

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CLAUDIO ERNANI DA COSTA PEDROSO JUNIOR

**ANÁLISE TEÓRICA DE BOBINAS INTEGRADAS COM FOCO EM
TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO *NEAR-FIELD***

Alegrete - RS

2023

CLAUDIO ERNANI DA COSTA PEDROSO JUNIOR

**ANÁLISE TEÓRICA DE BOBINAS INTEGRADAS COM FOCO EM
TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO *NEAR-FIELD***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Dra. Natalia Braun Chagas.

Alegrete - RS

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

P372a Pedroso Junior, Claudio Ernani da Costa
Análise Teórica de Bobinas Integradas com Foco em
Transmissão de Energia Sem Fio Near-Field / Claudio Ernani da
Costa Pedroso Junior.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2023.

"Orientação: Natalia Braun Chagas".

1. Wireless Power Transfer. 2. Bobina Planar. 3. Antenna-on-
Chip. 4. Near-Field. 5. Acoplamento Indutivo. I. Título.

CLÁUDIO ERNANI DA COSTA PEDROSO JÚNIOR

ANÁLISE TEÓRICA DE BOBINAS INTEGRADAS COM FOCO EM TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO NEAR-FIELD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Dissertação defendida e aprovada em: 07 de julho de 2023.

Banca examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Natalia Braun Chagas

Orientadora

UNIPAMPA

Prof. Dr. Alessandro Gonçalves Girardi

UNIPAMPA

Prof. Dr. Alessandro Botti Benevides

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ALESSANDRO GONCALVES GIRARDI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2023, às 09:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALESSANDRO BOTTI BENEVIDES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2023, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **NATALIA BRAUN CHAGAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2023, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1166431** e o código CRC **0A0C1D0E**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada acadêmica. Sua graça e orientação têm sido fundamentais para alcançar este marco em minha vida. Sou grato por Sua presença constante, Suas bênçãos e Suas respostas às minhas orações.

À minha mãe, Juscelaine, que tem sido minha maior fonte de inspiração e apoio ao longo de toda a minha vida. Sua dedicação, amor incondicional e encorajamento constante foram fundamentais para eu alcançar este momento. Sua presença e incentivo foram essenciais para minha caminhada acadêmica, e sou imensamente grato por todo o apoio que ela me proporcionou.

Ao meu padrasto, João, por todo o amor, apoio e dedicação que tem mostrado ao longo dos anos. Desde o momento em que entrou em minha vida, se tornou uma figura paterna exemplar, sempre disposto a oferecer orientação e suporte. Sou verdadeiramente abençoado em tê-lo como pai e mentor.

À minha família, minha companheira, Graziela, e minha sogra, Terezinha, pelo constante encorajamento, apoio emocional e compreensão durante esta jornada acadêmica. Suas palavras de incentivo foram uma fonte de motivação e fortalecimento ao longo do caminho.

À minha orientadora, Natalia Braun Chagas pela orientação dedicada, pelos valiosos *insights* e pelo apoio ao longo de todo o processo. Seu conhecimento e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amados companheiros de quatro patas, Lady, Derpina, Margot, Mintsie, Maria Augusta e Snow, expresse minha profunda gratidão. Sua presença afetuosa e amor incondicional trouxeram alegria e conforto aos meus dias de estudo. Agradeço por serem leais e constantes companheiros, proporcionando momentos de felicidade e alívio durante essa jornada acadêmica.

Aos colegas Arthur, Eduardo e Fabiano que, com amizade, parceria e apoio, foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e pessoal e tornaram essa jornada mais leve.

Aos colegas e professores dos grupos EIRE e GAMA, pelo apoio sempre que necessário.

Aos professores e funcionários da UNIPAMPA, cujas contribuições e ensinamentos enriqueceram minha formação acadêmica.

*”Não adentre a boa noite apenas com ternura,
A velhice queima e clama ao cair do dia,
Fúria, fúria contra a luz que já não fulgura.*

*Embora os sábios, no fim da vida,
saibam que é a treva que perdura,
Pois suas palavras não capturaram a centelha tardia.*

*Não adentram a boa noite apenas com ternura,
Fúria, fúria contra a luz que já não fulgura...”*

(Dylan Thomas)

RESUMO

O presente trabalho consiste em uma análise teórica das bobinas integradas para transmissão de energia sem fio, com ênfase na tecnologia de transmissão *near-field*. O objetivo principal é compreender o funcionamento dessas bobinas e explorar as características e propriedades que influenciam na eficiência da transmissão de energia.

O estudo inicia com uma discussão aprofundada sobre os conceitos de indutância, capacitância e frequência de ressonância, destacando sua importância na transmissão de energia sem fio. Além disso, são abordadas as características e propriedades das bobinas, como sua geometria, número de espiras, resistência e fator de qualidade Q . A geometria da bobina, como o formato e o tamanho, influencia a área de superfície e a distribuição do campo magnético, afetando a capacidade de acoplamento. O material utilizado na construção da bobina deve apresentar alta condutividade elétrica e boas propriedades magnéticas. O número de espiras da bobina influencia sua indutância, e um maior número de espiras geralmente resulta em maior eficiência de transmissão. A resistência elétrica da bobina é um fator a ser considerado, pois afeta a perda de energia por aquecimento. Já o fator Q é uma medida da eficiência da bobina, sendo desejável que tenha um valor alto para minimizar as perdas de energia. Além de discutir as características das bobinas, o trabalho também apresenta metodologias para avaliação desses dispositivos. O estudo evidencia que as bobinas integradas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de sistemas de transmissão de energia sem fio eficientes e viáveis. A compreensão desses conceitos e propriedades oferece *insights* e diretrizes para o projeto e aprimoramento desses dispositivos, contribuindo para o avanço da tecnologia de transmissão de energia sem fio.

Palavras-chaves: *wireless power transfer* (WPT), acoplamento indutivo, ressonância, bobina planar, *antenna-on-chip* (AoC), onda eletromagnética, *near-field*.

ABSTRACT

The present work consists of a theoretical analysis of integrated coils for wireless energy transmission, with emphasis on near-field transmission technology. The main objective is to understand the operation of these coils and explore the characteristics and properties that influence the efficiency of energy transmission.

The study begins with an in-depth discussion of the concepts of inductance, capacitance and resonant frequency, highlighting their importance in wireless power transmission. In addition, the characteristics and properties of the coils are discussed, such as their geometry, number of turns, resistance and quality factor Q . The coil geometry, such as shape and size, influences the surface area and the distribution of the magnetic field, affecting the transfer capacity. The material used in the construction of the coil must have high electrical conductivity and good magnetic properties. The number of coil turns influences its inductance, and a greater number of turns generally results in higher transmission efficiency. The electrical resistance of the coil is a factor to be considered, as it affects the energy loss due to heating. The Q factor, on the other hand, is a measure of the efficiency of the coil, and it is desirable that it have a high value to minimize energy losses. In addition to discussing the characteristics of the coils, the work also presents methodologies for evaluating these devices. The study shows that integrated coils play a key role in the development of efficient and viable wireless power transmission systems. Understanding these concepts and properties offers insights and guidelines for the design and improvement of these devices, contributing for the advancement of wireless power transmission technology.

Key-words: wireless power transfer (WPT), inductive coupling, resonance, planar coil, antenna-on-chip (AoC), electromagnetic wave, near-field.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Experimento estudado em Kurs et al. (2007).	18
Figura 2 – Aplicações da transmissão de energia sem fio. (a) aplicação médica; (b) carregamento de veículos aéreos; e (c) carregamento de veículos elétricos.	24
Figura 3 – Delimitação das regiões dos campos próximo e distante relacionada à quantidade de comprimentos de onda eletromagnética.	25
Figura 4 – Comparação da eficiência entre os diferentes métodos de transmissão de energia sem fio relacionados à distância de transmissão.	25
Figura 5 – Esquemático de um sistema de transmissão de energia sem fio para médias distâncias.	27
Figura 6 – Ilustração do experimento realizado por Faraday.	34
Figura 7 – Ilustração da transferência de energia sem fio por acoplamento indutivo.	34
Figura 8 – Ilustração da transferência de energia sem fio por acoplamento indutivo ressonante com mais de duas bobinas.	38
Figura 9 – Diferentes técnicas de Transmissão de Energia Sem Fio: (a) com uma bobina ressonante; (b) com duas bobinas ressonantes; (c) bobinas em dipolo; (d) matriz de bobinas.	42
Figura 10 – Comparação de bobina externa (a) e bobina integrada (b).	47
Figura 11 – Ilustração da dissipação da radiação eletromagnética em substrato de silício de uma antena dipolo.	48
Figura 12 – Ilustração de dispositivo biomédico para monitoramento remoto da saúde do paciente com a utilização de bobina integrada em chip (AoC).	49
Figura 13 – Vista 3D de uma antena com estrutura AMC fabricada usando tecnologia CMOS padrão de seis camadas de metal de 180 nm	52
Figura 14 – Comportamento de uma onda incidente quando adicionado um AMC entre a bobina e o substrato.	53
Figura 15 – Principais tecnologias de fabricação de circuitos integrados baseadas em silício.	55
Figura 16 – Campos gerados em uma bobina integrada percorrida por corrente.	58
Figura 17 – Corte em perspectiva das componentes de uma bobina integrada.	59
Figura 18 – Modelo equivalente de uma bobina integrada.	59
Figura 19 – Geometrias mais utilizadas para bobinas integradas.	61
Figura 20 – Ilustração do Método de Mohan.	62
Figura 21 – Modelagem da capacitância entre os terminais, exemplo com uma bobina retangular.	66
Figura 22 – Modelagem das características elétricas do substrato.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AoC	<i>Antenna-on-Chip</i>
AMC	Condutor Magnético Artificial, do inglês <i>Artificial Magnetic Conductor</i>
CC	Corrente Contínua
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
DRC	<i>Design Rule Check</i>
FCC	<i>Federal Communication Commission</i>
HIS	Superfície de Alta Impedância, do inglês <i>High-Impedance Surface</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
MOS	Metal-Oxide-Semiconductor
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PDA	Assistente Digital Pessoal, do inglês <i>Personal Digital Assistant</i>
PMC	Condutor Magnético Perfeito, do inglês <i>Perfect Magnetic Conductor</i>
PTE	Eficiência de Transferência de Potência, do inglês <i>Power Transfer Efficiency</i>
RF	Rádio Frequência
SoC	<i>System-on-Chip</i>
WPT	Transmissão de Energia sem Fio, do inglês <i>Wireless Power Transfer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações Gerais	17
1.2	Motivação	19
1.3	Objetivos	20
1.4	Estrutura do Trabalho	21
2	INTRODUÇÃO À TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO	23
2.1	Definição e Histórico da Transmissão de Energia sem Fio	23
2.2	Importância da Transmissão de Energia Sem Fio	26
2.3	Benefícios e Limitações da Transmissão de Energia Sem Fio	28
3	TECNOLOGIAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO <i>NEAR-FIELD</i>	31
3.1	Campos Radiativos e Não Radiativos	31
3.2	Acoplamento Indutivo	33
3.3	Acoplamento Indutivo Ressonante	37
4	BOBINAS PARA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO	41
4.1	Definição e Características das Bobinas	41
4.2	Bobina Transmissora	43
4.3	Bobina Receptora	43
5	REVISÃO DE BOBINAS INTEGRADAS PARA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO	45
5.1	Conceito de Bobinas Integradas	45
5.2	Bobinas Integradas em Dispositivos Biomédicos	48
5.2.1	Benefícios	49
5.2.2	Desafios	50
5.2.3	Soluções	50
6	METODOLOGIAS DE PROJETO	55
6.1	Seleção da Tecnologia de Fabricação	55
6.1.1	Substrato de Arseneto de Gálio	55
6.1.2	Tecnologia CMOS	56
6.1.3	Tecnologia BiCMOS	57
6.2	Comportamento de uma Bobina Integrada	57
6.3	Modelagem de Bobinas Integradas	58

6.4	Método de Cálculo dos Parâmetros	60
6.4.1	Cálculo da Indutância Série pelo Método de Mohan	61
6.4.2	Cálculo da Resistência Série	63
6.4.3	Cálculo da Capacitância entre Terminais	65
6.4.4	Cálculo das Características Parasitas do Substrato	67
6.4.5	Fator de Qualidade	68
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FU-	
	TUROS	69
7.1	Considerações Finais	69
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	70
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

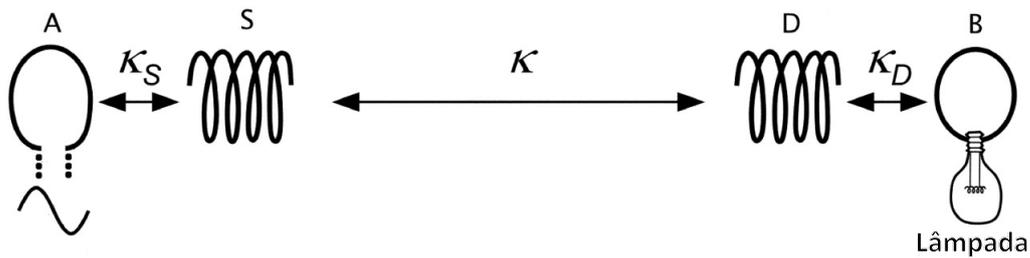
A transmissão de energia sem fio tem despertado um interesse crescente devido à sua aplicabilidade em diversos campos, desde dispositivos eletrônicos portáteis até sistemas de carregamento de veículos elétricos. Nesse contexto, as bobinas integradas desempenham um papel fundamental como componentes-chave na transferência eficiente de energia sem a necessidade de fios ou cabos.

A compreensão das técnicas de projeto, características geométricas, materiais utilizados, eficiência e desempenho das bobinas integradas é essencial para o avanço dessa tecnologia e sua aplicação prática. Ao explorar a literatura especializada, será possível analisar as principais técnicas de projeto utilizadas, considerando fatores como a geometria das bobinas, materiais empregados e considerações de eficiência energética. Além disso, serão abordadas as características fundamentais das bobinas integradas, tais como a resistência, indutância mútua e capacitância parasita, que influenciam diretamente no desempenho do sistema de transmissão de energia.

Na pesquisa de Kurs et al. (2007) intitulada "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances", os pesquisadores exploraram a transferência de energia sem fio por meio do experimento da Figura 1 para alcançar ressonâncias magnéticas fortemente acopladas. O estudo proporcionou uma base teórica e experimental fundamental para o desenvolvimento de sistemas eficientes de transmissão de energia demonstrando que, ao utilizar o acoplamento magnético entre duas bobinas ressonantes, é possível transferir energia de forma eficiente, mesmo a distâncias significativas. Eles identificaram que a chave para alcançar altas eficiências de transferência reside na sintonização adequada das frequências de ressonância das bobinas transmissora e receptora. Os resultados mostraram que, quando as bobinas ressonantes estão alinhadas adequadamente e operam na mesma frequência de ressonância, ocorre um acoplamento forte entre elas. Isso leva a uma transferência eficiente de energia, minimizando perdas por dissipação de campo. Além disso, o estudo abordou considerações práticas, como a otimização do design das bobinas, a compensação de perdas devido a resistência e a minimização de interferências eletromagnéticas. A pesquisa de Kurs et al. (2007) foi um marco importante no campo da transferência de energia sem fio, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas eficientes e abrindo caminho para avanços subsequentes nessa área. Suas descobertas foram fundamentais para impulsionar pesquisas adicionais e aplicações práticas de transferência de energia sem fio.

Para Ki (2017), a tecnologia de WPT tem uma ampla gama de aplicações, abran-

Figura 1 – Experimento estudado em Kurs et al. (2007).



Fonte: Modificado de (KURS et al., 2007).

gendo desde dispositivos médicos implantáveis de baixa potência, como marca-passos e implantes cocleares, até o carregamento de veículos elétricos (EVs) de alta potência. Ele destaca que dispositivos de baixa potência, como marca-passos, requerem um receptor de energia que seja o menos invasivo possível, enquanto próteses de retina e sistemas de registro neural necessitam de centenas ou milhares de canais e potências na faixa de miliwatts. A alta eficiência é essencial para evitar danos aos tecidos, no caso de dispositivos implantáveis. Em aplicações de alta potência, como o carregamento de EVs, diodos e transistores discretos de alta tensão são utilizados para lidar com a potência na faixa de kilowatts. Além disso, a transferência de energia sem fio tem sido explorada em cartões de memória para uso sem a necessidade de contato, oferecendo vantagens como maior taxa de transmissão de dados, ausência de desgaste devido a conexões repetidas e embalagem selada para aumentar a vida útil da memória. Menciona também que a transferência de energia sem fio torna possível o carregamento de drones no ar para estender sua autonomia e a embalagem à prova d'água de dispositivos portáteis sem a necessidade de conectores elétricos. A utilização de tecnologias WPT está à beira de um crescimento exponencial, impulsionada por sua aplicabilidade em diversas áreas.

A revisão bibliográfica proposta visa não apenas fornecer um panorama abrangente das pesquisas existentes, mas também identificar lacunas no conhecimento atual. Com base nessa análise crítica, serão delineadas possíveis direções futuras para o projeto e otimização de bobinas integradas, a fim de aprimorar a eficiência, aumentar o alcance da transmissão e viabilizar sua aplicação em dispositivos de baixa potência e baixa tensão.

Ao concluir esta revisão bibliográfica, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento na área de transmissão de energia sem fio e fornecer subsídios para futuros estudos e desenvolvimentos nesse campo promissor. A compreensão aprofundada das técnicas de projeto, características geométricas, materiais utilizados, eficiência e desempenho das bobinas integradas é essencial para impulsionar a aplicação dessa tecnologia inovadora em diversos setores e impulsionar a evolução de dispositivos eletrônicos sem fio de baixa potência.

1.2 Motivação

Compreender e aprimorar as técnicas de projeto, as características geométricas, os materiais utilizados e as considerações de eficiência e desempenho das bobinas integradas são fatores essenciais para o avanço da tecnologia de WPT e sua aplicação prática em dispositivos de baixa potência e baixa tensão como Sistemas *On-Chip*. Para (CHEEMA; SHAMIM, 2013), as antenas integradas representam um desafio significativo na busca por sistemas completamente integrados, pois, embora o CMOS seja a tecnologia de Circuitos Integrados predominante, não é o mais adequado para bobinas integradas, exigindo abordagens de projeto inovadoras para superar suas limitações. O projeto das antenas integradas é governado por regras específicas de fabricação, e a caracterização dessas antenas requer acessórios de teste especiais. Para alcançar sistemas completamente integrados, as fábricas precisarão fornecer camadas especiais para a implementação eficiente de antenas integradas, assim como já fazem para indutores integrados.

A motivação para a realização deste estudo baseia-se na necessidade de avançar o conhecimento sobre as bobinas integradas e sua aplicação na transmissão de energia sem fio. A compreensão aprofundada das técnicas de projeto, das características geométricas, dos materiais utilizados, das considerações de eficiência e desempenho dessas bobinas é fundamental para otimizar a transferência de energia, aumentar a eficiência do sistema e ampliar seu alcance de aplicação. Além disso, a revisão bibliográfica proposta tem como objetivo identificar lacunas no conhecimento atual e estabelecer bases sólidas para futuras pesquisas e desenvolvimentos nessa área. Ao consolidar o conhecimento existente e fornecer uma visão abrangente das pesquisas realizadas até o momento, espera-se contribuir para o avanço do campo da transmissão de energia sem fio e fornecer subsídios para o desenvolvimento de soluções inovadoras e eficientes no futuro. Através dessa pesquisa, busca-se impulsionar o uso de bobinas integradas como elementos essenciais na transmissão de energia sem fio, permitindo uma maior adoção e viabilidade dessa tecnologia em diversos setores e aplicações. Alguns dos motivos que despertaram interesse na realização deste trabalho são:

- Destacar a relevância do tema no contexto atual, discutir como a transmissão de energia sem fio tem se mostrado uma solução promissora para atender às demandas de dispositivos eletrônicos portáteis e sistemas de carregamento sem fio, e como as bobinas integradas desempenham um papel central na miniaturização desse processo;
- Explicar como o aprimoramento das técnicas de projeto, uso de tecnologias e eficiência das bobinas integradas é essencial para impulsionar a evolução da transmissão de energia sem fio e viabilizar sua aplicação em uma ampla gama de dispositivos de baixa potência e baixa tensão;

- Abordar os benefícios práticos e o impacto que a eliminação do uso de fios e cabos de energia na transmissão de energia sem fio pode melhorar a mobilidade e conveniência dos dispositivos eletrônicos, além de reduzir o consumo de materiais e contribuir para a sustentabilidade;
- Apontar os desafios técnicos e as lacunas de conhecimento existentes no projeto e otimização de bobinas integradas e destacar a importância de aprofundar o entendimento desses aspectos para superar as limitações atuais e alcançar níveis mais altos de eficiência e desempenho; e
- Enfatizar o potencial de pesquisa e inovação que o tema oferece. Discutir como a revisão bibliográfica proposta pode contribuir para consolidar o conhecimento existente, identificar oportunidades de melhoria e estabelecer bases para futuros estudos e desenvolvimentos na área.

1.3 Objetivos

Realizar uma análise aprofundada das pesquisas e desenvolvimentos relacionados ao projeto e otimização de bobinas integradas, que são amplamente utilizadas em sistemas de transmissão de energia sem fio. A revisão englobará estudos sobre as técnicas de projeto, características geométricas, considerações de eficiência e desempenho, entre outros aspectos relevantes. Como objetivos específicos, destacam-se os seguintes:

- Analisar as principais técnicas de projeto utilizadas em bobinas integradas para transmissão de energia sem fio;
- Investigar as diferentes geometrias de bobinas integradas e sua influência no desempenho do sistema de transmissão de energia sem fio;
- Avaliar os materiais mais comumente utilizados na fabricação de bobinas integradas e seus efeitos na eficiência e na transferência de energia;
- Investigar as considerações de eficiência na transmissão de energia sem fio por meio de bobinas integradas, como perdas por resistência, acoplamento magnético e dissipação de calor;
- Comparar os métodos de otimização empregados no projeto de bobinas para maximizar a eficiência da transmissão de energia;
- Analisar o desempenho de sistemas de transmissão de energia sem fio com base em bobinas integradas em relação a fatores como distância de transmissão, potência de transmissão e eficiência energética;

- Explorar as aplicações práticas das bobinas integradas em dispositivos de baixa potência e baixa tensão, identificando os benefícios e os desafios associados a essas aplicações; e
- Identificar as tendências recentes e futuras no projeto e na otimização de bobinas integradas para transmissão de energia sem fio.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos, visando fornecer uma compreensão abrangente e detalhada sobre o tema da transmissão de energia sem fio *near-field* utilizando bobinas integradas. No Capítulo 1, apresentamos uma introdução geral ao trabalho, destacando a importância e relevância do estudo da transmissão de energia sem fio. Também discutimos a motivação por trás do desenvolvimento desse trabalho, bem como os objetivos a serem alcançados. Além disso, é apresentada a estrutura geral do trabalho, fornecendo uma visão geral dos capítulos subsequentes. No Capítulo 2, abordamos de maneira abrangente a transmissão de energia sem fio, apresentando sua definição, histórico e importância. Exploramos os benefícios oferecidos por essa tecnologia, bem como as limitações e desafios associados a ela. Essa visão geral fornece o contexto necessário para o entendimento das bobinas utilizadas nesse tipo de transmissão. No Capítulo 3, concentramos nossa atenção nas tecnologias de transmissão de energia sem fio *near-field*, com foco nos dois principais métodos: acoplamento indutivo e acoplamento indutivo ressonante. Exploramos os princípios básicos por trás dessas tecnologias, destacando suas características e aplicações. No Capítulo 4, aprofundamos nosso estudo nas bobinas utilizadas na transmissão de energia sem fio. Definimos as bobinas transmissoras e receptoras, destacando suas características específicas e seu papel na eficiência da transmissão. Discutimos a importância da geometria, número de espiras e resistência dessas bobinas. No Capítulo 5, realizamos uma revisão detalhada sobre as bobinas integradas para transmissão de energia sem fio. Apresentamos o conceito dessas bobinas e exploramos suas aplicações em dispositivos biomédicos. Discutimos os benefícios oferecidos por essa abordagem, bem como os desafios e soluções associados ao desenvolvimento e otimização dessas bobinas. No Capítulo 6, são abordadas algumas tecnologias de fabricação de sistemas *on-chip*, é explicado como se comporta uma bobina integrada em tecnologia CMOS, como é feita sua modelagem e o cálculo de seus parâmetros desejados e parasitas. Por fim, no Capítulo 7, apresentamos as conclusões finais do trabalho, resumindo os principais pontos discutidos em cada capítulo. Também destacamos as contribuições do estudo e possíveis direções para pesquisas futuras nesse campo promissor da transmissão de energia sem fio.

2 INTRODUÇÃO À TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO

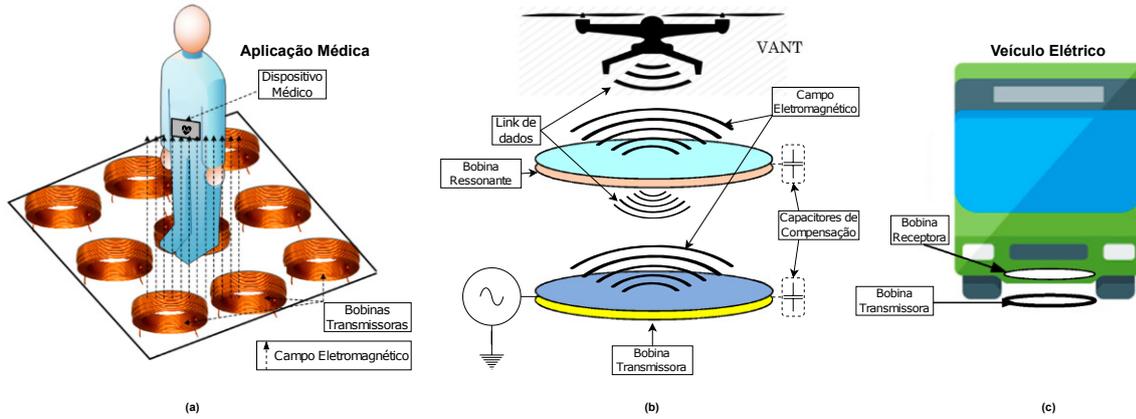
2.1 Definição e Histórico da Transmissão de Energia sem Fio

A transmissão de energia sem fio é a transferência de energia elétrica de uma fonte para um dispositivo elétrico sem a necessidade de fios ou cabos. O conceito de WPT foi proposto pela primeira vez por Nikola Tesla entre 1891 e 1904, quando ele descreveu um sistema de transmissão de energia elétrica sem fio, baseado no acoplamento indutivo, usando ondas eletromagnéticas para transmitir energia elétrica para atender uma carga, porém, as leis responsáveis por definir o comportamento do sistema surgiram antes de 1868 quando James Clerk Maxwell unificou a Lei Circuital de Ampère e a Lei da Indução de Faraday. Posteriormente, em 1884, John Henry Poynting apresentou uma equação matemática para o campo eletromagnético que podia ser aplicada a sistemas de transmissão de energia sem fio. Em 1888, Heinrich Rudolf Hertz, estudou a propagação de ondas eletromagnéticas confirmando as previsões de Maxwell e conseguiu comprovar que ondas eletromagnéticas podem ser geradas por bobinas percorridas por corrente elétrica e detectadas por bobinas receptoras, gerando uma corrente elétrica nessas bobinas. Brown, em 1964, desenvolveu uma rectena capaz de converter ondas eletromagnéticas em energia elétrica de corrente contínua utilizando dos avanços da tecnologia de microondas. Até o ano de 2007 havia um hiáto nas pesquisas na área, a partir deste ano Estados Unidos, Japão, China e Coreia do Sul vem liderando as pesquisas e criando sistemas onde conseguem fazer a transmissão de energia mas ainda com baixa eficiência (JAWAD et al., 2017).

O desenvolvimento de técnicas de WPT avançou lentamente até o final do século XX, quando a indústria de dispositivos móveis começou a procurar maneiras de carregar dispositivos sem a necessidade de fios. Desde então, a tecnologia de WPT tem avançado rapidamente, com o surgimento de técnicas de acoplamento indutivo e ressonante, bem como o uso de campos magnéticos para transferir energia elétrica. Hoje, a WPT é amplamente utilizada ou estudada para várias aplicações, como carregamento de dispositivos móveis, automóveis elétricos, dispositivos biomédicos e sistemas de energia renovável (Figura 2). O uso de WPT também tem o potencial de melhorar a eficiência energética, reduzir a poluição ambiental e aumentar a segurança, eliminando a necessidade de fios e cabos (KURS et al., 2007) e (JAWAD et al., 2017).

A tecnologia de Transferência de Energia sem Fio (WPT) pode ser dividida em duas categorias principais: WPT de campo distante (*Far Field*) e WPT de campo próximo (*Near Field*). No caso do WPT de campo distante, a transferência de energia ocorre entre dois dispositivos separados por uma distância maior que dois comprimentos de onda, exemplificado na Figura 3. Um sistema de WPT é composto por uma unidade transmissora

Figura 2 – Aplicações da transmissão de energia sem fio. **(a)** aplicação médica; **(b)** carregamento de veículos aéreos; e **(c)** carregamento de veículos elétricos.



Fonte: Modificado de (JAWAD et al., 2017).

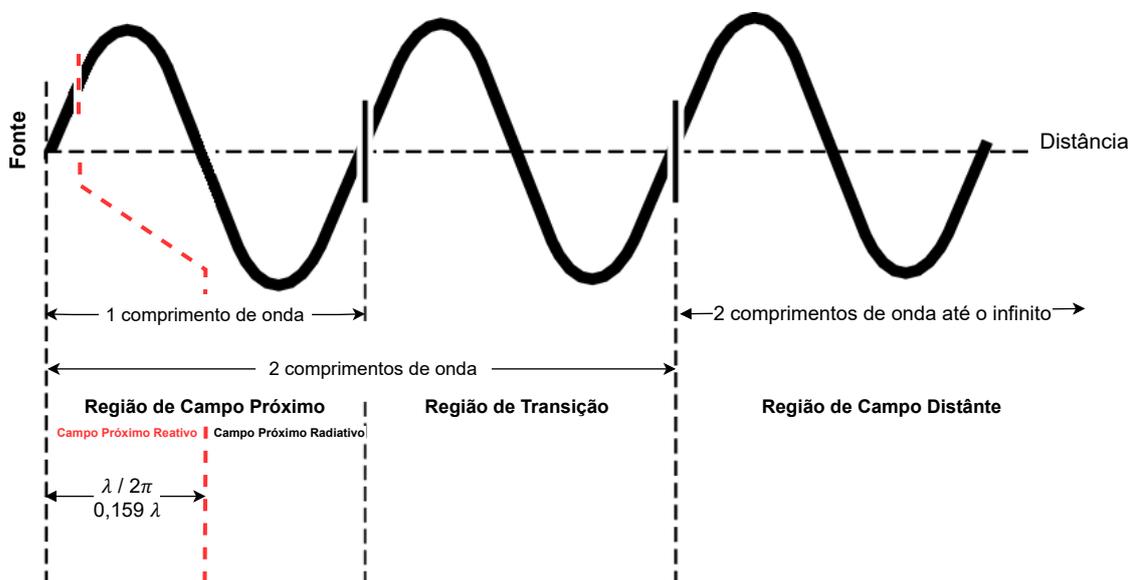
conectada à fonte de energia principal ou a uma bateria, responsável por converter a energia elétrica em um campo eletromagnético. Esse campo pode ser recebido por um ou vários receptores, que convertem novamente a energia em eletricidade para alimentar a carga elétrica. No lado receptor, são utilizados sistemas de acoplamento ou bobinas semelhantes para converter o campo eletromagnético recebido em corrente elétrica, que pode ser coletada para alimentar os dispositivos e permitir seu funcionamento. Dessa forma, a WPT possibilita a transmissão eficiente de energia elétrica sem a necessidade de fios físicos, abrindo caminho para o carregamento sem fio de dispositivos eletrônicos e outras aplicações semelhantes (MOTTA, 2016) e (JAWAD et al., 2017).

A definição de campo próximo e campo distante é referenciada ao comprimento de onda (λ) do campo gerado pela bobina transmissora (KI, 2017), conforme mostra a Figura 3, e tem sua eficiência relacionada à distância da transmissão (Figura 4). Uma transmissão de campo próximo é feita em distâncias contidas no comprimento de onda do campo gerado ($d \ll \lambda$) e possui uma distância ótima diretamente proporcional ao raio da bobina transmissora para transmissão efetiva da energia dada pela Equação 2.1. Existem três configurações principais para o caso de campo próximo que dependem do método de acoplamento utilizado: acoplamento indutivo, acoplamento indutivo ressonante e acoplamento capacitivo.

$$d_{opt} \approx \frac{R}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

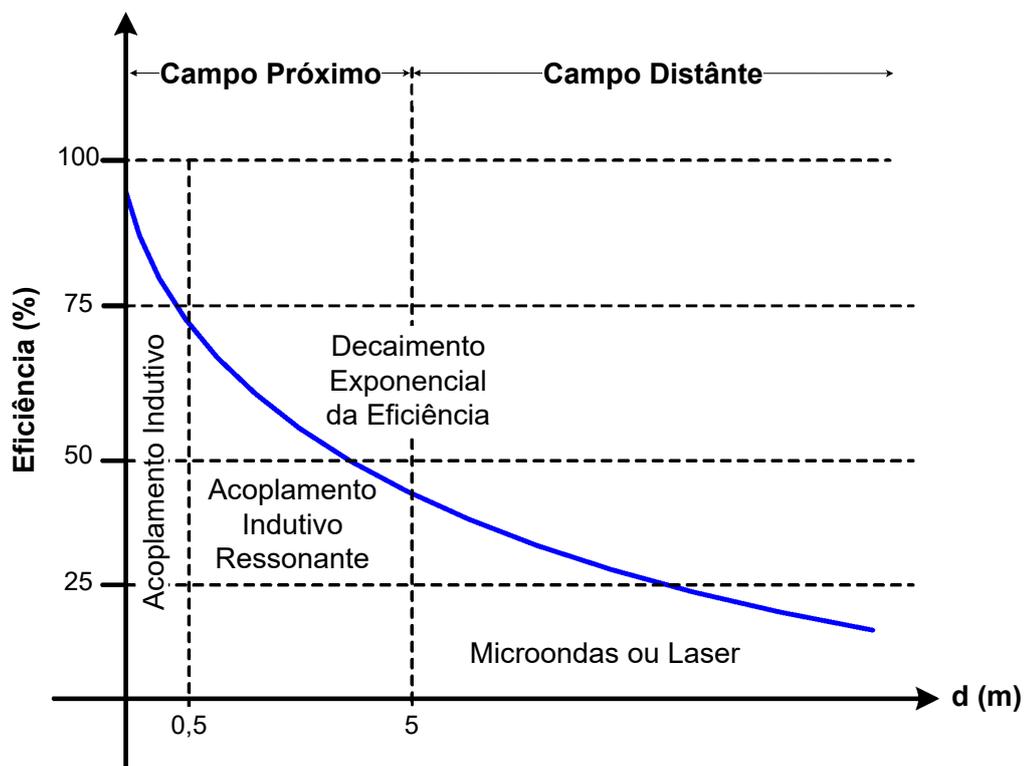
Conforme Jawad et al. (2017), os métodos mais adequados são o acoplamento indutivo e o acoplamento indutivo ressonante. Isso ocorre porque a quantidade de potência transferida no acoplamento capacitivo aumenta com a capacitância entre as placas e a

Figura 3 – Delimitação das regiões dos campos próximo e distante relacionada à quantidade de comprimentos de onda eletromagnética.



Fonte: Modificado de (UMENEI, 2011).

Figura 4 – Comparação da eficiência entre os diferentes métodos de transmissão de energia sem fio relacionados à distância de transmissão.



Fonte: Modificado de (JAWAD et al., 2017).

frequência. Consequentemente, o tamanho total da área da superfície do capacitor será maior, e isso resulta em um tamanho maior do componente, além de exigir tensões mais altas nas placas do capacitor. Portanto, ao considerar a eficiência e o tamanho do sistema, o acoplamento indutivo e o acoplamento indutivo ressonante são os métodos preferidos para a transferência de energia de campo próximo. Essas abordagens oferecem vantagens em termos de eficiência energética e tamanho compacto em comparação com o acoplamento capacitivo, que pode requerer componentes maiores e operar com tensões mais elevadas.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.2)$$

De acordo com Motta (2016), o acoplamento indutivo ou magnético é um fenômeno que ocorre quando duas bobinas são colocadas próximas uma da outra, permitindo que a energia seja transferida de uma bobina para outra por meio de um campo magnético, sendo mais utilizado em transformadores, indutores e sistemas WPT para distâncias muito pequenas. Esse acoplamento é caracterizado pelo coeficiente de acoplamento magnético (k), que é uma medida da quantidade de fluxo magnético que flui de uma bobina para outra. O coeficiente de acoplamento magnético é dependente da indutância mútua (M) e das indutâncias das bobinas (L_1 e L_2), tornando o acoplamento magnético influenciado por fatores como o número de espiras nos enrolamentos, os coeficientes de auto-indução e a distância entre as bobinas, conforme mostram as Equações 2.2, 3.8 e 6.1.

2.2 Importância da Transmissão de Energia Sem Fio

Com o rápido desenvolvimento de dispositivos móveis, como telefones celulares, laptops, assistentes digitais pessoais (PDAs) e dispositivos portáteis, bem como a proliferação de aplicativos baseados em sensores para a Internet das Coisas (IoT), tem havido uma grande atenção voltada para o desenvolvimento de sistemas de carregamento sem fio. Essas aplicações dependem principalmente do acoplamento indutivo de curto alcance no contexto do WPT.

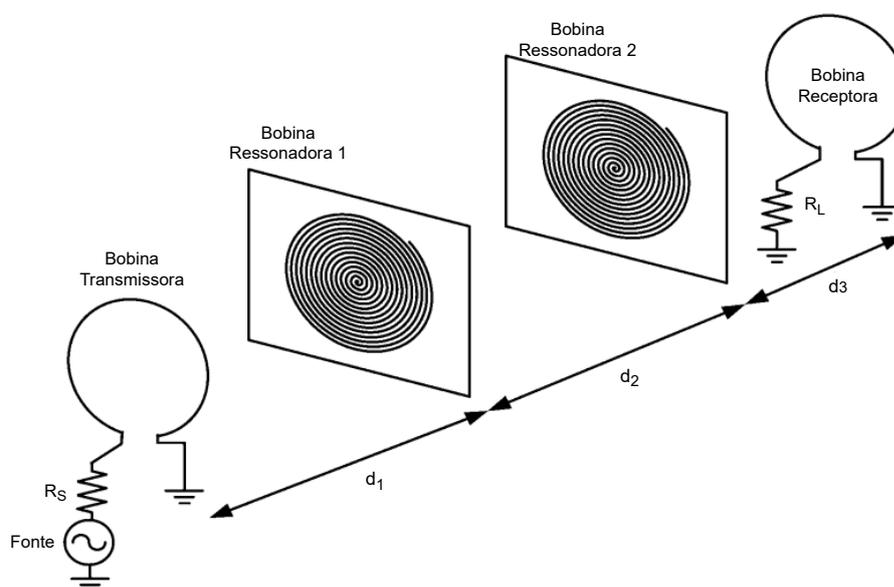
Estudos como o de Duong e Lee (2011) têm abordado técnicas eficazes de detecção de vários dispositivos de carregamento e estratégias de carregamento elétrico para identificar corretamente o equipamento receptor. Além disso, o método do acoplamento indutivo ressonante tem sido proposto para estender a operação do WPT a médias distâncias. Esse método se baseia na ideia de que dois ressonadores com a mesma frequência podem transferir energia eficientemente de forma recíproca. Além disso, o uso de um ou mais ressonadores como repetidores melhora a capacidade de transmissão de energia do sistema, permitindo a extensão da faixa de trabalho entre as bobinas do transmissor e do receptor como o esquemático mostrado na Figura 5 onde duas bobinas, Ressonadora 1 e Ressonadora

2, são projetadas para operar na frequência de ressonância das demais, Transmissora e Receptora, são inseridas no caminho do sistema WPT para aumentar a distância de transmissão.

No entanto, a distância na qual a transmissão de energia é efetiva pode variar já que a eficiência do WPT diminui rapidamente quando ocorrem mudanças no espaçamento entre as bobinas ou desalinhamento axial entre as bobinas do transmissor e do receptor. Pensando nisso, Hwang et al. (2017) propõe sistemas autoajustáveis para contornar os problemas com o desalinhamento das bobinas. Esses avanços visam melhorar a eficiência e a confiabilidade do carregamento sem fio, tornando-o mais prático e conveniente para o uso diário. Ao superar os desafios relacionados ao desalinhamento e às variações na distância de transmissão, os sistemas de energia sem fio têm o potencial de impulsionar ainda mais a adoção de dispositivos móveis e aplicativos baseados em sensores, facilitando a integração dessas tecnologias em nossas vidas cotidianas.

Uma aplicação promissora da transmissão de energia sem fio proposta por Ahn et al. (2011) é a possibilidade de carregar veículos elétricos sem a necessidade de fios ou cabos. Essa tecnologia é conhecida como "carregamento sem fio para veículos elétricos" e funciona de maneira semelhante à tecnologia de carregamento sem fio para dispositivos eletrônicos. A transmissão de energia sem fio para veículos elétricos poderia reduzir a necessidade de infraestrutura de carregamento e tornar a transição para veículos elétricos mais fácil e conveniente para os consumidores.

Figura 5 – Esquemático de um sistema de transmissão de energia sem fio para médias distâncias.



Fonte: Modificado de (DUONG; LEE, 2011).

2.3 Benefícios e Limitações da Transmissão de Energia Sem Fio

Inicialmente, é importante destacar que um dos principais benefícios da tecnologia WPT é a comodidade proporcionada pela eliminação dos cabos e fios tradicionalmente utilizados para transferência de energia. Isso traz maior liberdade de movimento aos dispositivos, possibilitando seu uso em locais de difícil acesso ou em ambientes onde a presença de fios poderia representar um risco. Além disso, a tecnologia permite a recarga sem fio de dispositivos portáteis, como smartphones e tablets, simplificando o processo e aumentando a praticidade para os usuários.

Outro benefício importante é a flexibilidade na localização dos dispositivos. Como não requer uma conexão física direta entre o transmissor e o receptor, permitindo que os dispositivos sejam posicionados em diferentes locais sem comprometer a transferência de energia. Isso é particularmente vantajoso em aplicações de carregamento de veículos elétricos, onde a possibilidade de recarregar o veículo sem a necessidade de conectá-lo a um cabo é altamente conveniente. Além dos benefícios já mencionados, também apresenta vantagens em termos de eficiência energética. A tecnologia pode ser projetada para minimizar as perdas de energia durante a transferência, garantindo que uma quantidade significativa de energia seja efetivamente transmitida do transmissor para o receptor. Isso contribui para a redução do desperdício de energia.

A transmissão de energia sem fio também é uma solução promissora para aplicações em ambientes hostis ou de difícil acesso. Por exemplo, em ambientes subaquáticos, onde a utilização de cabos de energia tradicionais é impraticável, a transferência de energia sem fio pode viabilizar o funcionamento contínuo de sensores e equipamentos submarinos. Além disso, a transmissão de energia sem fio pode ser aplicada em áreas remotas ou de difícil acesso, como regiões rurais ou mesmo em missões espaciais, onde o fornecimento de energia convencional é limitado (KARIM et al., 2019).

No entanto, é importante ressaltar que a transmissão de energia sem fio possui limitações na eficiência da transmissão que precisam ser consideradas. A transmissão, pode ser afetada por fatores como a distância entre o transmissor e o receptor, a presença de obstáculos físicos e a interferência eletromagnética. À medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta, a eficiência da transferência de energia diminui, devido a perdas e dispersão de energia. Portanto, o desenvolvimento de técnicas e sistemas que possibilitem a transferência eficiente de energia em longas distâncias é um desafio importante a ser enfrentado. Embora os avanços tecnológicos tenham contribuído para melhorar a eficiência, ainda existem desafios a serem superados para garantir uma transferência de energia otimizada em todas as situações. Outra limitação importante é a potência da transmissão. A transmissão ocorre, normalmente, em frequências de rádio ou micro-ondas, o que impõe restrições à quantidade de energia que pode ser transmitida de forma eficiente.

Em aplicações de alta potência, como o carregamento rápido de veículos elétricos, pode ser necessário o uso de sistemas mais complexos e eficientes para lidar com as demandas de energia (KURS et al., 2007).

Adicionalmente, a segurança e a compatibilidade eletromagnética são questões a serem consideradas com cuidado na transmissão de energia sem fio. A exposição a campos eletromagnéticos deve ser mantida dentro dos limites estabelecidos para garantir a segurança dos usuários. Além disso, a compatibilidade eletromagnética com outros dispositivos eletrônicos é fundamental para evitar interferências indesejadas que possam afetar o desempenho de outros equipamentos (CHRIST et al., 2013).

Por fim, um desafio adicional está relacionado à padronização e interoperabilidade dos sistemas de transmissão de energia sem fio. A existência de diferentes tecnologias e padrões pode dificultar a integração e a interoperabilidade entre os dispositivos e sistemas. Portanto, é importante o estabelecimento de padrões comuns que permitam a interoperabilidade entre diferentes dispositivos e a coexistência harmoniosa de várias tecnologias de transmissão de energia sem fio.

3 TECNOLOGIAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO *NEAR-FIELD*

Os métodos de transmissão de energia sem fio são divididos em duas categorias: campo próximo (*near-field*) e campo distante (*far-field*). Se a distância de transferência for maior que o comprimento de onda do sinal eletromagnético, a transmissão é considerada de campo distante. De outro modo, se a distância de transferência for menor que o comprimento de onda do sinal eletromagnético, a transmissão é considerada de campo próximo. Com o uso de técnicas de compensação na direcionalidade do sinal e na eficiência, a técnica de campo distante pode alcançar vários quilômetros e operar na faixa de alguns GHz, porém, sua eficiência ainda é baixa. A técnica de campo próximo, que será mais abordada neste trabalho, possui a vantagem de operar em frequências mais altas, ter melhor eficiência e possibilitar a miniaturização das bobinas utilizadas, porém, seu alcance é curto. O que é válido para as duas técnicas de transmissão é que suas eficiências diminuem exponencialmente com a distância (JAWAD et al., 2017).

3.1 Campos Radiativos e Não Radiativos

De acordo com Motta (2016), Jawad et al. (2017), Rao e Geetha (2016) e Coca (2016), campos radiativos são campos eletromagnéticos que se propagam no espaço na forma de ondas eletromagnéticas. Essas ondas são caracterizadas pela sua capacidade de se propagarem a longas distâncias, transportando energia e informação através do espaço. Uma característica importante dos campos radiativos é que eles se espalham em várias direções a partir da fonte, seguindo o princípio da propagação das ondas. Essa propagação ocorre em todas as direções no espaço, formando um padrão de radiação característico, que pode ser direcional ou omnidirecional, dependendo do tipo de antena ou fonte utilizada.

Os campos radiativos podem ser utilizados em diversas aplicações, como comunicações sem fio, transmissão de dados, radiodifusão, radares, entre outras. Eles são amplamente utilizados na tecnologia moderna para permitir a transmissão de informações e energia sem fio a longas distâncias. No entanto, é importante ter em mente que, devido à sua natureza propagativa, os campos radiativos podem se dissipar à medida que se afastam da fonte, resultando em uma diminuição de sua intensidade ao longo da distância. Além disso, a exposição prolongada a campos radiativos intensos pode ter impactos negativos à saúde, razão pela qual existem regulamentações e limites de exposição estabelecidos para garantir a segurança das pessoas.

Campos não radiativos, ao contrário dos campos radiativos, não se propagam como

ondas eletromagnéticas no espaço. Esses campos são mais localizados e não se espalham para longe da fonte de geração. Em vez disso, eles são confinados em regiões próximas à fonte e não possuem a capacidade de se propagar a grandes distâncias. Os campos não radiativos são gerados por sistemas que envolvem correntes elétricas ou campos magnéticos confinados em uma área limitada. Esses campos podem ser produzidos por meio de técnicas específicas, como acoplamento magnético ou acoplamento capacitivo, onde a energia é transferida entre duas bobinas ou dispositivos próximos.

Um exemplo comum de campo não radiativo é o utilizado na tecnologia de transferência de energia sem fio de campo próximo. Nesse caso, a energia é transmitida entre um emissor e um receptor através de um acoplamento magnético ou capacitivo próximo, sem a necessidade de fios físicos. O campo gerado pelo emissor é capturado pelo receptor, permitindo a transferência de energia elétrica. Os campos não radiativos são caracterizados por terem uma área de cobertura limitada e uma intensidade que diminui rapidamente à medida que se afasta da fonte. Eles são amplamente utilizados em aplicações de curto alcance, onde a transferência de energia ou informações é necessária em um espaço próximo.

É importante ressaltar que, embora os campos não radiativos não se propaguem a longas distâncias, eles ainda podem causar interferência eletromagnética em dispositivos próximos. Portanto, medidas de mitigação devem ser adotadas para evitar interferências indesejadas entre diferentes sistemas.

As características da fonte que definem se o campo será radiativo ou não radiativo são principalmente relacionadas ao tamanho físico da fonte em relação ao comprimento de onda da energia transmitida.

Se as dimensões da fonte de energia são significativamente menores do que o comprimento de onda da energia transmitida, o campo gerado pela fonte tende a ser não radiativo. Isso ocorre porque as ondas eletromagnéticas não têm espaço suficiente para se propagar no espaço e se tornam confinadas na proximidade da fonte.

O comprimento de onda da energia transmitida também influencia se o campo será radiativo ou não. Em geral, quando o comprimento de onda é relativamente longo em relação às dimensões da fonte, a energia tende a se propagar como um campo radiativo. Por outro lado, se o comprimento de onda é comparável ou menor que as dimensões da fonte, a energia tende a se propagar como um campo não radiativo.

Essas características podem ser aplicadas em diferentes cenários. Por exemplo, em transmissões de energia sem fio de campo próximo, as fontes são projetadas com dimensões apropriadas para garantir que os campos gerados sejam não radiativos e confinados entre as bobinas transmissora e receptora. Já em transmissões de energia sem fio de campo distante, as fontes são projetadas para criar campos radiativos que se propagam pelo espaço para alcançar dispositivos receptores a distâncias maiores. É importante considerar

essas características ao projetar sistemas de transmissão de energia sem fio, levando em conta as necessidades específicas de cada aplicação e a distância de transmissão desejada.

Existem três principais métodos para a Transmissão de Energia sem Fio (WPT) no campo próximo, são eles o Acoplamento Indutivo, o Acoplamento Indutivo Ressonante e o Acoplamento Capacitivo, que não será abordado neste trabalho. O Acoplamento Indutivo envolve o uso de bobinas acopladas magneticamente para transferir energia entre o transmissor e o receptor, permitindo a eficiente transferência de energia em curtas distâncias. O Acoplamento Indutivo Ressonante baseia-se na sintonia da frequência de ressonância entre as bobinas componentes do transmissor e receptor, proporcionando uma transferência de energia mais eficiente e estendendo a faixa de operação em comparação com o acoplamento indutivo convencional. Outro método, que não será abordado neste trabalho, o Acoplamento Capacitivo envolve a transferência de energia através do acoplamento elétrico entre placas de capacitor, o que pode permitir maior flexibilidade no projeto e posicionamento dos dispositivos, porém, o acoplamento capacitivo geralmente apresenta eficiência energética mais baixa em comparação com outras técnicas, como o acoplamento indutivo. Isso ocorre porque a quantidade de potência transferida no acoplamento capacitivo está diretamente relacionada à capacitância entre as placas do capacitor e à frequência de operação. Altas capacitâncias e frequências mais altas podem ser necessárias para aumentar a transferência de energia, o que pode resultar em perdas de energia significativas.

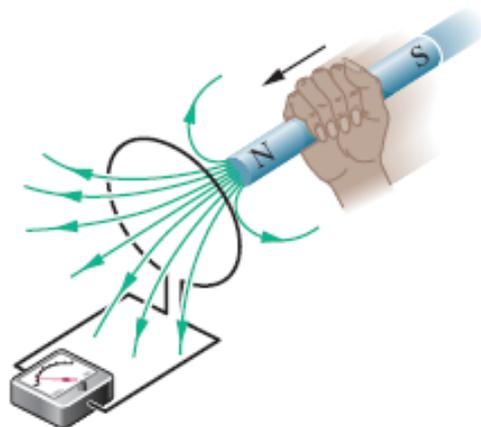
Cada um desses métodos apresenta características e considerações específicas, e compreender suas vantagens e limitações é essencial para o desenvolvimento de sistemas de WPT eficientes e adaptados a diferentes aplicações.

3.2 Acoplamento Indutivo

De acordo com Nussenzveig (2015), Faraday foi o criador dos conceitos fundamentais da Indução Eletromagnética através de seu experimento (Figura 6), realizado em 1831, onde este criou um solenoide com vários metros de fio de cobre, conectou a um galvanômetro e percebeu que havia passagem de corrente quando uma barra de ímã permanente cilíndrico era introduzida ou removida de dentro do solenoide. Faraday notou então que a indução de corrente elétrica no solenoide dependia do movimento relativo entre o solenoide e o ímã, ou seja, quando uma variação do campo magnético atravessava a bobina solenoide.

O Acoplamento Indutivo, estudado neste trabalho, é um dos métodos mais comumente utilizados na Transmissão de Energia sem Fio (WPT) no campo próximo (MOTTA, 2016). Ele se baseia no princípio da transferência de energia por meio do acoplamento magnético entre duas bobinas próximas uma da outra. O sistema de acoplamento indutivo é composto por uma bobina transmissora, que gera um campo magnético alternado, e uma bobina receptora, que é projetada para captar esse campo magnético e converter a energia

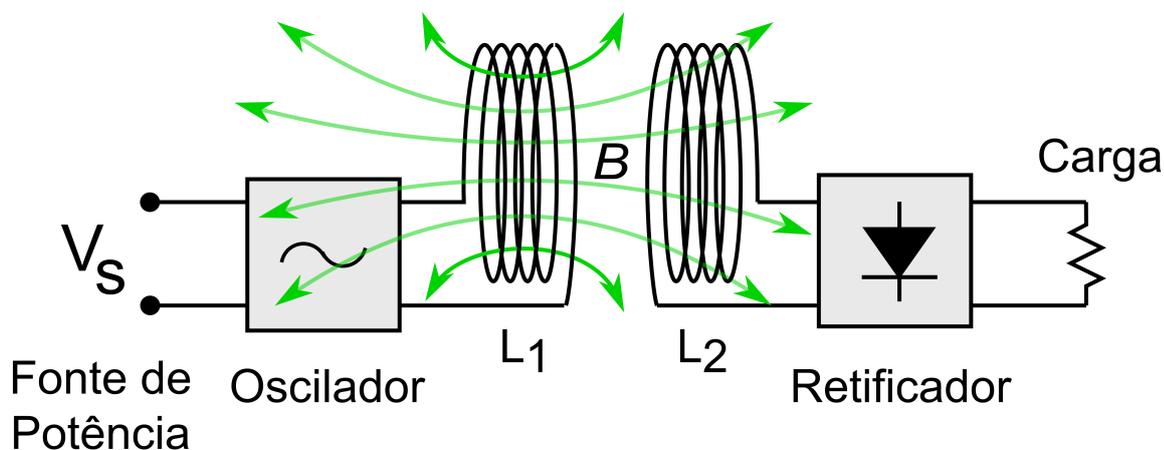
Figura 6 – Ilustração do experimento realizado por Faraday.



Fonte: Modificado de (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016)

magnética em energia elétrica utilizável, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Ilustração da transferência de energia sem fio por acoplamento indutivo.



Fonte: Modificado de (MOTTA, 2016)

Quando uma corrente alternada percorre a bobina transmissora, um campo magnético oscilante é gerado ao redor de suas espiras tendo uma intensidade diretamente proporcional ao número de voltas e à corrente, como descreve a Equação 3.1.

$$B_1 = \frac{\mu_0 N_1}{4\pi} i_1(t) \oint \frac{d\mathbf{i}_1(\mathbf{t}) \cdot \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (3.1)$$

Resolvendo esta integral de linha ao longo de um caminho fechado na espira, considerando apenas pontos ao longo do eixo central onde a Equação 3.1 tem solução analítica e considerando apenas o módulo do campo magnético, tem-se

$$\mathbf{B}_1 = \frac{\mu_0 N_1 R^2 I_1}{2(R^2 + d^2)^{3/2}} \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

onde

- B_1 é a intensidade do campo magnético produzido pela bobina transmissora;
- μ_0 é a constante de permeabilidade do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$);
- N_1 é o número de voltas da bobina transmissora;
- R é o raio da bobina;
- ω é a frequência de oscilação da corrente elétrica aplicada;
- $i_1(t)$ é a corrente aplicada na bobina transmissora;
- I_1 é o valor de pico da corrente aplicada na bobina transmissora; e
- d é a distância da bobina ao ponto onde é medido o campo magnético.

O campo magnético que atravessa a bobina receptora induz nesta uma corrente elétrica (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016), que pode ser utilizada para alimentar dispositivos eletrônicos ou recarregar baterias.

O fluxo magnético gerado que atravessará a bobina receptora (ϕ_1) é dado pela Equação 3.3

$$\phi_1 = \int \mathbf{B}_1 \cdot d\mathbf{A}_2 \quad (3.3)$$

E, pela Lei de Faraday para indução eletromagnética, estabelece-se que a tensão induzida em uma bobina é proporcional à taxa de variação do fluxo magnético que atravessa a bobina (MOTTA, 2016). Assim,

$$v_2 = -N_2 \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{\pi\mu_0 N_1 N_2 R^4 I_1}{2(R^2 + d^2)^{3/2}} \omega \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

onde

- v_2 é a tensão induzida na bobina receptora;
- N_2 é o número de voltas da bobina receptora; e
- $\frac{d\phi_1}{dt}$ é a taxa de variação do fluxo magnético que atravessa a bobina receptora.

O sinal negativo na Equação 3.4 é explicado pela Lei de Lenz que diz que a corrente induzida por um campo magnético oscilante cria o seu próprio campo magnético oscilante que se opõe à variação do campo magnético que induziu a corrente (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

A Equação 3.4 descreve como a variação do campo magnético gera uma tensão induzida em uma bobina, e é fundamental para a compreensão da transferência de energia sem fio por indução magnética.

Com o circuito acoplado magneticamente, pode-se obter uma relação entre as tensões e as correntes nas bobinas de transmissão e recepção

$$v_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (3.5)$$

$$v_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (3.6)$$

onde

- v_1 e v_2 são as tensões nas bobinas de transmissão e recepção, respectivamente;
- L_1 e L_2 são as indutâncias das bobinas de transmissão e recepção, respectivamente;
- M é a indutância mútua entre as bobinas; e
- $\frac{di_1}{dt}$ e $\frac{di_2}{dt}$ são as taxas de variação das correntes nas bobinas de transmissão e recepção, respectivamente.

As Equações 3.5 e 3.6 relacionam as tensões e as corrente nas bobinas acopladas, levando em consideração a indutância mútua, e são essenciais para analisar e projetar sistemas de transferência de energia sem fio por indução magnética.

Para garantir uma transferência eficiente de energia, é importante otimizar a geometria das bobinas, a frequência de operação e a relação de acoplamento. Esses parâmetros influenciam diretamente a eficiência da transferência de energia e a distância máxima de transmissão. Além disso, o acoplamento indutivo pode ser afetado por fatores como a presença de objetos metálicos próximos às bobinas, que podem causar interferências magnéticas e reduzir a eficiência do acoplamento.

A relação de acoplamento, ou fator de acoplamento, indica a eficiência com a qual a energia é transferida de uma bobina transmissora para uma bobina receptora. Representado pela letra "k" varia de 0 a 1. Um valor de k igual a 1 indica um acoplamento perfeito, onde toda a energia gerada pela bobina transmissora é transferida para a bobina receptora. Por

outro lado, um valor de k igual a 0 significa que não há acoplamento magnético entre as bobinas, resultando em nenhuma transferência de energia.

A equação para o fator de acoplamento entre duas bobinas acopladas magneticamente é dada por 3.7 (MOTTA, 2016)

$$k = \frac{M}{\sqrt{(L_1 \cdot L_2)}} \quad (3.7)$$

A indutância mútua (M) é uma medida da capacidade das bobinas de influenciarem mutuamente seus campos magnéticos. Quanto maior for o valor de M , maior será o acoplamento entre as bobinas e, conseqüentemente, maior será o fator de acoplamento.

A indutância mútua é dada pela Equação 3.8.

$$M = \frac{\pi\mu_0 N_1 N_2 R^4}{2(R^2 + d^2)^{3/2}} \quad (3.8)$$

Motta (2016) apresenta a dedução para a equação da indutância mútua.

Analisando as equações para o acoplamento indutivo nota-se que a tensão induzida na bobina receptora (v_2) depende dos fatores geométricos das bobinas, da corrente que percorre a bobina transmissora e da frequência de oscilação da corrente. Conforme a distância entre as bobinas aumenta a indutância mútua tende a se aproximar de zero.

3.3 Acoplamento Indutivo Ressonante

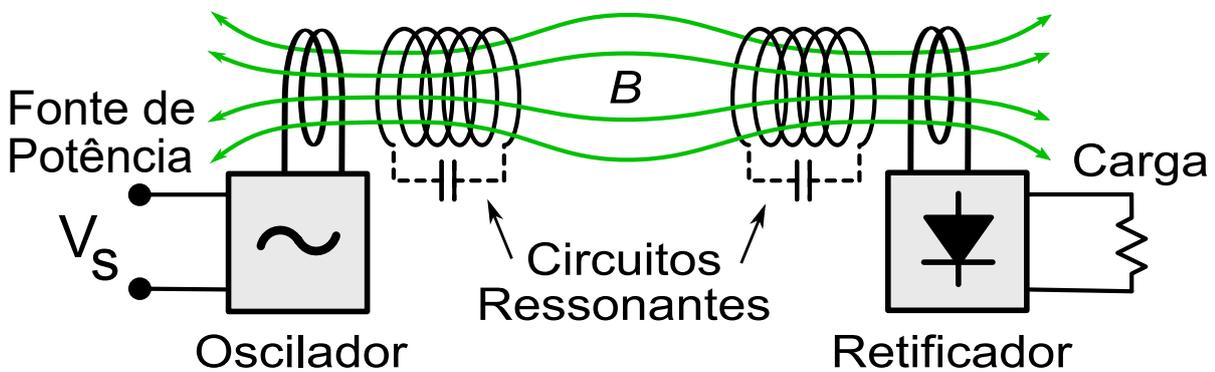
O acoplamento indutivo ressonante é uma técnica avançada de transferência de energia sem fio que utiliza o conceito de ressonância para melhorar a eficiência e a distância de transferência em comparação com o acoplamento indutivo simples. Enquanto o acoplamento indutivo simples envolve o uso de duas bobinas com coeficiente de acoplamento indutivo direto, o acoplamento indutivo ressonante utiliza duas ou mais bobinas em um circuito ressonante sintonizado para operar na mesma frequência projetada em todas as bobinas para aumentar a eficiência e a faixa de transferência. As Figuras 5 e 8 mostram circuitos utilizando bobinas ressonadoras para aumentar a distância de transmissão, na Figura 8 é possível notar o acoplamento de capacitores em paralelo com as bobinas ressonadoras a fim de ajustar a frequência de ressonância através da Equação 3.9.

Uma das vantagens do acoplamento indutivo ressonante é a possibilidade de alcançar altas eficiências de transferência de energia em distâncias maiores do que o acoplamento indutivo simples. Isso ocorre devido à ressonância entre as bobinas, que permite uma transferência eficiente de energia, pois, elimina as impedâncias reativas. Além disso, o

acoplamento indutivo ressonante é menos sensível a desalinhamentos entre as bobinas, o que facilita a operação em sistemas reais onde o posicionamento preciso pode ser desafiador.

O acoplamento indutivo ressonante pode ser aplicado com o uso de bobinas planares sintonizadas. Essas bobinas são projetadas de forma a terem uma frequência de ressonância em comum, permitindo uma transferência eficiente de energia entre elas. As bobinas planares oferecem a vantagem de ocupar menos espaço físico em comparação com as bobinas tradicionais, tornando-as adequadas para aplicações em dispositivos compactos (LIU; CHEN; LI, 2017).

Figura 8 – Ilustração da transferência de energia sem fio por acoplamento indutivo ressonante com mais de duas bobinas.



Fonte: Modificado de (MOTTA, 2016).

A frequência de ressonância é a frequência na qual as bobinas estão sintonizadas para obter a máxima eficiência na transferência de potência (PTE) através da anulação de suas reatâncias indutivas e capacitivas. Cada bobina possui uma frequência própria de ressonância que depende dos seus parâmetros construtivos e, caso sejam acoplados capacitores ao circuito, do tanque magnético formado.

$$f_r = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (3.9)$$

Na Equação 3.9, da frequência de ressonância, L representa a indutância da bobina e C pode ser a soma das capacitâncias parasitas da bobina e uma adicionada para deslocar a frequência de ressonância para um valor desejado. Ambas, indutância e capacitância, dependem dos parâmetros construtivos da bobina (Equações 3.10 e 3.11).

$$L = \frac{\phi_m}{I} = \mu_0 N^2 A l \quad (3.10)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (3.11)$$

O cálculo destes parâmetros para bobinas planares integradas em tecnologia CMOS é mostrado no Capítulo 6. Através das Equações 3.10 e 3.11 pode-se calcular, respectivamente, a indutância de um solenoide e a capacitância de um capacitor de placas paralelas (TIPLER; MOSCA, 2009).

Onde

- ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} F/m$);
- A é a área transversal do indutor (Equação 3.10) ou a área formada pelas placas paralelas do capacitor (Equação 3.11) ;
- l é o comprimento do solenoide; e
- d é a distância entre as placas do capacitor.

4 BOBINAS PARA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO

4.1 Definição e Características das Bobinas

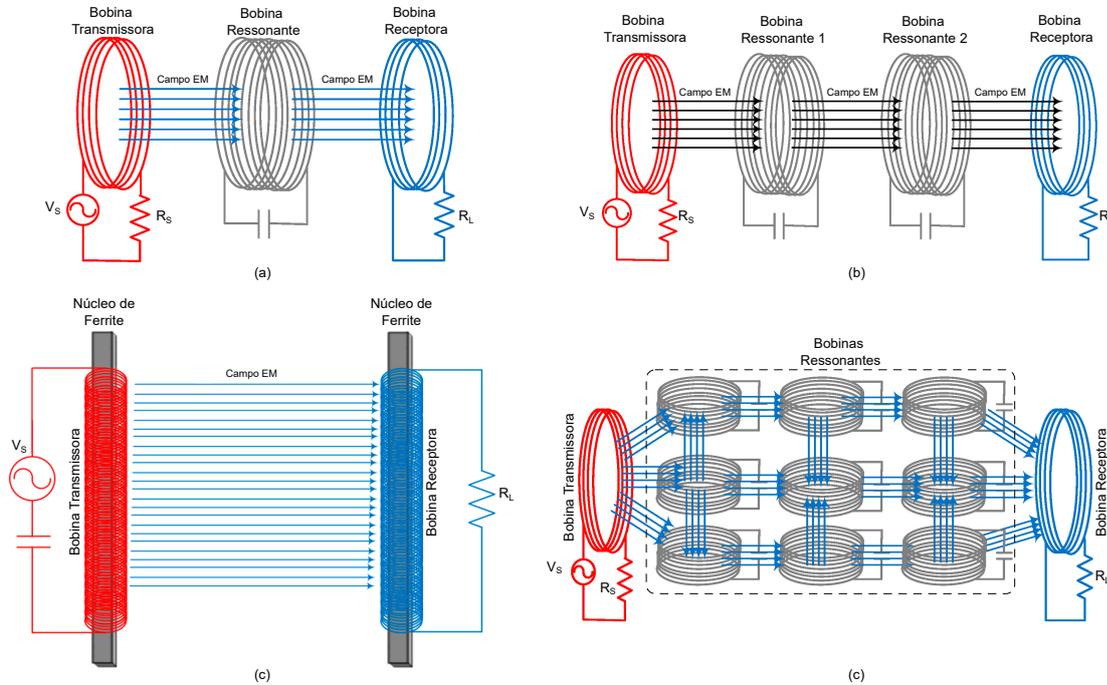
As bobinas desempenham um papel fundamental na transferência eficiente de energia sem fio, sendo responsáveis pela geração de campos magnéticos ou eletromagnéticos que são utilizados para transmitir a energia de uma fonte para um dispositivo receptor. A Figura 9 mostra quatro diferentes técnicas de transmissão de energia sem fio que são relevantes para este trabalho, em (a), (b) e (d) são utilizadas bobinas ressonantes no caminho do campo eletromagnético e, em (c), as bobinas são enroladas em um núcleo de ferrite para formar um dipolo.

Um dos tipos mais comuns de bobinas utilizadas na transmissão de energia sem fio é a bobina com núcleo de ar. Essas bobinas são construídas utilizando um fio condutor enrolado em forma de espiral, sem a presença de um núcleo magnético (Figura 9 (a), (b) e (d)). Elas são relativamente simples de serem fabricadas e oferecem boa eficiência de transferência de energia em curtas distâncias. No entanto, a eficiência diminui à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta, devido às perdas de energia no ambiente.

Outro tipo de bobina comumente utilizado é a bobina ressonante. Essas bobinas são projetadas para operar em uma frequência de ressonância específica, o que aumenta significativamente a eficiência da transferência de energia. A ressonância ocorre quando a frequência do campo magnético gerado pelo transmissor coincide com a frequência de ressonância da bobina receptora. Isso permite uma transferência de energia mais eficiente, mesmo em distâncias maiores. No entanto, o projeto e a sintonização dessas bobinas requerem um cuidado adicional para garantir a compatibilidade entre o transmissor e o receptor (MOTTA, 2016).

As bobinas utilizadas na transmissão de energia sem fio possuem características e propriedades importantes que afetam o desempenho e a eficiência do sistema como um todo. A geometria da bobina é uma característica relevante ao projeto das bobinas. A forma e o tamanho da bobina, como circular, retangular ou quadrada, determinam a área de superfície disponível para o acoplamento e influenciam a distribuição do campo magnético. Uma geometria adequada pode melhorar a eficiência da transmissão e maximizar a transferência de energia. O material utilizado na construção da bobina também desempenha um papel importante. Materiais com alta condutividade elétrica são preferidos para minimizar as perdas por resistência elétrica. Além disso, é importante que o material tenha boas propriedades magnéticas, a fim de aprimorar a transferência de energia por meio do campo

Figura 9 – Diferentes técnicas de Transmissão de Energia Sem Fio: **(a)** com uma bobina ressonante; **(b)** com duas bobinas ressonantes; **(c)** bobinas em dipolo; **(d)** matriz de bobinas.



Fonte: Modificado de (JAWAD et al., 2017).

magnético. O número de espiras da bobina é um fator fundamental a ser considerado. Um maior número de espiras aumenta a indutância da bobina, o que pode melhorar a eficiência da transmissão de energia. No entanto, é necessário encontrar um equilíbrio, pois um número excessivo de espiras pode aumentar a resistência da bobina e reduzir a eficiência do sistema. A resistência elétrica da bobina é uma consideração importante. Uma menor resistência resulta em menor dissipação de energia na forma de calor, o que contribui para uma transmissão de energia mais eficiente. É desejável projetar bobinas com baixa resistência para reduzir as perdas de energia. E, relacionando algumas destas características, o fator de qualidade Q é um indicador de eficiência de uma bobina. Quanto maior o fator de qualidade, menor será a perda de energia por resistência e radiação eletromagnética indesejada, maximizando a transferência de energia e minimizando as perdas no sistema de transmissão sem fio.

Além dessas características, outros fatores, como o espaçamento entre as espiras, a distância entre as bobinas transmissora e receptora, e a frequência de operação, também influenciam no desempenho das bobinas para transmissão de energia sem fio.

É importante destacar que o projeto das bobinas também deve levar em consideração a otimização dessas características de acordo com os requisitos específicos da aplicação, buscando um equilíbrio entre eficiência, alcance, tamanho e custo do sistema de transmissão

de energia sem fio.

4.2 Bobina Transmissora

A bobina de transmissão tem suas características projetadas de forma a fornecer a potência necessária para a transferência eficiente de energia. A seguir, segundo Karim et al. (2019), Motta (2016), Duong e Lee (2011) e Mulders et al. (2022) são destacadas algumas das principais características que uma bobina primária, ou transmissora, deve ter:

- Alta indutância para permitir uma transferência eficiente de energia. A indutância é responsável por armazenar energia magnética na bobina, que será transferida para a bobina receptora;
- Baixa resistência para evitar perdas de energia por dissipação de calor. Uma baixa resistência também ajuda a maximizar a eficiência da transmissão de energia;
- Alto fator de qualidade, o fator de qualidade Q é uma medida da eficiência de energia de uma bobina. Uma bobina transmissora com alto fator de qualidade significa que ela é capaz de armazenar e transferir energia de forma eficiente, minimizando as perdas;
- Frequência de ressonância adequada, a frequência de ressonância é a frequência em que a bobina tem maior eficiência de transferência de energia. É importante ajustar a frequência de operação para corresponder à frequência de ressonância da bobina receptora. O ajuste da frequência de ressonância pode ser feito no projeto da bobina e com a conexão de capacitores em paralelo com a bobina (ver Equação 3.9); e
- Design compacto e eficiente, uma bobina transmissora ideal deve ser projetada de forma compacta, ocupando pouco espaço físico, embora haja liberdade para projetá-la maior que a bobina receptora. Além disso, ela deve ser eficiente em termos de consumo de energia, minimizando as perdas e maximizando a transferência de energia para a bobina receptora.

4.3 Bobina Receptora

Ainda de acordo com Karim et al. (2019), Motta (2016), Duong e Lee (2011) e Mulders et al. (2022) são destacadas algumas das principais características que uma bobina secundária, ou receptora, deve ter:

- Alta sensibilidade para captar eficientemente o campo magnético gerado pela bobina transmissora. Isso implica em uma alta taxa de variação do fluxo magnético e uma resposta adequada às variações do campo magnético incidente.
- Alta eficiência de conversão para converter a energia eletromagnética recebida em energia elétrica de forma eficiente. Isso envolve minimizar as perdas de energia durante o processo de conversão.
- Baixa resistência, idealmente, deseja-se que a resistência da bobina receptora seja minimizada para reduzir as perdas de energia por dissipação. Isso permite a máxima transferência de energia da bobina para a carga, otimizando a eficiência geral do sistema.
- Frequência de ressonância compatível, a bobina receptora deve ser projetada para operar em uma frequência de ressonância compatível com a bobina transmissora. A frequência de ressonância é o ponto em que a transferência de energia é maximizada. Portanto, alinhar a frequência de ressonância da bobina receptora com a bobina transmissora é essencial para uma eficiência máxima.
- Design compacto e adaptável, a bobina receptora deve ser projetada de forma compacta para permitir sua integração em dispositivos e sistemas diversos. Além disso, ela deve ser adaptável a diferentes ambientes e condições de operação, garantindo um desempenho consistente em diferentes cenários.

5 REVISÃO DE BOBINAS INTEGRADAS PARA TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO

Dentre as tecnologias utilizadas no campo de WPT, as bobinas integradas têm se mostrado uma opção promissora. Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre o uso dessas bobinas para a transmissão de energia sem fio, abordando seus princípios de funcionamento, vantagens e desafios associados.

5.1 Conceito de Bobinas Integradas

As bobinas ou antenas integradas em chip (AoC, *Antenna-on-Chip*) consistem em bobinas planares instaladas diretamente no substrato de silício junto ao circuito eletrônico, que fará o processamento da energia recebida pela antena, no mesmo substrato. Para tornar isto viável, a bobina deve possuir tamanho compacto (ótimo para frequências mais altas), boa eficiência e boa largura de banda (MANDAL; MANDAL; MAL, 2017).

Tais bobinas são acopladas magneticamente com outras bobinas, onde a bobina transmissora é responsável por gerar um campo magnético variável, enquanto a bobina receptora converte esse campo em corrente elétrica. O princípio fundamental por trás desse processo é a indução eletromagnética (Capítulo 3), assim como em sistemas que não utilizam bobinas integradas. Uma das principais vantagens das bobinas integradas é a eficiência na transferência de energia, possibilitando o carregamento de dispositivos a uma distância considerável através do método do acoplamento indutivo ressonante. Além disso, esse sistema é relativamente robusto contra obstáculos físicos, como paredes, e pode ser implementado em diferentes formatos, como superfícies planas ou curvas.

Para melhorar o acoplamento magnético, é comum utilizar técnicas como ressonância magnética, onde a frequência de operação é ajustada para coincidir com a frequência natural do sistema. Isso aumenta a transferência de energia e reduz as perdas por reatâncias. Outra estratégia é o uso de eletrônica de potência para controlar e monitorar a energia transferida, garantindo um ajuste dinâmico e eficiente.

De acordo com Cheema e Shamim (2013), o uso de bobinas integradas no chip apresentam diversas vantagens em relação às bobinas convencionais implementadas em PCBs. Algumas das principais vantagens são:

- Correspondência de impedância simplificada: Ao implementar a bobina no mesmo chip que o circuito eletrônico, é possível garantir que as impedâncias complexas da seção de RF e da bobina correspondam conjugadamente entre si. Isso significa que a

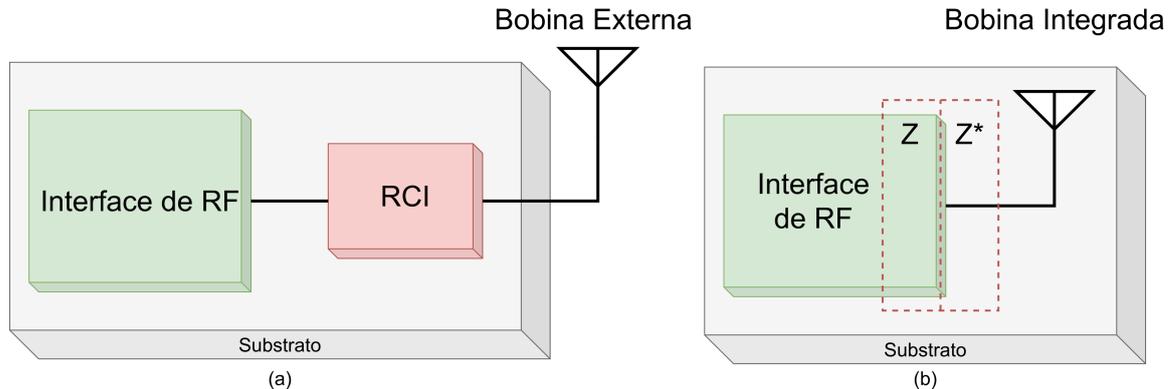
parte imaginária das impedâncias tem magnitude igual, mas sinais opostos. Dessa forma, elimina-se a necessidade de uma rede de correspondência de impedâncias (RCI) como mostra a Figura 10, simplificando o projeto e reduzindo a necessidade de componentes extras;

- Melhor desempenho em frequências mais altas: As antenas convencionais conectadas a circuitos integrados por meio de condutores de ligação podem sofrer perdas e degradação de desempenho, especialmente em frequências mais altas. Com as antenas integradas no chip, as interconexões de metal permitem uma conexão direta entre o circuito integrado e o ponto de alimentação da antena, eliminando a incerteza dos condutores de ligação e garantindo um desempenho mais confiável;
- Miniaturização e integração multifuncional: A implementação de antenas no chip permite uma miniaturização significativa dos sistemas, pois não é necessário reservar espaço adicional para antenas separadas. Além disso, a integração multifuncional também é facilitada, uma vez que a antena e o circuito eletrônico estão no mesmo chip. Isso possibilita a criação de dispositivos que combinam diferentes funcionalidades, como comunicação sem fio, processamento de sinais e sensores, em um único chip;
- Redução de custos e esforço de projeto: Com a eliminação da necessidade de componentes extras, como redes de correspondência externas, a implementação de bobinas no chip reduz os custos de produção. Além disso, o esforço de projeto também é reduzido, uma vez que o casamento de impedâncias é simplificado e as incertezas causadas pelos condutores de ligação são eliminadas; e
- Otimização conjunta de circuitos e antenas: O coprojeto de antenas e circuitos permite uma otimização conjunta entre os dois domínios. Isso significa que os projetistas podem explorar os dois graus de liberdade entre o circuito e a antena para obter um desempenho otimizado. Essa abordagem leva a um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e resulta em sistemas mais eficientes e de alta qualidade.

Porém, de acordo com Cheema e Shamim (2013), Mandal, Mandal e Mal (2017) e Jow e Ghovanloo (2007), projetar antenas integradas no chip apresenta diversos desafios. A seguir, são explicados os principais desafios relacionados à concepção dessas antenas:

- Baixa resistividade do substrato de silício: O substrato de silício (Si) utilizado nos chips eletrônicos possui uma resistividade muito baixa, o que significa que apresenta perdas significativas de energia. Essas perdas no substrato representam a maior parte das perdas totais em uma antena on-chip. Em comparação, as perdas na metalização do chip são relativamente pequenas. Esse desafio torna necessário considerar cuidadosamente as perdas no substrato ao projetar a antena, a fim de maximizar a eficiência de radiação.

Figura 10 – Comparação de bobina externa (a) e bobina integrada (b).

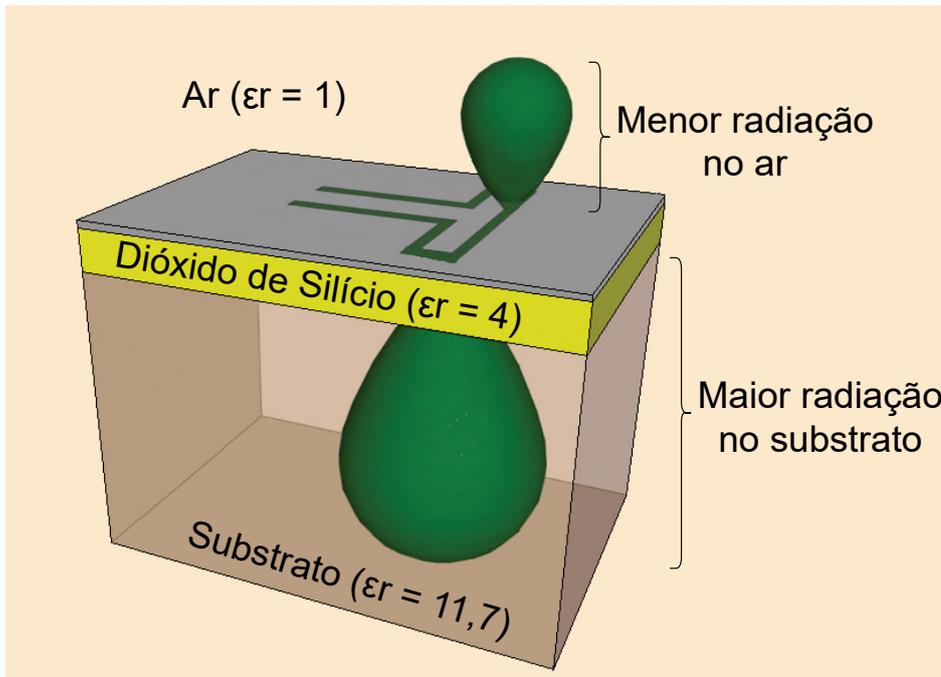


Fonte: Modificado de (KARIM et al., 2019).

- Alta permissividade do substrato de Si: O substrato de Si possui uma alta permissividade, o que faz com que a maior parte da energia fique confinada no substrato, em vez de ser irradiada para o espaço livre. Isso resulta em uma degradação da eficiência de radiação da antena. Por exemplo, em uma antena dipolo implementada em um substrato de Si, apenas uma pequena porcentagem da potência é irradiada para o espaço livre, enquanto o restante é acoplado ao substrato como mostra a Figura 11. Esse desafio requer técnicas de projeto que minimizem a perda de energia para o substrato e maximizem a radiação efetiva para o espaço livre.
- Ausência de regras específicas de projeto para antenas em tecnologia CMOS padrão: As antenas geralmente estão localizadas fora do chip, portanto, não existem regras de projeto específicas estabelecidas para o layout das antenas em tecnologias CMOS padrão. Isso dificulta a resolução de erros de Design Rule Check (DRC) no layout da antena. Além disso, a espessura máxima permitida da camada de metal superior na tecnologia CMOS padrão geralmente não é suficiente para projetar uma antena eficiente em termos de radiação eletromagnética. Essa restrição limita a capacidade de lidar com altas correntes e resulta em uma radiação fraca.
- Incorporação de radiação espúria durante a medição prática: As características de radiação da bobina integrada não podem ser medidas diretamente em uma câmara anecoica, a menos que o chip seja montado em uma placa ou dispositivo de teste especial. No entanto, a montagem do chip em uma placa resulta em radiação indesejável devido à interferência dos componentes do circuito próximos. Esse desafio torna necessário considerar cuidadosamente as condições de medição e o ambiente para obter resultados precisos sobre o desempenho da antena.

Em suma, o uso de bobinas integradas no chip oferece uma série de vantagens, incluindo simplificação da correspondência de impedância, melhor desempenho em frequên-

Figura 11 – Ilustração da dissipação da radiação eletromagnética em substrato de silício de uma antena dipolo.



Fonte: Modificado de (CHEEMA; SHAMIM, 2013).

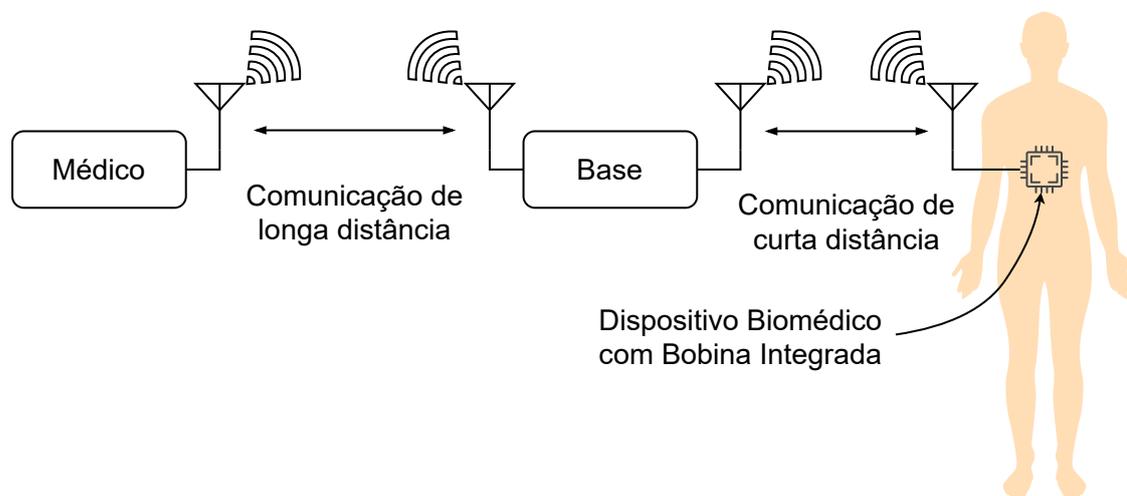
cias mais altas, miniaturização e integração multifuncional, redução de custos e esforço de projeto, além da possibilidade de otimização conjunta de circuitos e antenas. Essas vantagens tornam as bobinas integradas uma escolha atraente para uma variedade de aplicações de comunicação sem fio.

5.2 Bobinas Integradas em Dispositivos Biomédicos

A aplicação de bobinas integradas em dispositivos biomédicos tem se tornado uma área de interesse crescente no campo da tecnologia médica. As bobinas desempenham um papel fundamental na transmissão e recepção de energia e sinais sem fio em dispositivos implantáveis, permitindo a alimentação e comunicação entre o dispositivo implantado ou conectado ao paciente e um dispositivo externo. A Figura 12, mostra um caso onde a comunicação ou alimentação do dispositivo do paciente é feita em curta distância, processada e enviada para um dispositivo a longa distância que informa os dados ao médico. Essa tecnologia oferece vantagens significativas, como a eliminação da necessidade de fios externos e conexões diretas, além de facilitar a miniaturização dos dispositivos, tornando-os mais confortáveis para os pacientes.

A integração de bobinas diretamente nos dispositivos biomédicos apresenta desafios únicos de projeto e fabricação, que exigem uma abordagem cuidadosa e especializada. Os

Figura 12 – Ilustração de dispositivo biomédico para monitoramento remoto da saúde do paciente com a utilização de bobina integrada em chip (AoC).



Fonte: Modificado de (KARIM et al., 2019).

projetos de bobinas devem levar em consideração as restrições de espaço, consumo de energia e compatibilidade com o tecido humano. Além disso, é essencial garantir a eficiência da transferência de energia sem fio, a fim de permitir o carregamento e a operação contínua dos dispositivos implantáveis.

5.2.1 Benefícios

Os avanços na tecnologia biomédica nos últimos anos têm impulsionado a proeminência dos dispositivos biomédicos implantáveis como uma peça central no sistema de saúde personalizado. Esses dispositivos têm a capacidade de enviar sem fio informações sobre variações patológicas e fisiológicas no corpo humano, permitindo o diagnóstico, monitoramento e tratamento remoto de pacientes (KARIM et al., 2019). Esse progresso revolucionário representa uma melhoria significativa em relação aos métodos tradicionais de monitoramento externo, proporcionando maior fidelidade, precisão e conforto para os pacientes.

Com a transmissão sem fio das informações coletadas pelos dispositivos implantáveis, os serviços médicos podem ser aprimorados, superando as limitações das instalações médicas tradicionais. Além disso, a variedade de aplicações dos dispositivos biomédicos implantáveis abrange desde o monitoramento de glicose, marcapassos e monitoramento cardíaco até o monitoramento do sistema respiratório e transplantes. Essa aplicação de bobinas integradas reforça a promessa e o potencial desses dispositivos, fornecendo serviços médicos de alta qualidade e acessíveis para a crescente população mundial, e abrindo novas oportunidades para diagnóstico e tratamento em uma variedade de condições de saúde.

5.2.2 Desafios

A miniaturização é fundamental para permitir a implantação desses dispositivos, enquanto a viabilidade econômica garante sua acessibilidade. A coleta de energia de RF surge como uma solução viável devido à escassez de outras fontes de energia. Além disso, o consumo ultrabaixo de energia é essencial para garantir a autonomia desses dispositivos. Estes são os desafios a serem superados e os requisitos a serem atendidos no desenvolvimento desses dispositivos sem fio para aplicações biomédicas. Essa necessidade de miniaturização é impulsionada pela demanda por dispositivos menores e mais discretos, capazes de serem incorporados ao corpo humano de forma confortável e eficiente. A *Federal Communication Commission* (FCC) designou a faixa de frequência de 401-406 MHz como padrão para a comunicação de implantes médicos, tornando essa faixa amplamente utilizada em dispositivos e sistemas biomédicos (KARIM et al., 2019).

Os dispositivos de implantes biomédicos também enfrentam desafios significativos relacionados ao desempenho das antenas integradas em relação às propriedades dielétricas dos tecidos biológicos. Essas propriedades podem levar a uma degradação do desempenho das bobinas quando implantadas no corpo humano já que as propriedades dielétricas dos tecidos do corpo dependem da frequência de operação e tem o potencial de variar a frequência de ressonância de uma bobina interna, tornando necessário um amplo estudo de modelagem precisa dos efeitos dos tecidos biológicos no desempenho das AoCs em implantes biomédicos. Além disso, as propriedades dielétricas dos tecidos variam com a frequência, o que acrescenta mais complexidade aos desafios de projeto, pois as bobinas integradas precisam funcionar de forma eficiente em diferentes partes do corpo (CHRIST et al., 2013).

A caracterização e teste das bobinas integradas em dispositivos de implantes biomédicos são tarefas desafiadoras que requerem abordagens inovadoras e de baixo custo. As técnicas de medição atuais podem ter limitações na capacidade de medir parâmetros importantes, como ganho e padrão de radiação das antenas. Portanto, é necessário o desenvolvimento de métodos avançados de medição para obter uma compreensão completa do desempenho das antenas. Além disso, uma tendência futura promissora é a modelagem e compreensão aprofundada dos efeitos dos tecidos biológicos no desempenho das antenas integradas, visando melhorar a eficiência e o desempenho global dos dispositivos de implantes biomédicos.

5.2.3 Soluções

Além da faixa de frequência de 401-406 MHz, outras bandas de baixa frequência, como 2,4 GHz, 4-10,6 GHz, 900 MHz e 1800 MHz, também são populares em aplicações de biotelemetria. No entanto, o uso de bandas de frequência de ondas milimétricas (MM-Wave)

surge como uma solução promissora para os desafios de miniaturização, integração *on-chip* e aumento da largura de banda. A miniaturização para dimensões de mm ainda é um desafio porque uma diversidade de técnicas WPT atuais ainda dependem de bobinas de recepção de energia externas, volumosas e capacitores de desacoplamento de armazenamento de energia. A miniaturização pode ser realmente habilitada integrando esses componentes volumosos externos em um receptor de energia sem fio *on-chip* (KIM et al., 2017).

As bandas de MM-Wave oferecem altas taxas de dados e maior capacidade de transmissão, o que é benéfico para dispositivos biomédicos implantáveis que requerem uma comunicação eficiente e confiável. Além disso, os dispositivos de implantes biomédicos desempenham um papel crucial no paradigma emergente da Internet das Coisas Bio-Nano (Bio-Nano Things), com a banda de terahertz (THz) sendo considerada uma opção favorável para aplicações futuras devido às suas propriedades únicas e potencialidades ainda a serem exploradas.

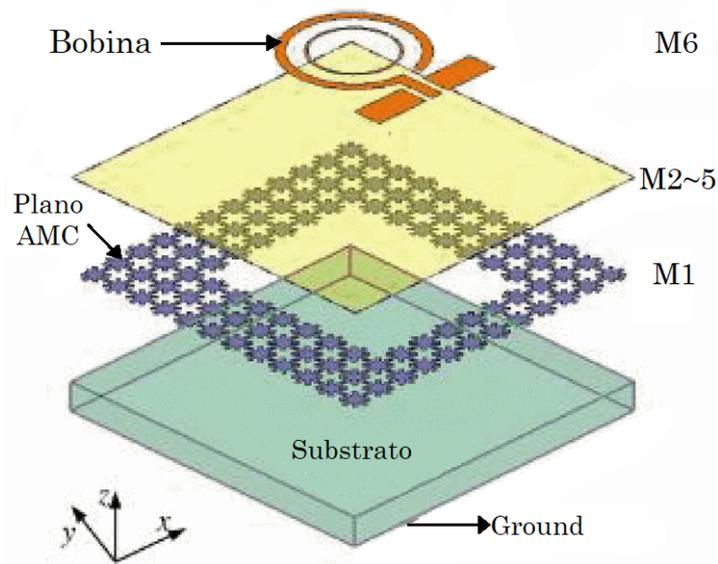
De acordo com Karim et al. (2019), o uso de tecnologias de silício, como CMOS, SiGe BiCMOS e SOI-CMOS, apresenta-se como uma escolha altamente atrativa para dispositivos de saúde sem fio devido aos benefícios de baixo consumo de energia, perfil compacto e custo reduzido. Nesse contexto, os circuitos com bobinas integradas em chip despontam como uma opção particularmente interessante, uma vez que suas vantagens estão em perfeita sintonia com os requisitos necessários para sistemas de saúde sem fio. Os AoCs baseados em tecnologia de silício têm demonstrado um potencial significativo para esses sistemas, superando as limitações dos sistemas tradicionais com bobinas externas ao chip, especialmente em termos de eficiência de transmissão de energia.

Para frequências de operação maiores que 100 MHz, Kim et al. (2017) defende que são maiores as possibilidades de integração total da bobina receptora no chip e cita quatro vantagens significativas:

- Miniaturização dos implantes, eliminando o espaço ocupado pela bobina receptora externa;
- Redução das capacitâncias e resistências parasitas entre a bobina receptora e sua rede de casamento de impedância;
- Não necessitar de um processo de fabricação especial para integrar a bobina receptora no chip; e
- Simplificação do encapsulamento já que não haverá conexão externa ao chip

Para mitigar os problemas de eficiência e ganho das bobinas integradas Mandal, Mandal e Mal (2017) propõe a inserção de um condutor magnético artificial (AMC) entre a bobina no chip e o substrato com perdas. Geralmente, uma camada de AMC é

Figura 13 – Vista 3D de uma antena com estrutura AMC fabricada usando tecnologia CMOS padrão de seis camadas de metal de 180 nm .

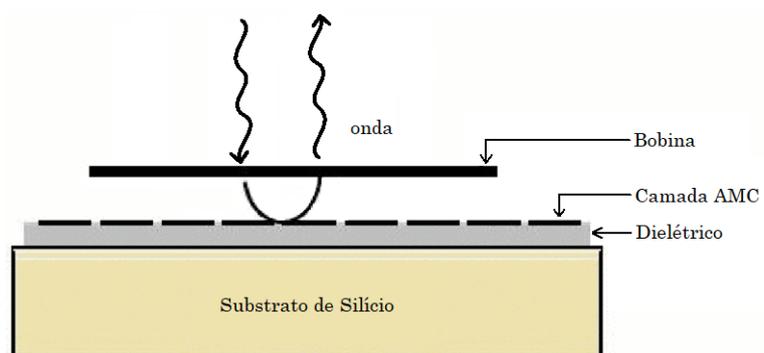


Fonte: Modificado de (MANDAL; MANDAL; MAL, 2017).

posicionada na primeira camada de metal, enquanto a bobina é colocado na camada de metal superior do processo CMOS. Essa estrutura, também conhecida como superfície de alta impedância (HIS) ou condutor magnético perfeito (PMC), tem recebido atenção considerável na pesquisa atual. Ao utilizar o AMC, é possível eliminar a radiação absorvida pelo substrato (ver Figura 11) e obter um padrão de radiação mais suave, como ilustrado na Figura 14.

Assim, ao utilizar uma superfície de alta impedância, é possível obter reflexões construtivas em fase com a onda incidente dentro de uma banda de frequência de operação específica. A utilização de condutores magnéticos artificiais permite um maior controle sobre as propriedades eletromagnéticas do sistema, resultando em melhor eficiência e desempenho.

Figura 14 – Comportamento de uma onda incidente quando adicionado um AMC entre a bobina e o substrato.



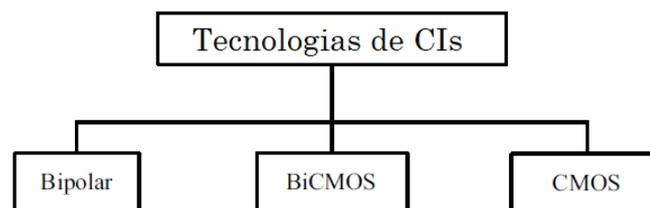
Fonte: Modificado de (MANDAL; MANDAL; MAL, 2017).

6 METODOLOGIAS DE PROJETO

6.1 Seleção da Tecnologia de Fabricação

A escolha do substrato adequado para aplicações de radiofrequência, faixa de frequência entre 8,3 kHz e 3000 GHz (Agência Nacional de Telecomunicações, 2021), envolve considerações cuidadosas. Como o objetivo principal é tornar a tecnologia mais acessível, o setor tem se esforçado para migrar de tecnologias mais caras, como o arseneto de gálio (GaAs), para alternativas mais acessíveis, como a tecnologia de óxido de metal complementar (CMOS) em silício. Essa transição é impulsionada pela busca por soluções que possam oferecer um equilíbrio entre desempenho, custo e escalabilidade. A tecnologia CMOS tem ganhado destaque devido à sua ampla disponibilidade e baixo custo de produção em massa. Além disso, ela oferece a vantagem de integração de múltiplos componentes em um único chip, permitindo a criação de sistemas complexos em um espaço reduzido. No entanto, a adoção do CMOS, em substrato de silício, para aplicações de radiofrequência apresenta desafios, como a menor mobilidade dos elétrons em comparação com o GaAs, o que pode impactar o desempenho em altas frequências (KOWALTSCHUK, 2003).

Figura 15 – Principais tecnologias de fabricação de circuitos integrados baseadas em silício.



Fonte: Modificado de (ALLEN; HOLBERG, 2011).

6.1.1 Substrato de Arseneto de Gálio

Para a construção de dispositivos eletrônicos que combinam múltiplos componentes e funções em um único chip, geralmente na faixa de gigahertz ou superior, como circuitos integrados monolíticos de microondas, o arseneto de gálio é o substrato mais utilizado devido a sua estrutura cristalina especial que permite alta mobilidade de elétrons, capacidade dos elétrons se moverem livremente em um material sob a influência de um campo elétrico, e alta corrente de pico, causada pela sua alta densidade de portadores de carga e eficiência do transporte de elétrons. E, devido à sua constante de mobilidade de deriva (μ_n) ser de 5 a

10 vezes maior do que no silício, os elétrons se deslocam mais rapidamente em um material tipo n de GaAs, do que no silício. Assim, os dispositivos de GaAs possuem um maior g_m proporcionando maiores correntes de saída para as mesmas tensões de entrada, em comparação com dispositivos de silício. As capacitâncias de carga e parasitas são carregadas e descarregadas mais rapidamente resultando numa maior velocidade de operação.

A maior resistividade do GaAs ($\rho = 10^7 \Omega \text{ cm}$) reduz as interferências entre dispositivos permitindo que sejam fabricados linhas de transmissão, elementos passivos (incluindo indutores com alto fator de qualidade e capacitores com baixas capacitâncias parasitas) e dispositivos ativos e de controle no mesmo substrato.

Porém, o substrato de GaAs apresenta desvantagens consideráveis como: a baixa mobilidade de lacunas (μ_p) que dificulta que se façam dispositivos complementares; o custo por mm^2 ser 200 vezes maior do que a tecnologia CMOS; e a baixa capacidade de integração dos componentes (KOWALTSCHUK, 2003).

6.1.2 Tecnologia CMOS

De acordo com Allen e Holberg (2011), a tecnologia CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) é uma técnica de fabricação de circuitos integrados que utiliza transistores de efeito de campo (FETs) do tipo MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) para criar dispositivos eletrônicos. É uma das tecnologias mais amplamente utilizadas na indústria de semicondutores devido à sua eficiência energética, escalabilidade, baixo consumo de energia e custos relativamente baixos de fabricação.

Os transistores CMOS são compostos por camadas finas de material semicondutor, geralmente silício, sobre o qual são depositados óxido de silício e metal. Os transistores CMOS operam com base no controle da corrente elétrica pelo controle da tensão aplicada aos terminais do transistor. Eles são chamados de "complementares" porque a tecnologia CMOS utiliza tanto transistores do tipo NMOS (transistor de óxido de metal semicondutor negativo) quanto PMOS (transistor de óxido de metal semicondutor positivo) para fornecer um melhor desempenho e eficiência.

A tecnologia CMOS tem sido objeto de investimento significativo devido às suas vantagens econômicas e desempenho confiável. Esses investimentos contínuos tornaram a tecnologia CMOS dominante e amplamente adotada na indústria de semicondutores. À medida que novas tecnologias emergem, é mais viável e benéfico integrá-las com a tecnologia CMOS existente em vez de substituí-la completamente. Ao integrar outras tecnologias com a tecnologia CMOS, é possível aproveitar as vantagens específicas de cada uma delas. Por exemplo, a tecnologia CMOS é conhecida por seu baixo consumo de energia e alta densidade de integração, enquanto outras tecnologias podem oferecer características únicas, como alta velocidade de comutação ou alta potência de saída (KOWALTSCHUK,

2003).

A Figura 15 mostra as principais tecnologias de fabricação de circuitos integrados conforme Allen e Holberg (2011). A integração de diferentes tecnologias também permite a criação de soluções mais flexíveis e adaptáveis para atender às demandas do mercado. Além disso, aproveitar os investimentos já feitos na tecnologia CMOS evita custos adicionais de desenvolvimento e infraestrutura.

6.1.3 Tecnologia BiCMOS

Com a tecnologia que emprega dispositivos bipolares de silício pode-se construir transistores para operar em altas frequências ($f \approx 50 \text{ GHz}$) e elementos passivos de boa qualidade. É uma tecnologia conhecida por sua alta corrente de pico, alta velocidade de comutação e capacidade de operar com altas tensões. Pode ser utilizada em amplificadores comerciais de baixo ruído, sistemas de comunicação sem fio, fontes de alimentação e outras aplicações que exijam alta potência e alta frequência. Porém, a tecnologia bipolar apresenta maior dissipação de energia que a tecnologia CMOS além de ter sua fabricação mais complexa, com custo mais elevado e nível de integração mais baixo.

Na tecnologia mista, chamada de bipolar com MOS complementar, os dispositivos bipolares e CMOS dividem o mesmo substrato e esta união garante algumas qualidades da tecnologia CMOS como: alta escala de integração; baixo consumo de potência; e alta imunidade ao ruído. E, também, alta velocidade de operação e alta capacidade de alimentar cargas maiores, qualidades da tecnologia bipolar.

A tecnologia BiCMOS permite a construção de indutores com maior fator de qualidade, devido ao substrato de silício desta tecnologia ter uma resistividade maior, tornando mais fácil a criação de blocos de radiofrequência. Entretanto, para a implementação desta tecnologia, é necessária a aplicação de máscaras adicionais no processo de fabricação, aumentando o custo de produção (KOWALTSCHUK, 2003).

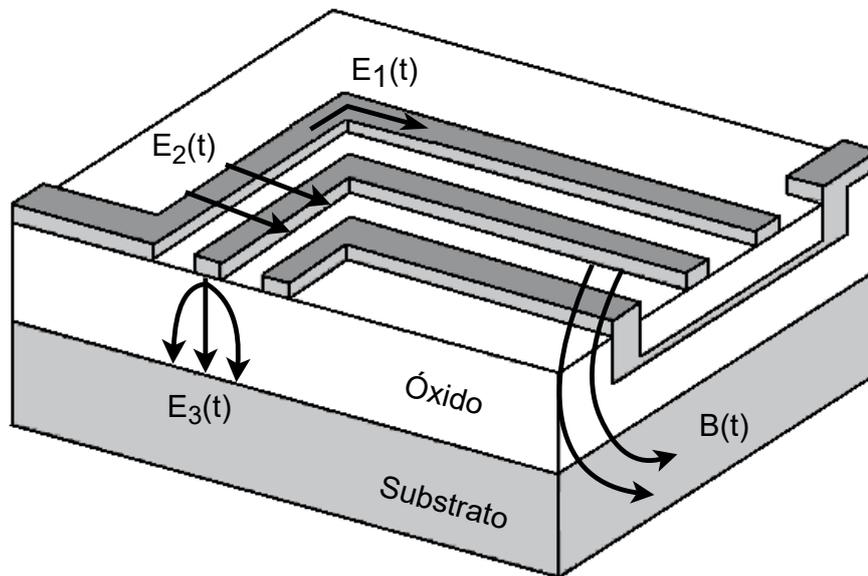
6.2 Comportamento de uma Bobina Integrada

Conforme Kowaltschuk (2003), em bobinas integradas em tecnologia CMOS, quando aplicada uma tensão, surgem quatro campos, um magnético e três elétricos como mostra a Figura 16.

O campo magnético, $B(t)$, é gerado pela corrente alternada que flui pelas trilhas da bobina e é responsável induzir correntes parasitas nas trilhas do substrato.

O campo elétrico $E_1(t)$ é gerado pela diferença de potencial nos terminais da bobina, fazendo fluir uma corrente pela bobina que, devido à resistividade do material, causará

Figura 16 – Campos gerados em uma bobina integrada percorrida por corrente.



Fonte: Modificado de (KOWALTSCHUK, 2003).

perdas ôhmicas.

O campo elétrico $E_2(t)$ é gerado pela diferença de potencial entre cada enrolamento da bobina causando uma capacitância parasita entre as trilhas.

O campo elétrico $E_3(t)$ é gerado pela diferença de potencial entre a bobina e o substrato, que normalmente é aterrado, causando uma capacitância parasita entre a bobina e o substrato e perdas ôhmicas no substrato.

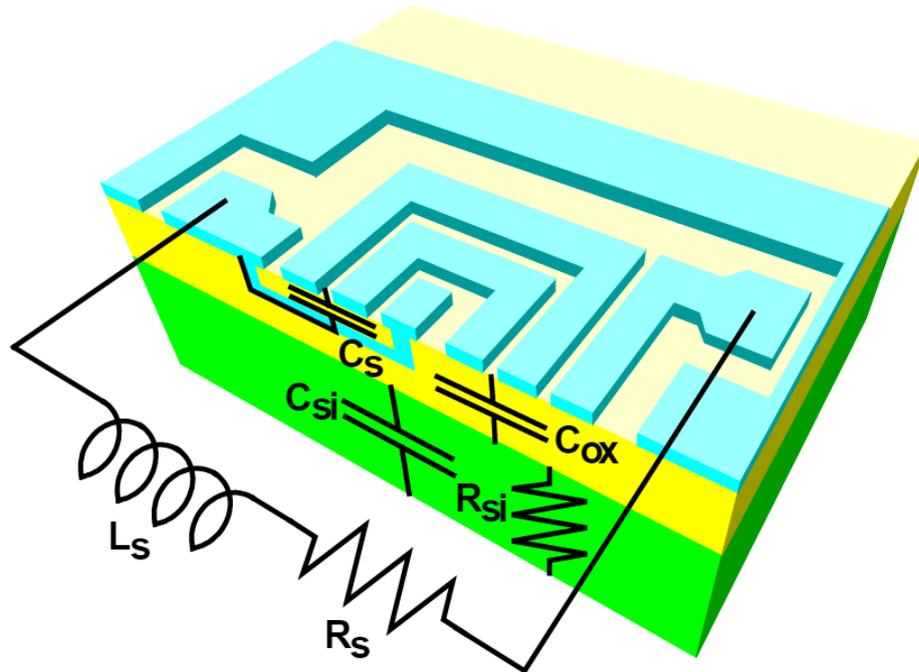
6.3 Modelagem de Bobinas Integradas

A falta de um modelo equivalente para bobinas integradas é um desafio significativo no projeto de circuitos integrados. Ao contrário de transistores, resistores e capacitores, bobinas, indutores e antenas não são componentes padronizados nas tecnologias atuais de circuitos integrados, o que dificulta sua incorporação em bibliotecas de design. Modelos padronizados têm sido propostos, mas não são completamente escaláveis em relação às dimensões dos dispositivos e aos parâmetros dos processos. Um modelo escalável permitiria ao projetista ajustar o projeto do indutor para uma aplicação específica, eliminando a necessidade de uma biblioteca tecnológica complexa e dispendiosa de manter (KOWALTSCHUK, 2003).

Uma modelagem equivalente pode ser obtida tratando separadamente a indutância da bobina e suas componentes parasitas. Da Figura 17, temos a resistência da bobina (R_S), a indutância da bobina (L_S), a capacitância parasita entre os enrolamentos da bobina

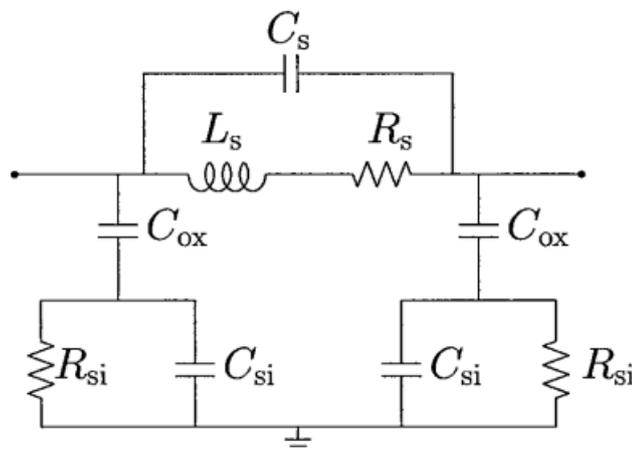
(C_S), a capacitância parasita no óxido (C_{OX}) e as capacitâncias e resistências parasitas entre a bobina e o substrato (C_{Si} e R_{Si}). Na Figura 18, fica mais claro como seria o circuito equivalente de uma bobina integrada em tecnologia CMOS.

Figura 17 – Corte em perspectiva das componentes de uma bobina integrada.



Fonte: (YUE, 1998).

Figura 18 – Modelo equivalente de uma bobina integrada.



Fonte: (MOHAN et al., 1999).

Segundo Jow e Ghovanloo (2007), a indutância mútua (M) e fator de qualidade das bobinas (Q_1 e Q_2) são os principais parâmetros que afetam o rendimento de um sistema

de transmissão de energia sem fio e estes parâmetros dependem diretamente da geometria e área das bobinas. Na Seção 6 serão abordados os impactos de diferentes geometrias na modelagem das bobinas.

6.4 Método de Cálculo dos Parâmetros

As geometrias das bobinas influenciam diretamente as propriedades elétricas desejadas, como a indutância, e parasitas como a resistência e a capacitância. Uma geometria inadequada pode resultar em perdas de energia, interferência eletromagnética indesejada e desempenho inferior. Portanto, é crucial considerar cuidadosamente as geometrias das bobinas durante o projeto, levando em conta fatores como a frequência de operação, a área disponível no chip, as restrições de fabricação e as características desejadas do dispositivo. Ao otimizar as geometrias das bobinas, é possível obter um melhor desempenho de transmissão, recepção e acoplamento em sistemas sem fio, resultando em um funcionamento mais eficiente e confiável.

Com base no estudo do trabalho de Kowaltschuk (2003), existem diversos métodos na literatura para calcular a indutância de bobinas integradas, algumas são mais precisas que outras e muitas vezes não deixam claro quais condições de contorno se aplicam a elas. Em resumo, as formulações empíricas analisadas neste trabalho foram:

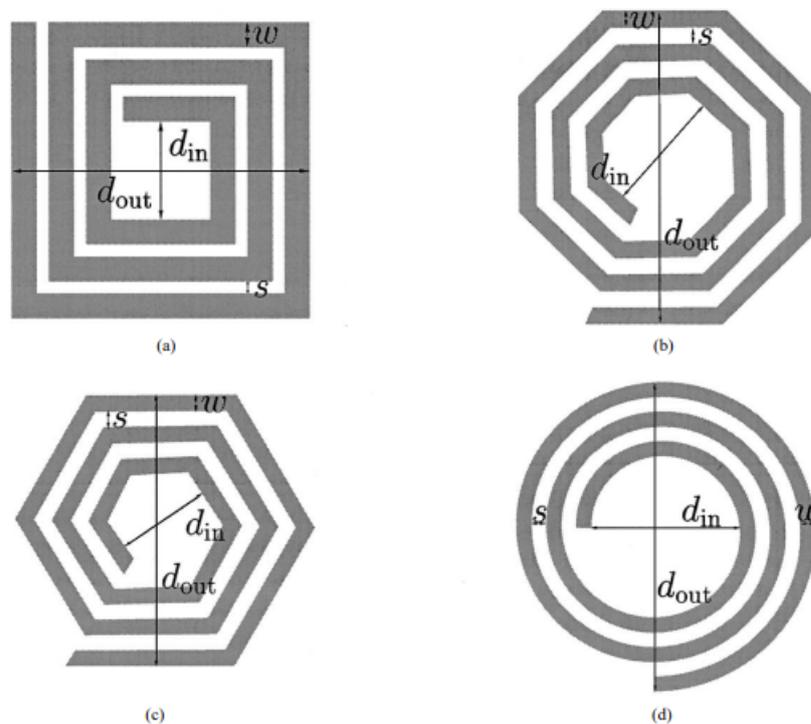
- A expressão de Wheeler, proposta em 1928, é válida apenas para elementos discretos e apresentava uma precisão de 1% para as bobinas estudadas com a tecnologia da época;
- A equação de Dill, proposta em 1964, é uma formulação mais simples, pois, considera somente o diâmetro médio e o número de voltas da bobina, por este motivo pode apresentar erros entre 40 e 80%;
- A equação de Wheeler Modificada presta-se para projeto rápido de indutores, apresenta comportamento semelhante ao Método de Mohan, porém, utiliza dois coeficientes dependentes da geometria da bobina e pode ser aplicada apenas às geometrias quadrada, hexagonal e octogonal;
- A formulação analítica aproximada de Greenhouse, proposta em 1974, apresenta resultados semelhantes aos resultados simulados e possui um fator de correção de efeito pelicular para frequências acima de 10 GHz, porém, sua aplicação em geometrias que envolvam ângulos diferentes de 0° ou 90° (circular e octogonal) é extremamente complexa. É um método bem amplo e considera diversos fatores das geometrias, por este motivo estará sugerido nos trabalhos futuros;

- O método de Mohan utiliza uma aproximação dos lados da geometria por placas com densidades de corrente equivalentes para obter uma expressão simples e exata da indutância da bobina como mostra a Figura 20 e pode ser aplicado as quatro principais geometrias. A precisão deste método é dependente da razão s/w , onde s é a distância entre as trilhas e w é a espessura das trilhas da bobina. No caso de $s \approx 3 w$ espera-se um erro de 8%. Entretanto, bobinas integradas costumam ser projetadas para $s \leq w$.

Apenas o Método de Mohan será discutido neste trabalho, pois, além do supracitado Kowaltschuk (2003) destaca a rapidez da simulação do método que possibilita avaliar as indutâncias de milhares de indutores em minutos, utilizando software de simulação eletromagnética.

A Figura 19 mostra os quatro principais tipos de geometrias utilizadas no projeto de bobinas integradas.

Figura 19 – Geometrias mais utilizadas para bobinas integradas.

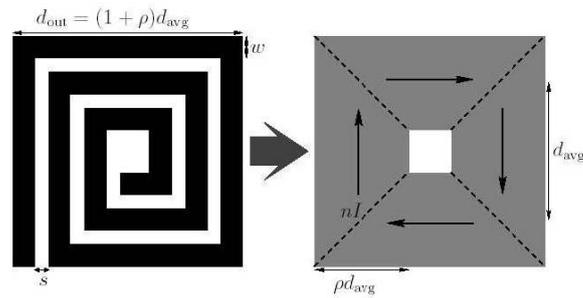


Fonte: (MOHAN et al., 1999).

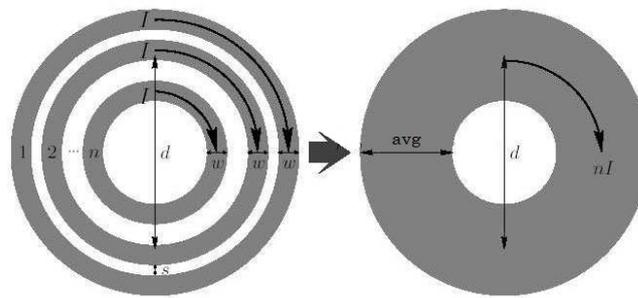
6.4.1 Cálculo da Indutância Série pelo Método de Mohan

O método se baseia em uma equação simplificada que relaciona a indutância com os parâmetros geométricos da bobina, como o número de espiras, o raio da bobina, a

Figura 20 – Ilustração do Método de Mohan.



(a) Aproximação para bobina retangular.



(b) Aproximação para bobina circular.

Fonte: Modificado de (KOWALTSCHUK, 2003).

espessura do condutor e a distância entre as espiras aproximando a geometria da bobina por um conjunto de placas de corrente como ilustra a Figura 20. Além disso, o Método de Mohan leva em conta os efeitos de borda, que podem afetar a distribuição de campo magnético e, conseqüentemente, a indutância.

De acordo com Kowaltschuk (2003) e Mohan et al. (1999), a expressão que modela a indutância L através do Método de Mohan é dada pela Equação 6.1

$$L_S = \frac{\mu n^2 d_{avg} c_1}{2} \left[\ln \left(\frac{c_2}{\rho} \right) + c_3 + c_4 \rho^2 \right] \quad (6.1)$$

onde

- μ é a permeabilidade magnética do meio em H/m ;
- ρ é a razão entre a largura da placa de corrente aproximada e seu comprimento médio. Se pegarmos como referência a Figura 19, ρ é dado pela Equação 6.2 (JOW; GHOVANLOO, 2007);
- n é o número de espiras;

- d_{avg} é o comprimento médio das espiras, em metros. d_{avg} pode ser calculado através da Equação 6.3 (JOW; GHOVANLOO, 2007);
- os coeficientes c_i dependem da geometria da bobina conforme a Tabela 1

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (6.2)$$

$$d_{avg} = \frac{d_{out} - d_{in}}{2} \quad (6.3)$$

Tabela 1 – Coeficientes para cálculo da indutância pelo Método de Mohan.

Geometria	c_1	c_2	c_3	c_4
Quadrada	1,27	2,07	0,18	0,13
Hexagonal	1,09	2,23	0,00	0,17
Octogonal	1,07	2,29	0,00	0,19
Circular	1,00	2,46	0,00	0,20

Fonte: (KOWALTSCHUK, 2003).

Uma das vantagens desse método é a sua simplicidade de implementação, permitindo que projetistas estimem rapidamente a indutância de bobinas planares integradas de quatro geometrias diferentes durante o processo de projeto. No entanto, é importante ressaltar que o Método de Mohan é uma aproximação e pode apresentar erros em relação a modelos mais complexos ou simulações mais detalhadas. Portanto, é recomendado validar os resultados obtidos com o método por meio de medições ou simulações mais precisas, especialmente em casos de geometrias de bobinas não convencionais ou aplicações de alta frequência.

6.4.2 Cálculo da Resistência Série

Em frequências abaixo de 500 MHz, a resistência em série de um componente pode ser aproximada pela resistência CC simples (VANACKERN, 2011). Isso ocorre porque, nessa faixa de frequência, os efeitos capacitivos e indutivos do componente são considerados insignificantes em comparação com a resistência. Portanto, a resistência CC, que é a resistência medida em corrente contínua, é uma boa estimativa da resistência série nessas baixas frequências.

No entanto, é importante ressaltar que essa aproximação é válida apenas em um intervalo limitado de frequências. À medida que a frequência aumenta, os efeitos capacitivos e indutivos começam a desempenhar um papel mais significativo, o que pode alterar a resistência efetiva do componente. Portanto, em frequências mais altas, é necessário levar

em consideração esses efeitos adicionais para obter uma caracterização mais precisa do componente.

Em frequências mais altas, o efeito pelicular, também conhecido como efeito *skin*, é um fenômeno que ocorre em bobinas planares (ou qualquer condutor) quando são submetidas a correntes alternadas de alta frequência. Esse efeito resulta da concentração da corrente elétrica na superfície externa do condutor, enquanto o núcleo do condutor apresenta uma corrente reduzida. Em frequências mais altas, as correntes alternadas tendem a se concentrar nas camadas superficiais do condutor, diminuindo a penetração da corrente em seu interior. Isso ocorre porque a corrente alternada induz campos magnéticos opostos na região interna do condutor, o que inibe o fluxo da corrente nessa área.

Como resultado, a seção transversal efetiva da trilha da bobina é reduzida, aumentando a resistência aparente do condutor. Isso tem implicações importantes para o desempenho da bobina, uma vez que a resistência aumentada afeta sua eficiência e capacidade de transmitir ou receber sinais de alta frequência. A escolha adequada da geometria da bobina, incluindo o espaçamento e a espessura do condutor, pode ajudar a otimizar a distribuição da corrente e reduzir os efeitos indesejados do efeito pelicular (KOWALTSCHUK, 2003).

A profundidade pelicular ou profundidade de penetração, dada pela Equação 6.4, é o parâmetro mais crítico relacionado aos efeitos das correntes parasitas. É uma medida que indica a distância característica que a corrente elétrica se concentra na superfície de um condutor quando submetido a correntes alternadas de alta frequência.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (6.4)$$

Onde:

- δ é a variável que representa o efeito pelicular;
- ρ é a resistividade do condutor, em Ωm ;
- μ é a permeabilidade magnética do material, em H/m ; e
- f é a frequência da corrente elétrica, em Hz .

O comprimento da espira pode ser encontrado através da Equação 6.6 (JOW; GHOVANLOO, 2007) e a resistência série da bobina pode ser determinada a partir da Equação 6.5 (VANACKERN, 2011).

$$R_S = \frac{\rho l}{W t_{eff}} = \frac{\rho l}{W \delta \left(1 - e^{-\frac{t}{\delta}}\right)} \quad (6.5)$$

$$l = 4 n d_{out} - 4 n W - (2n + 1)^2(s + W) \quad (6.6)$$

Onde:

- l é o comprimento da espiral, em m ;
- t_{eff} é a espessura eficaz da trilha, do inglês *effective thickness*, em m ;
- s é o espaço entre as espiras, em m ;
- d_{out} é o diâmetro externo da bobina, em m ;
- t é a espessura física da trilha, do inglês *thickness*, em m ; e
- W é a largura da trilha, do inglês *width*, em m .

Assim, nota-se que a Resistência Série é dependente da frequência, que modifica a espessura eficaz da bobina, do comprimento, da largura e da espessura física da bobina.

6.4.3 Cálculo da Capacitância entre Terminais

O acoplamento capacitivo indesejado que ocorre entre os terminais de entrada e saída do indutor é modelado pelo cálculo da capacitância entre terminais, C_S . Essa capacitância permite que o sinal flua diretamente entre os terminais, contornando a espiral do indutor como mostra a Figura 21. Ao analisar a estrutura física do indutor, tanto o acoplamento entre espiras adjacentes quanto a sobreposição entre a espiral e o terminal de saída contribuem para o valor da capacitância C_S .

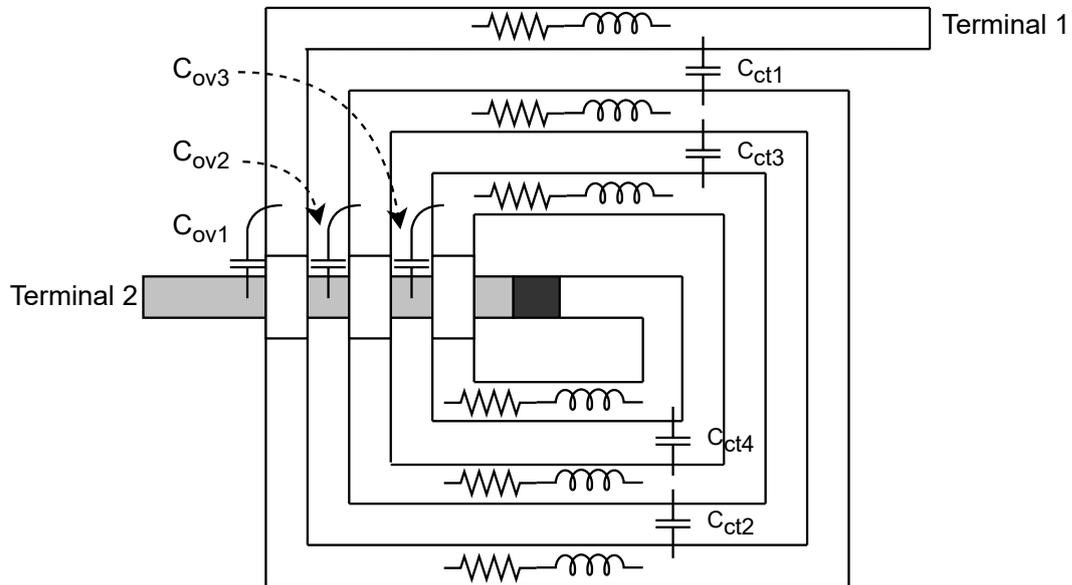
A capacitância entre os terminais ou capacitância de sobreposição, C_S , será a soma das capacitâncias C_{ov1} , C_{ov2} e C_{ov3} , esta capacitância de sobreposição é considerada, pois, há uma diferença de potencial maior entre as espiras da bobina e o terminal *Port2*. O acoplamento entre as espiras adjacentes e entre as próprias espiras também contribuem para o valor de C_S , porém, como as espiras da bobina são quase equipotenciais, esse efeito de acoplamento pode ser desconsiderado. Caso seja necessário, este efeito de acoplamento pode ser diminuído ao aumentar-se a distância entre as espiras (VANACKERN, 2011).

O valor da capacitância de sobreposição, C_S , será dada pela Equação 6.7.

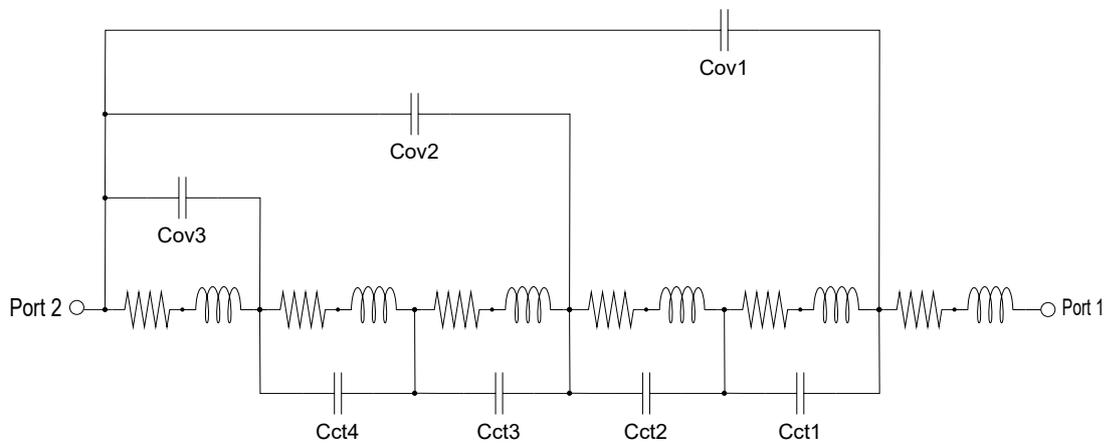
$$C_S = n W^2 \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox(m1-m2)}} \quad (6.7)$$

Onde

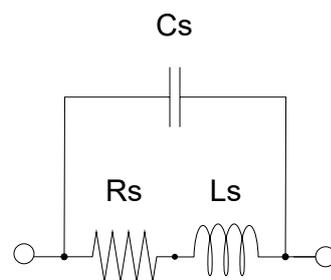
Figura 21 – Modelagem da capacitância entre os terminais, exemplo com uma bobina retangular.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Modificado de (VANACKERN, 2011).

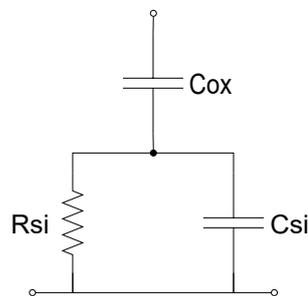
- n é o número de sobreposições;
- W é a largura da trilha;
- $t_{ox(m1-m2)}$ é a espessura entre a camada de metal da espiral e do terminal inferior; e
- ε_{ox} é a permissividade do óxido.

Com base nas simulações de Yue (1998), nota-se que a Equação 6.7 só é válida para frequências menores que 5 GHz. A partir de 5 GHz, as capacitâncias entre as espiras adjacentes (C_{ct1} , C_{ct2} , C_{ct3} e C_{ct4}) se tornam consideráveis para o cálculo de C_S .

6.4.4 Cálculo das Características Parasitas do Substrato

As características de uma estrutura CMOS podem ser modeladas por três elementos, C_{ox} , R_{si} e C_{si} , (Figura 22), que representam a capacitância do óxido e a resistência e a capacitância do silício, respectivamente.

Figura 22 – Modelagem das características elétricas do substrato.



Fonte: Modificado de (KOWALTSCHUK, 2003) e (VANACKERN, 2011).

Como bobinas em espiral sobre o silício são da ordem de centenas de μm , isso é muito maior que a espessura da camada de óxido e comparável à espessura do silício, a capacitância e a resistência do substrato são aproximadamente proporcionais à área ocupada pela bobina e dadas pelas Equações 6.8, 6.9 e 6.10

$$C_{ox} = \frac{1}{2} l W \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad (6.8)$$

$$C_{Si} = \frac{1}{2} l W C_{SUB} \quad (6.9)$$

$$R_{Si} = \frac{2}{l W G_{SUB}} \quad (6.10)$$

Onde C_{SUB} é a capacitância por unidade de área para o substrato de silício e G_{SUB} é a condutância por unidade de área para o substrato de silício. Os valores de C_{SUB} e G_{SUB} dependem da dopagem do substrato e devem ser extraídos através de medições.

6.4.5 Fator de Qualidade

O fator de qualidade, Q , é uma medida que indica a eficiência da bobina em armazenar energia magnética em relação às perdas. É uma métrica importante para avaliar o desempenho de bobinas e indutores em circuitos integrados.

O fator de qualidade (Q) é calculado como a razão entre a energia armazenada no campo magnético da bobina e a energia dissipada nas perdas do sistema (Equação 6.11). Quanto maior o valor do Q , menor é a perda de energia e maior é a eficiência da bobina. Em outras palavras, um alto Q indica que a bobina possui baixas perdas e é capaz de manter uma alta quantidade de energia armazenada durante oscilações de frequência.

Para melhorar o fator de qualidade em bobinas integradas em tecnologia CMOS, várias técnicas podem ser aplicadas, como a redução das perdas ôhmicas nos condutores, a minimização das perdas dielétricas no substrato e a otimização do layout da bobina para reduzir o acoplamento parasita. Além disso, a escolha de materiais com baixas resistividades e dielétricos de baixa perda também pode contribuir para um melhor desempenho em termos de fator de qualidade.

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energia_Armazenada}}{\text{Energia_Dissipada_em_um_Ciclo_de_Oscilacao}} \quad (6.11)$$

Embora não haja uma relação direta entre o Fator de Acoplamento (k) e o Fator de Qualidade (Q), em circuitos ressonantes acoplados, o valor de Q é afetado pelo fator de acoplamento. Um acoplamento mais forte (k próximo de 1) resulta em um aumento no fator de qualidade (Q) do sistema, indicando uma maior eficiência de transferência de energia entre as bobinas. No entanto, é importante observar que outros fatores, como resistência interna das bobinas e perdas dielétricas, também podem influenciar o fator de qualidade (Q) além do fator de acoplamento (k). Portanto, a relação entre k e Q pode ser indireta e depende das características específicas do circuito e das condições de operação.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Considerações Finais

A transmissão de energia sem fio é uma área de pesquisa e desenvolvimento tecnológico que tem despertado grande interesse nos últimos anos. A possibilidade de transmitir energia de forma eficiente e sem a necessidade de fios ou cabos tem o potencial de revolucionar diversos setores da sociedade, desde a medicina até a indústria automotiva. No presente trabalho, buscamos investigar e compreender as características e propriedades das bobinas utilizadas na transmissão de energia sem fio, com foco nas bobinas integradas e na tecnologia *near-field*.

Ao longo dos capítulos anteriores, exploramos diversos aspectos relacionados ao tema como a importância da transmissão de energia sem fio, seus benefícios e limitações. Compreendemos que a transmissão de energia sem fio oferece maior flexibilidade e mobilidade, eliminando a necessidade de conexões físicas. No entanto, há desafios a serem enfrentados, como a eficiência energética e a limitação da distância de transmissão. Aprofundamos nosso estudo nas tecnologias de transmissão de energia sem fio *near-field*, em especial o acoplamento indutivo e o acoplamento indutivo ressonante. Entendemos que o acoplamento indutivo é baseado no princípio da indução eletromagnética, em que a corrente elétrica é induzida por meio da variação do campo magnético entre as bobinas transmissora e receptora. Já o acoplamento indutivo ressonante utiliza a ressonância para aumentar a eficiência da transmissão, tornando-a mais estável e eficaz. Discutimos as características e propriedades das bobinas utilizadas na transmissão de energia sem fio. Exploramos a importância da geometria, número de espiras e resistência das bobinas. Compreendemos que a geometria da bobina afeta a distribuição do campo magnético e a capacidade de acoplamento. O material utilizado influencia a condutividade elétrica e as propriedades magnéticas da bobina. O número de espiras influencia a indutância da bobina e, conseqüentemente, a eficiência da transmissão. E a resistência elétrica da bobina influencia a perda de energia por aquecimento. Focamos nas bobinas integradas para transmissão de energia sem fio e compreendemos que essas bobinas são projetadas e fabricadas diretamente em dispositivos, como implantes biomédicos, oferecendo uma solução compacta e eficiente. Exploramos os benefícios dessa abordagem, como a redução do tamanho do dispositivo e a melhoria da eficiência de transmissão. No entanto, também enfrentamos desafios, como o projeto e otimização das bobinas para maximizar o acoplamento e a eficiência.

Diante das informações obtidas ao longo deste trabalho, concluímos que as bobinas desempenham um papel fundamental na transmissão de energia sem fio. Seu projeto adequado e otimizado é essencial para maximizar a eficiência e a estabilidade da transmissão. A geometria, o material, o número de espiras e a resistência são características importantes a serem consideradas no projeto das bobinas. Além disso, as bobinas integradas apresentam vantagens significativas, especialmente em dispositivos biomédicos, permitindo a criação de soluções compactas e eficientes.

Este trabalho contribui para o conhecimento e compreensão das bobinas para transmissão de energia sem fio, fornecendo uma visão geral sobre suas características, propriedades e aplicações. No entanto, é importante ressaltar que a área de transmissão de energia sem fio ainda está em constante evolução e há espaço para futuras pesquisas e aprimoramentos. Avanços contínuos na tecnologia das bobinas, bem como a investigação de novos materiais e técnicas de otimização, podem levar a melhorias significativas na eficiência e alcance da transmissão de energia sem fio.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os seguintes estudos são sugeridos para trabalhos futuros:

- Explorar a formulação analítica aproximada de Greenhouse para as quatro principais geometrias de projeto;
- Implementar as técnicas de projeto abordadas em simulador eletromagnético;
- Testar técnicas de miniaturização das AoCs em baixas frequências;
- Avaliar o potencial do uso de matrizes de AoCs com mecanismos de formação de feixe para lidar com a alimentação simultânea de dispositivos em locais distintos; e
- Avaliar o impacto em AoCs dos métodos aplicados à bobinas externas para melhoria da eficiência de transmissão.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Telecomunicações. *Radiofrequência*. 2021. Acesso em 16 de maio de 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/radiofrequencia>>.
- AHN, C.-J. et al. Prototype of 5.8 ghz wireless power transmission system for electric vehicle system. *Int Conf Environ Sci Technol*, v. 6, 01 2011.
- ALLEN, P. E.; HOLBERG, D. R. *CMOS Analog Circuit Design*. 3. ed. New York, NY: Oxford University Press, 2011. (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering).
- CHEEMA, H. M.; SHAMIM, A. The last barrier: on-chip antennas. *IEEE Microwave Magazine*, v. 14, n. 1, p. 79–91, 2013.
- CHRIST, A. et al. Evaluation of wireless resonant power transfer systems with human electromagnetic exposure limits. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 55, n. 2, p. 265–274, 2013.
- COCA, E. *Wireless power transfer: fundamentals and technologies*. [S.l.]: BoD–Books on Demand, 2016.
- DUONG, T. P.; LEE, J.-W. Experimental results of high-efficiency resonant coupling wireless power transfer using a variable coupling method. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 21, n. 8, p. 442–444, 2011.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física, volume 3: Eletromagnetismo*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 365 p. ISBN: 9788521208013.
- HWANG, K. et al. An autonomous coil alignment system for the dynamic wireless charging of electric vehicles to minimize lateral misalignment. *Energies*, MDPI, v. 10, n. 3, p. 315, 2017.
- JAWAD, A. M. et al. Opportunities and challenges for near-field wireless power transfer: A review. *Energies*, MDPI AG, v. 10, n. 7, p. 1022, jul. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en10071022>>.
- JOW, U.-M.; GHOVANLOO, M. Design and optimization of printed spiral coils for efficient inductive power transmission. In: *2007 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 70–73.
- KARIM, R. et al. The potentials, challenges, and future directions of on-chip-antennas for emerging wireless applications—a comprehensive survey. *IEEE Access*, v. 7, p. 173897–173934, 2019.
- KI, W.-H. *CMOS integrated circuit design for wireless power transfer*. 1. ed. Singapore, Singapore: Springer, 2017. (Analog Circuits and Signal Processing).
- KIM, C. et al. Design of miniaturized wireless power receivers for mm-sized implants. In: *2017 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–8. ISSN 2152-3630.

- KOWALTSCHUK, R. *Projeto de Indutores Espirais Integrados por Seleção em Banco de Dados Gerado por Simulação Eletromagnética e Redes Neurais*. 226 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2003.
- KURS, A. et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, v. 317, n. 5834, p. 83–86, 2007. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1143254>>.
- LIU, Z.; CHEN, Z.; LI, J. A magnetic tank system for wireless power transfer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 27, n. 5, p. 443–445, 2017.
- MANDAL, S.; MANDAL, S. K.; MAL, A. K. On-chip antennas using standard cmos technology: A brief overview. In: *2017 International Conference on Innovations in Electronics, Signal Processing and Communication (IESC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 74–78.
- MOHAN, S. et al. Simple accurate expressions for planar spiral inductances. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. 34, n. 10, p. 1419–1424, 1999.
- MOTTA, T. da S. *Transmissão de Energia Sem-Fio: Método do Acoplamento Indutivo Ressonante*. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- MULDERS, J. V. et al. Wireless power transfer: Systems, circuits, standards, and use cases. *Sensors*, v. 22, n. 15, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/15/5573>>.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica 3*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 296 p. ISBN: 9788521208013.
- RAO, T.; GEETHA, K. Categories, standards and recent trends in wireless power transfer: A survey. *Indian journal of science and technology*, v. 9, p. 20, 2016.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para Cientistas e Engenheiros, volume 2: Eletricidade e Magnetismo, Ótica*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 530 p. ISBN: 9788521617112.
- UMENEI, A. Understanding low frequency non-radiative power transfer. *Bearing a date of Jun*, v. 7, 2011.
- VANACKERN, G. *Design Guide for CMOS Process On-Chip 3D Inductor using Thru-Wafer Vias*. Dissertação (Dissertação) — Boise State University, 2011.
- YUE, C. P. *On-Chip Spiral Inductors for Silicon-Based Radio-Frequency Integrated Circuits*. Tese (Doutorado) — Stanford University, 1998.