estes dados possuem extrema importância para a definição de novos parâmetros e abordagens a serem implementados.

Uma sugestão de trabalho futuro é o projeto e desenvolvimento de um sistema de transferência de energia sem fio via bobinas bifilares abertas, com base nos resultados obtidos neste artigo para auxiliar na escolha dos melhores métodos a serem adotados. Esta maneira de enrolamento da bobina apresenta algumas vantagens pelo fato de possuir uma

Tabela I  
PRINCIPAIS PARÂMETROS DAS APLICAÇÕES

Ref	Ano	Nº de bobinas	Frequência (MHz)	Diâmetro do transmissor (mm)	Diâmetro do receptor (mm)	Distância (mm)	Eficiência (%)	Meio de transmissão
[3]	2018	3	40,68	15	5	15	51	Ar
[4]	2018	3	5	70	35	20	80	Ar
[5]	2018	4	39,86	24 e 32	11 e 9	10	47,2	Diversos tipos de tecido
[6]	2017	3	60	45	32 e 1,2	16	2,4	Ar
[7]	2017	4	13,56	30 e 24	5 e 5	10	19,1	Ar
[7]	2017	4	13,56	30 e 24	5 e 5	10	11,7	Músculo
[8]	2016	4	15,07	30	30	20	14	Ar
[9]	2014	3	6,76	37	30	20	82,4	Ar
[10]	2014	4	3,1	40 e 38	15 e 12	15	53,5	Simulação
[11]	2013	3	3	40 e 36	15	12	65	Ar
[12]	2012	3	3,37	36 e 32	15	10	58	Ar
[13]	2011	4	0,7	64	22	20	82	Ar
[14]	2011	3	13,56	43	10 e 9,1	10	78,6	Ar
[15]	2009	4	10,37	25,6	25,6	25	58	Ar

autorressonância em série, o que gera capacitâncias parasitas mais adequadas para as aplicações propostas, no objetivo de se construir circuitos sem capacitores para redução da dimensão das unidades transmissora e, principalmente, receptora [19].

Na verdade, estes resultados podem ser utilizados como fundamentação para outras diversas aplicações, abrindo assim uma grande variedade de possibilidades para se aplicar os dados encontrados.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro obtido durante a realização do trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- [1] N. Tesla, "Apparatus for transmitting electrical energy," 1914.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 1, pp. 83–86, 2007.
- [3] Y. Yao, X. Meng, C. Y. Tsui, and W. H. Ki, "Polyimide-Based Flexible 3-Coil Inductive Link Design and Optimization," *2018 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, APCCAS 2018*, pp. 505–508, 2019.
- [4] M. Machnoor, E. S. G. Rodriguez, P. Kosta, J. Stang, and G. Lazzi, "Analysis and Design of a 3-Coil Wireless Power Transmission System for Biomedical Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018.
- [5] G. Sun, B. Muneer, Y. Li, and Q. Zhu, "Ultracompact Implantable Design with Integrated Wireless Power Transfer and RF Transmission Capabilities," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 281–291, apr 2018.
- [6] S. A. Mirbozorgi, P. Yeon, and M. Ghovanloo, "Robust Wireless Power Transmission to mm-Sized Free-Floating Distributed Implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 692–702, 2017.
- [7] C. L. Yang, C. K. Chang, S. Y. Lee, S. J. Chang, and L. Y. Chiou, "Efficient four-coil wireless power transfer for deep brain stimulation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 7, pp. 2496–2507, jul 2017.
- [8] C. M. Miranda, S. F. Pichorim, and P. S. Ferreira, "Análise e Desenvolvimento de um Link Indutivo Ressonante com 4 Bobinas para fins Biomédicos," in *XXV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, 2016, pp. 476–479.
- [9] Y. Yi, U. Buttner, Y. Fan, and I. G. Foulds, "Design and optimization of a 3-coil resonance-based wireless power transfer system for biomedical implants," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 43, pp. 1379–1390, oct 2015.
- [10] G. Lazzi and A. RamRakhyani, "Interference-free wireless power transfer system for biomedical implants using multi-coil approach," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 12, pp. 853–855, jun 2014.
- [11] A. K. RamRakhyani and G. Lazzi, "On the design of efficient multi-coil telemetry system for biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 11–23, 2013.
- [12] A. K. RamRakhyani and G. Lazzi, "Multicoil telemetry system for compensation of coil misalignment effects in implantable systems," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1675–1678, 2012.
- [13] A. K. RamRakhyani, S. Mirabbasi, and M. Chiao, "Design and optimization of resonance-based efficient wireless power delivery systems for biomedical implants," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 48–63, feb 2011.
- [14] M. Kiani, U. M. Jow, and M. Ghovanloo, "Design and optimization of a 3-coil inductive link for efficient wireless power transmission," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 5, no. 6, pp. 579–591, dec 2011.
- [15] A. Kumar, S. Mirabbasi, and M. Chiao, "Resonance-based wireless power delivery for implantable devices," in *2009 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, BioCAS 2009*, 2009, pp. 25–28.
- [16] R. Shadid and S. Noghianian, "A Literature Survey on Wireless Power Transfer for Biomedical Devices," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, pp. 1–11, apr 2018.
- [17] C. M. de Miranda, "Determinação da frequência de autorressonância por onda estacionária em enrolamentos solenoidais e proposta de um sistema autorressonante de transferência de energia sem fio utilizando bobinas bifilares abertas," Tese, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- [18] S. F. Pichorim, "Estudo de bobinas para sensores e telemetria," pp. 1–36, 2011.
- [19] C. M. Miranda and S. F. Pichorim, "A Self-Resonant Two-Coil Wireless Power Transfer System Using Open Bifilar Coils," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 64, no. 6, pp. 615–619, 2017.