

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Diego da Luz Pinheiro

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ANTENAS MICROFITA COM  
SUBSTRATO DE METAMATERIAL**

Belo Horizonte  
2016

Diego da Luz Pinheiro

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ANTENAS MICROFITAS COM  
SUBSTRATO DE METAMATERIAL**

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.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Mary de Souza Batalha

Belo Horizonte  
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

P654a Pinheiro, Diego da Luz  
Análise de desempenho de antenas microfita com substrato de metamaterial  
/ Diego da Luz Pinheiro. Belo Horizonte, 2016.  
85 f. : il.

Orientadora: Rose Mary de Souza Batalha  
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

1. Antenas (Eletrônica). 2. Simulação (Computadores). 3. Radiofrequência-  
Identificação. 4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Compatibilidade  
eletromagnética. I. Batalha, Rose Mary de Souza. II. Pontifícia Universidade  
Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.396.67

Ficha catalográfica elaborada por Fernanda Paim Brito - CRB 6/2999

Diego da Luz Pinheiro

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE ANTENAS MICROFITA COM  
SUBSTRATO DE METAMATERIAL**

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.

---

Profa. Dra. Rose Mary de Souza Batalha (Orientadora) - PUC Minas

---

Profa. Dra. Úrsula do Carmo Resende - CEFET-MG

---

Prof. Dr. Carlos Augusto Paiva da Silva Martins - PUC Minas

---

Prof. Dr. Gustavo Luís Soares (Suplente) - PUC Minas

Belo Horizonte, 29 de Março de 2016

*A minha família.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, me dando saúde e força para superar as dificuldades.

À minha orientadora, Profa. Dra. Rose Mary de Souza Batalha, pela orientação, apoio, confiança e oportunidade na elaboração deste trabalho.

Aos meus pais e meu irmão, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelos exemplos de dedicação e apoio.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Minas pelo ambiente amigável e aprendizado.

À CAPES e a FAPEMIG pelo incentivo financeiro.

*Não precisamos de mais dinheiro, não precisamos de mais sucesso ou fama, não precisamos do corpo perfeito, nem mesmo do parceiro perfeito, agora mesmo, neste momento exato, dispomos da mente, que é todo o equipamento básico de que precisamos para alcançar a plena felicidade.*  
(Dalai Lama)

## RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre antenas do tipo *patch* microfita, metamateriais e a aplicação de metamateriais em antenas. A realização desse estudo permitiu a esta pesquisa propor um novo modelo de antena microfita com substrato de metamaterial. A antena foi projetada com dois substratos de diferentes configurações de metamateriais para avaliar seus parâmetros de desempenho, como perda por reflexão, eficiência e ganho. A investigação dos arranjos de metamateriais abordou duas estruturas diferentes a serem aplicadas em antenas, quais sejam: os anéis complementares fendidos ressonadores e os dipolos cruzados. Essas duas diferentes estruturas são posicionadas concentricamente e dimensionadas de acordo com o tamanho e frequência de operação da antena. Cada arranjo dessas estruturas compõe uma camada de substrato da antena. A antena projetada nesta pesquisa foi simulada pelo software CST<sup>®</sup> e seu desempenho foi avaliado. Os resultados computacionais obtidos mostraram-se superiores aos de uma antena *patch* convencional, com relação às perdas por reflexão, eficiência e ganho. Também foi construído um protótipo artesanal da antena projetada. Os resultados experimentais confirmam os de simulação, tendo-se obtido boa concordância entre eles, principalmente com relação às perdas de retorno. Ressalta-se que a antena projetada apresentou maiores ganhos e maior diretividade, podendo ainda operar em três frequências de ressonância.

Palavras-chave: Antena Patch Microfita, Metamaterial, Parâmetro S11, Ganho, Dipolos Cruzados, CSR.

## ABSTRACT

In this dissertation it was developed a study on microstrip patch antennas, metamaterials and application of metamaterials in antennas. The antenna is designed with two substrates of different metamaterials configurations in order to assess performance parameters, such as return loss, efficiency and gain. The investigation of metamaterials arrays addressed two different elements to be applied to antennas, which are: the complementary split ring resonator and the crossed dipole. These two different structures are positioned concentrically and dimensioned according to the size of the antenna operating frequency. Each array of these structures comprises a substrate layer of the antenna. Each array of these structures comprises a substrate layer of the antenna. The antenna designed in this research was simulated via CST<sup>®</sup> software and its performance was evaluated. The computational results obtained showed superior performance than that of a conventional patch antenna, regarding the return loss, efficiency and gain. Also it was built a handcrafted prototype of the designed antenna. The experimental results confirm the simulations, with a good agreement between them, particularly with respect to the return loss. It is noteworthy that the proposed antenna showed higher gains and higher directivity, with three different operating resonant frequencies.

Keywords: Antenna Patch Microstrip, Metamaterial, Parameter S11, Gain, Crossed Dipole, CSRR.



FIGURA 27 – Diagrama de radiação da antena proposta $f=2,24$ GHz . . . . .	61
FIGURA 28 – Diagrama de radiação da antena proposta $f=2,45$ GHz . . . . .	61
FIGURA 31 – Diagrama de radiação da antena proposta $f=12$ GHz . . . . .	61
FIGURA 29 – Diagrama de radiação da antena proposta $f=5,12$ GHz . . . . .	62
FIGURA 30 – Diagrama de radiação da antena proposta $f=6,89$ GHz . . . . .	62
FIGURA 32 – Parâmetro S11 da antena proposta com células de 3 cm . . . . .	64
FIGURA 33 – Diagrama de eficiências da antena com células MTM de 3 cm . . . . .	64
FIGURA 34 – Diagrama de radiação da antena com células MTM de 3 cm . . . . .	64
FIGURA 35 – Parâmetros S11 da antena com 24 células . . . . .	65
FIGURA 36 – Diagrama de eficiências da antena com 24 células . . . . .	66
FIGURA 37 – Diagrama de radiação da antena com 24 células $f= 2,86$ GHz . . . . .	66
FIGURA 38 – Parâmetros S11 antena proposta com substrato de Arlon AR . . . . .	67
FIGURA 39 – Eficiência da antena com substrato de Arlon AR . . . . .	68
FIGURA 40 – Radiação da antena com substrato de Arlon AR em $f=5,6$ GHz . . . . .	68
FIGURA 41 – Radiação da antena com substrato de Arlon AR em $f=7,7$ GHz . . . . .	69
FIGURA 42 – Parâmetros S11 da antena com substrato de Teflon . . . . .	69
FIGURA 43 – Eficiências da antena com substrato de Teflon . . . . .	70
FIGURA 44 – Diagrama de radiação com substrato de Teflon $f=3,2$ GHz . . . . .	70
FIGURA 45 – Diagrama de radiação com substrato de Teflon $f=5,3$ GHz . . . . .	71
FIGURA 46 – Diagrama de radiação com substrato de Teflon $f=6,8$ GHz . . . . .	71
FIGURA 47 – Vista das faces da antena . . . . .	72
FIGURA 48 – Posicionamento das antenas . . . . .	72
FIGURA 49 – Medição dos parâmetros S11 da antena proposta . . . . .	73
FIGURA 50 – Carta de Smith da medição . . . . .	73

## LISTA DE SIGLAS

- CSRR – Anéis fendidos ressonadores complementares  
CST – *Computer Simulation Technology* - Tecnologia de Simulação Computacional  
DPS – Duplo Positivo  
DNG – Duplo Negativo  
ENG – Épsilon-Negativo  
IR – Infravermelho  
MNG – Mi-Negativo  
CSRR – Índice de Refração Negativo  
FDTD – *Finite Difference Time Domain* - Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo  
FEM – Método dos Elementos Finitos  
MoM – Método dos Momentos  
TEM – Transverso Eletromagnético  
FSS – Superfície Seletiva de Frequência  
**E** – Vetor intensidade de campo elétrico ( $V/m$ )  
**H** – Vetor intensidade de campo magnético ( $A/m$ )  
 $f$  – frequência ( $Hz$ )  
**J** – densidade de corrente ( $A/m^2$ )  
 $k$  – número de onda  
 $R$  – resistência ( $\Omega$ )  
 $S$  – parâmetro de espalhamento  
 $t$  – tempo ( $s$ )  
 $Z$  – impedância ( $\Omega$ )  
 $Z_0$  – impedância intrínseca ( $\Omega$ )  
 $\Gamma$  – coeficiente de reflexão  
 $\lambda$  – comprimento de onda  
 $\mu$  – permeabilidade magnética  
 $\omega$  – frequência angular  
 $\sigma$  – condutividade  
 $\varepsilon$  – permissividade elétrica  
 $\nabla^2$  – operador laplaciano  
 $\nabla \times$  – operador rotacional

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos	15
1.3 Revisão Bibliográfica	15
1.4 Organização dos capítulos	19
<b>2 ANTENAS</b>	<b>21</b>
2.1 Aspectos construtivos	21
2.2 Métodos de alimentação	23
2.3 Parâmetros de antenas	25
2.3.1 <i>Perda de retorno</i>	26
2.3.2 <i>Diretividade</i>	29
2.3.3 <i>Eficiência</i>	30
2.3.4 <i>Ganho</i>	31
2.3.5 <i>Largura de Banda (BW)</i>	32
2.3.6 <i>Impedâncias via Carta de Smith</i>	33
<b>3 METAMATERIAIS</b>	<b>35</b>
3.1 Definição de metamaterial	35
3.2 Histórico	37
3.3 Características dos metamateriais	38
3.3.1 <i>Permissividade Elétrica Negativa</i>	39
3.3.2 <i>Permeabilidade Magnética Negativa</i>	41
3.3.3 <i>Índice de Refração Negativo</i>	43
3.3.4 <i>Superfície Seletiva de Frequência</i>	47
3.4 Circuito Equivalente dos Metamateriais	50
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>55</b>
4.1 Antena <i>patch</i> convencional	55
4.2 Antena <i>patch</i> de metamaterial proposta	57
4.3 Solução do circuito equivalente dos metamateriais	59
4.4 Resultados computacionais da antena proposta	59
4.5 Resultados da variação dimensional e do substrato dielétrico do metamaterial	62
4.5.1 <i>Variação da dimensão do metamaterial</i>	63
4.5.1.1 Metamaterial com células de 3 cm	63
4.5.1.2 Metamaterial com células de 1,5 cm	65
4.5.2 <i>Variação do dielétrico do metamaterial</i>	66
4.5.2.1 Antena com substrato de Arlon (AR)	67
4.5.2.2 Antena com substrato de Teflon	69
4.6 Resultados das medições da antena proposta	71
4.7 Análises	74

<b>5 CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>77</b>
<b>5.1 Contribuição do trabalho</b> . . . . .	<b>77</b>
<b>5.2 Trabalhos futuros</b> . . . . .	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>81</b>