

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Arthur Henrique de Lima Ferreira

**APLICAÇÃO DE METAMATERIAIS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA NA  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR MEIO DE ACOPLAMENTO  
MAGNÉTICO RESSONANTE FORTE**

Belo Horizonte

2020

Arthur Henrique de Lima Ferreira

**APLICAÇÃO DE METAMATERIAIS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA NA  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR MEIO DE ACOPLAMENTO  
MAGNÉTICO RESSONANTE FORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rose Mary de Souza  
Batalha

Belo Horizonte

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

F383a	<p>Ferreira, Arthur Henrique de Lima</p> <p>Aplicação de metamateriais para aumento da eficiência na transmissão de energia sem fio por meio de acoplamento magnético ressonante forte / Arthur Henrique de Lima Ferreira. Belo Horizonte, 2020.</p> <p>79 f. : il.</p> <p>Orientadora: Rose Mary de Souza Batalha</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica</p> <p>1. Energia elétrica - Transmissão. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Ondas eletromagnéticas - Transmissão. 4. Linhas de transmissão em fita. 5. Antenas (Eletrônica). 6. Campos eletromagnéticos - Simulação por computador. I. Batalha, Rose Mary de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p>CDU: 621.396.67</p>
-------	--

Arthur Henrique de Lima Ferreira

**APLICAÇÃO DE METAMATERIAIS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA NA  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR MEIO DE ACOPLAMENTO  
MAGNÉTICO RESSONANTE FORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rose Mary de Souza Batalha – PUC Minas (Orientadora)

---

Prof. Dr. Maury Meirelles Gouvêa Júnior – PUC Minas (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Ricardo Luiz da Silva Adriano – UFMG (Banca Examinadora)

---

Prof. Dr. Petr Iakovlevitch Ekel – PUC Minas (Suplente)

Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2020.

*À memória do Prof. Dr. Orlando Fedeli,  
a Joseph Ratzinger, Bento XVI, Cooperatores Veritatis.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à Nossa Senhora que me sustentaram em tão difícil labor e que hão de me guiar na senda de novas conquistas.

Aos meus pais, João Batista e Vanilda Maria, pelo dom da vida.

À Dayane Leal pelo amor e dedicação a mim, e por ser minha fonte de inspiração.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rose Batalha, pela condução deste trabalho, pelo suporte, e pela paciência ao longo destes meses.

Ao meu precioso amigo, Lucas Douglas, que me auxiliou nesta tarefa hercúlea.

Ao Prof. Dr. Wágner Bachur, por todo o incentivo, ajuda, e exemplo profissional.

Aos Mestres Diego Luz e Diego Corrêa por suas imprescindíveis colaborações.

Aos meus colegas de Mestrado: Dalvan Rodrigues, Jhenifer dos Anjos e Mariana Thayná pela cooperação nas disciplinas e pela convivência.

À PUC-MG e à CAPES pela oportunidade, na esperança de que minha contribuição seja dada para o progresso da ciência.

Ao PPGEE PUC-MG faço votos de sucessos vindouros. Agradeço e parabênizo na pessoa de Eliza Caetano por toda a organização e zelo.

A todos os meus amigos e familiares que sempre estão comigo.

Nisi Dominus aedificaverit domum, in vanum laboraverunt qui aedificant eam.

[Se o Senhor não sustentar o edifício, em vão trabalharão os construtores.]

(Salmo 126, 1)

## RESUMO

A energia elétrica tradicionalmente é transmitida em meios confinados como fios e cabos metálicos. Contudo, é possível transmiti-la através do ar, uma vez que ela assume a forma de ondas eletromagnéticas. Estas ondas se propagam pelo espaço em todas as direções, e por isso parte da energia é perdida por dispersão, diminuindo a eficiência da transmissão. Neste trabalho é estudada uma maneira de se fazer convergir o campo magnético de modo a reduzir as perdas inerentes à transmissão sem fio provenientes de fenômenos como a propagação radial e reflexão. Para tanto são utilizados Metamateriais, estruturas normalmente periódicas, compostas por elementos naturais e que quando arranjados adequadamente podem ter comportamentos incomuns na natureza, como por exemplo, apresentar um índice de refração negativo. Os Metamateriais apresentam-se como uma opção para aumentar a eficiência na transmissão de energia sem fio, pois são capazes de fazer alterações nos campos elétrico e magnético de modo a funcionarem como uma lente de convergência. Em sua configuração tradicional podem ser confeccionados na forma de anéis ressonadores partidos ou fios finos, sendo denominados então como Metamateriais convencionais, ou através de uma linha espiral de material supercondutor, os chamados Metamateriais Supercondutores. A modelagem matemática de uma célula de Metamaterial Convencional e supercondutora foi realizada neste trabalho. Um sistema de transmissão de energia sem fio foi modelado em 3D num *software* para resolver problemas eletromagnéticos, onde três configurações foram simuladas: inicialmente sem Metamateriais, depois com os Metamateriais convencionais e por último com os Metamateriais Supercondutores, sempre pela técnica de acoplamento magnético ressonante forte. Foi feita uma investigação do comportamento de parâmetros como tensão, corrente, potência e eficiência em função da variação da distância entre as bobinas transmissora e receptora, com a alteração do resistor de carga, e também de acordo com o desalinhamento horizontal entre as mesmas bobinas, para todas as configurações de sistema, de modo a serem comparados. Os resultados obtidos mostram que os Metamateriais, independente do tipo utilizado no trabalho, foram responsáveis por fazer convergir o fluxo magnético disperso no ar, aumentando a eficiência na transmissão de energia sem fio. Some-se a isso o fato de que eles também se mostram úteis mesmo quando ocorre um desalinhamento entre as unidades transmissora e receptora, confirmando sua empregabilidade e benefícios em carregamento sem fio.

Palavras-chave: Transmissão de energia sem fio. Acoplamento magnético ressonante forte. Metamateriais.

## ABSTRACT

The electric energy traditionally is transmitted in confined ways like metallic wires and cables. However, it is possible to transmit it through the air, once it takes over the electromagnetic waveform. These waves propagate through space in all directions, and because of it part of the energy is lost through dispersion, decreasing the efficiency of the transmission. In this work, a way to make the electromagnetic waves converge in order to reduce the losses inherent from phenomena such as radial propagation and reflection to wireless transmission is studied. For this purpose, Metamaterials are used, normally periodic structures, composed by natural elements and when properly arranged, can behave in an way not found in nature, such as having a negative refractive index. Metamaterials are an option to increase the efficiency in the wireless power transfer, because they are capable to make changes in the electric and magnetic fields in order to work like a converging lens. In its traditional configuration they can be made with split ring resonators or thin wires, these are the termed as Conventional Metamaterials, or through a superconductor Metamaterial spiral line and thus called Superconducting Metamaterials. The mathematical modeling of a Conventional and Superconducting Metamaterial cell was performed in this work. A wireless power transfer system was implemented in a 3D electromagnetic solver, where three configurations were simulated: initially without Metamaterials, then with the Conventional Metamaterial and finally with superconducting Metamaterials, always by the strongly coupled magnetic resonance technique. There was an investigation of the behavior of parameters such as voltage, current, power and the efficiency according to the increase of distance between the transmitter and receiver coils, with the change of the load resistor, and also according to the horizontal misalignment between them, for all system configurations, in order to be compared. The results obtained show that the Metamaterials, regardless of the type used in this work, were responsible for converging the magnetic flow dispersed in the air, increasing the efficiency of the simulated wireless energy transfer system. In addition to that the fact that they are also useful even when there is a misalignment between the transmitting and receiving units, confirming their employability in wireless charging.

Keywords: Wireless power transfer. Strongly coupled magnetic resonance. Metamaterials.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bobina de Tesla .....	18
Figura 2 - Torre de Wanderclyffe.....	19
Figura 3 - Exemplo de carregador sem fio .....	19
Figura 4 - Classificação das tecnologias WPT .....	22
Figura 5 - SHARP .....	23
Figura 6 - Diagrama de blocos de um sistema WPT-RF.....	23
Figura 7 - Diagrama de blocos de um sistema BD-IPT.....	25
Figura 8 - Sistema SCMR tradicional.....	26
Figura 9 - (a) Ilustração de um sistema com bobinas planas (b) Protótipo de bobinas planas.....	26
Figura 10 - Ilustração de um sistema CWPT.....	27
Figura 11 - SCMR: (a) Configuração básica (b) Circuito equivalente.....	29
Figura 12 - Ilustração de um sistema de compensação paralela e série .....	31
Figura 13 - Classificação dos materiais quanto à permeabilidade magnética e permissividade elétrica .....	36
Figura 14 - Comportamento do vetor de Poynting.....	37
Figura 15 - Reflexão e refração na interface de dois meios (a) $n_2 > 0$ , (b) $n_2 < 0$ .....	39
Figura 16 - Refração de um raio em meios RHM e LHM.....	40
Figura 17 - Metamateriais (a) <i>Thin Wire</i> (b) <i>Split Ring Resonator</i> .....	41
Figura 18 - Circuitos equivalentes de SRR's (a) anéis duplos (b) anel único .....	43
Figura 19 - Modelo de um SRR básico .....	44
Figura 20 - Efeito Meissner em YBCO .....	46
Figura 21 - Diagrama esquemático de uma <i>slab</i> de MM Supercondutor num sistem WPT.....	47
Figura 22 - MM Supercondutor: (a) Estrutura (b) Circuito equivalente .....	48
Figura 23 - Variação da resistividade do YBCO de acordo com a temperatura .....	48
Figura 24 – (a) Unidade transmissora (b) Unidade receptora .....	52
Figura 25 - Condições de contorno.....	53
Figura 26 - Comportamento dos campos elétrico e magnético num meio PMC.....	53
Figura 27 - SCMR sem Metamaterial.....	54
Figura 28 - Corrente na carga - $RL = 100\Omega$ – Sem MM .....	54
Figura 29 - Tensão na carga - $RL = 100\Omega$ – Sem MM.....	55
Figura 30 - Eficiência no sistema - $RL = 100\Omega$ – Sem MM .....	55
Figura 31 - SCMR com MM Convencional .....	56
Figura 32 - Dimensões da <i>slab</i> de MM Convencional .....	57
Figura 33 - Corrente na carga - $RL = 100\Omega$ – Com MM Convencional .....	57
Figura 34 - Tensão na carga - $RL = 100\Omega$ – Com MM Convencional.....	58
Figura 35 - Eficiência na carga - $RL = 100\Omega$ – Com MM Convencional .....	58
Figura 36 – Célula unitária de MM Supercondutor.....	60
Figura 37 - SCMR com <i>slab</i> de MM Supercondutor .....	61
Figura 38 - Corrente na carga - $RL = 100\Omega$ – Com MM Supercondutor.....	62
Figura 39 - Tensão na carga $RL = 100\Omega$ – Com MM Supercondutor.....	62

Figura 40 - Eficiência na carga - $RL = 100\Omega$ – Com MM Supercondutor.....	63
Figura 41 - Comparação da eficiência em sistemas SCMR - $RL = 100\Omega$ .....	63
Figura 42 - Comparação dos valores de potência disponibilizada à carga.....	64
Figura 43 - Deslocamento da Unidade Receptora .....	65
Figura 44- Comparação da eficiência após desalinhamento de UR – $RL = 100\Omega$ .....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre técnicas WPT .....	28
Tabela 2 - Parâmetros das bobinas utilizadas nas simulações.....	52
Tabela 3 - Resultados sem MM - $RL = 100\Omega$ .....	54
Tabela 4 - Parâmetros construtivos - Célula unitária de MM Convencional .....	56
Tabela 5 - Resultados com MM Convencional - $RL = 100\Omega$ .....	57
Tabela 6 - Parâmetros construtivos - Célula unitária de MM Supercondutor .....	60
Tabela 7 - Resultados com MM Supercondutor - $RL = 100\Omega$ .....	61
Tabela 8 - Comparação da eficiência e potência na carga em sistemas SCMR .....	64
Tabela 9 - Comparação dos valores de corrente na carga .....	65
Tabela 10 - Comparação de resultados após desalinhamento - Sem Metamaterial e com Metamaterial.....	66
Tabela 11 - Comparação de resultados após variação da carga - Sem Metamaterial e com Metamaterial .....	67

## LISTA DE ABREVIACÕES

- BD-WPT – *Bidirectional Wireless Power Transfer*
- BD-IWPT – *Bidirectional Inductive Power Transfer*
- CMR – Acoplamento Magnético Ressonante (*Coupling Magnetic Resonance*)
- CST® – *Computer Simulation Technology* – software CST®
- CWPT – *Capacitive Wireless Power Transfer*
- DNG – Duplo negativo (*Double Negative*)
- ENG – Meio com Epsilon Negativo (*Epsilon-Negative Medium*)
- FR4 – Retardante a Chamas 4 (*Flame Retardant 4*)
- IoT – Internet das Coisas (*Internet of things*)
- IWPT – *Inductive Wireless Power Transfer*
- LHM – Materiais de Mão-esquerda (*Left Handed Materials*)
- MNG – Meio Mu-negativo (*Mu-negative Medium*)
- MM – Metamaterial (is) (*Metamaterials*)
- PMC – Perfect Magnetic Conductor
- RF – Radiofrequência
- RFID – Identificação por Rádio Frequência (*Radio-Frequency Identification*)
- RHM – Materiais de Mão-direita (*Right Handed Materials*)
- SCMR – Acoplamento magnético ressonante forte (*Strong Coupled Magnetic Resonance*)
- SRR – Anel ressonador partido (*Split Ring Resonator*)
- TEM – Onda transversoeletromagnética (*Transverse Electromagnetic Wave*)
- TW – Fios finos (*Thin Wires*)
- UR – Unidade Receptora
- UT – Unidade Transmissora
- WPT – Transmissão de energia sem fio (*Wireless Power Transfer*)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	Objetivo .....	14
1.1.1	Objetivos específicos .....	14
1.2	Justificativa .....	15
1.3	Metodologia .....	15
1.4	Organização do texto .....	16
<b>2</b>	<b>TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO</b> .....	<b>17</b>
2.1	Histórico.....	17
2.2	Estado da arte em WPT sem Metamateriais .....	20
2.3	Classificação .....	21
2.3.1	WPT Radiativa – Campo distante .....	22
2.3.2	WPT Não-radiativa – Campo próximo.....	24
2.4	Comparação entre as técnicas WPT.....	28
2.5	Sistemas SCMR.....	28
<b>3</b>	<b>METAMATERIAIS</b> .....	<b>33</b>
3.1	Introdução .....	33
3.2	Permissividade elétrica e permeabilidade magnética .....	34
3.3	Terminologia.....	37
3.3.1	Materiais canhotos – LH (Left-handed) .....	37
3.3.2	Materiais duplo-negativos – DNG (Double-negative) .....	37
3.3.3	Meio de Veselago (Veselago medium) .....	37
3.3.4	Meio de velocidade de fase negativa – NPV (Negative phase velocity medium, NPV) .....	37
3.4	Índice de Refração Negativo.....	38
3.5	Estruturas MM convencionais .....	40
3.5.1	Modelo de fios finos – TW (Thin Wire) .....	41
3.5.2	Anéis ressonadores partidos – SRR’s (Split Ring Resonators) .....	42
3.5.3	Modelo utilizado para simulação.....	43
3.6	Metamateriais Supercondutores.....	45
3.6.1	Efeito Meissner.....	46
3.6.2	Sistemas SCMR com MM Supercondutores .....	47
3.7	Estado da arte em WPT com Metamateriais.....	48

<b>4</b>	<b>SISTEMA WPT – SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
4.1	Dados gerais dos sistemas simulados .....	51
4.2	Condições de contorno.....	53
4.3	Sistema SCMR sem Metamaterial .....	53
4.4	Sistema SCMR com Metamaterial Convencional .....	56
4.5	Simulações com <i>slab</i> de MM Supercondutor .....	59
4.5.1	Projeto de uma <i>slab</i> de MM Supercondutor .....	59
4.5	Comparação dos sistemas SCMR.....	63
4.6	Efeito do desalinhamento entre UT e UR.....	65
4.7	Variação dos valores dos resistores de carga.....	67
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>68</b>
5.1	Trabalhos futuros .....	69
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A transmissão de energia sem fio – WPT (do inglês, *Wireless Power Transfer*) é uma tecnologia capaz de transmitir energia eletromagnética de uma fonte a uma carga elétrica através de um espaço livre no ar.

Em função do desenvolvimento contínuo de novas tecnologias e dispositivos eletroeletrônicos, a WPT pode oferecer energia para suprir as respectivas demandas desde pequenos dispositivos (ZHANG; ZHANG, 2020) como implantes biomédicos (HA-VAN; SEO, 2018), eletrônicos portáteis (LIU et al., 2018), redes de sensores (KRIKIDIS, 2019), Internet das Coisas – IoT (*Internet of Things*) (PARDUE et al., 2018) até artefatos de magnitude superior, como robôs (GAO; YAN, 2019) e veículos elétricos (ZENG, YANG e PENG, 2017).

A tecnologia de transmissão de energia sem fio apresenta-se como uma opção para eliminar os tradicionais métodos de transmissão via cabos, uma vez que tem vantagens inerentes como segurança em baixa frequência e conveniência (LI et al., 2020). Ademais, acrescenta em mobilidade no manuseio de eletroeletrônicos e aumenta a flexibilidade para dispositivos cuja substituição de baterias seja cara, perigosa ou inviável (biomédicos, por exemplo).

A WPT também torna possível que a partir de um mesmo carregador se forneça energia a dispositivos de modelos e marcas diferentes, e está apta a gerar economia ao fornecê-la sob demanda (LU et al., 2016).

Existem várias técnicas para WPT, e estas são classificadas quanto à aplicação ou não de radiação eletromagnética. Elas são denominadas como radiativas (caracterizadas por campo distante) e não radiativas (caracterizadas por campo próximo) (WU; CHOUDHURY; MATSUMOTO, 2013).

As técnicas radiativas empregam radiofrequência para transmitir energia em distâncias desde dezenas de metros a dezenas de quilômetros, em frequências da ordem de GHz. Contudo, a maioria das aplicações de carregamento sem fio atuais é baseada em acoplamento magnético ressonante (*Coupling Magnetic Resonance, CMR*). Esta forma de transmissão de energia ocorre a partir da indução de campo magnético entre duas bobinas, em geral numa frequência de operação da ordem de kHz a MHz, e, além disso, apresenta segurança em baixa frequência e boa eficiência em distâncias curtas, quando comparada às outras técnicas WPT (LU et al., 2016).

A pesquisa em WPT tem avançado no campo científico e tem atraído esforços para seu desenvolvimento devido à sua importância e empregabilidade atual e futura. Segundo levantamento da empresa de pesquisa *Research and Markets*, o mercado de carregamento sem fio para veículos elétricos elevar-se-á de 16 para 234 milhões de dólares de 2020 até 2027 (MARKETS, 2017). E, segundo pesquisa da empresa *Research Nester* o mercado global em WPT deverá atingir 12,43 bilhões de dólares ao

fim de 2024, quintuplicando o valor de 2016 (NESTER, 2019), confirmando a importância desta tecnologia na economia mundial contemporânea.

Contudo, dispositivos de carregamento via WPT possuem um custo de implementação maior frente aos carregadores convencionais, pelo fato de que produzem mais calor e pela necessidade de custos adicionais com o material de fabricação (WANG, 2016). Além disso, a WPT tem como problema o fato de a potência transmitida decair exponencialmente com o aumento da distância ( $d$ ) da carga à fonte na razão de  $(1/d)^3$  para sistemas de campo próximo (MUR-MIRANDA et al., 2010) e de  $(1/d)^2$  para sistemas de campo distante (LU et al., 2015).

O decaimento da eficiência é proveniente de fatores como distância entre a fonte e a carga, alinhamento entre o transmissor e o receptor, e fatores inerentes à WPT como fenômenos de propagação radial e reflexão.

A fim de atenuar as perdas na WPT, e conseqüentemente aumentar a distância de transmissão e a eficiência, está como objeto de estudo atual a utilização de materiais com propriedades não naturais, denominados Metamateriais – MMs (*Metamaterials*). Os Metamateriais são capazes de fazer a concatenação do fluxo magnético divergente no ar e fornecer um acoplamento adicional entre os elementos transmissor e receptor (BHATTACHARYA et al., 2018), de forma a amenizar a exponencial redução da eficiência em sistemas WPT de campo próximo (LIPWORTH, 2015).

A partir de materiais comuns obtidos na natureza, condutores como cobre, ouro e prata, são confeccionados os Metamateriais (WATTS; XIANLIANG; PADILLA, 2012). Estes elementos são utilizados na construção de arranjos periódicos que apresentam reações não naturais uma vez que estejam submetidos a campos eletromagnéticos, funcionando então como absorvedores perfeitos (ZHANG et al., 2015).

Os arranjos periódicos de Metamateriais podem ser aplicados em superfícies (planas ou não), sendo muitas vezes denominados Superfícies Seletivas de Frequência – FSS (*Frequency Selective Surfaces*) ou em estruturas volumétricas (CAMPOS, 2009). O fato de poderem ser estendidos em estruturas 2D e 3D provém de sua homogeneidade efetiva, que é satisfeita uma vez que o tamanho médio de sua célula estrutural seja muito menor que o seu comprimento de onda. Assim, o material tem um comportamento eletromagnético uniforme ao longo da direção de propagação (CALOZ; ITOH, 2006).

O comportamento incomum dos Metamateriais é possível porque seus parâmetros como permeabilidade magnética ( $\mu$ ), permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e o índice de refração ( $n$ ) podem ser simultaneamente negativos, de forma que os Metamateriais passam a agir como lentes eletromagnéticas capazes de fazer convergir o campo eletromagnético divergente na direção de transmissão (CHO et al., 2016).

Veselago denominou os MM como materiais LH (do inglês, *left-handed*) pelo fato da propagação das ondas eletromagnéticas com o campo elétrico, magnético e vetor constante de propagação ( $k$ ) formar uma tríade canhota, quando comparada aos materiais convencionais. Ele previu vários fenômenos comportamentais que ocorrem em meios LH como a reversão do efeito Doppler, da lei de Snell e a refração negativa.

Os Metamateriais podem ser projetados também para que sua superfície sirva como refletor para o campo eletromagnético que se propaga na direção contrária à direção de transmissão. Some-se a isso o fato de que uma onda eletromagnética pode ter parte de sua amplitude restaurada ao se propagar em MMs uma vez que eles são capazes de modificar o coeficiente de atenuação das mesmas (SMITH; PENDRY, 2009).

Além dos MMs já citados, tidos como convencionais, atualmente também são objeto de estudo os chamados Metamateriais Supercondutores (*Superconducting Metamaterials*).

Os MMs Supercondutores diferenciam-se dos convencionais em sua estrutura, geometria e elementos componentes. Eles são compostos basicamente por uma linha espiral de material com características supercondutoras, como por o exemplo o óxido de Ítrio-Bário-Cobre (*Yttrium-Barium-Copper Oxide*, YBCO) sobrepostos a um substrato dielétrico geralmente à base de Lantano (WANG et al., 2019), enquanto que os MMs convencionais utilizam estruturas ressonadoras baseadas em anéis partidos e fios finos.

Tanto na forma convencional como na forma de supercondutor, os Metamateriais vêm sendo empregados na transmissão de energia sem fio pela sua capacidade de aumentar a absorvidade de ondas eletromagnéticas, captando o fluxo magnético disperso no ar, e conseqüentemente aumentando a eficiência na WPT.

Neste trabalho, é feita uma investigação da aplicabilidade de Metamateriais em sistemas de transmissão sem fio baseado em acoplamento magnético ressonante, técnica que tem sido amplamente empregada no carregamento de dispositivos de baixa potência e na frequência da ordem de MHz.

## 1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é fazer uma investigação por meio de simulações em *software* da capacidade dos Metamateriais (sejam convencionais sejam supercondutores) em aumentar a eficiência da transmissão de energia sem fio por meio de acoplamento magnético ressonante.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Revisão bibliográfica das técnicas de transmissão de energia sem fio, especialmente a de acoplamento magnético ressonante forte (*Strongly Coupled Magnetic Resonance*, SCMR).

- Revisão bibliográfica de Metamateriais convencionais e supercondutores aplicados à SCMR.

- Projeto de uma *slab* de Metamaterial Supercondutor.

- Análise da eficiência e potência transmitida na WPT, comparando os sistemas sem MM, com MM Convencional e com MM Supercondutor.

- Análise da eficiência e potência transmitida ao variar a distância entre as unidades transmissora e receptora e ao variar a frequência.

- Análise da eficiência do sistema quando há um desalinhamento horizontal entre as unidades transmissora e receptora.

- Análise da eficiência e potência ao se variar o resistor de carga acoplado à unidade receptora.

## 1.2 Justificativa

Dada a importância da WPT no cenário de pesquisa mundial, e o contínuo aumento de sua aplicabilidade para o carregamento de dispositivos munidos de bateria, é feita uma investigação de como melhorar sua eficiência. Além de utilizar os chamados Metamateriais Convencionais para confirmar o funcionamento destes, neste trabalho também é desenvolvido o projeto de um Metamaterial Supercondutor. O MM Supercondutor faz parte do Estado da Arte no que tange a metamateriais e visa ser útil para diminuir a área e volume da *slab* entre as bobinas, além de, claro, aumentar a eficiência na transmissão.

## 1.3 Metodologia

A fim de se efetuar a investigação, são realizadas simulações no *software* CST Studio Suite® (CST), versão 2018, da empresa Dassault Systèmes®.

O CST é um *software* capaz de fazer análise e otimização de sistemas eletromagnéticos. A partir dele é possível efetuar a modelagem de objetos tridimensionais e o cálculo de campos eletromagnéticos tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo.

Uma vez efetuadas as simulações, o *software* fornece informações como parâmetro S, permissividade elétrica, permeabilidade magnética, índice de refração, fluxo de energia, além de tensão e corrente que foram utilizados para a análise do desempenho dos sistemas implementados.

Neste trabalho, as simulações são feitas inicialmente sem MM, e depois são incluídas *slabs* com MM Convencional e Supercondutor, de forma a comparar a eficiência em cada sistema após um gradativo aumento da distância entre as unidades transmissora e receptora. Também são feitas simulações variando-se o valor da carga

acoplada, além de simulações considerando o desalinhamento horizontal entre as bobinas.

#### **1.4 Organização do texto**

Este trabalho está disposto em 5 capítulos. O primeiro, a Introdução, contém conceitos preliminares sobre a WPT, assim como seu contexto no cenário científico atual, problemas, e por fim os objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2 oferece uma revisão bibliográfica, que visa explicar a técnica de transmissão de energia sem fio baseada em acoplamento magnético ressonante forte, ou, simplesmente SCMR, além de citar projetos e trabalhos que envolvem esta técnica.

No Capítulo 3 são apresentados os Metamateriais convencionais e supercondutores. São descritas suas características construtivas, princípio de funcionamento, estado da arte e como eles são usados no incremento da eficiência na WPT.

O Capítulo 4 fornece os resultados obtidos por meio de simulações computacionais. É feita também uma análise dos sistemas no que tange à tensão, corrente, potência e eficiência em sistemas de WPT sem MM, com MM Convencional e supercondutor, após a variação da distância entre as unidades transmissora e receptora, o desalinhamento destas e também após a variação da carga acoplada à bobina receptora.

O Capítulo 5 contém a conclusão do trabalho. Nele constam considerações sobre o desenvolvimento e resultados, algumas contribuições obtidas e são dadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

## 2 TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO

A transmissão de energia sem fio é uma tecnologia ainda em desenvolvimento, mas que tem seu alicerce nas leis básicas do eletromagnetismo desenvolvidas a partir do século XIX, por meio de experimentos e formulação de leis.

A WPT pode ocorrer de forma radiativa (direcionada e não-direcionada) e não radiativa (acoplamento magnético ressonante e acoplamento capacitivo). A chamada forma radiativa é utilizada para transmissão a distâncias da ordem de metros a quilômetros, sendo então denominadas também como técnicas de campo distante. Já a forma não radiativa é empregada em geral para transmissão da ordem de poucos centímetros a alguns metros, sendo então nomeadas como de campo próximo. Estas duas formas de transmissão também diferenciam-se no que tange à frequência de operação e valores de potência a serem transmitidos.

Neste trabalho é estudado o comportamento de um sistema baseado em acoplamento magnético ressonante forte (*Strongly Coupled Magnetic Resonance*, SCMR). Esta técnica tem como princípio de funcionamento a oscilação do campo magnético entre duas bobinas acopladas, e que neste trabalho operam em ressonância.

A técnica SCMR tem sido muito utilizada em WPT em dispositivos tais como implantes biomédicos (MASHHADI et al., 2019), estruturas auto-ressonantes (STEIN, 2019) e circuitos com supercapacitores (AQUEVEQUE; BARBOZA, 2015).

### 2.1 Histórico

O estudo do eletromagnetismo teve sua origem em 1819, quando o físico-químico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) realizou aquele que ficou conhecido como o “experimento de Oersted”. Ao submeter um condutor à passagem de corrente elétrica, ele observou o desvio de uma agulha magnética colocada na vizinhança do condutor, de modo a assumir uma posição diferente ao plano definido pelo fio e o centro da agulha. Assim, ele descobriu que a corrente elétrica ao fluir por um condutor gera um campo magnético ao redor de si.

O descobrimento de Oersted serviu como embrião para o desenvolvimento e fundamentação teórica do eletromagnetismo, e que, posteriormente, somado a outras descobertas possibilitou a transmissão de energia sem fio (ELEFTHERIADES; ENGHETA, 2011).

Ainda na primeira metade do século XIX uma gradativa sucessão de experimentos e formulação de leis se desenvolveu:

- em 1820 nasceu a lei de Biot-Savart (físicos franceses Jean-Baptiste Biot, 1774-1862, e Félix Savart, 1791-1841) que expressa matematicamente o comportamento do campo magnético gerado a partir de uma corrente elétrica.

- em 1820 a lei de Ampère (André-Marie Ampère, físico francês, 1775-1836) que define que a integral de linha do campo magnético em qualquer caminho fechado é exatamente igual à corrente contínua envolvida pelo caminho (HAYT; BUCK, 2003).

- em 1831 a lei Faraday (Michael Faraday, físico-químico britânico, 1791-1867), que afirma que um campo magnético variante no tempo produz uma força eletromotriz que pode estabelecer uma corrente em um circuito fechado adequado.

Tais leis modelam as relações básicas do Eletromagnetismo e compõem a teoria que possibilitou o surgimento da WPT (AGBAEZE, 2017).

Munido dessas leis, James Clerk Maxwell (físico-matemático britânico, 1831-1879) caracterizou o comportamento de mútua geração e alteração de campos elétricos e magnéticos, culminando com a formulação das chamadas “equações de Maxwell”, em 1864.

Com o aprofundamento de seus estudos, Maxwell publicou “*A treatise on Electricity and Magnetism*”, em 1873, onde unificou o estudo da eletricidade e do magnetismo, sendo tal publicação um marco no desenvolvimento do eletromagnetismo.

Como contribuição ao desenvolvimento do estudo do eletromagnetismo, que permeou o século XIX, mais precisamente em 1888, Heinrich Rudolf Hertz (físico alemão, 1857-1894) transmitiu energia através do espaço de ar livre ao utilizar um oscilador conectado a bobinas de indução.

Somem-se a estas contribuições os experimentos físicos desenvolvidos pelo físico húngaro-americano Nikola Tesla (1856-1943) que foi pioneiro ao conseguir êxito na transmissão de energia sem fio baseada em tecnologia de micro-ondas.

Dentre os feitos de Tesla, destacam-se: a iluminação sem fio de lâmpadas fosforescentes (1893), a transmissão de sinais de micro-ondas a aproximadamente 48 km da fonte (1896), o desenvolvimento da famosa bobina de Tesla (1897) (Figura 1), a iluminação sem fio de 200 lâmpadas a aproximadamente 40 km de distância da fonte (IVAN, 1990) e a construção da torre de Wanderclyffe (1901) (Figura 2).

Figura 1 - Bobina de Tesla



Fonte: (LU et al., 2016)

Figura 2 - Torre de Wanderclyffe



**Fonte: (CHENEY, 1981)**

Uma vez rompida a barreira entre os séculos XIX e XX, nas décadas de 20 e 30 deste, foram inventados os *magnetrons*, dispositivos aptos a efetuarem a conversão da eletricidade em micro-ondas. Tornou-se então possível a transmissão de energia sem fio à longa distância, embora ainda tendo como empecilho o fato de não existir um método para converter micro-ondas novamente em eletricidade.

A adversidade perdurou até 1964, quando William C. Brown (engenheiro eletricitista americano, 1922-1999) efetuou a conversão de micro-ondas em eletricidade através de uma rectenna e realizou a primeira transmissão de energia sem fio através de micro-ondas.

No início do século XXI, cientistas do MIT propuseram a transferência simultânea de informações e energia via rádio-frequência e diferentes consórcios como *Wireless Power Consortium (WPC)*, *Power Matters Alliance (PMA)* e *Alliance for Wireless Power (A4WP)*, foram estabelecidos para desenvolver padrões internacionais para carregamento sem fio (LU et al., 2016). Atualmente, tais padrões foram adotados em muitos produtos eletrônicos disponíveis no mercado, como *smartphones* e carregadores sem fio (Figura 3).

Figura 3 - Exemplo de carregador sem fio



**Fonte: (ALIEXPRESS, 2019)**

No fim de 2014 surgiu o MagMIMO para realizar a formação de feixes de múltiplas antenas com base em ondas eletromagnéticas. Esta tecnologia iniciou o desbravamento da pesquisa de formação de feixe de campo magnético.

## 2.2 Estado da arte em WPT sem Metamateriais

Um novo sistema de transferência de energia sem fio à longa distância usando bobinas repetidoras, e a técnica de acoplamento magnético ressonante, foi proposto no trabalho de (CHENG et al., 2019). O trabalho tem o intuito de fornecer fontes de alimentação para os circuitos de *driver* em aplicações de alta tensão, como sistemas flexíveis de transmissão de corrente alternada. Diferente da maioria dos sistemas repetidores sem fio existentes, nos quais a carga é conectada apenas à última bobina e as bobinas repetidoras funcionam apenas como relés de potência, no sistema proposto várias cargas são alimentadas pelos repetidores. Assim, as bobinas repetidoras transferem energia não apenas para as bobinas subsequentes, mas também para as cargas conectadas a elas, e estas cargas podem então ser facilmente ajustadas sem afetar umas às outras. Uma configuração experimental com 10 cargas foi construída para validar a eficácia do sistema proposto, a fonte de tensão é de 30 V, a frequência é de 200 kHz.

Uma análise de eficiência e controle de otimização para sistemas WPT com entradas em paralelos e saídas em série é oferecida no trabalho de (LI et al., 2020). O trabalho propõe uma topologia de circuito com saídas em série e entradas em paralelo baseado em semicondutores de baixa potência e custo. Foi desenvolvida uma estratégia de controle para maximizar a eficiência energética sob várias condições de desalinhamento e a partir dos protótipos criados, de 2,5 kW, a eficiência geral foi aprimorada em 2,32% com o método proposto.

Sistemas WPT via acoplamento magnético ressonante tem sido muito empregados em implantes biomédicos. O trabalho de (HA-VAN; SEO, 2018) propõe uma nova bobina de transmissão em forma de borboleta para implantes biomédicos miniaturizados. O trabalho apresenta uma proposta capaz de fornecer significativa melhora da eficiência, mesmo quando há variações na distância e no ângulo de desalinhamento axial com a bobina receptora de 9 mm de diâmetro.

No trabalho de (LUO et al., 2019) é proposto um sistema de transferência de energia sem fio de forma híbrida indutiva e capacitiva (*Hybrid Wireless Power Transfer, HWPT*), uma vez que um sistema IWPT (*Inductive Wireless Power Transfer*) e o sistema CWPT (*Capacitive Wireless Power Transfer*) necessitam do acoplamento de um capacitor e de um indutor para compensação respectivamente. Os elementos acoplados são empregados para compensar um ao outro e transferir energia juntos. Após empregar a teoria da superposição, é feita uma análise do princípio de funcionamento da HWPT e é modelado um sistema reduzido para validação do desempenho da abordagem proposta. Os resultados experimentais demonstraram que o sistema HWPT proposto atingiu uma potência de saída de 655 W na condição de alinhamento. Houve uma variação máxima da potência de saída da ordem de 10% quando o desalinhamento foi variado de 0 a 270 mm.

Uma configuração geral de transferência de energia sem fio mista (por acoplamento indutivo e capacitivo) com topologia em série foi desenvolvida no trabalho

de (MINNAERT; STEVENS, 2018). Foi determinada uma carga ideal para maximizar a quantidade de transferência de energia e calcular a máxima potência de saída possível. A potência máxima transmitida foi de cerca de 125 mW a 100 kHz.

Foi proposta uma alternativa para supressão de perda de energia quando o sistema está em estado inativo no trabalho de (BADOWICK; MARKLEY, 2018), que tem como princípio de funcionamento o acoplamento ressonante magnético (*Coupling Magnetic Resonance*, CMR). A transferência de energia ocorre entre bobinas ressonantes por meio da variação e oscilação de campos magnéticos, numa frequência na ordem de MHz. Esse trabalho propõe que o sistema seguidamente efetue a ativação e desativação do sistema WPT, pois no estado inativo ocorre desperdício de energia. A técnica CMR possui imunidade ao ambiente vizinho e a capacidade de transferir energia numa distância maior do que a do acoplamento indutivo. Além disso, opera em maior eficiência do que nas técnicas de radiofrequência, e é capaz de carregar simultaneamente vários dispositivos.

Estão em curso estudos para a transferência de energia sem fio de forma bidirecional (*Bidirectional Wireless Power Transfer*, ou BD-WPT) em veículos elétricos. Este tipo de sistema é complexo por natureza e exige estratégia de controle sofisticada para a sincronização, além da necessidade de regulação do fluxo de energia nos dois sentidos conforme demonstrado no trabalho de (CHANG; LIANG; YANG, 2018, 2018). Nesse trabalho é proposto um novo controlador do fluxo de energia, que utiliza as potências ativa e reativa medidas na rede ressonante para regular o sistema de forma bidirecional entre o barramento DC e um veículo elétrico, de modo que haja sincronia entre eles. A partir de um protótipo de 1 kW, houve aproximação dos valores obtidos experimentalmente frente aos simulados, o que validou o controlador no intuito de regular o fluxo de potência bidirecional.

### 2.3 Classificação

As formas de transmissão de energia sem fio podem ser divididas basicamente em dois grupos: radiativas e não radiativas (SHARMA; GOEL; AGARWAL, 2017).

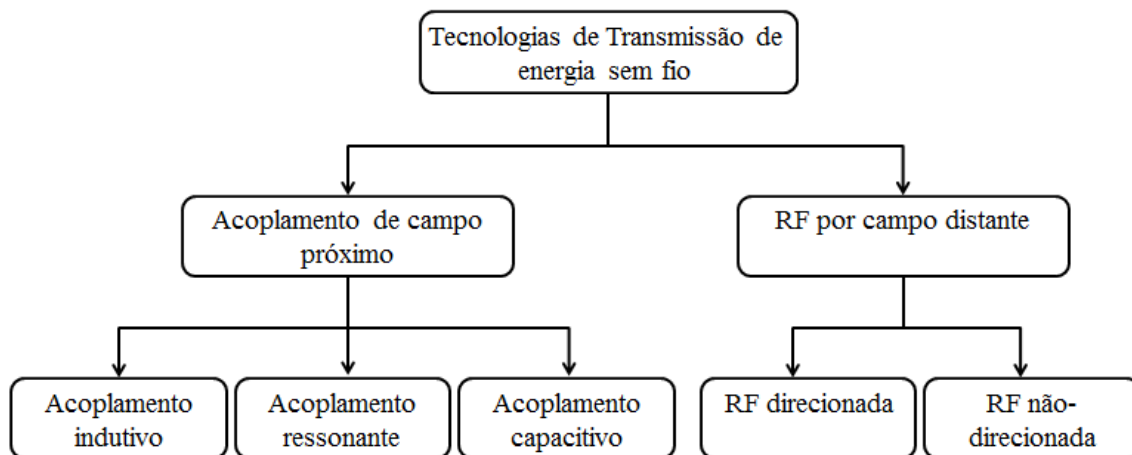
O carregamento radiativo utiliza o campo elétrico de uma onda eletromagnética, normalmente onda de radiofrequência (RF) ou micro-ondas para transportar energia. Em função de segurança no que tange à exposição a ondas RF, esta técnica de transmissão em geral é empregada em baixa potência, limitando-se a alguns watts, embora possa ser utilizada para longas distâncias.

O carregamento não radiativo, por sua vez, baseia-se no acoplamento do campo magnético entre duas bobinas e tem uma limitação da distância de transmissão quando comparado ao carregamento radiativo, que por sua vez utiliza campos elétricos para a transferência de energia.

As técnicas de transmissão sem fio na forma não radiativa também são chamadas de técnicas de campo próximo e as radiativas de campo distante. Esta

diferença entre elas provém do alcance de transmissão, que por sua vez, é dado pela distância em comprimento de onda. A Figura 4 é um diagrama que resume a divisão das técnicas WPT.

Figura 4 - Classificação das tecnologias WPT



Fonte: Elaborado pelo autor

Em técnicas de campo distante, a absorção de radiação não afeta o transmissor, diferentemente da técnica de campo próximo (SHINOHARA, 2012). Isto se deve ao fato das antenas transmissora e receptora não serem acopladas para a transmissão de energia (SHINOHARA, 2011). Estas técnicas podem transmitir energia por longas distâncias (de dezenas de metros a quilômetros), mas com potência limitada a alguns watts em função de risco à segurança do ser humano que esteja submetido a ondas RF por exemplo.

### 2.3.1 WPT Radiativa – Campo distante

A WPT radiativa transfere energia por meio de radiação eletromagnética, utilizando rádio frequência para transportá-la em micro-ondas. As referentes ondas se propagam na velocidade da luz através do espaço, numa faixa de frequência de 300 MHz a 300 GHz (LU et al., 2016). A transferência de energia radiativa também pode servir-se de ondas eletromagnéticas como infravermelho ou raios-X, mas estas não são extensamente empregadas em razão de potenciais problemas de segurança à saúde humana.

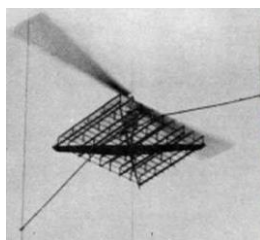
Conforme Figura 4 observa-se que a WPT via RF pode ocorrer de forma direcionada ou não-direcionada (VISSER, 2013). A forma não-direcionada pode ocorrer sem linha de visão explícita e é menos sensível à orientação e posição em relação à antena de transmissão, contudo, apresenta eficiência relativamente baixa quando comparada às outras técnicas WPT (FALKENSTEIN et al., 2011). A forma direcionada apresenta entre suas limitações o fato de que deve haver um estricto alinhamento entre a fonte e o receptor de energia.

A história moderna desta técnica de transmissão remete aos anos 50 do século XX (BROWN, 1984), especialmente com aplicações a aeronaves movidas a micro-

ondas (BROWN, 1969). Destacou-se nesse período o experimento realizado em 1963 por William C. Brown, onde foi fornecida energia a um pequeno helicóptero sem utilizar cabos a uma altura de cerca de 18 metros acima do solo.

Outro ambicioso experimento WPT foi realizado pelo *Communications Research Centre of Canada* em 1987: o *Stationary High Altitude Relay Platform (SHARP)*. Esse experimento forneceu energia de uma estação terrestre até o SHARP numa distância de aproximadamente 21,3 km (VARSHNEY, 2008). A ilustração do protótipo construído pode ser vista na Figura 5.

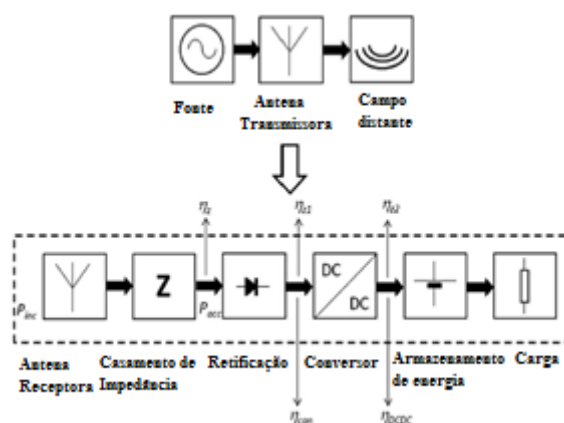
Figura 5 - SHARP



Fonte: (LU et al., 2016)

A partir do diagrama da Figura 6 pode-se observar o procedimento padrão para efetuar a transmissão da energia por RF: no âmbito da antena transmissora, inicialmente ocorre uma conversão AC-DC seguida de uma conversão DC-RF por meio de um *magnetron*. Depois, ocorre a propagação das micro-ondas no ar e estas são capturadas pela *rectenna* receptora. O sinal é então convertido novamente em eletricidade por meio de um conversor RF-DC.

Figura 6 - Diagrama de blocos de um sistema WPT-RF



Fonte: (Adaptado de VISSER, 2013).

A eficiência deste tipo de transmissão WPT é baixa quando comparada ao sistema não-radiativo e sua melhora está em desenvolvimento. Quanto à conversão RF-DC, sua eficiência é altamente dependente da densidade de energia capturada na antena receptora, da precisão do casamento de impedância entre a antena e o amplificador de tensão, e a eficiência do conversor de RF em DC (LADAN et al., 2013).

A radiação de micro-ondas oferece a vantagem de compatibilidade com o sistema de telecomunicações existente, e portanto, pode fornecer energia e dados simultaneamente (VARSHNEY, 2008). A amplitude e a fase das micro-ondas são responsáveis por modular a informação e por sua vez a radiação e a vibração ocupam-se do transporte da energia. Este conceito é denominado como “Transferência simultânea de energia e informação sem fio” (*Simultaneous wireless information and power transfer*, ou SWIPT) (ZHANG; HO; 2013)

Com o crescente desenvolvimento da tecnologia de semicondutores, houve uma redução drástica do consumo de energia em sistemas eletrônicos (PARKS et al., 2013). Tornou-se então promissor o emprego de transmissão de energia sem fio via RF para alimentar dispositivos eletrônicos de baixa potência, como sensores de temperatura e umidade (ZHANG et al., 2019). As aplicações nas quais a WPT-RF são mais empregadas são em sistemas sem fio de baixa potência, como as Redes de sensores sem fio renováveis – WRSN's (*Wireless Renewable Sensor networks*) (FALKENSTEIN et al., 2011) e sistemas de Identificação por Rádio Frequência - RFID (*Radio-Frequency Identification*) (SAMPLE, 2008)

### **2.3.2 WPT Não-radiativa – Campo próximo**

A WPT não-radiativa pode ser executada por meio de acoplamento magnético ressonante – CMR (*Coupling Magnetic Resonance*) e acoplamento capacitivo - CWPT (*Capacitive Wireless Power Transfer*) (SHARMA; GOEL; AGARWAL, 2017).

O acoplamento magnético ressonante é subdividido em duas técnicas, de acordo com seu alcance de operação (TOYA; KOKUGA, 2000): acoplamento indutivo – IWPT (*Inductive Wireless Power Transfer*) e acoplamento magnético ressonante forte - SCMR (*Strongly Coupled Magnetic Resonance*).

Os sistemas CMR basicamente são compostos por uma bobina primária, que é excitada por uma corrente elétrica alternada, dando origem a um campo magnético variante no tempo. Este campo magnético da bobina primária, por sua vez, induz uma corrente na bobina secundária.

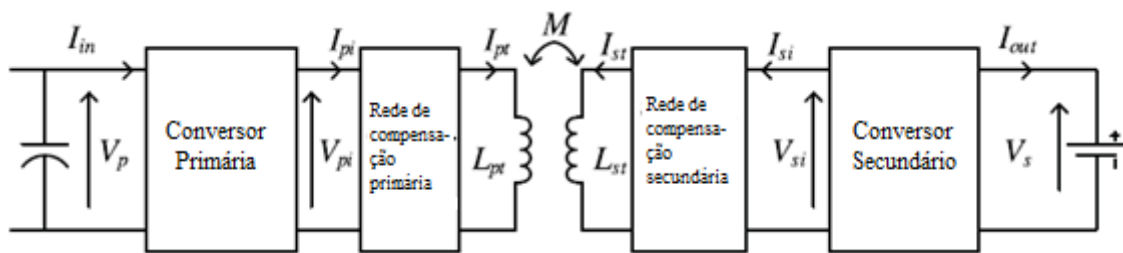
A técnica IWPT tem como princípio de funcionamento a oscilação de um campo magnético de frequência baixa, eficiência em geral superior e nível de potência média-alta quando comparada às outras técnicas WPT. Tal técnica transfere energia entre bobinas não ressonantes mas com fraco acoplamento e operam em curto alcance (de alguns milímetros a alguns centímetros) (LUO et al, 2018).

Nos últimos anos está em desenvolvimento a transferência de energia bidirecional (*Bidirectional Inductive Power Transfer, BD-IPT*). Esta tecnologia é baseada em IWPT e tem sido, por exemplo, muito empregada em veículos elétricos, devido ao seu alto isolamento galvânico e à flexibilidade oferecida (KALRA et al., 2020).

Um sistema típico BD-IPT funciona por meio de dois conversores de ponte completa sincronizados que operam em ciclos de serviço fixos para acionar as bobinas primária e secundária. O trabalho de Kalra et al (2020) propõe um novo conversor de energia chamado de ponte ativa de reforço (*Boost active bridge*, BAB), que dispensa a necessidade de dispositivos de comutação extra, e opera na faixa de 3,5 kW.

O diagrama de blocos da Figura 7 ilustra resumidamente um sistema BD-IPT típico que pode ser utilizado em aplicações veículo-para-rede/rede-para-veículo, V2G-G2V (*vehicle-to-grid / grid-to-vehicle*).

Figura 7 - Diagrama de blocos de um sistema BD-IPT



Fonte: (Adaptado de KALRA et al., 2020).

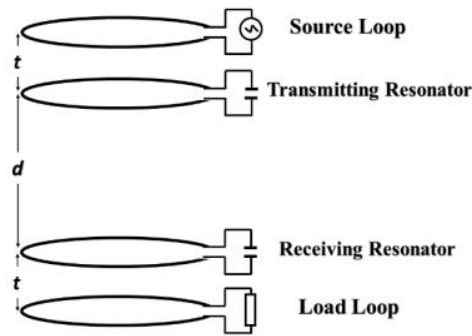
Por sua vez, a técnica SCMR usufrui de bobinas com elevado nível de acoplamento e que operam em ressonância, de forma a aumentar o alcance de transmissão sem prejudicar a eficiência e sem a necessidade de um preciso alinhamento entre as unidades transmissora e receptora (KIM; BIEN, 2013).

Diferindo do sistema IWPT, um sistema SCMR necessita de um forte acoplamento indutivo, proporcionado pela proximidade das bobinas transmissora e receptora (BAO et al., 2019) para que o campo magnético gerado pela bobina transmissora possa induzir corrente na receptora efetuando então a WPT.

O SCMR foi desenvolvido em 2007 (KURS et al., 2007) e na sua configuração convencional tem uma certa distância entre a fonte e os ressonadores (LIU et al., 2017 e LIU; GEORGAKOPOULOS, 2018), conforme pode-se observar na Figura 8. Esta configuração de SCMR ocupa um significativo volume, e isto implica na criação de obstáculos para várias aplicações práticas, como dispositivos móveis, eletrônicos e médicos.

O sistema SCMR tradicional possui uma espira junto à fonte, um conjunto de espiras na unidade transmissora e receptora, e uma espira na qual é acoplada a carga, conforme está exemplificado na Figura 8. Este sistema deve operar com todos os seus componentes na mesma frequência para que o fator de qualidade (Q) e a energia transferida também seja maximizados.

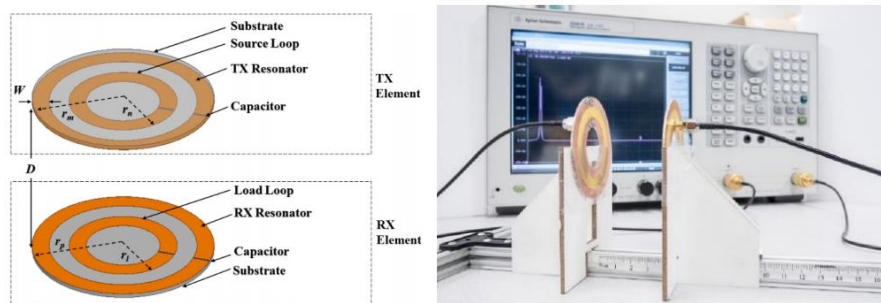
Figura 8 - Sistema SCMR tradicional



Fonte: (BAO et al., 2019)

Como tentativa de solucionar o problema do volume ocupado surgiram então os sistemas SCMR compostos por bobinas planas, tornando o sistema mais compacto conforme se pode observar nas Figuras 9 (a) e (b).

Figura 9 - (a) Ilustração de um sistema com bobinas planas (b) Protótipo de bobinas planas



Fonte: (BAO et al., 2019)

Neste trabalho as simulações de sistemas WPT ocorrem segundo a técnica SCMR. Para este tipo de transmissão de energia são utilizadas duas bobinas planas, que desempenham as funções de unidade transmissora (UT) e receptora (UR), respectivamente.

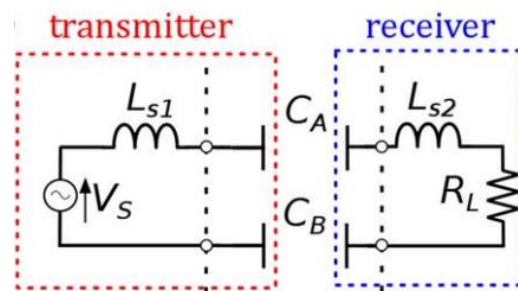
A terceira e até então menos utilizada técnica de acoplamento não radiativo, é a transferência de energia sem fio capacitiva (*Capacitive Wireless Power Transfer*, ou, CWPT).

A CWPT baseia-se na redistribuição das cargas elétricas em um objeto. A Figura 10 é uma representação simplificada de CWPT. Observe-se que há uma fonte ( $V_s$ , que deve ser de alta frequência e alta tensão) que é responsável por excitar um par de placas metálicas na unidade transmissora ( $C_A$  e  $C_B$ ). Então, ao aproximar um outro par de placas metálicas, o campo elétrico alternado existente entre as placas será responsável pela geração de uma corrente de deslocamento na unidade receptora, dando origem à transferência de energia sem contato direto entre as placas. O sistema possui ainda dois

indutores de compensação ( $L_{s1}$  e  $L_{s2}$ ) responsáveis por tornar o circuito ressonante e uma carga puramente resistiva ( $R_L$ ) acoplada à unidade receptora.

Uma vez que o campo magnético não é capaz de penetrar em objetos de metal, e pode causar perdas por correntes parasitas, a CMR não é adequada para a transferência de energia sem fio através de barreiras metálicas ou ambientes similares (LIU; HU; NAIR, 2011). Assim, a CWPT emprega um campo elétrico para efetuar a transferência, sendo também empregados para fornecer energia a lâmpadas LED (REN; LI, 2006), robôs (HU; LIU; LI, 2008) e sensores (ZHENG; TNAY; ALAMI, 2010) para dispositivos respiratórios.

Figura 10 - Ilustração de um sistema CWPT



Fonte: (MINNAERT; STEVENS, 2018)

Quando comparada às outras técnicas WPT, a CWPT possui perdas menores, produz menos calor, tem menor custo de produção, tem um sistema fisicamente mais leve, e tem interferência eletromagnética reduzida para distâncias curtas (MINNAERT; STEVENS, 2018).

## 2.4 Comparação entre as técnicas WPT

A Tabela 1 fornece uma compilação e comparação das principais técnicas WPT:

Tabela 1 - Comparação entre técnicas WPT

Tecnologia	Campo próximo			Campo distante
	Acoplamento Magnético Ressonante Forte	Acoplamento indutivo	Acoplamento capacitivo	Radiação eletromagnética
Alcance (a)	De alguns centímetros a poucos metros	De alguns milímetros a alguns centímetros	De alguns centímetros a poucos metros	De dezenas de metros a dezenas de quilômetros
Frequência	kHz - MHz	Hz	kHz - MHz	>GHz
Dispositivos	Bobinas ressonantes	Bobinas	Placas metálicas	Antenas
Aplicações	- Dispositivos biomédicos - Veículos elétricos - IoT	- Carregamento de dispositivos móveis - fornos indutivos	- Carregamento de lâmpadas LED - Dispositivos respiratórios	- Aeronáutica - Aplicações militares
Vantagens	- Segurança para seres humanos - Carregamento simultâneo de vários dispositivos	- Segurança para seres humanos - Implementação simples	- Eficiência - Interferência eletromagnética reduzida para distâncias curtas	- Longa distância de operação - Adequado para dispositivos móveis
Desvantagens	- distância limitada - Implementação complexa	- curta distância - aquecimento - não adequado para dispositivos móveis	- distância limitada - Implementação complexa	- Segurança para seres humanos - Eficiência

Fonte: (Dados do autor)

## 2.5 Sistemas SCMR

Um sistema SCMR tem uma configuração muito semelhante à de um transformador com núcleo de ar, e pode ser ilustrado basicamente conforme a Figura 11.

Este sistema possui duas bobinas em sua composição, sendo uma delas atrelada à unidade transmissora (UT) e outra à unidade receptora (UR). Uma fonte de tensão  $V_f$  (de resistência interna  $R_G$ ) está conectada à UT onde surge então uma corrente elétrica circulante ( $I_T$ ).

Esta corrente  $I_T$  produz um campo magnético variável no tempo que intercepta a segunda bobina alocada na unidade receptora, onde é então induzida uma corrente elétrica  $I_R$ , que por sua vez percorre a carga  $R_L$ .

As denominadas unidades transmissora e receptora possuem resistências próprias, provenientes da energia dissipada pelas mesmas, e cujos valores são procedentes da resistência elétrica característica ( $R_T$ ) e da resistência gerada pelo efeito pelicular de cada bobina ( $R_R$ ).

As bobinas em questão também possuem indutâncias próprias ( $L_T$  e  $L_R$ ) que advêm da energia acumulada pelas mesmas quando submetidas ao campo magnético.

A relação entre a energia acumulada e a dissipada dá origem ao chamado fator de qualidade ( $Q$ ) e pode ser mensurada de forma quantitativa por:

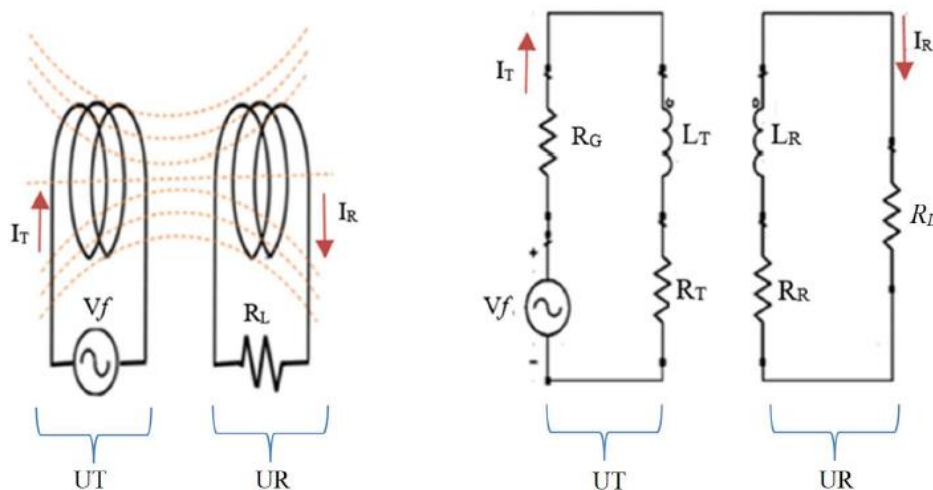
$$Q = \frac{2\pi fL}{R} = \frac{\omega L}{R} \quad (1)$$

onde  $f$  é a frequência na qual o sistema opera,  $L$  é a indutância própria da bobina e  $R$  sua resistência, e  $\omega$  a frequência angular.

O fator de qualidade  $Q$  é de suma importância em sistemas SCMR, pois a partir da Equação (1) pode-se inferir que ele é diretamente proporcional ao aumento da energia acumulada e inversamente à dissipada.

Na Figura 11 um sistema SCMR é ilustrado a partir de sua configuração básica e de seu circuito equivalente. Sendo:  $V_f$  (fonte de tensão),  $I_T$  e  $I_R$  (correntes nos lados transmissor e receptor respectivamente),  $R_G$  (resistência interna da fonte),  $R_T$  e  $R_R$  (resistências dos lados transmissor e receptor respectivamente),  $L_T$  e  $L_R$  (indutâncias próprias das bobinas dos lados transmissor e receptor respectivamente),  $R_L$  (carga acoplada).

Figura 11 - SCMR: (a) Configuração básica (b) Circuito equivalente



Fonte: (CORRÊA, 2018)

Nestas representações foram desprezados os capacitores que representam a capacitância parasita das bobinas do sistema, pelo fato de serem da ordem de picofarads (EZZULDDIN; IBRAHEEM, 2017), e exercerem pouca influência frente à frequência

de ressonância determinada para este trabalho que é de 1 MHz. Esta frequência de operação foi definida em função de se ter uma ordem de grandeza compatível com sistemas de SCMR. Além disso, trata-se de uma faixa de frequência que pode ser aplicada para o carregamento de vários dispositivos como redes de sensores, Internet das Coisas e dispositivos portáteis.

A interação existente entre as bobinas do sistema com o campo magnético, oriundo da passagem da corrente elétrica pelas unidades transmissora (UT) e receptora (UR), pode ser medida a partir da chamada indutância mútua ( $L_M$ ).

A indutância mútua entre duas espiras filamentosas hipoteticamente denominadas  $A$  e  $a$ , pode ter seu valor obtido por meio da equação de Neumann (HURLEY, 1995):

$$L_{M_{Aa}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Aa \cos(\varphi - \varphi') d\varphi d\varphi'}{\sqrt{A^2 + a^2 + x^2 - 2Aa \cos(\varphi - \varphi')}} \quad (2)$$

onde:  $A$  e  $a$  são os respectivos raios de cada espira considerada,  $\varphi$  e  $\varphi'$  seus respectivos ângulos em radianos,  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo e  $x$  a distância entre as bobinas (AKYEL et al., 2006), (QUEIROZ, 2003) e (UEI-MING; GHOVANLOO, 2007).

Uma vez que as bobinas tenham mais de uma espira, a indutância mútua total entre as bobinas,  $L_M$ , pode ser obtida pelo somatório da indutância mútua entre cada par de espiras das duas bobinas (QUEIROZ, 2003) e (SILVA, 2012):

$$L_M = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{M_{ij}} \quad (3)$$

A partir da Equação (2) conclui-se que o valor da indutância mútua entre duas bobinas é inversamente proporcional à distância entre elas, e decresce de maneira exponencial com o aumento da distância, porque a interação magnética entre as bobinas é maior quando estão mais próximas (NAIR; CHOI, 2016).

Para medir a interação entre duas bobinas, existe o coeficiente de acoplamento,  $K$  (adimensional). Supondo as bobinas da UT e UR,  $K$  é diretamente proporcional à indutância mútua entre elas. E inversamente à raiz do produto das indutâncias próprias de cada uma dessas bobinas. O valor de  $K$  pode ser calculado por:

$$K = \frac{L_M}{\sqrt{L_T L_R}} \quad (4)$$

Dentre os parâmetros de um sistema SCMR, como o da Figura 11, também deve-se levar em conta a impedância ( $Z$ ) do sistema, que pode ser obtida por:

$$Z = R + j2\pi fL \quad (5)$$

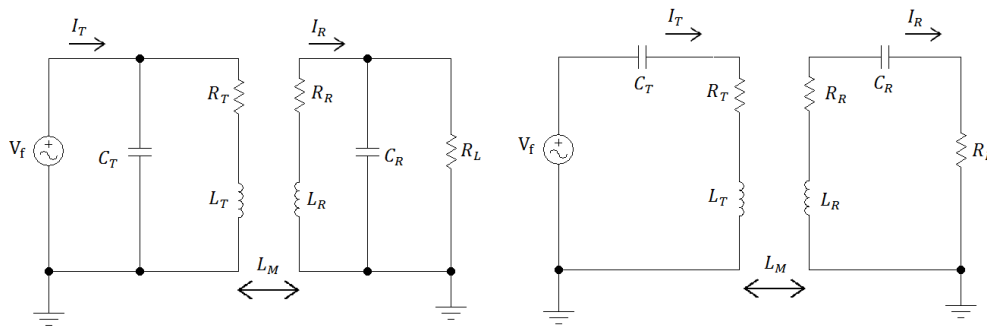
onde a parte imaginária da equação é a reatância indutiva da bobina em questão.

Em circuitos RLC, a condição de ressonância ocorre uma vez que a reatância indutiva tenha a mesma magnitude da reatância capacitiva. Este fenômeno ocorre na chamada frequência de ressonância ( $f_R$ ). Para fazer o sistema operar nesta condição, devem ser adicionados capacitores às bobinas (NAIR; CHOI, 2016).

Uma vez operando na frequência de ressonância pode-se obter a maximização do módulo da corrente, além do fato de colocá-la em fase com a tensão do circuito. Assim, pode aumentar-se a potência transmitida, a eficiência e o alcance de transmissão.

Além disso, os capacitores a serem adicionados são úteis para a compensação do circuito e podem ser inseridos em série ou paralelo, conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Ilustração de um sistema de compensação paralela e série



Fonte: (Dados do autor)

Em ambos os tipos de compensação, a frequência de ressonância, em Hz pode ser quantitativamente obtida por (KESLER, 2017):

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6)$$

sendo L a indutância própria da bobina avaliada e C a capacitância inserida.

Em um circuito como o ilustrado na Figura 11, desde que ocorra o acoplamento magnético, é induzida uma tensão  $V_{ind}$  nos terminais da UR e que pode ser obtida por (LI; MI, 2015):

$$V_{ind} = \frac{j\omega L_M^2}{Z_R} V_f \quad (7)$$

sendo  $Z_R$  a impedância da UR, obtida por meio da soma entre a resistência  $R_R$ , a indutância  $L_R$  e a capacitância  $C_R$  próprias.

A impedância refletida pela UT, denominada aqui como  $Z_{Tref}$ , pode ser calculada por (ABDOLKHANI, 2016):

$$Z_{Tref} = \frac{\omega^2 L_M^2}{Z_T} \quad (8)$$

onde  $Z_T$  é a impedância da unidade transmissora.

Esta impedância  $Z_T$  é obtida pela soma dos elementos da unidade transmissora e pela impedância refletida pelo lado receptor, denominada  $Z_{Rref}$  e que pode ser mensurada pela expressão (ABDOLKHANI, 2016):

$$Z_{Rref} = \frac{\omega^2 L_M^2}{Z_R} \quad (9)$$

A partir da Equação (7), infere-se que a tensão induzida na UR é diretamente proporcional à  $L_M^2$  e à frequência angular  $\omega$ . Ou seja, alterando-se a distância entre as unidades transmissora e receptora, ou então a frequência de operação, altera-se a impedância refletida por cada unidade e por consequência a eficiência do sistema é afetada. Assim, o sistema SCMR é muito sensível à alteração de seus parâmetros.

### 3 METAMATERIAIS

Em sistemas SCMR a eficiência ( $\eta$ ) pode ser mensurada pela razão entre a potência disponibilizada aos terminais da carga acoplada à UR ( $P_2$ ) e a potência fornecida pela UT ( $P_1$ ).

Contudo, a eficiência diminui de acordo com o inverso da distância ( $d$ ) entre as bobinas transmissora e receptora, num fator de  $\left(\frac{1}{d}\right)^6$  quando a distância for maior que três vezes o diâmetro da bobina transmissora. Caso a distância não infrinja esta condição, o decaimento se dá na razão de  $\left(\frac{1}{d}\right)^3$  (KARALIS; SOLJACIC, 2008).

A queda na eficiência em sistemas SCMR se deve à dispersão do fluxo magnético proveniente da UT e direcionado à UR no ar. Para amenizar tal anomalia, podem-se utilizar bobinas com elevado fator de qualidade ( $Q$ ), de forma a concatenar o fluxo magnético que esteja dispersando-se (LIPWORTH, 2015).

A fim de mitigar o problema de decaimento na eficiência apresentam-se os Metamateriais (*Metamaterials*, MMs) . Eles são projetados para fazer convergir na direção da UR o fluxo magnético disperso no ar, de forma a funcionar como um sorvedouro, e tem sido muito utilizados em sistemas SCMR.

Além das já conhecidas estruturas de Metamateriais ditos convencionais, atualmente tornaram-se objetos de atenção e de estudo os chamados Metamateriais Supercondutores. Eles são confeccionados com uma geometria e materiais diferentes dos convencionais, mas mantêm o mesmo propósito de incrementar a eficiência na WPT.

Neste capítulo é apresentado um estudo sobre as características dos MMs que os possibilitam realizar a concatenação do fluxo magnético disperso e conseqüentemente elevar a eficiência do sistema.

#### 3.1 Introdução

Os Metamateriais eletromagnéticos são estruturas artificiais efetivamente homogêneas confeccionadas a partir de elementos naturais, a fim de apresentarem propriedades incomuns na natureza.

Uma estrutura efetivamente homogênea tem seu tamanho de célula médio ( $p$ ) muito menor do que o comprimento de onda ( $\lambda$ ). Assim, adota-se o limite de homogeneidade efetiva como  $p \leq \left(\frac{\lambda}{4}\right)$ , de forma que os fenômenos refrativos se sobreponham aos de espalhamento e difração na propagação de ondas no MM (CALOZ; ITOH, 2006).

Uma vez que a condição de homogeneidade efetiva seja satisfeita, a estrutura comporta-se como um material real, ou seja, eletromagneticamente uniforme ao longo da direção da propagação.

Os materiais são classificados conforme os seus parâmetros constitutivos. Tratam-se de permissividade elétrica ( $\epsilon$ ), permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e índice de refração ( $n$ ), que podem ser simultaneamente negativos dependendo da natureza da célula unitária.

### 3.2 Permissividade elétrica e permeabilidade magnética

Uma vez que esteja submetido a um campo elétrico, um átomo é polarizado de forma que suas cargas se orientam segundo a direção do campo. O mesmo acontece caso seja submetido a um campo magnético, dando origem ao dipolo magnético.

A intensidade da resposta dos átomos varia conforme a natureza do material, mais especificamente quanto à sua permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e sua permeabilidade magnética ( $\mu$ ).

O termo permissividade elétrica resume o quão facilmente um material permite o estabelecimento de um campo elétrico em seu meio. Relacionado a este, está a permissividade relativa (também chamada de constante dielétrica,  $\epsilon_r$ ), e é dada pela razão da permissividade de um elemento ( $\epsilon$ ) e a permissividade do ar ( $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ ) (BOYLESTAD, 2012):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (10)$$

Os materiais que apresentam uma boa resposta a campos elétricos, são chamados condutores. E os materiais que apresentam uma alta constante dielétrica, são classificados como dielétricos ou isolantes.

Materiais nos quais as linhas de fluxo magnético são estabelecidas prontamente são denominados “magnéticos”, e por isso diz-se que possuem uma alta permeabilidade magnética.

De forma sucinta, pode-se dizer que a permeabilidade de todos os materiais não magnéticos em geral como cobre, alumínio, madeira, vidro e ar é igual à do espaço livre ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ).

Os materiais que possuem permeabilidades ligeiramente superiores à do espaço livre, são denominados diamagnéticos, e caso ligeiramente inferiores, paramagnéticos. Existem ainda os materiais cuja permeabilidade é muito alta, e são chamados ferromagnéticos.

A permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ) de cada material, é dada em função da permeabilidade do espaço livre, e é obtida por (BOYLESTAD, 2012):

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (11)$$

onde  $\mu$  é a permeabilidade do material.

Os parâmetros permissividade elétrica e permeabilidade magnética podem assumir valores complexos:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + j\epsilon_r'' \quad (12)$$

$$\mu_r = \mu_r' + j\mu_r'' \quad (13)$$

As partes reais tem relação com a energia armazenada, enquanto que a imaginária com as perdas.

Relacionado à permissividade elétrica, há também a tangente de perdas ( $\tan(\delta)$ ), que é inversamente proporcional ao fator de qualidade ( $Q$ ), e é tida como um fator de dissipação (CALOZ; ITOH, 2006):

$$\tan(\delta) = \frac{1}{Q} = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (14)$$

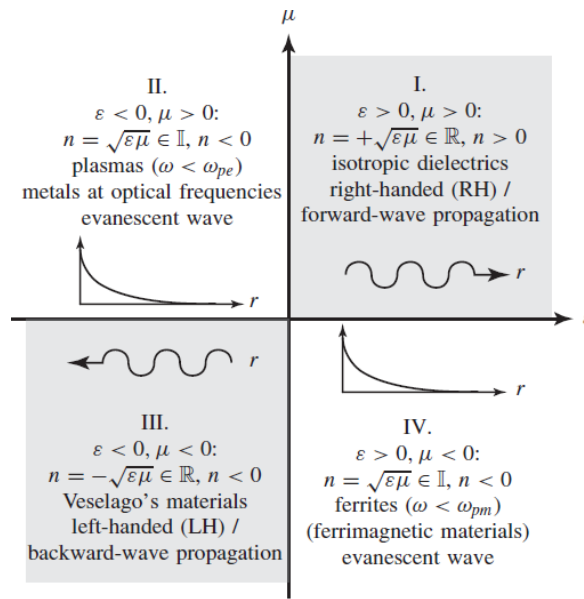
Os parâmetros constitutivos,  $\mu$  e  $\epsilon$ , podem ser relacionados entre si pelo índice de refração ( $n$ ):

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (15)$$

onde  $\epsilon_r$  e  $\mu_r$  são a permeabilidade e permissividade relativas.

Conforme se pode verificar na Figura 13 as quatro combinações possíveis no que tange aos sinais de  $\epsilon$  e  $\mu$  são (+,+), (+,-), (-,+), (-,-). As três primeiras combinações pertencem a materiais convencionais, e a última (-,-), com permissividade e permeabilidade simultaneamente negativas corresponde aos chamados materiais canhotos ou materiais LH (left-handed) ou duplo-negativos - DNG (Double-negatives).

Figura 13 - Classificação dos materiais quanto à permeabilidade magnética e permissividade elétrica



Fonte: (CALOZ; ITOH, 2006)

Os materiais canhotos também são chamados “materiais de Veselago”, conforme se pode observar na Figura 13 pois coube a Viktor Veselago (físico russo, 1929-2018) a especulação visionária de “substâncias” com tais características, em 1967.

Contudo, também podem ser classificados como Metamateriais, as estruturas que possuam pelo menos um parâmetro constitutivo negativo ( $\epsilon$  ou  $\mu$ ), tais como os MMs anisotrópicos ou materiais obtidos pelo recente desenvolvimento da nanotecnologia e processos químicos (CALOZ; ITOH, 2006).

Os materiais em que cujo interior os vetores campo elétrico ( $E$ ), campo magnético ( $H$ ) e constante de propagação ( $k$ ) obedecem à regra da mão direita, são também chamados de “Materiais de mão direita”. Estes vetores formam uma onda Transversa-Eletromagnética – TEM (*Transverse Electromagnetic Wave*) e são mutuamente perpendiculares (CAPOLINO, 2009):

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad \rightarrow \quad k \times \mathbf{E} = \omega\mu\mathbf{H}, \quad (16)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon\mathbf{E} \quad \rightarrow \quad k \times \mathbf{H} = -\omega\epsilon\mathbf{E}, \quad (17)$$

$$\mathbf{k} \perp \mathbf{E} \perp \mathbf{H} \quad (18)$$

Um arranjo periódico de células Metamateriais, cuja geometria respeite as condições de homogeneidade pode fazer com que sejam obtidas as características peculiares dos materiais LH. Entre elas está o fato de não obedecerem à “Regra da Mão Direita”, de forma que os vetores  $E$ ,  $H$  e  $k$  tem alterado o seu sentido de propagação e cujas equações podem ser reescritas como:

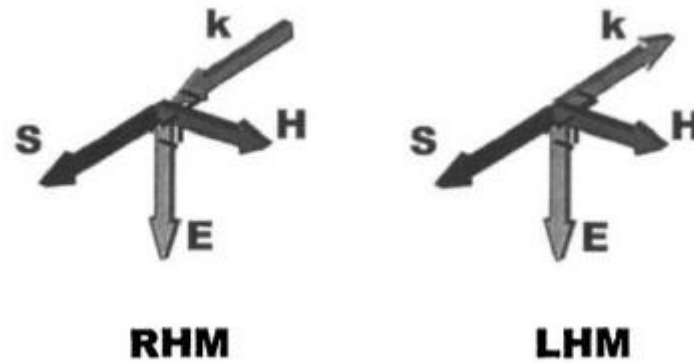
$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega(-\mu)\mathbf{H} \quad \rightarrow \quad k \times \mathbf{E} = \omega\mu(-\mathbf{H}), \quad (19)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega(-\varepsilon)\mathbf{E} \quad \rightarrow \quad \mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega\varepsilon\mathbf{E}, \quad (20)$$

$$-\mathbf{k} \perp \mathbf{E} \perp \mathbf{H} \quad \rightarrow \quad -\mathbf{k} \perp \mathbf{E} \perp (-\mathbf{H}) \quad (21)$$

Num meio LH, o vetor de onda está alocado em oposição ao vetor de Poynting ( $\vec{S}$ ), conforme se pode observar na Figura 14 (ELEFThERIADES; BALMAIN, 2005):

Figura 14 - Comportamento do vetor de Poynting



Fonte: (ELEFThERIADES; BALMAIN, 2005)

### 3.3 Terminologia

Não há consenso quanto à terminologia para designar os MM com índices de permissividade e permeabilidade negativas simultaneamente. Contudo, as mais comuns citadas abaixo tem algumas vantagens e desvantagens:

#### 3.3.1 *Materiais canhotos – LH (Left-handed)*

Terminologia sugerida originalmente por Veselago (BALANIS, 2016), relacionada principalmente à mais fundamental propriedade destas estruturas, que é o fato das velocidades de fase e de grupo serem antiparalelas e também por serem universais (aplicáveis em 1D, 2D e 3D).

#### 3.3.2 *Materiais duplo-negativos – DNG (Double-negative)*

Esta nomenclatura faz referência ao fato de os MMs apresentarem permissividade e permeabilidade negativas, embora não as cite explicitamente.

#### 3.3.3 *Meio de Veselago (Veselago medium)*

Trata-se de uma homenagem ao visionário Viktor Veselago. Contudo, este nome não fornece nenhuma informação das propriedades do meio.

#### 3.3.4 *Meio de velocidade de fase negativa – NPV (Negative phase velocity medium, NPV)*

Para (CALOZ; ITOH, 2006) trata-se da melhor expressão do ponto de vista semântico, embora pouco usada.

A velocidade de fase ( $v_p$ ) pode ser entendida como a taxa de propagação de uma onda no espaço, comum às fases de todas as componentes desta onda (harmônicas) e pode ser mensurada pela relação:

$$v_p = \frac{\lambda}{T} \quad (22)$$

onde  $T$  e  $\lambda$  são o período e o comprimento da onda, respectivamente.

No que tange à teoria eletromagnética, a velocidade de fase é dada pela razão entre a frequência angular ( $\omega$ ) e o número da onda ( $k$ ):

$$v_p = \frac{\omega}{k} \quad (23)$$

A radiação eletromagnética pode, sob condições restritas, ter uma velocidade de fase superior à da luz no vácuo. Contudo, é um fenômeno de magnitude pontual, e portanto, não ocorre transferência de energia ou informações.

Por sua vez, a velocidade de grupo ( $v_g$ ), quantifica a taxa de alteração da amplitude na propagação da onda, e pode ser obtida pela relação entre a variação da frequência angular e a variação do número da onda:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (24)$$

Em meios LH a velocidade de fase,  $v_p$ , é menor que zero (a velocidade de fase indica a propagação de uma perturbação, e não de energia) e tem sentido contrário à velocidade de grupo,  $v_g$ , que é maior que zero (pois caso contrário violaria a causalidade, pois significaria transferência de energia para a fonte), confirmando assim o antiparalelismo entre elas.

### 3.4 Índice de Refração Negativo

O fenômeno da refração ocorre quando uma onda incidente passa de um meio a outro com características distintas. Uma mudança no meio no qual a onda se propaga implica numa mudança de velocidade. No caso de uma onda eletromagnética, a densidade do meio é inversamente proporcional à velocidade da onda, embora a frequência não seja alterada.

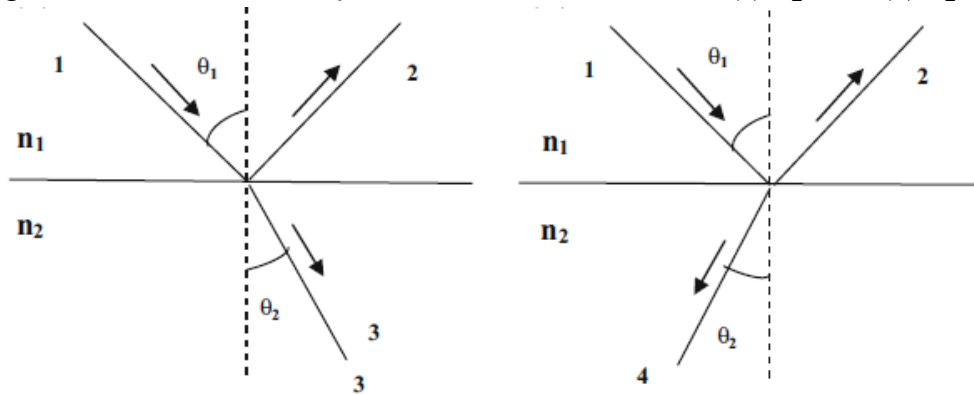
O índice de refração ( $n$ ) é responsável por quantificar o número de vezes que a velocidade ( $v$ ) da onda incidente diminuiu no meio no qual incidiu, e pode ser obtido por:

$$n = \frac{c}{v} \quad (25)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no meio no qual a onda se propaga.

Além de ter alterada a sua velocidade, a onda também sofre um desvio angular ao mudar de meio. A Figura 15 ilustra a incidência de um raio que ultrapassa um meio de índice de refração ( $n_1$ ), com um ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) a um meio de índice ( $n_2$ ), com um ângulo de refração ( $\theta_2$ ), em meios com  $n_2 > 0$  (a) e  $n_2 < 0$  (b).

Figura 15 - Reflexão e refração na interface de dois meios (a)  $n_2 > 0$ , (b)  $n_2 < 0$



Fonte: (CHOUDHURY, 2017)

A Lei de Snell relaciona os índices de refração dos meios com os ângulos de incidência e de refração a partir da relação:

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}\mu_{r1}}{\epsilon_{r2}\mu_{r2}}} \quad (26)$$

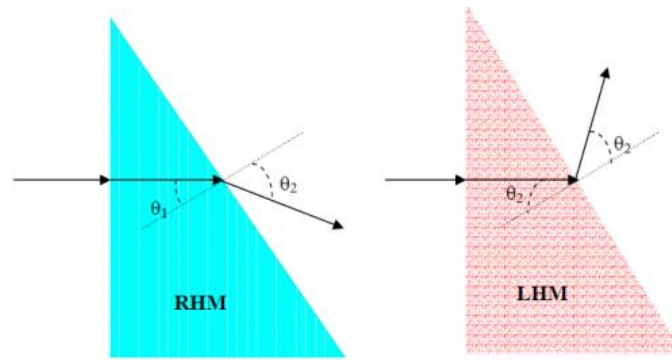
onde  $\epsilon_{r1}$ ,  $\mu_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$  e  $\mu_{r2}$  são respectivamente a permissividade elétrica relativa e a permeabilidade magnética relativa dos meios 1 e 2.

Caso  $\epsilon$  e  $\mu$  sejam negativos ao mesmo tempo, o índice de refração é obtido por:

$$n = \sqrt{|\epsilon||\mu|}\sqrt{e^{2j\pi}} = -\sqrt{|\epsilon||\mu|} \quad (27)$$

O índice de refração também determina o comportamento de deflexão de um feixe na separação entre dois meios distintos (PINHEIRO, 2016). Uma vez que o índice seja positivo, o feixe será defletido ao lado oposto da normal à superfície em relação à onda incidente. Caso o índice seja negativo, o ângulo do raio refratado produzirá um ângulo negativo com a normal, conforme se pode observar na Figura 16:

Figura 16 - Refração de um raio em meios RHM e LHM



Fonte: (SUDHAKARAN, 2006)

A fim de se obter um índice de refração negativo, o material deve ter permeabilidade e/ou permissividade efetivas negativas na mesma faixa de frequência. Quando as partes reais de  $\epsilon$  e  $\mu$  possuem o mesmo sinal, as ondas eletromagnéticas podem se propagar, e caso não sejam, a onda só é capaz de se propagar se for evanescente, como é o caso deste trabalho (CAPOLINO, 2009).

Nenhum material conhecido possui permissividade e permeabilidade naturalmente negativas. Logo, para obter  $n < 0$ , são necessários pelo menos dois tipos de materiais que possuam individualmente  $\epsilon$  e  $\mu$  menores que zero, numa mesma faixa de frequência.

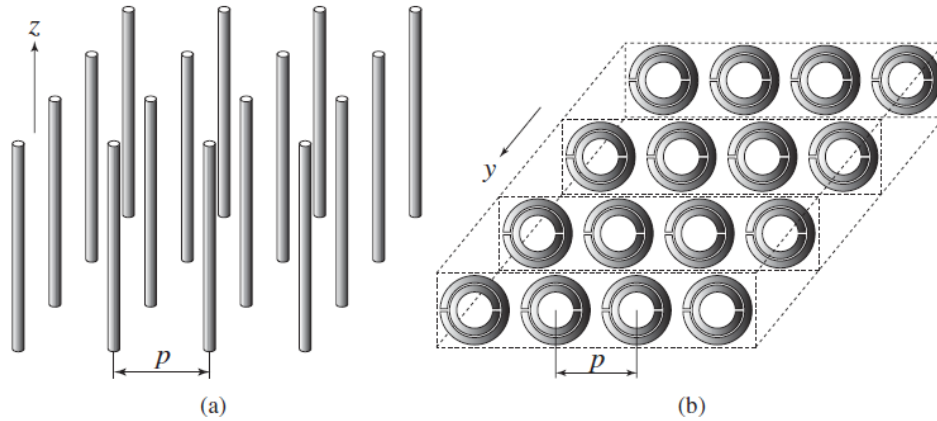
No intuito de criar um material com permissividade elétrica negativa na região de micro-ondas, foi desenvolvido um modelo com barras metálicas baseado na atuação do campo elétrico. Este modelo é denominado de “fios finos” – TW (Thin wire). Estas estruturas agem como um meio plasmático, e desde que a frequência esteja abaixo da frequência plasmática, obtém-se a permissividade negativa, conforme o modelo proposto por Drude-Lorentz.

No que tange a materiais com permeabilidade magnética negativa, Pendry propôs estruturas ressonantes de loops condutores, com um corte nos loops, onde é introduzido um capacitor a fim de se obter uma frequência ressonante determinada pela geometria do elemento, são os chamados anéis ressonadores partidos – SRR's (*Split Ring Resonators*).

### 3.5 Estruturas MM convencionais

O primeiro material LH foi demonstrado experimentalmente mais de 30 anos depois do trabalho de Veselago. Tratava-se de uma estrutura artificial efetivamente homogênea, proposta por Smith e demais colegas, na Califórnia (KRAUS; MARHEFKA, 2019). Tal estrutura baseou-se nos trabalhos de Pendry, que são ilustrados na Figura 17.

Figura 17 - Metamateriais (a) *Thin Wire* (b) *Split Ring Resonator*



Fonte: (CALOZ; ITOH, 2006)

Os MM são modelados basicamente nestes dois tipos de estruturas ilustrados na Figura 17 (SMITH; PADILLA, 2000) e (SMITH; PENDRY, 2009): uma grade densa de fios, também chamado de “estrutura metálica de fio fino” – TW (*thin wire*), com  $\epsilon < 0$  (Figura 17) e uma rede de anéis ressonantes – SRR (*Split Ring Resonators*) com  $\mu < 0$ . É importante ressaltar que as propriedades incomuns contidas nos MM são provenientes da estrutura periódica e não da composição química (PENDRY, 2007).

### 3.5.1 Modelo de fios finos – TW (*Thin Wire*)

O modelo TW, uma vez exposto a um campo elétrico ( $E$ ) paralelo ao eixo dos fios, de modo a induzir uma corrente ao longo deles e gerar momentos dipolo elétricos equivalentes, terá uma permissividade plasmônica ( $\epsilon_r$ ), em função da frequência da forma (CALOZ; ITOH, 2006):

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + j\omega\zeta} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \zeta^2} + j \frac{\zeta\omega_{pe}^2}{\omega(\omega^2 + \zeta^2)} \quad (28)$$

onde  $\omega_{pe}$  é a frequência do plasma elétrico, sintonizável na faixa de GHz e é dado por:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{2\pi c^2}{p^2 \ln\left(\frac{p}{a}\right)}} \quad (29)$$

sendo:  $c$  é a velocidade da luz,  $a$  o raio dos fios e  $p$  o tamanho médio da célula.

Tem-se ainda o fator de amortecimento devido às perdas do metal ( $\zeta$ ), que é obtida por:

$$\zeta = \epsilon_0 (p\omega_{pe}/a)^2 / \pi\sigma \quad (30)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade do metal.

A partir da fórmula de permissividade plasmônica deduz-se claramente que:

$$\text{Re}(\varepsilon_r) < 0, \quad \text{para} \quad \omega^2 < \omega_{pe}^2 - \zeta^2, \quad (31)$$

o que reduz se  $\zeta = 0$  a:

$$\varepsilon_r < 0, \quad \text{para} \quad \omega < \omega_{pe} \quad (32)$$

Neste caso, a permeabilidade é simplesmente  $\mu = \mu_0$ , uma vez que nenhum material magnético está presente e nenhum momento dipolo magnético é gerado. Deve-se levar em conta que os fios sejam muito mais longos que o comprimento de onda (teoricamente infinitos), o que significa que os fios são excitados com frequências bem abaixo de sua primeira ressonância.

### 3.5.2 Anéis ressonadores partidos – SRR's (Split Ring Resonators)

Neste trabalho, uma vez que a técnica escolhida foi a de acoplamento magnético ressonante forte, onde prepondera a característica magnética do campo evanescente, optou-se por utilizar uma estrutura com características MNG (*Mi-negative Medium*,  $\varepsilon > 0$ ,  $\mu < 0$ ), que pode ser obtida a partir dos anéis ressonadores partidos – SRR's (*Split Ring Resonators*).

Se o campo magnético  $H$  é perpendicular ao plano dos anéis, de modo a induzir correntes ressonantes no *loop* e gerar momentos dipolo magnéticos equivalentes, esse MM exhibe uma permeabilidade plasmônica em função da frequência, tal como (CALOZ; ITOH, 2006):

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + j\omega\zeta} \quad (33)$$

$$\mu_r(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2(\omega^2 - \omega_{0m}^2)}{(\omega^2 - \omega_{0m}^2)^2 + (\omega\zeta)^2} + j \frac{F\omega^2\zeta}{(\omega^2 - \omega_{0m}^2)^2 + (\omega\zeta)^2} \quad (34)$$

onde  $F$  é dado por:

$$F = \pi(a/p)^2 \quad (35)$$

sendo:  $a$  o raio interno do menor anel, e  $\omega_{0m}$  uma frequência de ressonância magnética, sintonizável na faixa de GHz e dada por:

$$\omega_{0m} = c \sqrt{\frac{3p}{\pi \ln(2wa^3/\delta)}} \quad (36)$$

onde:  $\omega$  é a largura dos anéis,  $\delta$  o espaçamento radial entre os anéis, e  $\zeta$  o fator de amortecimento devido às perdas do metal e dado por:

$$\zeta = 2pR'/a\mu_0 \quad (37)$$

sendo:  $R'$  a resistência do metal por unidade de comprimento.

Deve-se notar que a estrutura SRR tem uma resposta magnética apesar de não incluir materiais condutores magnéticos, devido à presença de momentos dipolo magnético artificiais proporcionado pelos anéis ressonadores.

A partir da Equação (34) infere-se que pode haver uma faixa de frequência na qual  $Re(\mu_r) < 0$ , em geral ( $\zeta \neq 0$ ). Em casos sem perdas ( $\zeta = 0$ ):

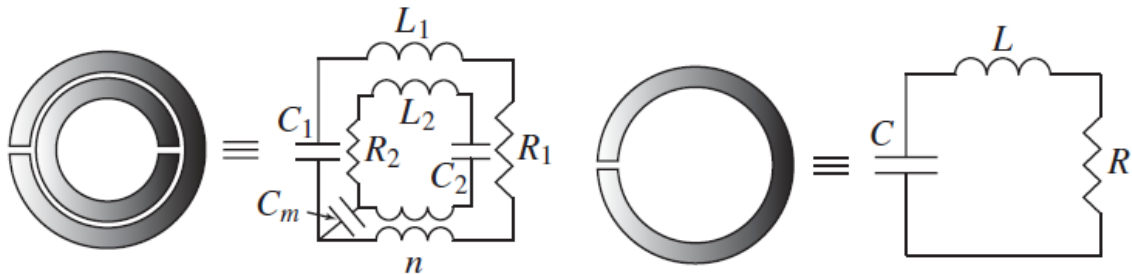
$$\mu_r < 0, \quad \text{para } \omega_{0m} < \omega < \frac{\omega_{0m}}{\sqrt{1-F}} = \omega_{pm} \quad (38)$$

onde  $\omega_{pm}$  é chamada frequência magnética do plasma.

Uma essencial diferença entre as expressões plasmônicas de  $\varepsilon$  e  $\mu$  é que esta é de natureza ressonante [ $\mu(\omega = \omega_{0m}) = \infty$ ], e aquela não-ressonante. A ressonância da estrutura é proveniente da ressonância de seus SRR's.

A Figura 18 ilustra o circuito equivalente de um SRR. Na configuração de anéis duplos (Figura 18-a), que foi utilizada no sistema de MM Convencional simulado, o acoplamento capacitivo e indutivo entre os anéis maiores e menores são modelados por uma capacitância de acoplamento ( $C_m$ ) e por um transformador (de razão de transformação  $n$ ), respectivamente. Na configuração de anel único (Figura 18-b), é o modelo de circuito mais simples ressonador RLC com frequência ressonante  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ .

Figura 18 - Circuitos equivalentes de SRR's (a) anéis duplos (b) anel único



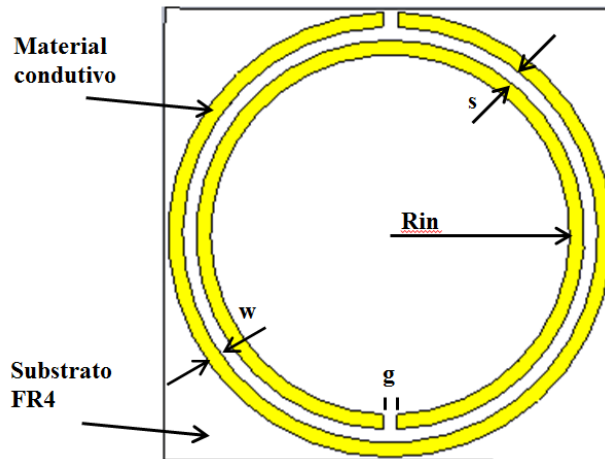
Fonte: (CALOZ; ITOH, 2006)

### 3.5.3 Modelo utilizado para simulação

A Figura 19 representa um modelo de um SRR básico cujos parâmetros construtivos são: raio interno ( $R_{in}$ ), largura da trilha condutora ( $w$ ), espaçamento entre os anéis ( $s$ ), e a distância da partição de cada anel ( $g$ ).

Os anéis ressonadores, de cobre, possuem este corte para operar em uma frequência de ressonância na qual o comprimento de onda seja amplamente superior a seu diâmetro.

Figura 19 - Modelo de um SRR básico



Fonte: Dados do autor

Um meio composto por anéis ressonantes cortados, dispostos periodicamente, pode ter sua permeabilidade magnética efetiva obtida por (ENGHETA; ZIOLKWSKI, 2006):

$$\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r = 1 - \frac{f_{pm}^2 - f_0^2}{f^2 - f_0^2 - jpf} \quad (39)$$

onde:  $f$  – frequência do sinal,  $f_{pm}$  – frequência plasmônica magnética (na qual o meio apresenta permeabilidade magnética nula),  $f_0$  – frequência de ressonância particular do Metamaterial,  $p$  - fator de perda (proveniente da relação com coeficiente de atenuação da onda).

O modelo de anéis ressonadores da Figura 19 tem suas propriedades de ressonância dependentes de sua geometria e sua frequência de ressonância ( $f_R$ ) dada por:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (40)$$

onde  $L$  é a indutância própria e  $C$  a capacitância agregada.

Esta indutância própria pode ser obtida por (JABITA, 2013):

$$L = \mu_0 R_m \left( \ln \frac{8R_m}{h+w} - \frac{1}{2} \right) \quad (41)$$

onde:  $R_m$  – raio médio ( $R_m = R_{in} + w/2$ ),  $h$  - espessura do material condutor.

A capacitância total da estrutura é obtida pela soma de quatro capacitâncias (JABITA, 2013): a do gap ( $C_g$ ), a própria do anel ( $C_s$ ), a mútua ( $C_m$ ), e a mútua no ar ( $C_a$ ).

A capacitância do gap,  $C_g$ , entre as duas finas placas paralelas dada por:

$$C_g = \varepsilon_0 \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{2.4h}{w}\right)} \right] \quad (42)$$

A capacitância própria do anel, proveniente do acúmulo de cargas na superfície do mesmo, também chamada de capacitância de superfície,  $C_s$  pode ser expressa por:

$$C_s = \frac{2\varepsilon_0 h}{\pi} \ln \frac{4R_m}{g} \quad (43)$$

A capacitância mútua,  $C_m$ , no substrato entre as células periódicas do Metamaterial é calculada por:

$$C_m = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{2.4h}{w}\right)} \right] \quad (44)$$

E por último, a capacitância mútua no ar,  $C_a$  é obtida por:

$$C_a = \varepsilon_0 \left[ \frac{wh}{g} + \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{2.4h}{w}\right)} \right] \quad (45)$$

Todavia, a soma destas capacitâncias muitas vezes tem um valor baixo, insuficiente para atingir a ressonância na frequência de projeto, sendo assim, incluem-se capacitores do tipo SMD nos SRR's.

### 3.6 Metamateriais Supercondutores

A supercondutividade foi observada, pela primeira vez, em 1911 por Heike Kamerlingh Omnes (físico holandês, 1853-1926). Após resfriar uma amostra composta por mercúrio e hélio líquido, a 4,2 K (-269 °C, aproximadamente), observou-se que o mercúrio tinha sua resistividade consideravelmente reduzida.

No desenvolvimento dos estudos de supercondutores, em 1922, Meissner e Oschensfeld, formularam aquele que ficou conhecido como “efeito Meissner”: a ausência de fluxo magnético no interior de um supercondutor uma vez que esteja exposto a um campo magnético externo.

A classificação de materiais supercondutores pode ser feita baseada na temperatura crítica ( $T_c$ ) dos mesmos, sendo eles então classificados como de baixa temperatura (próxima de 0 K, ou seja, -273 °C) e alta temperatura  $T_c$  (a partir de 77,4 K ou -195,6 °C) (PEREIRA; FÉLIX, 2013).

Materiais de baixo  $T_c$  incluem principalmente compostos elementares como o Nióbio (Nb), o Seleneto de Nióbio ( $NbSe_2$ ), e mais recentemente o Nitreto de Nióbio (NbN). Quanto aos materiais de alto  $T_c$ , o mais conhecido é o Óxido de Ítrio-Bário-Cobre, ou, YBCO (*Yttrium – Barium – Copper Oxide*), utilizados geralmente em uma

temperatura crítica  $T_c = 90\text{ K}$  ( $-183,1\text{ °C}$ ), bem acima do ponto de ebulição do nitrogênio líquido (LAZARIDES; TSIRONIS, 2018).

O modelo de condutividade de dois fluidos (BENDER; GORTER, 1952) e (TINHKAM, 2004) é geralmente aceito para a descrição formal das propriedades eletromagnéticas dos supercondutores (KRUPKA et al., 2013). De acordo com tal teoria, a condutividade ( $\sigma$ ) de um supercondutor em temperaturas inferiores à chamada temperatura crítica ( $T_c$ ), dada por:

$$\sigma(\omega) = \sigma_1(\omega) - j\sigma_2(\omega) \quad (46)$$

onde  $\sigma_1$  corresponde às perdas e  $\sigma_2$  a indutância cinética.

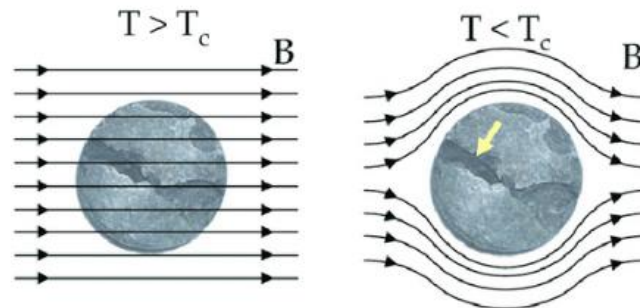
Uma vez em temperaturas mais altas que a temperatura crítica, a parte imaginária da condutividade é igual a zero, e as propriedades elétricas são descritas então somente pela parte real.

### 3.6.1 Efeito Meissner

O Efeito Meissner corresponde ao fenômeno de ausência do fluxo magnético que atravessa um supercondutor. O supercondutor tem em sua superfície a indução de uma corrente elétrica, que por sua vez induz um campo de mesma intensidade, contudo, em sentido oposto, permitindo então apenas a penetração superficial do campo externo.

A Figura 20 ilustra o efeito Meissner em YBCO:

Figura 20 - Efeito Meissner em YBCO



Fonte: (DAWSON et al., 2009)

A partir da Figura 20, se observa que quando acima da temperatura crítica (material não está no estado supercondutor), as linhas de campo magnético externo não sofrem interferência da corrente superficial. Contudo, uma vez abaixo da temperatura crítica (material no estado supercondutor), o campo magnético é desviado após sofrer a interferência da corrente superficial. A anulação do campo que atravessa o supercondutor não varia com o tempo, de modo que a corrente não decai com o tempo, ou seja, a resistência se torna nula no supercondutor.

A lei circuital de Ampère tem a forma:

$$\nabla \times H = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (47)$$

ela define que o rotacional do campo magnético (H) é igual à densidade de corrente elétrica (J) somada à densidade de fluxo elétrico variante no tempo ( $\partial \vec{D} / \partial t$ ). Uma vez que o efeito Meissner define que o campo magnético é nulo no interior do supercondutor, a densidade de corrente necessariamente tem que ser nula também, de modo que exista somente a corrente de superfície (RESNICK; EISBERG, 1979).

Recentemente, muitas estruturas supercondutoras (KURTER, 2010; GHAMSARI, 2013; JUNG, 2014;) foram introduzidas e testadas para aplicações de Metamateriais, em função de suas baixas perdas, maior fator de qualidade e tamanho de comprimento de onda inferior.

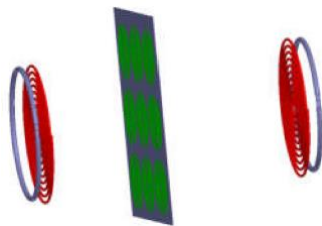
Em contrapartida aos MM convencionais, os MM Supercondutores podem ser substancialmente miniaturizados, e portanto são uma opção para aplicações de energia de pequeno e médio porte como em eletrônicos portáteis, robôs e implantes biomédicos.

### 3.6.2 *Sistemas SCMR com MM Supercondutores*

Neste trabalho foi projetada uma *slab* de Metamaterial Supercondutor com dimensões menores do que a *slab* de MM Convencional para verificar seu comportamento num sistema SCMR, além de aproveitar a característica de miniaturização atrelada aos MM Supercondutores.

No trabalho de (WANG et al., 2019) foi desenvolvido uma *slab* de MM Supercondutor para ser utilizada num sistema WPT, e onde também foram apresentados estudos sobre a localização ideal da mesma. A Figura 21 ilustra o sistema simulado.

Figura 21 - Diagrama esquemático de uma *slab* de MM Supercondutor num sistem WPT



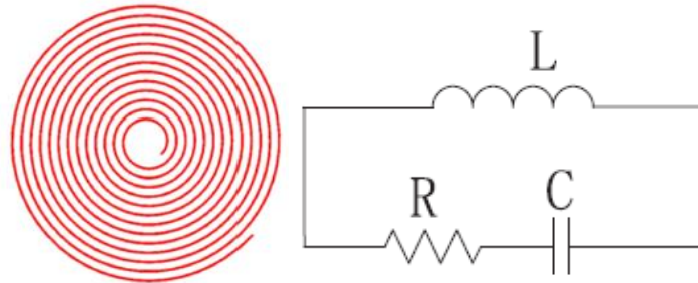
Fonte: (WANG et al., 2019)

A célula unitária de MM Supercondutor que foi empregada neste trabalho é composta por uma linha espiral de YBCO em uma das faces da placa de substrato de Óxido de Lantano-Alumínio ( $LaAlO_3$ ).

O material da espiral é o composto  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO), que é anisotrópico, e por ser supercondutor pode ter uma condutividade da ordem de  $10^{12}$ , e que quando combinado com o poliestireno faz aumentar a condutividade do material (ABRAHAM et al., 2011). Uma ilustração desta espiral pode ser vista na Figura 22-a além do seu

circuito equivalente (Figura 22-b), sendo a frequência de ressonância inversamente proporcional ao espaçamento entre as voltas (WANG et al., 2019). Para que o circuito entre em ressonância, é necessária a adição de um capacitor à espiral supercondutora.

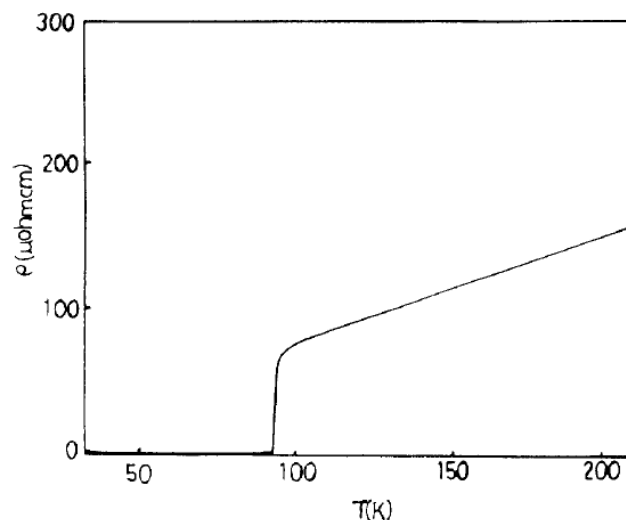
Figura 22 - MM Supercondutor: (a) Estrutura (b) Circuito equivalente



Fonte: (WANG et al., 2019)

A resistividade do YBCO cresce quando ele rompe a barreira da temperatura crítica, conforme se pode observar na Figura 23 (LI et al., 1990).

Figura 23 - Variação da resistividade do YBCO de acordo com a temperatura



Fonte: (Adaptado de LI et al., 1990)

O substrato no qual está alocada a espiral de YBCO é formado pelo composto  $LaAlO_3$ , que possui uma constante dielétrica de 25, e uma tangente de perdas de 0,0005 (WANG et al., 2005). Além disso, o  $LaAlO_3$  possui uma densidade de corrente crítica de  $4,7 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  a 77 K (LI, 1990).

### 3.7 Estado da arte em WPT com Metamateriais

Uma nova abordagem para a melhoria do desempenho de um sistema WPT foi apresentada no trabalho de (SHAW; MITRA, 2019), onde estruturas MM Convencionais planas foram projetadas e construídas. Foram utilizadas duas *slabs* de MM, sendo uma delas alocada mais próxima da unidade transmissora e outra mais próxima da unidade receptora. A alta permissividade do MM empregado gera um forte comportamento do dipolo magnético, aumentando o acoplamento entre as bobinas, de

forma que a eficiência foi aprimorada. A frequência de trabalho foi da ordem de 300-500 MHz, e a eficiência medida após a inserção de MM foi de 60,8% frente a 52,2% sem MM. Os resultados da eficiência medida tiveram grande proximidade com os resultados simulados (54,4% e 63,5%, respectivamente).

Implantes biomédicos estão entre as principais aplicações de Metamateriais em WPT. Um exemplo disso está no trabalho de (CHENG et al., 2019) onde MMs foram aplicados a 13,56 MHz para o acoplamento da onda evanescente em dispositivos biomédicos implantáveis. A eficiência foi aumentada de 46 para 51% após a inserção de Metamaterial sem desalinhamento entre transmissor e receptor. Após um deslocamento axial de 15°, a eficiência passa de 39 para 46% e de 28 para 50% quando duas *slabs* de MM foram inseridas entre antenas separadas por 1,5 cm.

Uma nova configuração de Metamateriais é apresentada no trabalho de (BAGHEL; KULKARNI; NAYAK, 2019). Tratam-se das lentes de Metamaterial denominadas GRIN MM (*Gradient Refractive Index Metamaterial*), baseadas em índice de refração gradiente. Neste tipo de MM, o índice de refração varia espacial e perpendicularmente à direção de propagação. O sistema construído possui 36 células unitárias, dispostas em 3 linhas e 12 colunas, opera a 2,45 GHz e está apto a transmitir energia a até 6 m de distância, com uma eficiência de 86%. Esta tecnologia pode ser empregada no carregamento de vários sistemas tais como veículos aéreos não tripulados (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV), sensores e robôs.

Quanto aos chamados Metamateriais Supercondutores, que estão atualmente sob estudo e em desenvolvimento para muitas aplicações WPT, e mostram-se com grande potencial de avanço na pesquisa científica. Um projeto de célula unitária de MM Supercondutor foi apresentado no trabalho de (WANG et al., 2019). O MM em questão possui uma espiral composta de Ítrio, Bário, Cobre e Oxigênio (*Yttrium-Barium-Copper Oxide*, YBCO) sobreposta num substrato de  $\text{LaAlO}_3$ , e as células de MM foram alocadas de modo a formarem uma *slab* de 3 linhas e 3 colunas. O sistema opera numa frequência de 58,8 MHz, com 20 cm de distância entre as unidades transmissora e receptora, e teve sua eficiência aumentada de 3,36% para 13,58% após a inserção de MM Supercondutor.

No trabalho de (WANG et al., 2018) foi projetada e construída uma espiral de material supercondutor composta YBCO acoplada num substrato de  $\text{LaAlO}_3$  a ser aplicado em sistemas de transmissão sem fio via acoplamento magnético ressonante. O sistema empregado nesse trabalho opera na frequência da ordem de 85 MHz e a potência transferida na faixa de 550 mV.

Um sistema WPT que utiliza a técnica de ressonância magnética, com duas bobinas, foi construído e testado no trabalho de (WANG et al., 2018). Esse trabalho utilizou Metamateriais supercondutores ferromagnéticos para melhorar a eficiência em sistemas WPT. Foram projetados três tipos de bobinas de ressonância a fim de se verificar os efeitos no sistema WPT de diferentes bobinas de ressonância usando MM supercondutores-ferromagnéticos. A frequência de operação do sistema é de ordem de

30 kHz, e as distâncias de transmissão são de 60 a 200 mm. Foi feita também uma investigação sobre a posição do Metamaterial entre as unidades transmissora e receptora.

## 4 SISTEMA WPT – SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo contém uma descrição geral dos sistemas WPT simulados e os resultados obtidos conforme a configuração simulada. São apresentados os dados construtivos das bobinas transmissora e receptora e das *slabs* de Metamaterial em suas configurações convencional e supercondutora. Há ainda uma análise dos valores de tensão, corrente, potência e eficiência é realizado.

### 4.1 Dados gerais dos sistemas simulados

A fonte de excitação utilizada em todas as simulações foi uma fonte de tensão c.a., com tensão de pico  $V_{m\acute{a}x} = 100V$ , acoplada aos terminais da unidade transmissora. No que tange à unidade receptora, a ela foi acoplado um resistor de  $100 \Omega$  em quase todas as simulações, embora uma investigação tenha sido feita do comportamento do sistema ao ter sua carga variada. Em todas as simulações, os dados de tensão, corrente e potência foram obtidos sobre o resistor que funcionou como carga.

O sistema SCMR simulado utiliza bobinas impressas, pois estas permitem um sistema de menor volume, devido à sua compactação, e com parâmetros construtivos mais fáceis de serem manipulados frente às bobinas com seção transversal circular.

A frequência de operação para a qual o sistema foi projetado foi de 1 MHz. Na ordem de grandeza desta frequência estão inseridas muitas aplicações em WPT como implantes biomédicos (MASHHADI et al., 2019), (WANG et al., 2005) e (CHEN, 2010), estruturas auto-ressonantes (STEIN, 2019), circuitos com supercapacitores (AQUEVEQUE; BARBOZA, 2015), conversores ressonantes (SI et al., 2005), e transmissores de estágio único (JIANG, 2019)

A eficiência ( $\eta$ ) do sistema foi calculada a partir da razão entre a potência medida na carga resistiva ( $P_L$ ) e a potência disponibilizada pela fonte ( $P_f$ ), que em sua forma percentual pode ser obtida por:

$$\eta(\%) = \frac{P_L}{P_f} \cdot 100\% \quad (48)$$

Quanto aos parâmetros geométricos das bobinas impressas, que funcionaram como UT e UR, conforme Tabela 2, foram obtidos a partir do trabalho de Corrêa (2019) que desenvolveu um protótipo das referidas bobinas, para operarem em 1 MHz.

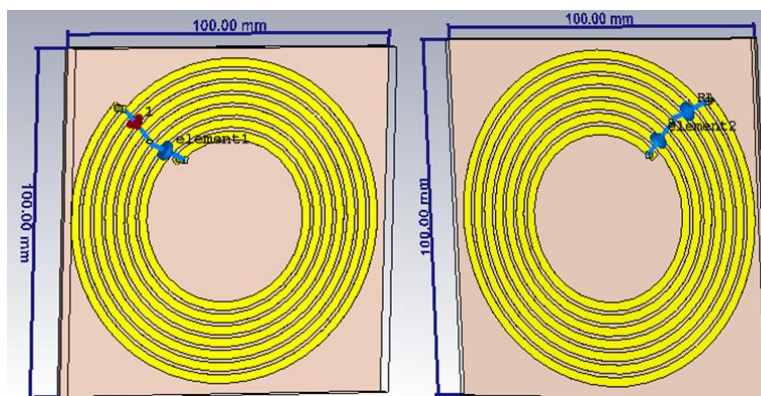
Tabela 2 - Parâmetros das bobinas utilizadas nas simulações

Elementos	Abreviatura	Parâmetros	Valor
Bobinas planas de cobre	$R_{in}$	Raio interno	22 mm
	$R_{out}$	Raio externo	47 mm
	w	Largura da trilha condutora	2,5 mm
	s	Espaçamento entre as trilhas	1 mm
	N	Número de espiras	7
	L	Indutância	4,73 $\mu$ H
	Q	Fator de Qualidade	38,27
Substrato de FR4	$\epsilon_r$	Permissividade elétrica	4,3
	$\delta$	Tangente de perdas	0,015

Fonte: (Adaptado de CORRÊA, 2018)

As bobinas foram alocadas sobre placas de substrato de FR4 que possui dimensões de 100 x 100 x 1,5 mm<sup>3</sup>, conforme se pode observar na Figura 24.

Figura 24 – (a) Unidade transmissora (b) Unidade receptora



Fonte: (Dados do autor)

Foram executadas simulações de um sistema SCMR, composto basicamente por duas bobinas planas que desempenham os papéis de unidades transmissora e receptora respectivamente, separadas inicialmente por ar. A distância entre o centro das bobinas transmissora e receptora foi variada de 1 em 1 cm, desde a distância mínima de 4 cm até a distância máxima de 10 cm. Além disso, entre UT e UR foi num primeiro momento, adicionada uma *slab* de MM Convencional e posteriormente uma *slab* de MM Supercondutor, a fim de se verificar o desempenho do sistema em cada uma destas configurações.

Para operar a uma frequência de ressonância de 1 MHz, e a partir da Equação (6), encontrou-se o valor de 47 nF para os capacitores a serem inseridos, em série com as bobinas transmissora e receptora. Para atingir a condição de ressonância devem ser adicionados estes capacitores de modo a fazerem a compensação do circuito, e consequentemente maximizar a eficiência de transferência de energia do circuito.

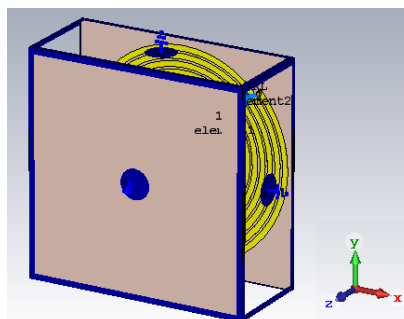
As simulações efetuadas para verificar o comportamento do sistema foram realizadas por meio do *software* CST®. Elas podem ser feitas utilizando-se o domínio

do tempo, baseada na técnica de integração finita (*Finite Integration Technique – FIT*) ou o método de matriz de linha de transmissão (*Transmission Line Matrix – TLM*).

## 4.2 Condições de contorno

Uma vez que o domínio computacional é finito, o CST impõe que sejam definidas as condições de contorno apropriadas nas fronteiras. A fronteira do domínio tem a forma de um paralelepípedo, e para cada uma das 6 faces são impostas as condições de contorno (*Boundary Conditions, BC*) (2 em cada eixo). As condições de contorno servem para restringir os campos elétrico e magnético, de forma que se comportem na simulação da mesma forma que se comportariam num sistema físico. Nas simulações realizadas, a condição de contorno utilizada foi a *Magnetic*, conforme ilustrado na Figura 25.

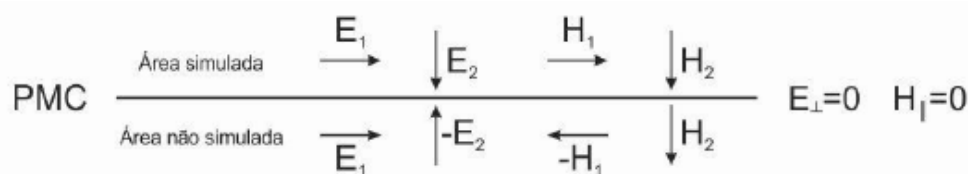
Figura 25 - Condições de contorno



Fonte: (Dados do autor)

Neste trabalho, a condição de contorno utilizada é a parede magnética (*Perfect Magnetic Conductor, PMC*) em todas as faces, e em todas as simulações. Isso se deve à geometria da bobina plana utilizada, na qual está acoplada uma fonte de tensão, que impõe que as faces operem como um condutor magnético perfeito, e os campos tangenciais dos fluxos magnéticos e as componentes normais dos campos elétricos sejam nulos. Isto significa que os campos elétricos são paralelos ao limite e os fluxos magnéticos são normais ao limite, conforme ilustra a Figura 27.

Figura 26 - Comportamento dos campos elétrico e magnético num meio PMC

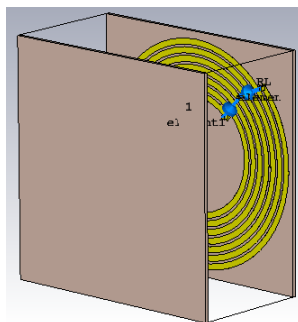


Fonte: (OLIVEIRA, 2019)

## 4.3 Sistema SCMR sem Metamaterial

Inicialmente foram feitas simulações onde o sistema WPT foi formado apenas pelas unidades transmissora e receptora conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - SCMR sem Metamaterial



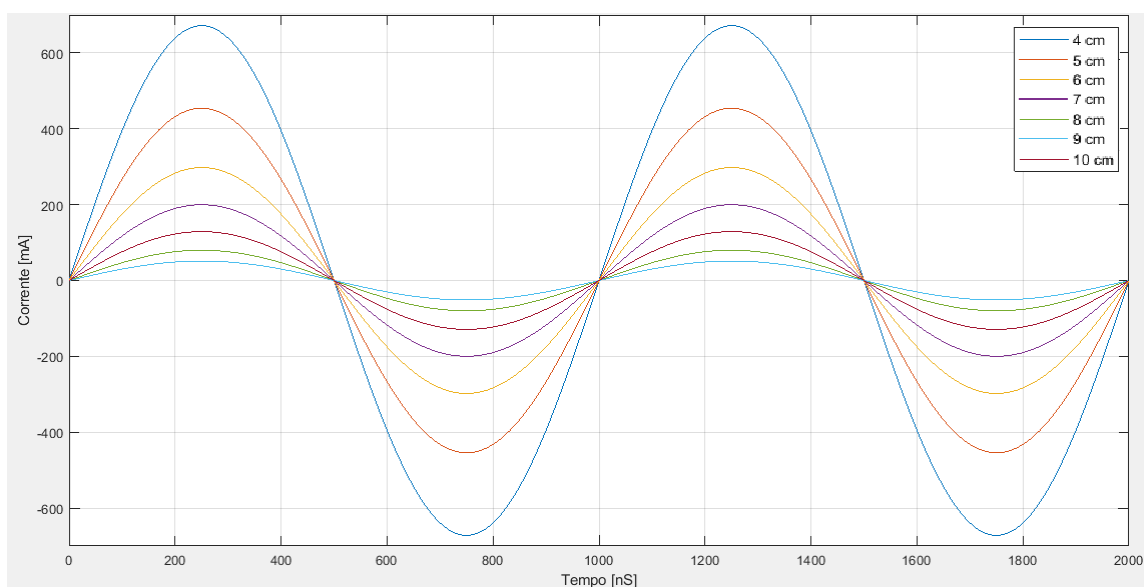
Fonte: Dados do autor

Os resultados obtidos após as simulações estão compilados na Tabela 3 e nas Figuras 28, 29 e 30.

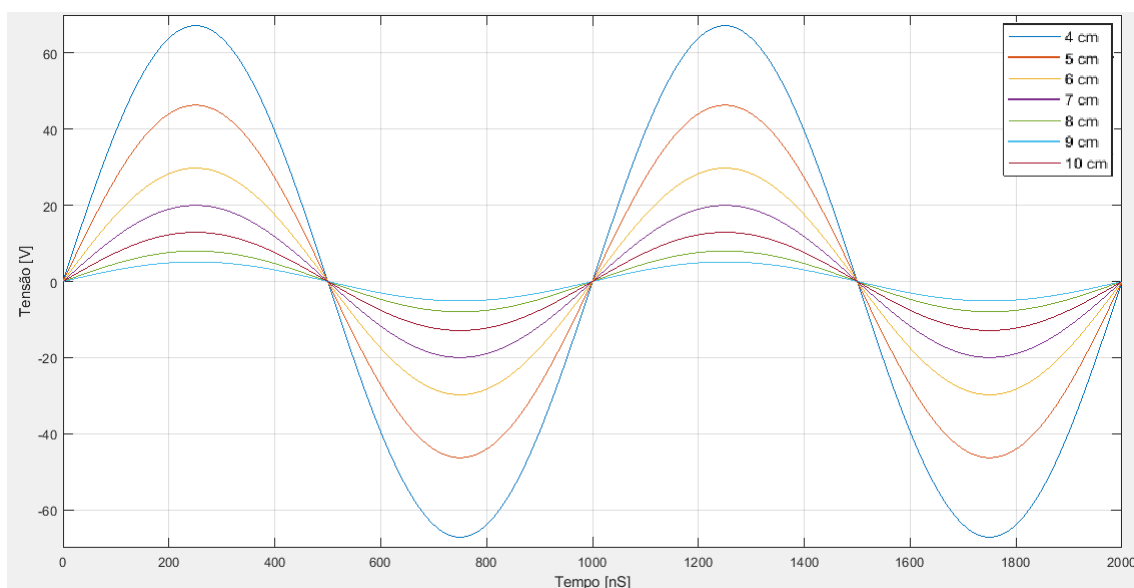
Tabela 3 - Resultados sem MM -  $R_L = 100\Omega$ 

1,0 MHz	Sem Metamaterial						Eficiência (%)
	FONTE ( $V_{m\acute{a}x}=100V$ )			CARGA ( $100\Omega$ )			
Dist\ancia (cm)	$V_{ef}$ (V)	$I_{ef}$ (A)	$P_1$ (W)	$V_{ef}$ (V)	$I_{ef}$ (mA)	$P_2$ (W)	
4	70,71	5,25	341,26	67,19	671,89	45,14	13,23
5	70,71	5,28	343,37	46,31	454,11	21,03	6,12
6	70,71	5,40	351,09	29,77	297,74	8,86	2,52
7	70,71	5,44	354,42	19,97	199,74	3,99	1,13
8	70,71	5,46	355,47	12,89	128,89	1,66	0,47
9	70,71	5,47	356,04	7,98	79,80	0,64	0,18
10	70,71	5,47	356,62	5,13	51,28	0,26	0,07

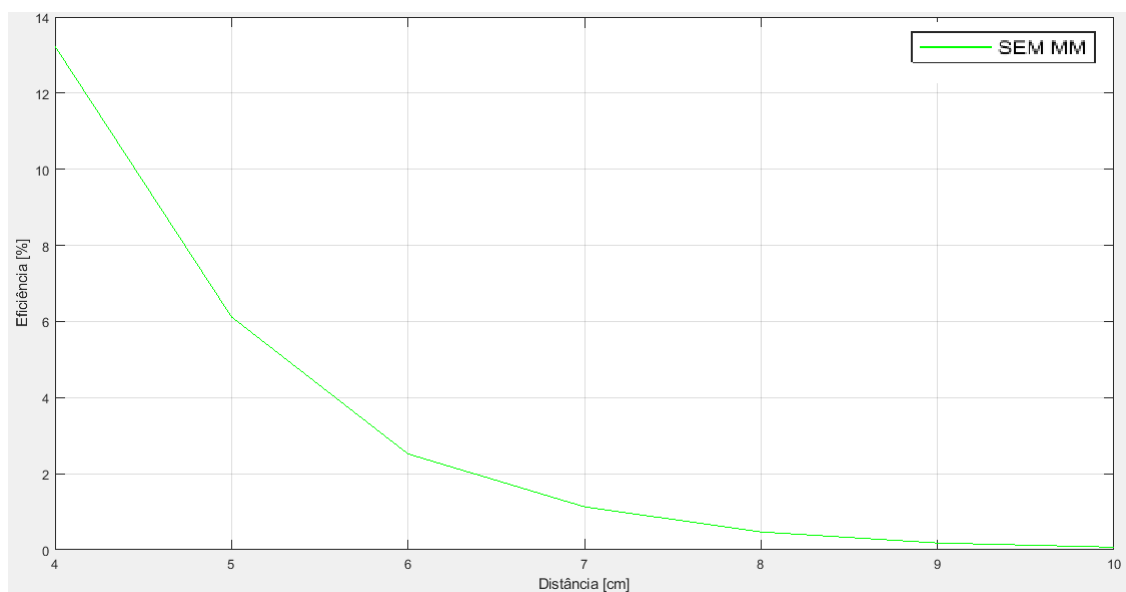
Fonte: Dados do autor

Figura 28 - Corrente na carga -  $R_L = 100\Omega$  - Sem MM

Fonte: Dados do autor

Figura 29 - Tensão na carga -  $R_L = 100\Omega$  – Sem MM

Fonte: Dados do autor

Figura 30 - Eficiência no sistema -  $R_L = 100\Omega$  – Sem MM

Fonte: Dados do autor

Os melhores resultados foram sempre obtidos a 4 cm, que foi a menor distância entre as bobinas transmissora e receptora. Nessas condições o sistema esteve menos propenso a sofrer os efeitos de fenômenos inerentes à WPT como propagação radial e reflexão, que por sua vez fazem com que decaia a eficiência do sistema. Contudo, houve um decaimento exponencial da eficiência do sistema – que chegou a ter um valor máximo de 13,23% – com o aumento da distância. O mesmo vale para os valores de corrente na carga (máximo de 671,89 mA), tensão na carga (máximo de 67,19 V) e potência recebida pela carga (valor máximo de 45,14 W).

#### 4.4 Sistema SCMR com Metamaterial Convencional

No trabalho de Corrêa (2018), projetou-se e montou-se um protótipo de sistema SCMR, para 1 MHz. A *slab* era composta de células básicas de Metamateriais que possuem tamanho máximo inferior a 50% do tamanho das bobinas utilizadas (raio de 10 cm), ou seja, menor que 5 cm, de forma que respeitassem o limite de homogeneidade  $\left(p \leq \left(\frac{\lambda}{4}\right)\right)$ .

A Tabela 4 apresenta os parâmetros construtivos das células unitárias de Metamaterial utilizadas no protótipo de (CORRÊA, 2018) e que teve seus valores utilizados para a *slab* de MM confeccionada no CST nas simulações realizadas neste trabalho.

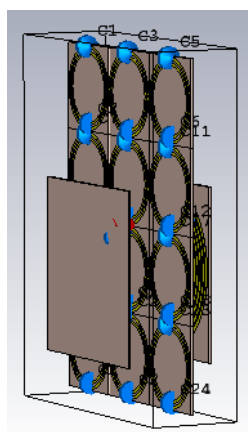
Tabela 4 - Parâmetros construtivos - Célula unitária de MM Convencional

Elemento	Abreviação	Parâmetros	Valor
Anéis ressonadores - Cobre	$R_{in1}$	Raio interno	19,87 mm
	w	Largura da trilha condutora	1,63 mm
	h1	Altura da linha condutora	0,02 mm
	s	Espaçamento entre as trilhas	1,47 mm
	C	Capacitância do capacitor agregado	47,0 nF
Substrato – FR4	L1	Largura	50,0 mm
	h2	Altura	50,0 mm
	t1	Espessura	1,50 mm

Fonte: (Adaptado de CORRÊA, 2018)

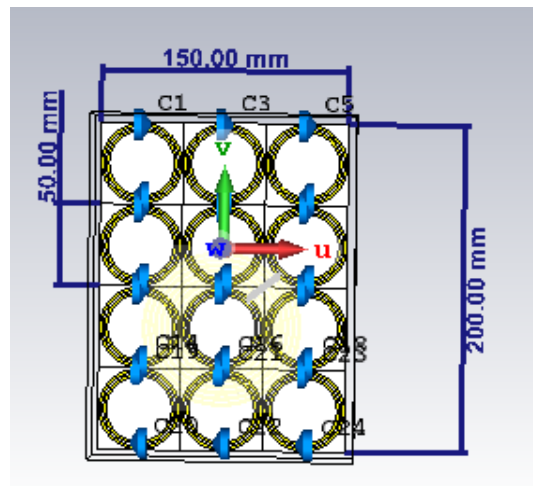
A *slab* de Metamaterial Convencional foi alocada na posição central entre a UT e UR conforme se pode observar na Figura 31.

Figura 31 - SCMR com MM Convencional



Fonte: (Dados do autor)

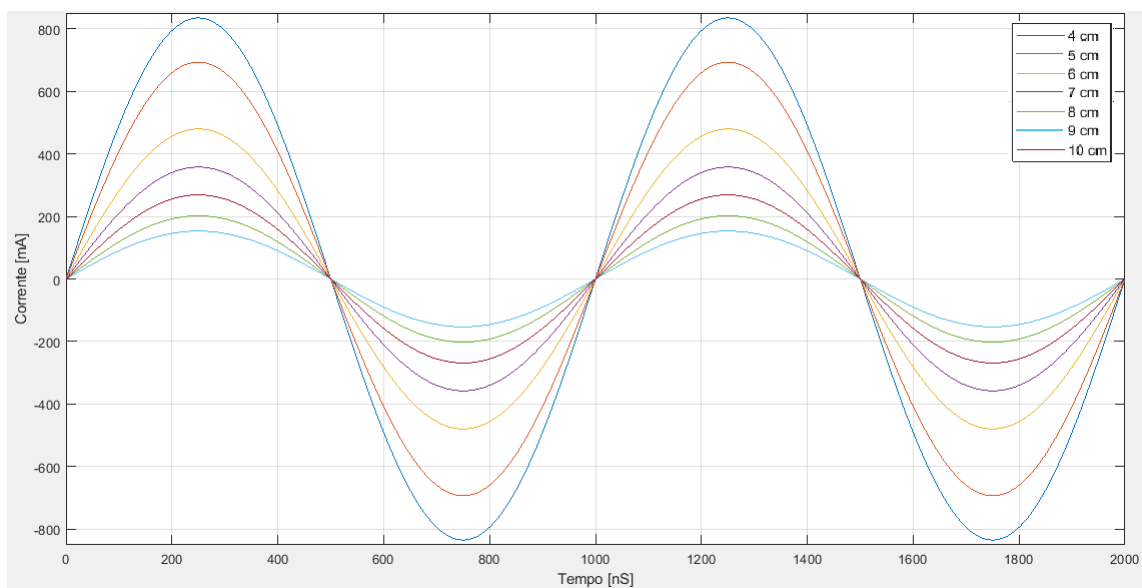
Foram utilizadas 12 células básicas, dispostas em 4 linhas e 3 colunas para formar a *slab*, numa área total de 300 cm<sup>2</sup>, conforme se pode ver na Figura 32.

Figura 32 - Dimensões da *slab* de MM Convencional

Fonte: (Dados do autor)

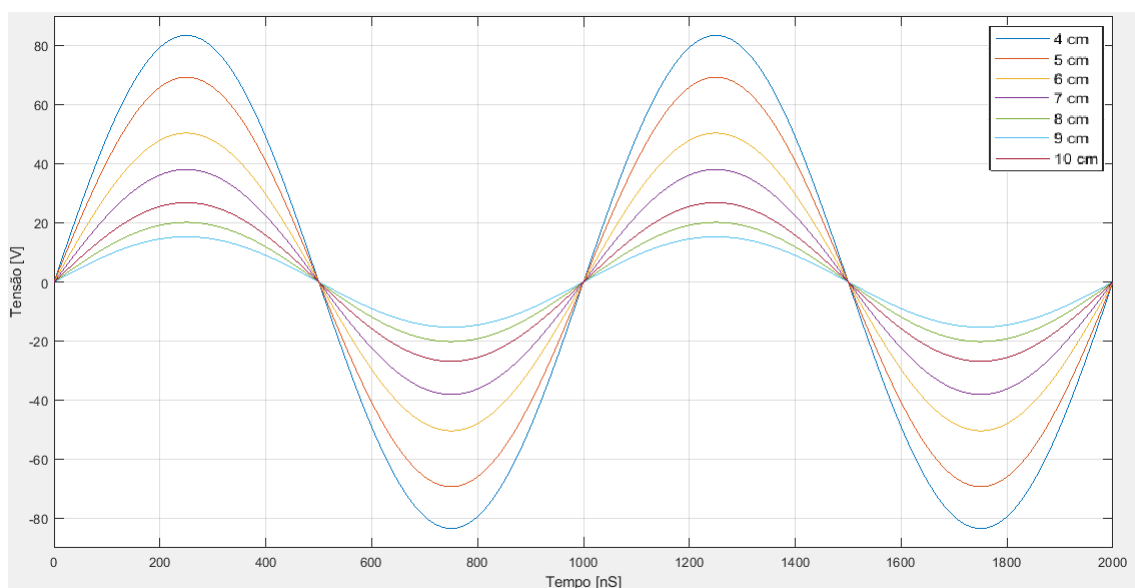
Tabela 5 - Resultados com MM Convencional -  $R_L = 100\Omega$ 

1,0 MHz	Com Metamaterial Convencional						Eficiência (%)
	FONTE ( $V_{m\acute{a}x}=100V$ )			CARGA ( $100\Omega$ )			
Dist\ancia (cm)	$V_{ef}$ (V)	$I_{ef}$ (A)	P1 (W)	$V_{ef}$ (V)	$I_{ef}$ (mA)	P2 (W)	
4	70,71	4,98	296,63	83,42	834,20	69,59	23,46
5	70,71	6,24	371,70	69,28	692,80	48,00	12,91
6	70,71	5,78	344,46	50,37	479,32	24,15	7,01
7	70,71	5,95	354,15	38,06	357,54	13,61	3,84
8	70,71	6,06	360,90	26,85	268,48	7,21	2,00
9	70,71	6,11	364,01	20,18	201,76	4,07	1,12
10	70,71	6,16	366,87	15,30	153,00	2,34	0,64

Figura 33 - Corrente na carga -  $R_L = 100\Omega$  - Com MM Convencional

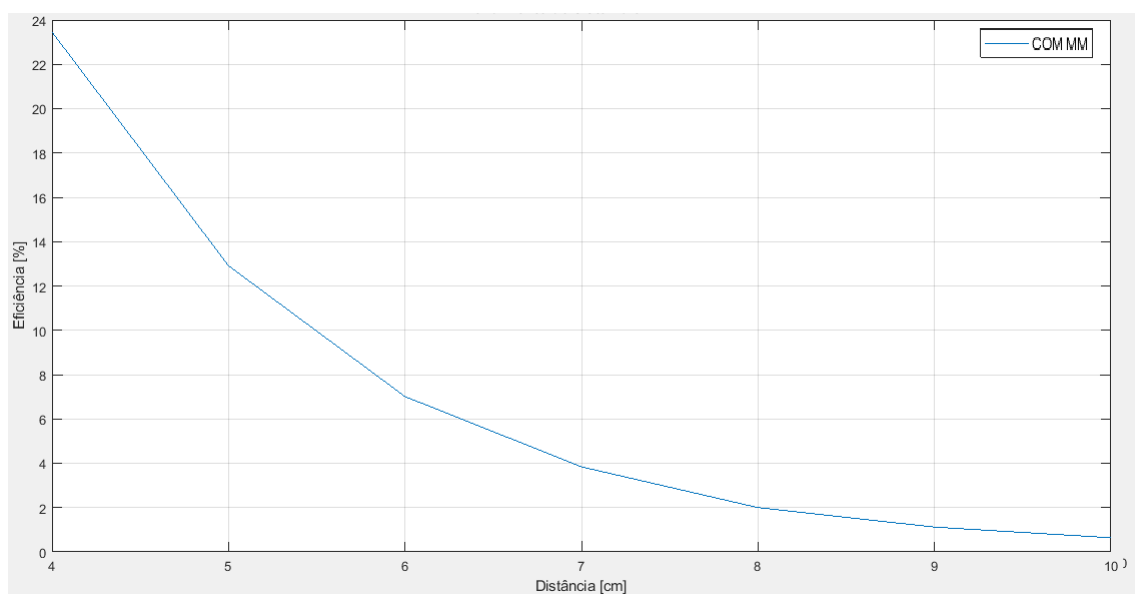
Fonte: Dados do autor

Figura 34 - Tensão na carga -  $R_L = 100\Omega$  – Com MM Convencional



Fonte: Dados do autor

Figura 35 - Eficiência na carga -  $R_L = 100\Omega$  – Com MM Convencional



Fonte: Dados do autor

Novamente os melhores resultados foram obtidos a 4 cm, conforme esperado, por ser a menor distância entre as bobinas. Os resultados demonstram que houve os seguintes valores máximos: 23,46% na eficiência (aumento de 77% quando comparado ao caso sem MM), 834,20 mA na corrente na carga (aumento de 24%), 83,42 V de tensão (aumento de 24%) e 69,59 W na potência (aumento de 54%), valores que comprovam o funcionamento do Metamaterial Convencional como captador do fluxo magnético disperso e capaz de aumentar então a eficiência na WPT.

## 4.5 Simulações com *slab* de MM Supercondutor

Foi desenvolvido neste trabalho o projeto de uma célula unitária de Metamaterial Supercondutor, que serviu como princípio para a formação de uma *slab* de Metamaterial Supercondutor. Esta *slab* foi utilizada em simulações em condições semelhante às outras configurações, a fim de se verificar seu desempenho e sua aplicabilidade em sistemas WPT-SCMR no que tange ao objetivo de se aumentar a eficiência na transmissão de energia sem fio.

### 4.5.1 Projeto de uma *slab* de MM Supercondutor

A célula unitária desenvolvida neste trabalho, em primeiro lugar teve suas dimensões definidas com tamanho médio ( $p$ ) muito menor do que o comprimento de onda ( $\lambda$ ), de forma a respeitar o princípio de homogeneidade efetiva,  $p \leq \left(\frac{\lambda}{4}\right)$ , de Metamateriais. Assim, os fenômenos refrativos podem se sobrepor aos de espalhamento e difração na propagação de ondas no MM (CALOZ; ITOH, 2006).

Além disso, visou-se a possibilidade de diminuição da *slab* de MM, de forma que ela fosse bem menor do que a *slab* de MM Convencional já utilizada nas simulações. Definiu-se então as dimensões da célula unitária em  $4 \times 4 \times 0,5 \text{ cm}^3$ , e uma *slab* de 9 células, dispostas em 3 linhas e 3 colunas, totalizando  $144 \text{ cm}^2$ , uma área que corresponde a 48% da área da *slab* de MM Convencional, ou seja, 52% menor.

Uma vez definida as dimensões da célula unitária, foram definidos o diâmetro externo ( $D_o$ ) da espiral condutora como 38 mm (3,8 cm) e o diâmetro interno ( $D_i$ ) como 2 mm (0,2 cm).

O circuito equivalente de um MM Supercondutor é um circuito RLC, de forma que é então necessário adicionar capacitores para fazer o circuito operar em ressonância. A partir de Wang et al. (2019) pode-se extrair o valor destes capacitores e também os demais parâmetros construtivos:

$$C(pF) = 0,035D_o(\text{mm}) + 0,06 \quad (49)$$

sendo C é a capacitância a ser inserida, em pF, neste caso é então de 1,39 pF, conforme a Equação (49).

Após a definição de C, e como a frequência de operação já está definida, pode-se extrair a indutância geométrica  $L_g$  a partir de:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_g C}} \quad (50)$$

obtendo-se  $L_g = 0,0182 \text{ H}$ .

O número de voltas ( $N$ ) da espira condutora é determinado a partir da Equação (51):

$$N = \sqrt{\frac{2L_g \left[ \ln \left( \frac{2,46}{a} + 0,2a^2 \right) \right]}{D_{avg} \mu_0}} \quad (51)$$

onde o fator  $a$  pode ser obtido de:

$$a = \frac{(D_o - D_i)}{(D_o + D_i)} \quad (52)$$

e o diâmetro médio,  $D_{avg}$  de:

$$D_{avg} = \frac{(D_o - D_i)}{2} \quad (53)$$

tendo-se encontrado  $N = 43,373$ .

Os dados obtidos e utilizados para as simulações estão compilados na Tabela 6.

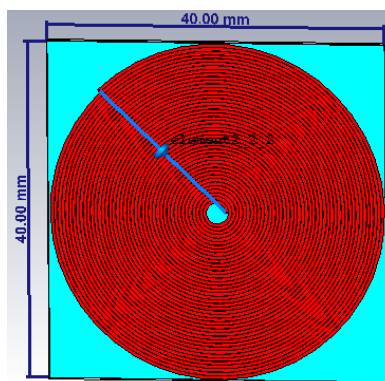
Tabela 6 - Parâmetros construtivos - Célula unitária de MM Supercondutor

Elemento	Abreviação	Parâmetros	Valor
Espiral de YBCO	$R_{in2}$	Raio interno	1,0 mm
	$R_{ext2}$	Raio externo	19,0 mm
	N	Número de voltas	43
	w	Largura da trilha condutora	0,40 mm
	h3	Altura da linha condutora	0,50 mm
	s	Espaçamento entre as trilhas	0,0318 mm
	C	Capacitância do capacitor agregado	1,39 pF
Substrato – $LaAlO_3$	L2	Largura	40,0 mm
	h4	Altura	40,0 mm
	t1	Espessura	0,50 mm

Fonte: (Dados do autor)

A célula unitária projetada está ilustrada na Figura 36.

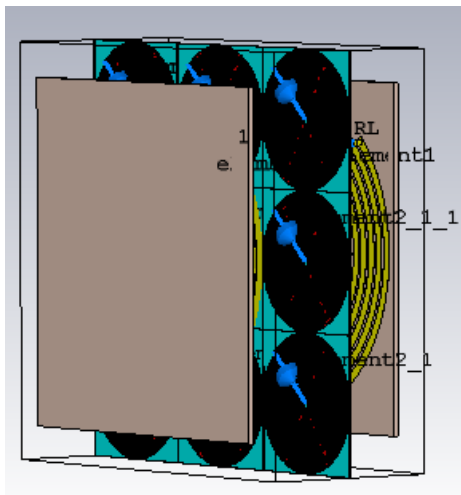
Figura 36 – Célula unitária de MM Supercondutor



Fonte: (Dados do autor)

Por último, foi inserida a *slab* composta por células de Metamateriais supercondutores, também na posição central entre as bobinas, conforme se pode verificar pela Figura 37.

Figura 37 - SCMR com *slab* de MM Supercondutor



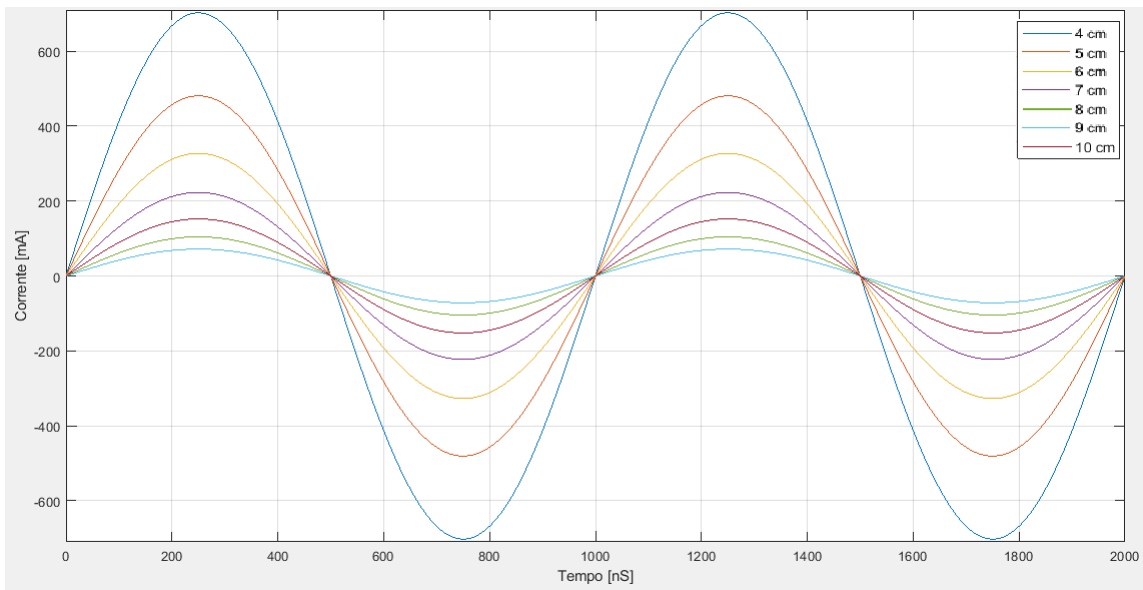
Fonte: (Dados do autor)

A *slab* de Metamaterial Supercondutor utilizada é composta por 9 células, cada uma com dimensões 4 x 4 cm<sup>2</sup>, numa área total de 144 cm<sup>2</sup>, valor que é 52% menor do que a área da *slab* de Metamaterial Convencional que havia sido utilizada. Foram feitas simulações para a configuração na qual foi inserida a *slab* de MM Supercondutor nas mesmas condições das simulações anteriores. Os resultados estão compilados na Tabela 7, e nas Figuras 38, 39 e 40.

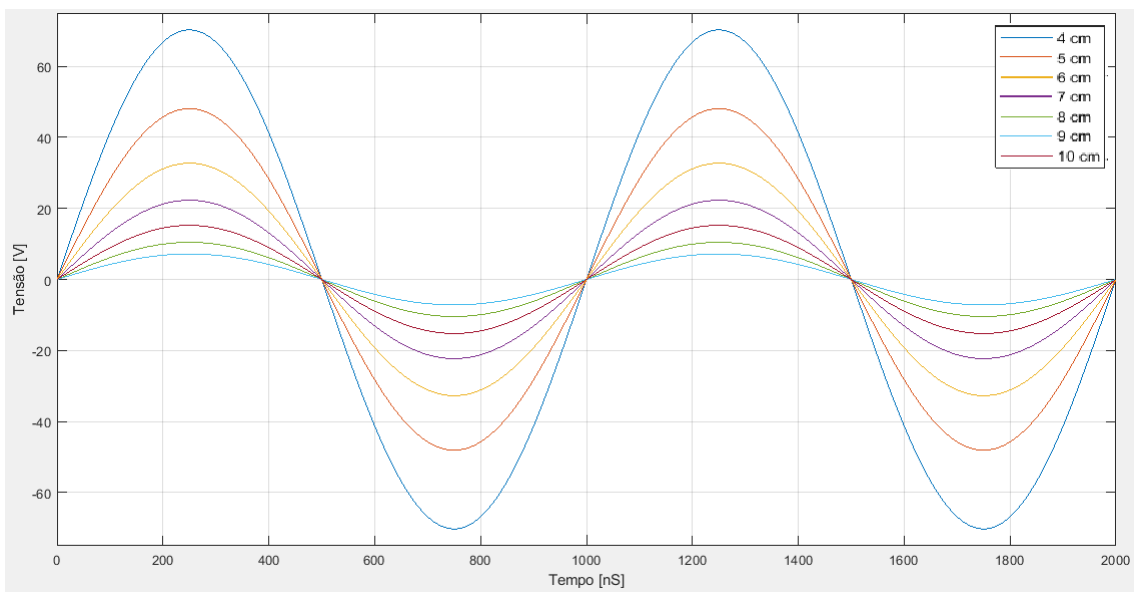
Tabela 7 - Resultados com MM Supercondutor -  $R_L = 100\Omega$

1,0 MHz	Com Metamaterial Supercondutor						Eficiência (%)
	FONTE ( $V_{m\acute{a}x}=100V$ )			CARGA ( $100\Omega$ )			
Distância (cm)	Vef (V)	Ief (A)	P1 (W)	Vef (V)	Ief (mA)	P2 (W)	
4	70,71	7,51	306,30	70,25	702,46	49,34	16,11
5	70,71	7,41	302,20	48,07	480,67	23,10	7,65
6	70,71	7,22	294,69	32,72	327,20	10,71	3,63
7	70,71	7,04	287,33	22,29	222,86	4,97	1,73
8	70,71	6,89	281,22	15,22	152,18	2,32	0,82
9	70,71	6,80	277,37	10,44	104,38	1,09	0,39
10	70,71	6,72	273,98	7,16	71,63	0,51	0,19

Fonte: (Dados do autor)

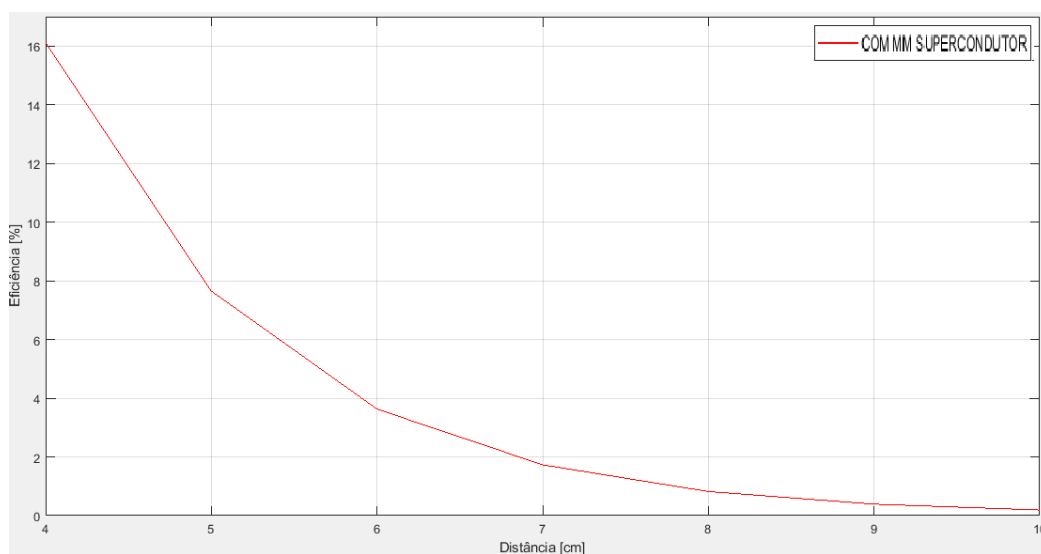
Figura 38 - Corrente na carga -  $R_L = 100\Omega$  - Com MM Supercondutor

Fonte: (Dados do autor)

Figura 39 - Tensão na carga  $R_L = 100\Omega$  - Com MM Supercondutor

Fonte: (Dados do autor)

Figura 40 - Eficiência na carga -  $R_L = 100\Omega$  – Com MM Supercondutor



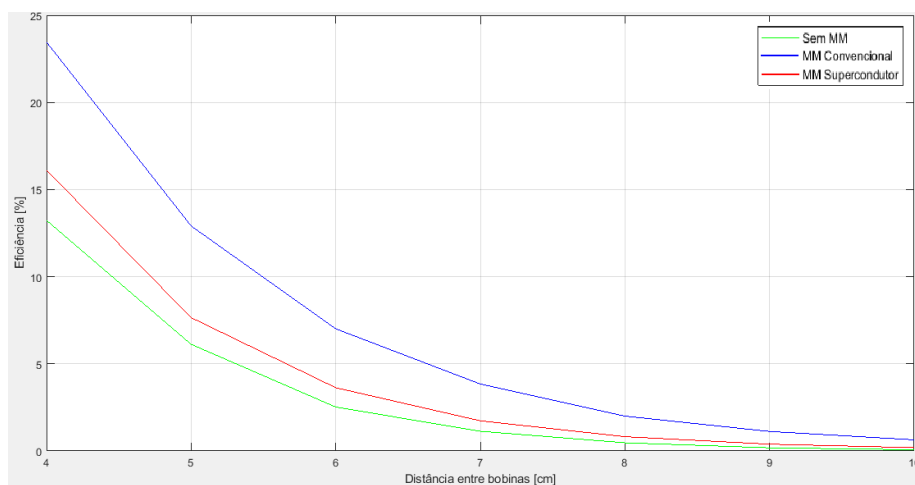
Fonte: (Dados do autor)

Também no caso em que foram utilizados MMs Supercondutores, os melhores resultados foram obtidos a 4 cm. A eficiência foi de 16,11%, aumento de 21% quando comparado ao caso sem MM, contudo, ainda 32% menor do que o MM Convencional. Nesse caso, o MM Supercondutor se mostrou aplicável para a WPT, contudo, menos eficiente do que a configuração convencional. No que tange à corrente na carga, o valor máximo foi de 702,46 mA, a tensão na carga 70,25 V e a potência recebida pela carga 49,34 W.

#### 4.5 Comparação dos sistemas SCMR

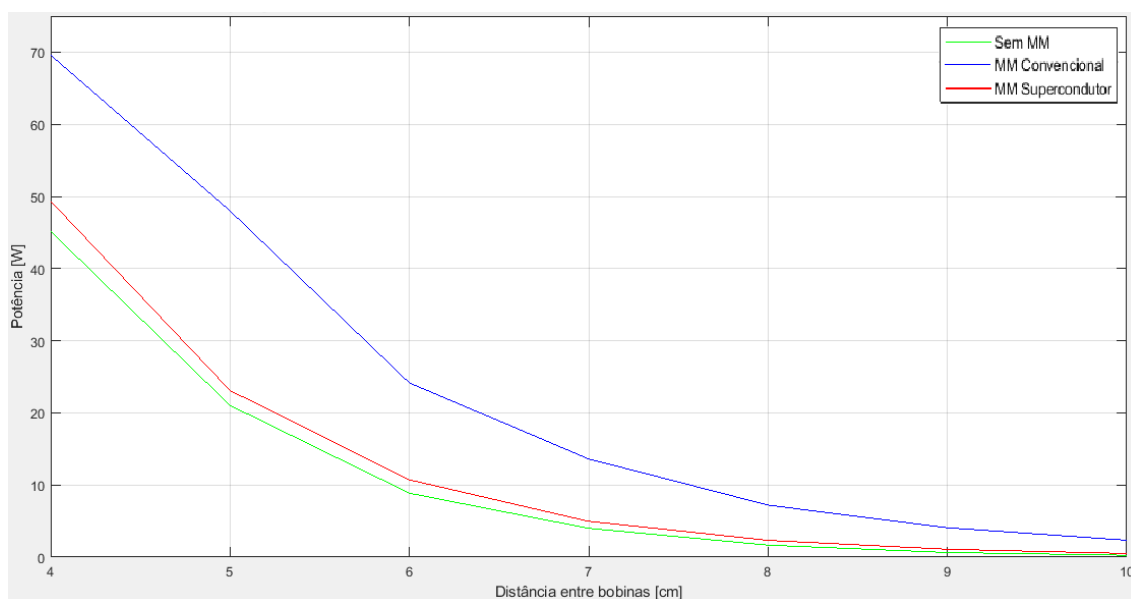
Foi feita uma compilação e comparação dos resultados obtidos, a 1 MHz, nas simulações do sistema SCMR em três configurações: sem MM, com MM Convencional e com MM Supercondutor, conforme se pode verificar na Tabela 8 e nas Figuras 41 e 42.

Figura 41 - Comparação da eficiência em sistemas SCMR -  $R_L = 100\Omega$



Fonte: (Dados do autor)

Figura 42 - Comparação dos valores de potência disponibilizada à carga



Fonte: (Dados do autor)

Tabela 8 - Comparação da eficiência e potência na carga em sistemas SCMR

1 MHz	Without Metamaterial		Conventional Metamaterial		Superconducting Metamaterial		
	Distance (cm)	P (W)	$\eta$ (%)	P (W)	$\eta$ (%)	P (W)	$\eta$ (%)
	4	45,14	13,23	69,59	23,46	49,34	16,11
	5	21,03	6,12	48,00	12,91	23,10	7,65
	6	8,86	2,52	24,15	7,01	10,71	3,63
	7	3,99	1,13	13,61	3,84	4,97	1,73
	8	1,66	0,47	7,21	2,00	2,32	0,82
	9	0,64	0,18	4,07	1,12	1,09	0,39
	10	0,26	0,07	2,34	0,64	0,51	0,19

Fonte: (Dados do autor)

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 38-40 e na Tabela 8, observa-se que a *slab* de MM Supercondutor também fez aumentar a eficiência na WPT via SCMR quando é feita a comparação com as simulações sem nenhum MM entre as bobinas.

A eficiência após a inserção da *slab* de MM Supercondutor aumentou de 13,23% no caso sem MM para 16,11%, na menor distância. Este valor, embora ainda distante dos 23,46% obtidos no caso da *slab* de MM Convencional, permanece significativo, uma vez que esta *slab* tem área equivalente a 48% da área daquela.

A potência na carga, por exemplo, era 45,14 W sem MM e foi elevada a 49,34 W (9,3% de aumento) com MM Supercondutor. Este aumento obtido ainda foi abaixo do caso de MM Convencional, mas chegou a 70,90% da potência fornecida no caso do MM Convencional, confirmando a possibilidade de diminuição das dimensões da *slab* de Metamateriais.

Os valores de corrente na carga após a inserção da *slab* de MM Supercondutor estão ilustrados na Figura 38 e comparados na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação dos valores de corrente na carga

1 MHz	Sem Metamaterial	Com Metamaterial Convencional	Com Metamaterial Supercondutor
Distância (cm)	I <sub>ef</sub> (mA)	I <sub>ef</sub> (mA)	I <sub>ef</sub> (mA)
4	671,89	834,20	702,46
5	454,11	692,80	480,67
6	297,74	479,32	327,20
7	199,74	357,54	222,86
8	128,89	268,48	152,18
9	79,80	201,76	104,38
10	51,28	153,00	71,63

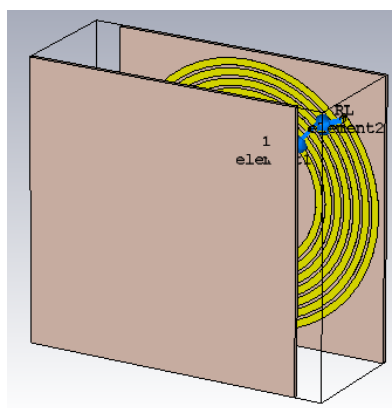
Fonte: (Dados do autor)

Após a inserção da *slab* de MM Supercondutor, obteve-se uma corrente na carga até 39% maior do que a corrente no caso sem MM. A 4 cm, a corrente na carga no caso de MM Supercondutor foi equivalente a 84% da corrente na carga no caso de MM Convencional, mesmo com uma *slab* 52% menor.

#### 4.6 Efeito do desalinhamento entre UT e UR

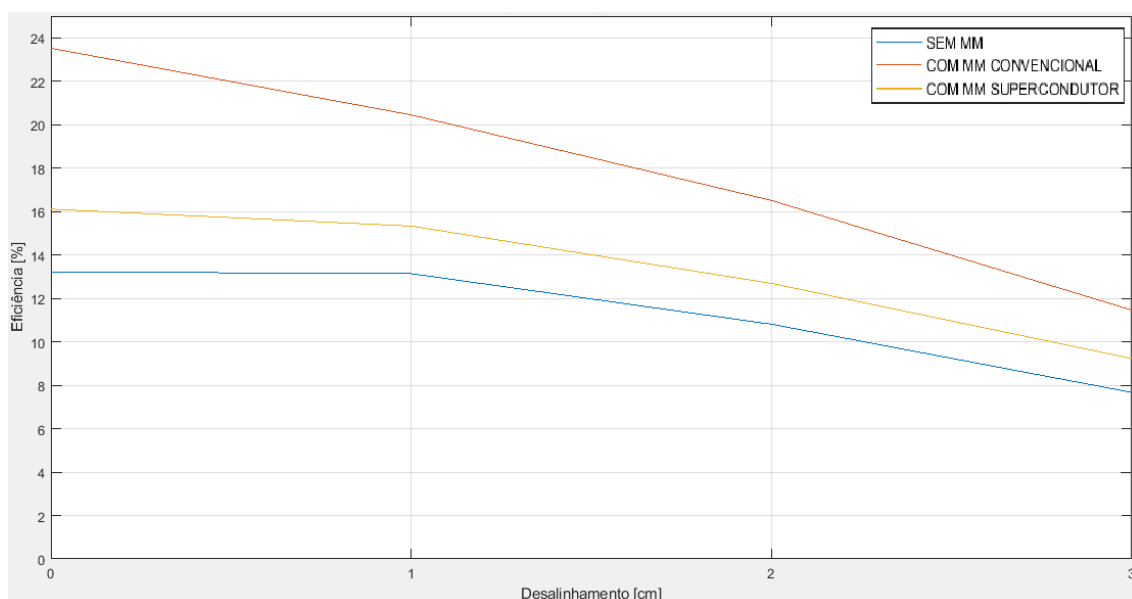
Foi feita uma investigação sobre o efeito do desalinhamento entre as unidades transmissora e receptora com relação à eficiência. O deslocamento horizontal foi feito na UR e variou de 1 a 3 cm, conforme se pode observar na Figura 43.

Figura 43 - Deslocamento da Unidade Receptora



Fonte: (Dados do autor)

Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 44 e na Tabela 10.

Figura 44- Comparação da eficiência após desalinhamento de UR –  $R_L = 100\Omega$ 

Fonte: (Dados do autor)

Tabela 10 - Comparação de resultados após desalinhamento - Sem Metamaterial e com Metamaterial

1 MHz	Sem Metamaterial			Com Metamaterial Convencional			Com Metamaterial Supercondutor		
	Desalinhamento (cm)	Pfonte (W)	Pcarga(W)	Efic.(%)	Pfonte (W)	Pcarga(W)	Efic.(%)	Pfonte (W)	Pcarga(W)
0	341,37	45,14	13,23	295,85	69,59	23,46	306,30	49,34	16,11
1	350,03	45,98	13,14	319,32	65,31	20,45	298,85	45,82	15,33
2	355,83	38,47	10,81	324,39	53,55	16,51	302,60	38,40	12,69
3	360,58	27,67	7,67	330,35	37,85	11,46	304,68	28,11	9,23

Fonte: (Dados do autor)

A eficiência do sistema com MM Convencional e com supercondutor continuou superior à eficiência do sistema sem MM em todos os casos. No caso do maior deslocamento entre as bobinas, 3 cm, o rendimento sem MM foi de cerca de 7,67%, enquanto que com MM Convencional foi de 11,46% e 9,23% com MM Supercondutor.

No que tange à potência, nas simulações com MM Supercondutor houve uma proximidade de seus valores quando comparados aos casos sem MM, contudo, a potência fornecida pela fonte foi diferente nos dois casos (menor no caso de supercondutor), o que resultou numa eficiência maior após o cálculo das respectivas razões entre potência da fonte e potência na carga. Já os MM convencionais apresentaram uma potência até 54,16% maior do que nos casos sem MM.

O estudo do efeito do desalinhamento entre UT e UR e a comparação de sistemas WPT-SCMR sem MM, com o MM Convencional e o Supercondutor foi utilizado para a confecção do artigo “*Wireless Power Transfer Through Coupled Magnetic Resonance With Conventional and Superconducting Metamaterials*” que foi publicado no MOMAG 2020.

#### 4.7 Variação dos valores dos resistores de carga

A fim de se investigar o comportamento dos sistemas WPT utilizados neste trabalho, foi efetuada a alteração dos valores das resistências de carga para 1  $\Omega$  e 50  $\Omega$ . As simulações neste caso foram feitas apenas para a distância de 4 cm de separação entre UT e UR, na qual se obtiveram os melhores resultados nas simulações anteriores. Os resultados estão compilados e são apresentados na Tabela 11 e foram comparados com os resultados provenientes das simulações em que a carga tinha o valor de 100  $\Omega$ .

Tabela 11 - Comparação de resultados após variação da carga - Sem Metamaterial e com Metamaterial

1 MHz	Sem Metamaterial			Com Metamaterial Convencional			Com Metamaterial Supercondutor		
	1 $\Omega$	50 $\Omega$	100 $\Omega$	1 $\Omega$	50 $\Omega$	100 $\Omega$	1 $\Omega$	50 $\Omega$	100 $\Omega$
Resistência ( $\Omega$ )	1 $\Omega$	50 $\Omega$	100 $\Omega$	1 $\Omega$	50 $\Omega$	100 $\Omega$	1 $\Omega$	50 $\Omega$	100 $\Omega$
Potência (W)	31,48	75,90	45,14	47,58	118,63	69,59	63,21	89,54	49,34
Eficiência (%)	8,57	22,81	13,23	12,09	38,71	23,46	14,24	30,20	16,11

**Fonte: (Dados do autor)**

Após analisar os resultados obtidos, verifica-se que em todos os casos, após a inserção da *slab* de MM, houve um aumento na eficiência de transmissão do sistema quando comparados os resultados aos das simulações sem MM.

Observa-se também que a potência entregue à carga foi maior quando o valor do resistor foi de 50  $\Omega$ , atingindo um valor máximo de 118,63 W na simulação com MM Convencional. Houve também um aumento na eficiência, que era da ordem de 23,46% quando a carga era de 100  $\Omega$  e chegou a cerca de 38,71%.

Nas simulações com a carga de 1  $\Omega$ , a potência recebida pela carga e a eficiência do sistema que utiliza MM Supercondutor superaram a configuração com MM Convencional, 63,21 W e 14,24% frente a 47,58 W e 12,09% respectivamente, e ambas maiores do que a simulação sem MM que teve 31,48 W e 8,57%.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram investigados sistemas para transmissão de energia sem fio, que podem ser empregados em sistemas de baixa potência, como implantes biomédicos, eletrônicos portáteis, redes de sensores e internet das coisas – IoT (*Internet of Things*).

A transmissão de energia sem fio apresenta-se como uma oportunidade para eliminar os tradicionais métodos de transmissão via cabos em baixa potência, além de apresentar ganhos em mobilidade e conveniência para o usuário. Some-se a isto, o fato de aumentarem a flexibilidade para dispositivos que possuem uma substituição de baterias cara, perigosa ou inviável, como, por exemplo em implantes biomédicos.

Contudo, a transmissão de energia sem fio apresenta o problema de baixa eficiência, uma vez que ela decai exponencialmente com o aumento da distância entre a fonte e a carga. Esse decaimento é proveniente de fatores inerentes à transmissão WPT como propagação radial e reflexão, e pode ser agravado por fatores como o desalinhamento entre as unidades transmissora e receptora.

Utilizou-se o *software* CST Studio para realizar as simulações de sistemas WPT em diversas configurações. Por meio dele foi possível extrair dados como tensão, corrente, potência que possibilitaram uma análise do comportamento dos sistemas simulados.

Por meio dos resultados obtidos neste trabalho, confirmou-se a expectativa de decaimento da eficiência de transmissão com o aumento da distância, conforme formulação teórica.

No intuito de se atenuar esse decaimento, foram utilizados Metamateriais para fazer o direcionamento do fluxo magnético proveniente da unidade transmissora e que se dispersa no ar para a unidade receptora.

Foram utilizados, primeiramente, os chamados MM convencionais, com uma estrutura de anéis ressonadores partidos, e que possuem um histórico maior de aplicações e trabalhos relacionados. Além disso, foi feito o projeto de uma *slab* de MM Supercondutor, que apresenta uma geometria diferente quando comparada ao MM Convencional e a vantagem de poder ter dimensões menores frente ao MM Convencional. Em ambas configurações, pode-se obter uma permeabilidade magnética negativa na estrutura. Em todas as simulações houve ganho em potência e eficiência após a inserção de Metamateriais.

Após a inserção de MM Convencional, e ao comparar seus resultados com os das simulações sem a presença do mesmo, verificou-se um aumento dos valores em todas as distâncias simuladas. A 4 cm, os ganhos foram de 24% nos valores de corrente e tensão (834,20 mA frente a 671,89 mA e 83,42 V frente a 67,19 V respectivamente). Um aumento de potência de 24% (69,59 W frente a 45,14 W) e de 77% na eficiência (23,46% frente a 13,23%).

Uma vez inserido o MM Supercondutor, com uma *slab* 52% menor do que a *slab* de MM Convencional, também houve ganho nos resultados quando comparados aos das simulações sem MM em todas as distâncias simuladas. A 4 cm, por exemplo, a corrente aumentou para 702,46 mA, a tensão para 70,25 V e a potência para 49,34 W, com um aumento de 21% na eficiência (16,11%).

Uma vez comprovados os benefícios dos MM na WPT, foi feita também uma investigação da eficiência em casos em que há desalinhamento horizontal entre as bobinas transmissora e receptora, fator preponderante para causar o decaimento da potência. Confirmou-se também que os MM são capazes de atenuar a perda de energia na transmissão nesses casos. Após a inserção de MM Convencional, mesmo a 3 cm de desalinhamento, a eficiência foi de 11,46% e de 9,23% no caso do MM Supercondutor, ambas maiores do que sem MM (7,67%).

Foram também efetuadas simulações onde se variou a carga resistiva acoplada à UR, de 100  $\Omega$  para 1  $\Omega$  e 50  $\Omega$ . A carga de 50  $\Omega$  foi a que apresentou a maior eficiência: 38,71% (com MM Convencional), 30,20% (Supercondutor) e 22,81% (sem MM).

Os resultados obtidos indicam que os Metamateriais empregados agiram como lentes capazes de convergir o campo magnético na direção da unidade receptora e confirmaram a teoria encontrada e estudada.

## 5.1 Trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos, observa-se que os sistemas SCMR podem ser fortemente influenciados por fatores como a distância entre as bobinas, a frequência de operação e sua geometria construtiva. Dentre as possibilidades de trabalhos futuros, destacam-se:

- projeto de sistemas com MM Supercondutor com maior eficiência que o MM Convencional, mesmo com tamanho menor.
- projeto de sistema com MM Supercondutor com uma *slab* de menor espessura.
- montagem de protótipo dos modelos desenvolvidos neste trabalho, a fim de se comparar os resultados teóricos com o sistema físico.
- estudo de específicas aplicações práticas de SCMR com MM Supercondutores.
- desenvolvimento de Metamateriais que possam agir como refletores ao invés de lentes para o campo magnético.

## REFERÊNCIAS

ABDOLKHANI, A. Fundamentals of inductively coupled Wireless Power Transfer systems. **INTECH OPEN SCIENCE**, p. 25. doi:10.5772/63013, 2016.

ABRAHAM, R. et al. Yttrium Barium Copper Oxide-filled Polystyrene as a Dielectric Material. **Journal of applied polymer science**, v. 120, n. 4, p. 2233–2241, 2011.

AGBAEZE, A. E.; RAHIM, S. K. A.; LEOW, C. Y.; JAYAPRAKASAM, S.; CHEW, B. W. Low-power near-field magnetic wireless energy transfer links: A review of architectures and design approaches. **RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS**, 2017.

AKYEL, C.; BABIC, S. I.; WU, K.; MOJICA, J. F. **Mutual inductance of thin coaxial circular coils with constant current density in air**. WSEAS International Conference on Telecommunications and Informatics, pp. 168-175, 2006.

ALIEXPRESS. [Sem título]. **ALIEXPRESS**. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/4000231576152.html> Acesso em: 08 de Jan. de 2020.

AQUEVEQUE, P.; PINO, E; BARBOZA, J. An inductive-link with a regulated secondary voltage based on frequency adjustment, **2015 IEEE PELS WORKSHOP ON EMERGING TECHNOLOGIES: WIRELESS POWER (2015 WoW)**, Daejeon, pp. 1-4, 2015.

BADOWICH, C., MARKLEY, L. Idle Power Loss Suppression in Magnetic Resonance Coupling Wireless Power Transfer. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, vol. 65, no. 11, pp. 8605-8612, Nov. 2018.

BAGHEL, A. K.; KULKARNI, S. S.; NAYAK, S. K. Far-Field Wireless Power Transfer Using GRIN Lens Metamaterial at GHz Frequency. **IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS**, v. 29, n. 6, p. 424–426, jun. 2019.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. [s.l.] John wiley & sons, 2016.

BAO, K.; ZEKIOS, C. L.; GEORGAKOPOULOS V, S. Miniaturization of SCMR Systems Using Multilayer Resonators. **IEEE ACCESS**, v. 7, p. 143445–143453, 2019.

BENDER, P. L.; GORTER, C. J. A few remarks on the two-fluid model for superconductors. **PHYSICA**, v. 18, n. 8–9, p. 597–604, 1952.

BHATTACHARYA, A.; SHAW, T.; MITRA, D. **Performance Enhancement of Wireless Power Transfer System by Controlling Transmission and Reflection Properties of Metamaterials**. 2018 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC). **Anais...**2018.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**; Prentice Hall/Pearson, 12ª Ed, 2012.

BROWN, W. C. Experiments Involving a Microwave Beam to Power and Position a Helicopter. **IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS**, v. AES5, n. 5, p. 692-, 1969.

BROWN, W. C. The History of Power Transmission by Radio-Waves. **IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES**, v. 32, n. 9, p. 1230–1242, 1984.

CALOZ, C.; ITOH, T. **Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications. The Engineering Approach**. [s.l.] Wiley, 2006.

CAMPOS, A. L. **Superfícies seletivas em frequência - Análise e Projeto**. Natal: IFRN, 2009.

CAPOLINO, F. **Theory and Phenomena of Metamaterials**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2009;

CHANG, H.; LIANG, T.; YANG, W. Design and Implementation of Bidirectional DC-DC CLLLC Resonant Converter. **2018 IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE)**, Portland, OR, pp. 2712-2719, 2018.

CHEN, K. et al. An Integrated 256-Channel Epiretinal Prosthesis. **IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS**, v. 45, n. 9, p. 1946–1956, 2010.

CHENEY, M. **Tesla: Man out of time**. [s.l.] Simon and Schuster, 1981.

CHENG, C. et al. Load-Independent Wireless Power Transfer System for Multiple Loads Over a Long Distance. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 34, n. 9, p. 9279–9288, 2019.

CHO, Y.; KIM, J. J.; KIM, D.; LEE, S.; KIM, H.; SONG, C.; KIM, J. Thin PCB-type Metamaterials for improved efficiency and reduced EMF leakage in Wireless Power Transfer systems. **IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES**, 64, 2016.

CHOU DHURY, B. **Metamaterial Inspired Electromagnetic Applications**. [s.l.] Springer, 2017.

CORRÊA, Diego Carlo. **Transmissão de Energia Sem Fio Utilizando Acoplamento Magnético Ressonante Forte e Metamateriais**. Orientador: Úrsula do Carmo Resende. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil, 2018.

DAWSON, M. et al. Imaging with Polarized Neutrons. **NEW JOURNAL OF PHYSICS**, v. 11, 2009.

ELEFThERIADES, G. V.; BALMAIN, K. G.; **Index in Negative-Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications**, IEEE, 2005, pp.413-418, 2005.

ELEFThERIADES, G. V.; ENGHETA, N. Metamaterials: Fundamentals and applications in the microwave and optical regimes. **IEEE PROCEEDINGS**, 99, 2011.

ENGHETA, N.; ZIOLKWSKI, R. W. **Metamaterials physics and engineering explorations**. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006.

EZZULDDIN, A. S.; IBRAHEEM, A. A. Design and optimization of printed spiral coils used in Wireless Power Transmission systems for powering 10mm<sup>2</sup> receiver size at 13.56MHz operating frequency. **International Journal of Current Engineering and Technology**, p. 7, 2017.

FALKENSTEIN, E. et al. Far-Field RF-Powered Variable Duty Cycle Wireless Sensor Platform. **IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS II-EXPRESS BRIEFS**, v. 58, n. 12, p. 822–826, 2011.

GAO, J.; YAN, G. Design and Implementation of a Clamper-Based and Motor-Driven Capsule Robot Powered by Wireless Power Transmission. **IEEE ACCESS**, v. 7, p. 138151–138161, 2019.

GHAMSARI, B. G. et al. High-Temperature Superconducting Spiral Resonator for Metamaterial Applications. **IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY**, v. 23, n. 3, 1, jun. 2013.

HA-VAN, N.; SEO, C. **Butterfly-Shaped Transmitting Coil for Wireless Power Transfer System in Millimeter-Sized Biomedical Implants**. 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). **Anais...: IEEE Wireless Power Transfer Conference**.345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2018.

HAYT, W. H.; BUCK, J. A.; **Eletromagnetismo**. LTC, 6<sup>a</sup> Ed, 2003.

HU, A. P.; LIU, C.; LI, H. L. A novel contactless battery charging system for soccer playing robot. Proc. **15th IEEE Int. Conf. Mechatronics and Machine Vision in Practice**, Auckland, New Zealand, 2008.

HURLEY, W. G. Calculation of self and mutual impedances in planar magnetic structures. **IEEE Transactions on Magnetics**, 31, 1995.

IVAN, J. V. Nikola Tesla, the man time forgot. **IEEE POTENTIALS**, 9, pp. 53-54, 1990.

JABITA, A. A. **Design of singly split ring resonator for measurement of dielectric constant of materials using resonant method**. Gavle, Suecia: University of Gavle, 2013.

JIANG, L.; COSTINETT, D. A High-Efficiency GaN-Based Single-Stage 6.78 MHz Transmitter for Wireless Power Transfer Applications. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 34, n. 8, p. 7677–7692, 2019.

JUNG, P.; USTINOV, A. V; ANLAGE, S. M. Progress in Superconducting Metamaterials. **SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY**, v. 27, n. 7, jul. 2014.

KALRA, G. R. et al. A Novel Boost Active Bridge-Based Inductive Power Transfer System. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, v. 67, n. 2, p. 1103–1112, 2020.

KARALIS, A.; SOLJACIC, M. Efficient Wireless non-radiative mid-range energy transfer. **ANNALS OF PHYSICS**, 323, pp. 33-48, 2008.

KESLER, M. **Highly resonant Wireless Power Transfer: Safe, efficient, and over distance.** **WiTricity Corporation**, p. 13., 2017.

KIM, J.; BIEN, F.; Electric field coupling technique of Wireless. **IEEE 2013 TENCON**, p. 5, 2013.

KRAUS, J. D.; MARHEFKA, R. J. **Antennas for all applications.** [s.l: s.n.], 2019.

KRUPKA, J.; WOSIK, J.; JASTRZEBSKI, C.; CIUK, T.; MAZIERSKA, J.; ZDROJEK, M. Complex Conductivity of YBCO Films in Normal and Superconducting States Probed by Microwave Measurements. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol. 23, no. 2, pp. 1501011-1501011, April 2013.

KRIKIDIS, I. Average Age of Information in Wireless Powered Sensor Networks. **IEEE WIRELESS COMMUNICATIONS LETTERS**, v. 8, n. 2, p. 628–631, 2019.

KURS, A. et al. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. **SCIENCE**, v. 317, n. 5834, p. 83–86, jul. 2007.

KURTER, C.; ABRAHAMS, J.; ANLAGE, S. M. Miniaturized Superconducting Metamaterials for Radio Frequencies. **APPLIED PHYSICS LETTERS**, v. 96, n. 25, jun. 2010.

LADAN, S. et al. Highly Efficient Compact Rectenna for Wireless Energy Harvesting Application. **IEEE MICROWAVE MAGAZINE**, v. 14, n. 1, p. 117–122, 2013.

LAZARIDES, N.; TSIRONIS, G. P. Superconducting Metamaterials. **Physics Reports**, v. 752, p. 1–67, 2018.

LI, C.-Z. et al. **LaAlO<sub>3</sub> Single Crystal for Substrate of High Temperature Superconducting Thin Films.** 1990 IEEE 7th International Symposium on Applications of Ferroelectrics. **Anais...**, 1990.

LI, Y. et al. Efficiency Analysis and Optimization Control for Input-Parallel Output-Series Wireless Power Transfer Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 35, n. 1, p. 1074–1085, jan. 2020.

LI, S.; MI, C. C. Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications. **Journal of emerging and selected topics in power electronics**, p. 14, 2015.

LIPWORTH, G. S. **Metamaterial Designs for Applications in Wireless Power Transfer and Computational Imaging**. [s.l.] Duke University, 2015.

LIU, C.; HU, A. P.; NAIR, N. K. Modelling and analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system. **IET POWER ELECTRONICS**, vol. 4, no. 7, pp. 808-815, Aug. 2011.

LIU, D.; GEORGAKOPOULOS, S. V. Cylindrical Misalignment Insensitive Wireless Power Transfer Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 33, n. 11, p. 9331–9343, nov. 2018.

LIU, D.; HU, H.; GEORGAKOPOULOS, S. V. Misalignment Sensitivity of Strongly Coupled Wireless Power Transfer Systems. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 32, n. 7, p. 5509–5519, jul. 2017.

LIU, Z. et al. A Shape-Reconfigurable Modularized Wireless Power Transfer Array System for Multipurpose Wireless Charging Applications. **IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION**, v. 66, n. 8, p. 4252–4259, 2018.

LU, X. et al. Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications. **IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS**, v. 18, n. 2, p. 1413–1452, 2016.

LU, X. et al. Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey. **IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS**, v. 17, n. 2, p. 757–789, 2015.

LUO, B. et al. **Analysis and Design of Hybrid Inductive and Capacitive Wireless Power Transfer System**. THIRTY-FOURTH ANNUAL IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION (APEC 2019). **Anais...: Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2019.

LUO, B. et al. Analysis and Design of Hybrid Inductive and Capacitive Wireless Power Transfer for High-Power Applications. **IET POWER ELECTRONICS**, v. 11, n. 14, p. 2263–2270, 2018.

MARKETS; MARKETS. **Wireless Charging for Electric Vehicle Market by Power Supply (3–<11, 11–50, & >50 KW), Application (Home & Commercial), Distribution channel (Aftermarket & OE), Component, Charging System, Propulsion, Vehicle type, & Region - Global Forecast to 2027**. [s.l: s.n.]. Disponível

em: <<https://www.researchandmarkets.com/reports/4897397/wireless-charging-for-electric-vehicle-market-by>>, 2017.

MASHHADI, I. A. et al. A New Wireless Power-Transfer Circuit for Retinal Prosthesis. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 34, n. 7, p. 6425–6439, jul. 2019.

MINNAERT, B.; STEVENS, N. **Maximizing the Power Transfer for a Mixed Inductive and Capacitive Wireless Power Transfer System**. 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). **Anais...**, 2018.

MINNAERT, B.; STEVENS, N. **Design of a Capacitive Wireless Power Transfer Link with Minimal Receiver Circuitry**. 2018 IEEE PELS WORKSHOP ON EMERGING TECHNOLOGIES: WIRELESS POWER TRANSFER (WOW). **Anais...** 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2018.

MUR-MIRANDA, J. O. et al. **Wireless Power Transfer Using Weakly Coupled Magnetostatic Resonators**. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. **Anais...**2010.

NAIR, V. V.; CHOI, J. R. An efficiency enhancement technique for a Wireless Power Transmission system based on a multiple coil switching technique. **Energies**, p. 15, 2016.

NESTER, R. **Wireless Power Transmission Market: Global Demand Analysis & Opportunity Outlook 2024**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchnester.com/reports/wireless-power-transmission-market-global-demand-analysis-opportunity-outlook-2024/314>>, 2019.

PARDUE, C. A. et al. Reverse Power Delivery Network for Wireless Power Transfer. **IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS**, v. 28, n. 7, p. 624–626, jul. 2018.

PARKS, A. N. et al. **A Wireless Sensing Platform Utilizing Ambient RF Energy**. 2013 IEEE TOPICAL CONFERENCE ON BIOMEDICAL WIRELESS TECHNOLOGIES, NETWORKS, AND SENSING SYSTEMS (BIOWIRELESS). **Anais...**: IEEE Topical Conference on Biomedical Wireless Technologies Networks and Sensing Systems. 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2013.

PENDRY, J. B. **Metamaterials and the control of electromagnetic fields**. Conference on coherence and quantum optics. **Anais...**2007

PEREIRA, S. H.; FÉLIX, M. G. 100 anos de Supercondutividade e a Teoria de Ginzburg-Landau. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, p. 1313, 2013.

PINHEIRO, D. L. **Análise de desempenho de antenas microfita com substrato de Metamaterial**. Belo Horizonte, Brasil: PUC-Minas, 2016.

QUEIROZ, A. C. **Mutual inductance and inductance calculations by Maxwell's method**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003.

REN, J.C.; LI, J.T. **A capacitively coupled battery charging system**. Part 4 Project Report, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Auckland, New Zealand, vol. 1, 2006.

RESNICK, R.; EISBERG, R. Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. **Editora Campus**, p. 29, 1979.

SAMPLE, A. P. et al. Design of an RFID-Based Battery-Free, Programmable Sensing Platform. **IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**, v. 57, n. 11, p. 2608–2615, nov. 2008.

SHARMA, G.; GOEL, A.; AGARWAL, S. **Wireless Charging System Using Resonant Coupling**. PROCEEDINGS OF THE 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INVENTIVE SYSTEMS AND CONTROL (ICISC 2017). **Anais...345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE**, 2017.

SHAW, T.; MITRA, D. Wireless Power Transfer System Based on Magnetic Dipole Coupling With High Permittivity Metamaterials. **IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS**, v. 18, n. 9, p. 1823–1827, 2019.

SHINOHARA, N. The Wireless Power Transmission: Inductive Coupling, Radio Wave, and Resonance Coupling. **WILEY INTERDISCIPLINARY REVIEWS-ENERGY AND ENVIRONMENT**, v. 1, n. 3, p. 337–346, 2012.

SHINOHARA, N. Power WITOHut Wires. **IEEE MICROWAVE MAGAZINE**, v. 12, n. 7, S, p. S64–S73, 2011.

SI, P.; HU, A. P.; BUDGETT, D.; MALPAS, S.; YANG, J.; GAO, J. Stabilizing the operating frequency of a resonant converter for Wireless Power Transfer to implantable biomedical sensors. **1st International Conference on Sensing Technology**, p. 6, 2005..

SILVA, M. T. **Métodos de projeto para acoplamento indutivo aplicado a implantes biomédicos**. Belo Horizonte, Minas Gerais: UFMG, 2012.

SMITH, D. R., PADILLA, W. J. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. **Physical Reviewed Letters**, 2000.

SMITH, D., PENDRY, J. B.; Reversing light negative refraction. **Physics Today**, 57, pp. 37-45, 2009.

STEIN, A. L. F.; KYAW, P. A.; SULLIVAN, C. R. Wireless Power Transfer Utilizing a High-Q Self-Resonant Structure. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 34, n. 7, p. 6722–6735, jul. 2019.

SUDHAKARAN, S. **Negative Refraction from Electromagnetic Periodic Structures and its Applications**. [s.l.] Queen Mary, University of London, 2006.

TINKHAM, M. **Introduction to Superconductivity**. [s.l.] Courier Corporation, 2004.

TOYA, S.; KOKUGA, T. **Rechargeable Battery Pack and Charging Stand for Charging the Rechargeable Battery Pack by Electromagnetic Induction**. Google Patents, 2000.

UEI-MING, J; GHOVANLOO, M. Design and optimization of printed spiral coils for efficient transcutaneous inductive power transmission. **Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, 1, pp. 192-202, 2007.

VARSHNEY, L. R. **Transporting Information and Energy Simultaneously**. 2008 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INFORMATION THEORY PROCEEDINGS, VOLS 1-6. **Anais...**345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2008.

VISSER, H. J.; VULLERS, R. J. M. RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements. **PROCEEDINGS OF THE IEEE**, v. 101, n. 6, SI, p. 1410–1423, jun. 2013.

WANG, G. X. et al. Design and Analysis of an Adaptive Transcutaneous Power Telemetry for Biomedical Implants. **IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS I-REGULAR PAPERS**, v. 52, n. 10, p. 2109–2117, 2005.

WANG, X. et al. Experimental and Numerical Study of a Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System Using Superconductor and Ferromagnetic Metamaterials. **IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY**, v. 28, n. 5, 2018.

WANG, X. et al. Analysis of Wireless Power Transfer Using Superconducting Metamaterials. **IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY**, v. 29, n. 2, p. 1–2, mar. 2019.

WATTS, C. M.; XIANLIANG, L.; PADILLA, W. J. Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers. **Advanced Materials**, 24(23):OP98-OP120, JUN 19 2012.

WU, K.; CHOUDHURY, D.; MATSUMOTO, H. Wireless Power Transmission, Technology, and Applications. **Proceedings of the IEEE**, vol. 101, no. 6, pp. 1271-1275, June 2013.

ZENG, H.; YANG, S.; PENG, F. Z. Design Consideration and Comparison of Wireless Power Transfer via Harmonic Current for PHEV and EV Wireless Charging. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 32, n. 8, p. 5943–5952, 2017.

ZHANG, H. et al. Cooperative Integration of RF Energy Harvesting and Dedicated WPT for Wireless Sensor Networks. **IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS**, v. 29, n. 4, p. 291–293, 2019.

ZHANG, R.; HO, C. K. MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. **IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS**, v. 12, n. 5, p. 1989–2001, 2013.

ZHANG, Y. et al. Experiments on adjustable magnetic Metamaterials applied in megahertz wireless power transmission. **AIP ADVANCES**, v. 5, n. 1, jan. 2015.

ZHANG, Z.; ZHANG, B. Angular-Misalignment Insensitive Omnidirectional Wireless Power Transfer. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, v. 67, n. 4, p. 2755–2764, 2020.

ZHENG, H.; TNAY, K.; ALAMI, N.; HU, A. P. Contactless power couplers for respiratory devices. **Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications**, Qingdao, pp. 155-160, 2010.