



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE  
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

**JOSÉ DE ARIMATEIA PINTO MAGNO**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE ESTRUTURAS  
METASSUPERFÍCIE EM ANTENAS DE MICROFITA**

**MOSSORÓ – RN**

**2016**

**JOSÉ DE ARIMATEIA PINTO MAGNO**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE ESTRUTURAS  
METASSUPERFÍCIE EM ANTENAS DE MICROFITA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

Orientador: Prof. D. Sc. Humberto Dionísio de Andrade – UFERSA

Co-orientador: D. Sc. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA

**MOSSORÓ – RN**

**2016**

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M198a Pinto Magno, José de Arimateia.  
ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE ESTRUTURAS  
METASSUPERFÍCIE EM ANTENAS DE MICROFITA / José de  
Arimateia Pinto Magno. - 2016.  
188 f. : il.

Orientador: Humberto Dionísio de Andrade.  
Coorientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Sistemas de Comunicação e Automação, 2016.

1. Antenas de microfita. 2. Estruturas  
Metassuperfície. 3. Estruturas SRR.. I. de Andrade,  
Humberto Dionísio , orient. II. Queiroz Júnior ,  
Idalmir de Souza , co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

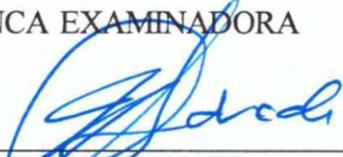
**JOSÉ DE ARIMATEIA PINTO MAGNO**

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE ESTRUTURAS  
METASSUPERFÍCIE EM ANTENAS DE MICROFITA**

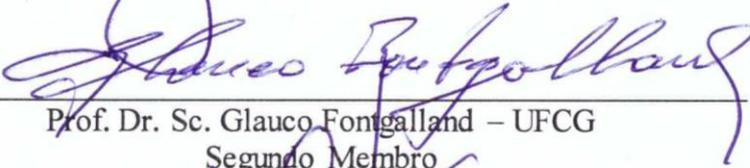
Dissertação de mestrado acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Comunicação e Automação.

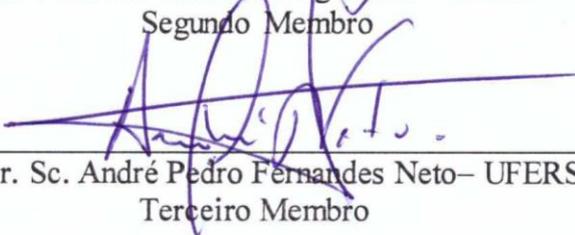
APROVADA EM: 01 / 12 / 2016

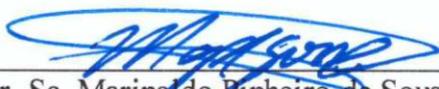
BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. Humberto Dionísio de Andrade – UFERSA  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. Idalmir de Souza Queiroz Júnior – UFERSA  
Primeiro Membro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. Glauco Fontgalland – UFCG  
Segundo Membro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. André Pedro Fernandes Neto – UFERSA  
Terceiro Membro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sc. Marinaldo Pinheiro de Sousa Neto – IFRN  
Quarto Membro

## DEDICATÓRIA

A todos os meus familiares, que o grau adquirido com esse trabalho os inspirem a serem mais audaciosos.

## **AGRADECIMENTOS**

Devo agradecer primeiramente a meus orientadores Prof. Humberto Dionísio e Prof. Idalmir de Souza, dois dos mais generosos e inspiradores seres humanos que conheço, a quem sou grato por todo tempo e disposição gastos para me tornar um profissional preparado.

A minha mãe Laura pelo esforço em me manter nos estudos. A Elaine Christine minha prima que me acompanha a um longo tempo.

Meus amigos Samanta Holanda, Flávia Elionara, Anamaria Sena, Diêgo Pires, Alexandre Henrique, Allison Cristian, Allyson Arilson, Cássio Falcão, Daniel Carlos, Felipe Bezerra, Isaú Macêdo, Jonas Rodrigo, Juan Rafael e Manassés Medeiros. Muito obrigado por participarem da melhor experiência da minha vida.

## RESUMO

A complexidade dos sistemas de comunicação impulsionam as pesquisas por novos tipos de antenas mais baratas e eficientes. Antenas de microfita são estruturas planares que podem ser utilizadas em vários tipos de aplicações devido as suas características peculiares. Existem na literatura várias técnicas para melhorar o rendimento dessas antenas, dentre elas se destaca o uso das Metassuperfícies. O princípio de funcionamento dessas estruturas é similar ao de um metamaterial, baseiam-se nas propriedades constitutivas, permissividade e permeabilidade, que não são encontrados em materiais na natureza, resultando em um índice de refração negativo. O presente trabalho tem por objetivo analisar a aplicação de estruturas Metassuperfície em antenas planares na faixa de micro-ondas, nas frequências de 1 a 10 GHz que compreendem as bandas L, S, C e parte da banda X, mediante a aplicação das estruturas SRR do tipo retangular e circular no *patch* e no plano de terra das antenas, as estruturas foram divididas nos tamanhos  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ . As antenas foram primeiramente analisadas por meio de simulação com o software comercial HFSS<sup>®</sup>, com os resultados simulados foram selecionadas quatro antenas para fabricação, das quais os resultados medidos dos parâmetros foram obtidos em um analisador de redes vetoriais, a saber: perda de retorno, ganho e casamento de impedância. Os resultados das antenas fabricadas apresentaram concordância com as simulações.

*Palavras-Chave:* Antenas de microfita, Estruturas Metassuperfície, Estruturas SRR.

## ABSTRACT

The complexity of communication systems drives researches into new types of cheaper and more efficient antennas. Microstrip antennas are planar structures that can be used in various types of applications due to their peculiar characteristics. There are several techniques in the literature to improve the performance of these antennas, among them the use of metasurfaces. The working principle of these structures is similar to a metamaterial, based on constitutive properties, permittiveness and permeability, which are not found in materials in nature, resulting in a negative refractive index. The present work has the objective of analyzing the application of metasurfaces in planar antennas in the range of microwaves, in the frequencies of 1 to 10 GHz that comprise the bands L, S, C and part of band X, through the application of rectangular and circular SRR structures in the patch and ground plane of the antennas. The structures were divided into sizes  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  and  $\lambda/20$ . The antennas were first analyzed by means of simulation with the commercial software HFSS®, with the simulated results were selected four antennas for manufacturing, of which the measured results of the parameters were obtained in a vector network analyzer, namely: loss of return, Gain and impedance matching. The results of the antennas manufactured were in agreement with the simulations.

*Keywords:* microstrip antennas, Metasurface structures, SRR structures.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais dielétricos comerciais mais utilizados.....	36
Tabela 2: Materiais utilizados na fabricação das antenas.....	62
Tabela 3: Dimensões das antenas projetadas em (mm).....	63
Tabela 4: Dimensões utilizadas nas células do tipo retangular (mm). ....	64
Tabela 5: Dimensões utilizadas nas células do tipo circular (mm). ....	65
Tabela 6: Parâmetros das antenas padrão.....	74
Tabela 7: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT5880 com aplicação de MS no patch $\lambda/10$ .....	76
Tabela 8: Frequência de ressonância e largura de banda para antena FR4 com aplicação de MS no patch $\lambda/10$ .....	77
Tabela 9: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT6010 com aplicação de MS no patch $\lambda/10$ .....	79
Tabela 10: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT5880 com aplicação de MS no patch $\lambda/15$ .....	81
Tabela 11: Frequência de ressonância e largura de banda para antena FR4 com aplicação de MS no patch $\lambda/15$ .....	82
Tabela 12: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT6010 com aplicação de MS no patch $\lambda/15$ .....	84
Tabela 13: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT5880 com aplicação de MS no patch $\lambda/20$ .....	86
Tabela 14: Frequência de ressonância e largura de banda para antena FR4 com aplicação de MS no patch $\lambda/20$ .....	87
Tabela 15: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT6010 com aplicação de MS no <i>patch</i> $\lambda/20$ .....	89
Tabela 16: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no patch com periodicidade $\lambda/10$ .....	91
Tabela 17: Frequência de ressonância e largura de banda de antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no patch com periodicidade $\lambda/10$ .....	92
Tabela 18: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no <i>patch</i> com periodicidade $\lambda/10$ .....	94

Tabela 19: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no patch com periodicidade $\lambda/15$ .	96
Tabela 20: Frequência de ressonância e largura de banda de antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no patch com periodicidade $\lambda/15$ .	97
Tabela 21: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no patch com periodicidade $\lambda/15$ .	99
Tabela 22: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no patch com periodicidade $\lambda/20$ .	101
Tabela 23: Frequência de ressonância e largura de banda de antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no patch com periodicidade $\lambda/20$ .	102
Tabela 24: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no patch com periodicidade $\lambda/20$ .	104
Tabela 25: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/10$ .	106
Tabela 26: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/10$ .	107
Tabela 27: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/10$ .	109
Tabela 28: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/15$ .	111
Tabela 29: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/15$ .	112
Tabela 30: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/15$ .	114
Tabela 31: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/20$ arranjo 3x3.	116
Tabela 32: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/20$ arranjo 3x3.	117
Tabela 33: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/20$ arranjo 3x3.	119
Tabela 34: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/20$ arranjo 4x4.	121
Tabela 35: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/20$ arranjo 4x4.	122

Tabela 36: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra $\lambda/20$ arranjo 4x4. ....	124
Tabela 37: Variação do comprimento de onda nos valores de $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ para as antenas RT5880 com célula retangular. ....	126
Tabela 38: Variação do comprimento de onda nos valores de $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ para as antenas RT5880 com célula circular. ....	128
Tabela 39: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com periodicidade no patch retangular para variação de $\lambda$ . ....	130
Tabela 40: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com periodicidade no patch circular para variação de $\lambda$ . ....	132
Tabela 41: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com célula retangular no plano de terra para variação de $\lambda$ . ....	134
Tabela 42: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com célula circular no plano de terra para variação de $\lambda$ . ....	136
Tabela 43: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula retangular de $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ . ....	138
Tabela 44: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula circular de $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ . ....	140
Tabela 45: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com periodicidade no patch retangular para variação de $\lambda$ . ....	142
Tabela 46: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com periodicidade no patch circular para variação de $\lambda$ . ....	144
Tabela 47: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula retangular no plano de terra para variação de $\lambda$ . ....	146
Tabela 48: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula circular no plano de terra para variação de $\lambda$ . ....	148
Tabela 49: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula retangular de $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ . ....	150
Tabela 50: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula circular de $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ . ....	152
Tabela 51: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com periodicidade no patch retangular para variação de $\lambda$ . ....	154
Tabela 52: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com periodicidade no <i>patch</i> circular para variação de $\lambda$ . ....	156

Tabela 53: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula retangular no plano de terra para variação de $\lambda$ .....	158
Tabela 54: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula circular no plano de terra para variação de $\lambda$ .....	160
Tabela 55: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com célula retangular no plano de terra para diferentes arranjos. ....	162
Tabela 56: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com célula circular no plano de terra para diferentes arranjos. ....	164
Tabela 57: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula retangular no plano de terra para diferentes arranjos.....	166
Tabela 58: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula circular no plano de terra para diferentes arranjos.....	167
Tabela 59: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula retangular no plano de terra para diferentes arranjos. ....	169
Tabela 60: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula circular no plano de terra para diferentes arranjos. ....	171
Tabela 61: Frequência de ressonância, perda de retorno e largura de banda para as antenas fabricadas.....	178
Tabela 62: Impedâncias obtidas nas Cartas de Smith. ....	181

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: a) Diagrama de irradiação linear bidimensional, b) Diagrama de irradiação polar tridimensional.....	24
Figura 2: Diagrama de potência em duas dimensões. ....	25
Figura 3: Curva de perda de retorno com as frequências de corte superior ( $f_{sup}$ ), inferior ( $f_{inf}$ ) e de ressonância ( $f_r$ ).....	31
Figura 4: Modelo de quadripolo.....	32
Figura 5: Antena de microfita com patch retangular.....	35
Figura 6: Exemplos de geometrias usadas nos patches das antenas de microfita. ....	36
Figura 7: Linha de microfita.....	37
Figura 8: Alimentação por cabo coaxial: a) Vista lateral, b) Vista superior. ....	38
Figura 9: Alimentação por acoplamento de abertura. ....	38
Figura 10: Alimentação de microfita através de acoplamento por proximidade.....	39
Figura 11: Esquemas elétricos equivalentes: a) Linha de microfita, b) Sonda coaxial, c) Acoplamento por abertura, d) Acoplamento por proximidade.....	39
Figura 12: a) Linha de microfita isométrica, b) Vista frontal das linhas de campo. ....	41
Figura 13: Modelo da cavidade ressonante. ....	42
Figura 14: Comportamento das cargas na antena.....	42
Figura 15: Propagação em um meio com índice de refração positivo (RHM) e com índice negativo (LHM).....	48
Figura 16: (a) Propagação da onda eletromagnética em um material da mão direita. (b) propagação da onda em um material da mão esquerda. ....	48
Figura 17: Representação do produto vetorial entre o campo elétrico.....	49
Figura 18: Representação do produto vetorial entre o campo elétrico, campo magnético e vetor de onda. ....	50
Figura 19: Arranjo de fios condutores dispostos de forma a produzir um meio com permissividade negativa. ....	51
Figura 20: Diagrama de dispersão. A linha contínua é a dispersão da luz no espaço livre; o tracejado em xis é a parte imaginária e o tracejado em ponto é a parte real. ....	53
Figura 21: Ressorador em forma de anel (SRR).....	54
Figura 22: Incidência de ondas planas na fronteira entre dois meios.....	58
Figura 23: Refração negativa em dois meios diferentes.....	60

Figura 24: Classificação dos parâmetros dos meios eletromagnéticos possíveis.....	61
Figura 25: Antena padrão simulada.....	63
Figura 26: Estruturas Metassuperfície a) retangular, b) circular.....	64
Figura 27: Células Metassuperfície espaçadas $\lambda/20$ .....	65
Figura 28: Metassuperfície desenvolvido para a antena FR4 com comprimento $\lambda/10$ a) retangular, b) circular.....	66
Figura 29: Metassuperfície desenvolvida para a antena RT5880 com comprimento $\lambda/20$ a) retangular, b) circular.....	67
Figura 30: Antenas simuladas com RT6010 e célula de comprimento $\lambda/10$ a) retangular, b) circular.....	68
Figura 31: Arranjo Metassuperfície a) 3x3 elementos, b) 4x4 elementos. ....	68
Figura 32: Antena RT6010 com Metassuperfície a) Retangular, b) Circular. ....	69
Figura 33: Impressora Mimaki. ....	70
Figura 34: Impressão final do arranjo 3x3. ....	70
Figura 35: Processo de corrosão da placa FR4.....	71
Figura 36: Antena FR4 antes da segunda corrosão.....	71
Figura 37: Conector SMA. ....	72
Figura 38: a) Antena FR4 com 3x3 elementos, b) Antena FR4 com 4x4 elementos. ....	72
Figura 39: Fluxograma do processo de fabricação das antenas. ....	73
Figura 40: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/10$ para as geometrias (retangular e circular).....	75
Figura 41: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .....	76
Figura 42: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .....	76
Figura 43: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/10$ para as geometrias (retangular e circular). ....	77
Figura 44: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ . ....	78
Figura 45: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ . ....	78
Figura 46: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/10$ .....	79
Figura 47: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .....	79

Figura 48: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .....	80
Figura 49: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/15$ .....	80
Figura 50: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .....	81
Figura 51: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .....	81
Figura 52: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/15$ . ....	82
Figura 53: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ . ....	83
Figura 54: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ . ....	83
Figura 55: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/15$ .....	83
Figura 56: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .....	84
Figura 57: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .....	85
Figura 58: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/20$ .....	85
Figura 59: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .....	86
Figura 60: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .....	86
Figura 61: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/20$ . ....	87
Figura 62: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ . ....	88
Figura 63: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ . ....	88
Figura 64: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no patch e comprimento de onda $\lambda/20$ .....	88
Figura 65: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .....	89

Figura 66: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .....	90
Figura 67: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/10$ .....	90
Figura 68: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .....	91
Figura 69: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .....	91
Figura 70: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/10$ .....	92
Figura 71: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .....	93
Figura 72: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .....	93
Figura 73: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/10$ .....	94
Figura 74: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .....	94
Figura 75: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .....	95
Figura 76: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/15$ .....	95
Figura 77: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .....	96
Figura 78: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .....	96
Figura 79: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/15$ .....	97
Figura 80: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .....	98
Figura 81: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .....	98
Figura 82: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/15$ .....	99

Figura 83: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .....	99
Figura 84: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .....	100
Figura 85: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/20$ .....	100
Figura 86: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .....	101
Figura 87: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .....	101
Figura 88: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/20$ .....	102
Figura 89: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .....	103
Figura 90: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .....	103
Figura 91: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no patch com periodicidade e comprimento de onda $\lambda/20$ .....	104
Figura 92: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .....	104
Figura 93: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .....	105
Figura 94: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/10$ .....	105
Figura 95: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	106
Figura 96: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	106
Figura 97: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/10$ .....	107
Figura 98: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	108
Figura 99: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	108
Figura 100: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/10$ .....	109
Figura 101: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	109
Figura 102: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	110

Figura 103: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/15$ .	110
Figura 104: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .	111
Figura 105: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .	111
Figura 106: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/15$ .	112
Figura 107: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .	113
Figura 108: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .	113
Figura 109: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/15$ .	114
Figura 110: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .	114
Figura 111: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .	115
Figura 112: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/20$ .	115
Figura 113: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	116
Figura 114: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	116
Figura 115: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/20$ .	117
Figura 116: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	118
Figura 117: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	118
Figura 118: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/20$ .	119
Figura 119: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	119
Figura 120: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	120
Figura 121: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 4x4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/20$ .	120
Figura 122: Antena RT5880 retangular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	121
Figura 123: Antena RT5880 circular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	121
Figura 124: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 4x4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/20$ .	122
Figura 125: Antena FR4 retangular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	123
Figura 126: Antena FR4 circular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	123
Figura 127: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 4x4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda $\lambda/20$ .	124

Figura 128: Antena RT6010 retangular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	124
Figura 129: Antena RT6010 circular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	125
Figura 130: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular no patch de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	125
Figura 131: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .	126
Figura 132: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .	127
Figura 133: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .	127
Figura 134: Antena RT5880 com Metassuperfície circular no patch de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	128
Figura 135: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .	128
Figura 136: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .	129
Figura 137: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .	129
Figura 138: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular no (patch periódico) de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	130
Figura 139: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .	130
Figura 140: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .	131
Figura 141: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .	131
Figura 142: Antena RT5880 com Metassuperfície circular no (patch periódico) de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	132
Figura 143: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .	132
Figura 144: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .	133
Figura 145: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .	133

Figura 146: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular no (plano de terra) de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .....	134
Figura 147: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	134
Figura 148: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .....	135
Figura 149: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .....	135
Figura 150: Antena RT5880 com Metassuperfície circular no (plano de terra) de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .....	136
Figura 151: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	136
Figura 152: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .....	137
Figura 153: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .....	137
Figura 154: Antena FR4 com Metassuperfície retangular no patch de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .....	138
Figura 155: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .....	138
Figura 156: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .....	139
Figura 157: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .....	139
Figura 158: Antena FR4 com Metassuperfície circular no patch de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ . .....	140
Figura 159: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ . .....	140
Figura 160: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ . .....	141
Figura 161: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ . .....	141
Figura 162: Antena FR4 com Metassuperfície retangular no (patch periódico) de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .....	142
Figura 163: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ . ....	142
Figura 164: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ . ....	143
Figura 165: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ . ....	143

Figura 166: Antena FR4 com Metassuperfície circular no (patch periódico) de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	144
Figura 167: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .	144
Figura 168: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .	145
Figura 169: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .	145
Figura 170: Antena FR4 com Metassuperfície retangular no plano de terra de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	146
Figura 171: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .	146
Figura 172: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .	147
Figura 173: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	147
Figura 174: Antena FR4 com Metassuperfície circular no plano de terra de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	148
Figura 175: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .	148
Figura 176: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .	149
Figura 177: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .	149
Figura 178: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular no patch de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	150
Figura 179: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .	150
Figura 180: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .	151
Figura 181: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .	151
Figura 182: Antena RT6010 com Metassuperfície circular no patch de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .	152
Figura 183: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/10$ .	152
Figura 184: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/15$ .	153
Figura 185: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com tamanho $\lambda/20$ .	153

Figura 186: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular no (patch periódico) de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .....	154
Figura 187: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .....	154
Figura 188: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .....	155
Figura 189: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .....	155
Figura 190: Antena RT6010 com Metassuperfície circular no (patch periódico) de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .....	156
Figura 191: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/10$ .....	156
Figura 192: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/15$ .....	157
Figura 193: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no patch com periodicidade e tamanho $\lambda/20$ .....	157
Figura 194: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular no plano de terra de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .....	158
Figura 195: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	158
Figura 196: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .....	159
Figura 197: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .....	159
Figura 198: Antena RT6010 com Metassuperfície circular no plano de terra de tamanho $\lambda/10$ , $\lambda/15$ e $\lambda/20$ .....	160
Figura 199: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/10$ .....	160
Figura 200: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/15$ .....	161
Figura 201: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .....	161
Figura 202: Perda de retorno para antena RT5880, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos retangular.....	162
Figura 203: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .....	163
Figura 204: Antena RT5880 retangular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ .....	163
Figura 205: Perda de retorno para antena RT5880, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos circular.....	164
Figura 206: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ .....	164
Figura 207: Antena RT5880 circular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ .....	165

Figura 208: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos retangular.....	165
Figura 209: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ . .....	166
Figura 210: Antena FR4 retangular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ . .....	166
Figura 211: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos circular. ....	167
Figura 212: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ . .....	168
Figura 213: Antena FR4 circular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ . .....	168
Figura 214: Perda de retorno para antena RT6010, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos retangular.....	169
Figura 215: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ . .....	169
Figura 216: Antena RT6010 retangular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ . .....	170
Figura 217: Perda de retorno para antena RT6010, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos Circular.....	170
Figura 218: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho $\lambda/20$ . .....	171
Figura 219: Antena RT6010 circular com 4x4 elementos de tamanho $\lambda/20$ . .....	171
Figura 220: Analisador de redes vetoriais.....	172
Figura 221: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 3x3 circular simulado e medido. ....	173
Figura 222: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 4x4 circular simulado e medido. ....	173
Figura 223: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 3x3 retangular simulado e medido. ....	174
Figura 224: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 4x4 retangular simulado e medido. ....	175
Figura 225: Antenas com arranjos circulares com 3x3 e 4x4 elementos. ....	176
Figura 226: Antenas com arranjos 3x3 circular e retangular. ....	176
Figura 227: Antenas com arranjos 3x3 e 4x4 retangulares. ....	177
Figura 228: Antenas com 4x4 elementos retangular e circular.....	178
Figura 229: Carta de Smith para antena fabricada com arranjo 4x4 retangular.....	179
Figura 230: Carta de Smith para antena fabricada com arranjo 3x3 retangular.....	179
Figura 231: Carta de Smith para antena fabricada com arranjo 4x4 circular.....	180
Figura 232: Carta de Smith para antena fabricada com arranjo 3x3 circular.....	180

## NOMENCLATURA

### *Letras Latinas*

$P_{\text{rad}\theta}$  - potência radiada em todas as direções, contida na componente  $\theta$  de campo.

$P_{\text{rad}\phi}$  - potência radiada em todas as direções, contida na componente  $\phi$  de campo.

$a_1$  - tensão aplicada pelas ondas incidentes.

$b_1$  - tensão aplicada pelas ondas refletidas.

$D_0$  - diretividade máxima.

$\text{dB}_d$  - ganho referente ao dipolo.

$\text{dB}_i$  - ganho referente ao radiador isotrópico.

$\vec{E}$  - campo elétrico.

$E_{i1}$  - tensão das ondas incidentes.

$E_{r1}$  - tensão das ondas refletidas.

$E_x$  - campos elétricos na direção x.

$f_{\text{inf}}$  - frequência inferior.

$f_{\text{PBG}}$  - frequência da banda proibida.

$f_r$  - frequência de ressonância.

$f_{\text{sup}}$  - frequência Superior.

$\vec{H}$  - intensidade de campo magnético.

$H_x$  - campos magnéticos na direção x.

$I_1$  - corrente eficaz total nos terminais do quadripolo.

$k_0$  - constante de propagação.

$K_x$  - número de ondas ao longo da direção x.

$L_m$  - comprimento da linha de microfita.

$m_{\text{ef}}$  - massa efetiva pela.

$n_{\text{ef}}$  - densidade efetiva de elétrons.

$P_{\text{in}}$  - potência entregue por uma fonte isotrópica.

$P_{\text{rad}}$  - Potência radiada total.

$\vec{S}$  - vetor de Poynting.

$S_{11}$  - coeficiente de reflexão da tensão no acesso 1 do quadripolo.

$S_{12}$  - isolamento do quadripolo.

$S_{21}$  - ganho de tensão direta do quadripolo.

$S_{22}$  - coeficiente de reflexão da tensão no acesso 2 do quadripolo.

$S_{max}$  - potência Máxima.

$S_{med}$  - potência Média.

$U_0$  - intensidade média de irradiação.

$U_{max}$  - intensidade máxima de irradiação.

$V_1$  - tensão eficaz total nos terminais do quadripolo.

$W_0$  - largura da linha de microfita.

$y_0$  - largura do inset feed.

$Z_0$  - impedância característica.

$Z_c$  - impedância da carga.

$Z_{in}$  - impedância de entrada da antena.

$D_0$  - diretividade máxima.

$P_{rad}$  - potência radiada total (W).

$U_0$  - intensidade de irradiação de uma fonte isotrópica (W/ ângulo sólido).

$U_{max}$  - máxima intensidade de irradiação (W/ ângulo sólido).

$U_\theta$  - intensidade de irradiação, em uma dada direção, contida na componente  $\theta$  de campo.

$U_\phi$  - intensidade de irradiação, em uma dada direção, contida na componente  $\phi$  de campo.

$e_0$  - eficiência total.

$e_c$  - eficiência de condução.

$e_{cd}$  - eficiência de irradiação da antena.

$e_d$  - eficiência dielétrica.

$e_r$  - eficiência de reflexão.

$a$  - periodicidade em x.

$c$  - velocidade da onda no espaço livre.

$D$  - diretividade.

$D$  - diretividade.

$d$  - espaço radial entre os anéis concêntricos.

$G$  - ganho.

$h$  - espessura do substrato.

$I$  - corrente de alimentação.

$k$  - número de onda.

$L$  - comprimento do patch.

$l$  - microfita comprimento da linha de microfita.  
 $n$  - índice de refração.  
 $P$  - período espacial do eixo ordenado  $y$ .  
 $r$  - raio interno do anel.  
 $R$  - resistividade.  
 $U$  - intensidade de irradiação ( $W/\text{ângulo sólido}$ ).  
 $V$  - tensão de alimentação.  
 $W$  - largura do patch.  
 $y$  - comprimento do inset feed.

### **Letras Gregas**

$\theta$  - ângulo.  
 $\Gamma$  - coeficiente de reflexão.  
 $\sigma$  - condutividade do material.  
 $\mu$  - permeabilidade magnética.  
 $\eta_0$  - eficiência total.  
 $\mu_0$  - permeabilidade magnética no vácuo.  
 $\eta_c$  - eficiência de condução.  
 $\eta_d$  - eficiência dielétrica.  
 $\eta_r$  - eficiência de reflexão.  
 $\mu_r$  - permeabilidade relativa.  
 $\epsilon_0$  - permissividade elétrica no vácuo.  
 $\epsilon_{\text{eff}}$  - permissividade elétrica efetiva.  
 $\epsilon_r$  - permissividade elétrica relativa.  
 $\theta_{\text{HP}}$  - largura de feixe de meia potência no plano  $\theta$ .  
 $\lambda_0$  - comprimento de onda no espaço livre.  
 $\epsilon_r$  - permissividade relativa.  
 $\mu_r$  - permeabilidade relativa.  
 $\omega_0$  - menor frequência angular que limita a banda elétrica inferior proibida.  
 $\omega_{0m}$  - frequência de ressonância magnética.  
 $\omega_p$  - frequência angular do plasma.  
 $\mu$  - permeabilidade.

$\varepsilon$  - permissividade.

$\Delta L$  - Variação de comprimento da antena.

$\varepsilon$  - Permissividade elétrica.

$\Lambda$  - Fator de Preenchimento.

$\tau$  - espessura do cobre.

$\omega$  - Frequência angular.

$\Delta L$  - variação no comprimento elétrico

$\gamma$  - fator de amortecimento devido a perdas no condutor.

$\xi$  - constante de amortecimento.

### *Siglas*

BW - bandwidth.

dB - decibéis.

DNG - duplamente negativo.

DPS - duplamente positivo.

EBG - electromagnetic band gap.

EM - eletromagnéticos.

ENG - Épsilon negativo.

FR4 - Fibra de Vidro.

FSS - frequency Selective Surface.

GSTCs - generalized sheet transition conditions

HFSS - high frequency structural simulator.

IEEE - institute of electrical and electronics engineers.

LFEN - largura de feixe entre nulos

LFMP - largura de feixe de meia potência.

LHM - left handed materials

LT - linha de transmissão

LTE - método da linha de transmissão equivalente.

LTT - método da linha de transmissão transversa.

MEF - métodos dos elementos finitos.

MNG - mi negativo.

MoM - método dos momentos.

MS - Metassuperfície.

NIM - negative-index metamaterial.

PEC - perfect electric conductor.

PPGSCA - programa de pós-graduação em sistemas de comunicação e automação.

RF - radio frequência.

RHM - right-handed materials.

RL - return loss.

SRR - split ring resonator.

TOE - taxa da onda estacionária.

TW - tinwire

UFERSA - universidade federal rural do semiárido.

VNA - vectorial network analyser.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1 OBJETIVO GERAL .....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>2 ANTENAS</b> .....	21
2.1 DEFINIÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS DE ANTENAS .....	21
<b>3 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS</b> .....	23
3.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO .....	23
<b>3.1.1 lóbulos do diagrama de irradiação</b> .....	23
<b>3.1.2 largura de feixe</b> .....	24
3.2 DIRETIVIDADE .....	25
3.3 EFICIÊNCIA DE ANTENAS .....	27
3.4 GANHO .....	28
3.5 LARGURA DE BANDA.....	30
3.6 PERDA DE RETORNO .....	31
<b>4 ANTENAS DE MICROFITA</b> .....	34
4.1 CONCEITOS BÁSICOS .....	34
4.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.....	35
4.3 MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO .....	37
<b>4.3.1 Linha de microfita</b> .....	37
<b>4.3.2 Cabo coaxial</b> .....	38
<b>4.3.3 Acoplamento por abertura</b> .....	38
<b>4.3.4 Acoplamento por proximidade</b> .....	39
4.4 MÉTODOS DE ANÁLISE.....	40
<b>4.4.1 Método da Linha de Transmissão</b> .....	40
<b>4.4.2 Método da Cavidade</b> .....	41
4.5 MÉTODO DA ONDA COMPLETA .....	44
<b>5 METASSUPERFÍCIE</b> .....	46
5.1 MATERIAIS ARTIFICIAIS .....	46
5.2 MATERIAIS RHM E LHM .....	47
5.3 PERMISSIVIDADE NEGATIVA .....	51
5.4 PERMEABILIDADE NEGATIVA.....	53
5.5 ÍNDICE DE REFRAÇÃO NEGATIVO.....	55

5.6	INVERSÃO DA LEI DE SNELL .....	57
5.7	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS ARTIFICIAIS .....	60
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>62</b>
6.1	ANTENA PADRÃO.....	62
6.2	PROJETO DA CÉLULA METASSUPERFÍCIE .....	64
6.3	APLICAÇÃO DAS CÉLULAS .....	65
6.3.1	No Patch .....	66
6.3.2	No Patch (arranjo periódico).....	67
6.3.3	Plano de terra.....	68
6.4	CONFECÇÃO DAS ANTENAS.....	69
<b>7</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
7.1	RESULTADOS COMPUTACIONAIS .....	74
7.1.1	Antenas padrão .....	74
7.1.2	Antenas com modificação do tipo de célula .....	74
7.1.3	Antenas com modificação do comprimento de onda .....	125
7.1.4	Antenas com modificação do número de células no plano de terra.....	161
7.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	172
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>182</b>
8.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	183
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>184</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de comunicar-se através de grandes distâncias e com rapidez criou uma demanda cada vez maior por soluções mais eficientes. O mercado cresceu exponencialmente e impulsionou as pesquisas nas mais diversas áreas.

Um dos maiores obstáculos das comunicações sem fio é a dimensão das antenas que não acompanha o processo de miniaturização que os equipamentos atravessaram. As antenas planares surgem como solução para alguns desses problemas, dentre as antenas planares se destacam as antenas de microfita por apresentarem um conjunto de características que possibilita o seu uso em diversas aplicações.

Antenas de microfita são constituídas de um substrato dielétrico, o qual apresenta em uma de suas faces um elemento condutor radiante (*patch*) e em sua face oposta podem apresentar um plano de terra metálico. Essas antenas têm como vantagens: facilidade de fabricação, baixo perfil, leveza, facilidade para adaptar as várias superfícies, robustez mecânica e frequência de projeto ajustável. Porém, não são estruturas ideais apresentando algumas limitações tais como, baixa eficiência, baixa potência transmitida, baixo ganho, largura de banda estreita (1 a 3 % valores médios), (BALANIS, 2005; POZAR, 1995). Uma das técnicas para corrigir as limitações das antenas de microfita é a utilização de metamateriais/Metassuperfície para atingir as condições de operação desejáveis.

Metamateriais são elementos artificiais com propriedades eletromagnéticas não encontradas na natureza (YUL AND CAPASSO, 2014). Outros estudos ainda definem os mesmos como materiais estruturados de forma periódica onde a periodicidade é menor que o comprimento de onda (ELEFTHERIADES, 2005). Metamateriais são versáteis possibilitando sua utilização nas mais diversas aplicações, desde trabalhos com dispositivos ópticos (JIAO LIN et al. 2015) a aplicações em antenas de microfita (PIRES et al. 2013).

Segundo Kuester o conceito de um metamaterial é facilmente estendido a uma estrutura bidimensional com mesmo padrão. Essa versão de superfície de um metamaterial pode ser chamada de Metassuperfície. Segundo (ZHU, et al. 2013) a Metassuperfície pode ser entendida como um equivalente bidimensional de um metamaterial, na literatura elas são consideradas um caso especial de superfície seletora de frequência.

Este trabalho propõe a realização de um estudo do comportamento das antenas de microfita mediante a aplicação de Metassuperfícies no *patch* das antenas e no plano de terra, através de modelagem computacional e com a utilização de um software comercial serão observados os principais parâmetros: Diagrama de irradiação 2D e 3D, perda de retorno e

largura de banda. Essas análises serão desenvolvidas para três tipos de materiais utilizados como substrato, nos quais serão aplicados dois tipos de células/Metassuperfícies, para cada célula a dimensão da mesma será variada em função de três comprimentos de onda diferentes  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ . As simulações serão realizadas por meio do software HFSS<sup>®</sup> versão 16.2.0, posteriormente serão fabricados os exemplares com as características de operação desejáveis.

A dissertação será dividida em oito capítulos são eles:

- Capítulo 1: Será apresentada uma breve introdução ao trabalho com os seus respectivos objetivos, geral e específicos.
- Capítulo 2: Serão apresentados os conceitos básicos sobre antenas.
- Capítulo 3: Breve introdução dos parâmetros fundamentais de antenas a serem avaliados nesse trabalho.
- Capítulo 4: Abordagem dos conceitos básicos das antenas de microfita, suas vantagens e desvantagens, formas de alimentação e métodos de análise de modo geral destacando os que serão utilizados no presente trabalho.
- Capítulo 5: Introdução aos materiais artificiais, conceitos básicos por trás de estruturas artificiais, estudos e aplicações.
- Capítulo 6: Neste capítulo o projeto dos dispositivos propostos para análise, antenas padrão e as antenas com Metassuperfície. Serão especificados os materiais e geometria das estruturas dos dispositivos.
- Capítulo 7: Os resultados do estudo, computacionais e depois os elementos fabricados serão apresentados e discutidos nesse capítulo.
- Capítulo 8: Nesse capítulo as conclusões que o trabalho proporcionou e os principais aspectos abordados neste estudo serão tratados, com sugestões para trabalhos futuros.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

- Analisar a aplicação das estruturas Metassuperfície nas antenas de microfita projetadas para frequência de 2,45 GHz e analisar as propriedades de irradiação destas antenas.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construção dos dispositivos com base nos resultado simulados.
- Efetuar análise dos valores simulados e medidos.

- Estudar a variação da dimensão da Metassuperfície.
- Comparar o tipo de célula circular ou retangular.
- Alterar o número de células para formar os arranjos 3x3 e 4x4 para os dois tipos de célula SRR no plano de terra.

## 2 ANTENAS

A propagação de ondas eletromagnética foi uma das maiores descobertas da humanidade, o conhecimento do seu comportamento possibilitou novas formas de comunicação. A antena é o dispositivo cuja função é transformar energia eletromagnética guiada pela linha de transmissão em energia eletromagnética irradiada, pode-se também dizer que o comportamento inverso é válido, isto é, transformar energia eletromagnética irradiada em energia eletromagnética guiada para a linha de transmissão, nesse capítulo serão abordados brevemente os conceitos básicos sobre antenas.

### 2.1 DEFINIÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS DE ANTENAS

Uma antena é uma estrutura geométrica constituída de um material que permite o movimento de cargas elétricas, ao ser submetido a um pulso (tensão ou corrente elétrica que tem uma determinada frequência) produz campos eletromagnéticos. Sua intensidade, direção e, principalmente, a forma com a qual os campos interagem entre si, dependerá de quatro fatores: da forma de variação das cargas com o tempo; da variação das cargas com a geometria da antena; do material que constitui a antena e do meio físico onde a mesma está inserida (BALANIS, 2005).

Antenas são dispositivos que em sua maioria são metálicos para irradiação ou recepção de ondas de rádio (WEBSTER). Segundo as normas do *IEEE – Standard definitions of terms for antenas*, antenas são classificadas como dispositivos que irradiam/recebem ondas de rádio, elas são a interface entre o espaço livre e o meio guiado. O elemento de guiamento pode ser de vários tipos dentre eles a linha de transmissão (LT), cabo coaxial ou um guia de ondas, esses levam energia eletromagnética da fonte a antena que por sua vez irradia essa energia para o espaço livre.

Os primeiros protótipos de antenas foram efetivamente construídos por Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894) por volta de 1886. Ao mesmo tempo em que pesquisas eram desenvolvidas na América do norte e Europa, o brasileiro Roberto Landell de Moura obtem resultados de seus trabalhos experimentais, segundo Ernani Fornari as primeiras experiências com transmissão e recepção da palavra falada teriam ocorrido entre 1893 e 1894, Landell de Moura obtém em 9 de março de 1901 a patente brasileira sob o número 3279.

O primeiro par de telefones instalado no Brasil foi começou a operar em janeiro de 1877, ligando o palácio de São Cristóvão (atual museu nacional) ao palácio da rua primeiro de

março (edifício dos correios), em janeiro de 1884 foi fundada a primeira concessionária paulistana, batizada de Companhia de Telégrafos Urbanos.

Em março de 1896, Alexander Stepanovich Popov arquitetou um dispositivo que permitia a transmissão de sinais entre os prédios da universidade de São Petersburgo, em 1901 Guglielmo Marconi fez a primeira transmissão de sinais à longa distância entre a Inglaterra e o Canadá. No seu experimento Marconi utilizou-se de um transmissor de 50 fios verticais posicionados como leque, suportados por postes de madeira com 60 m cada. O receptor era constituído por um fio de 200 m estendido e sustentado por uma pipa (POZAR, 1995).

Em 1915, uma transmissão de voz foi realizada entre New York e San Francisco, e em 1920 foi inaugurada a primeira estação comercial de radio na Pennsylvania. Durante a Segunda Guerra as comunicações sem fio se desenvolveram rapidamente para suprir as necessidades impostas pela guerra. Em 1946 foi inaugurado o primeiro serviço público de telefonia ligando as 25 maiores cidades dos Estados Unidos. Desde então foram implementados vários sistemas de modulação e outros protocolos que delimitaram as faixas de frequência dentre as inúmeras aplicações existentes.

### 3 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS

Para descrever o desempenho de uma antena é necessário definir alguns parâmetros, e esses estabelecem uma relação ou comparação entre os termos estudados e em sua maioria são normatizados por órgãos como IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, que há muitos anos normatiza o uso de antenas. Nesse capítulo serão abordados alguns parâmetros comumente utilizados na descrição de antenas como diagrama de irradiação, perda de retorno, largura de banda, ganho e diretividade.

#### 3.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO

O diagrama de irradiação é uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de irradiação de uma antena em função das coordenadas espaciais. Normalmente o diagrama de irradiação é determinado para campos distantes (POZAR, 1995).

A propriedade de irradiação mais relevante é distribuição espacial de energia radiada em função da posição do observador ao longo de uma superfície constante. O gráfico que relaciona a variação espacial da densidade de potência em uma superfície constante é conhecido como diagrama de amplitude de potência. Usualmente diagramas de campos são normalizados com o valor de máximo, esse ainda são traçados em sua maioria em escalas logarítmicas, mais comumente decibéis (dB), o uso desse tipo de escala em funções pois convenientemente permite acentuar com mais detalhes das partes do diagrama que tem valores pequenos, que são denominados lobos secundários. Para uma antena pode-se afirmar que:

- a) Diagrama de campo representa um gráfico da magnitude do campo elétrico ou magnético em função do espaço angular, quando em escala linear.
- b) Diagrama de potência representa o quadrado da magnitude do campo elétrico ou magnético como função do espaço, quando em escala linear.
- c) Diagrama de potência representa a magnitude do campo elétrico ou magnético, como função do espaço angular, quando em escala logarítmica (dB – decibéis).

##### 3.1.1 Lóbulos do diagrama de irradiação

Lóbulo do diagrama de irradiação é a porção do diagrama limitada por regiões onde a intensidade da mesma é menor (BALANIS, 2005). Na Figura 1 apresenta um diagrama em

escala linear bidimensional, no diagrama é apresentados o lóbulo principal e as demais partes de um diagrama de irradiação.

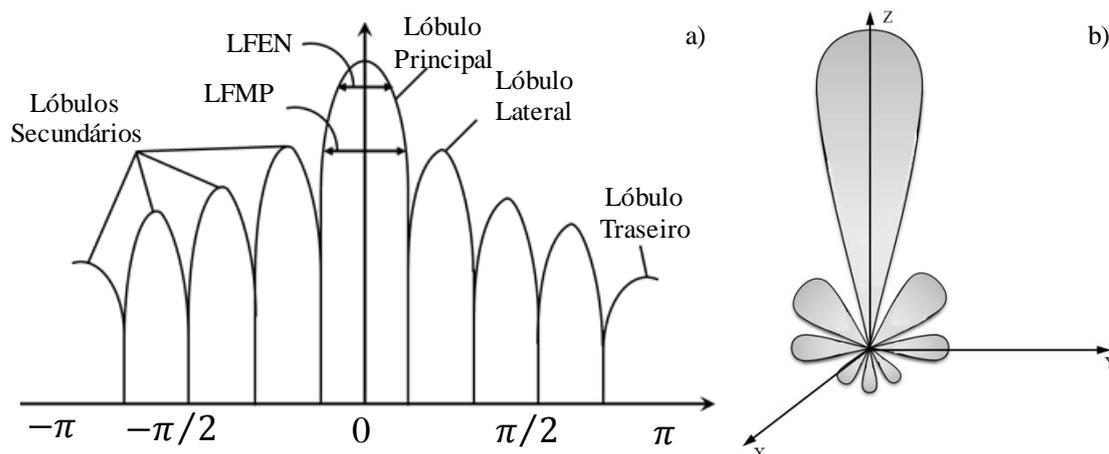


Figura 1: a) Diagrama de irradiação linear bidimensional, b) Diagrama de irradiação polar tridimensional.

Fonte: Autoria própria, 2016.

O lóbulo principal é o que contém a direção de máxima irradiação. Na Figura 1 a) e b) o lóbulo principal tem a direção  $\theta = 0$ , há casos que a antena apresenta mais de um lóbulo principal. Os lóbulos secundários<sup>1</sup> são aqueles que não sejam o lóbulo principal. Na Figura 1 a) e b) com exceção do lóbulo principal todos os lóbulos são secundários. Lóbulos laterais<sup>2</sup> aqueles que não possuem a direção desejada, normalmente é adjacente ao lóbulo principal ocupando o mesmo hemisfério. Lóbulo posterior é aquele onde o eixo do lóbulo faz um ângulo de  $180^\circ$  com o feixe da antena, esse termo é utilizado para designar os lóbulos secundários que ocupam o hemisfério oposto ao do lóbulo principal (POZAR, 2005).

### 3.1.2 largura de feixe

Largura de feixe é a separação angular entre dois pontos idênticos e em lados opostos do ponto de máximo do diagrama de irradiação. Em diagramas de antena existem inúmeras larguras de feixe, a mais comumente utilizada é a largura de feixe de meia potência (LFMP) que pode ser vista na Figura 2, em um plano que contém a direção de máxima irradiação, o ângulo entre as duas direções nas quais a intensidade de irradiação é a metade do valor de

<sup>1</sup> Normalmente os lóbulos secundários devem ser eliminados, pois representam irradiação em direções indesejadas.

<sup>2</sup> Em radares níveis baixos de lóbulos laterais são necessários para evitar a indicação de falsos alvos.

máximo, essa separação é conhecida como largura de feixe de meia potência (*Special issue - IEEE*).

A separação angular entre os primeiros nulos do diagrama, também referenciada como largura de feixe entre nulos (LFEN), a Figura 2 ilustra a largura de feixe. Na prática o termo largura de feixe sem qualquer outra designação designa o LFMP.

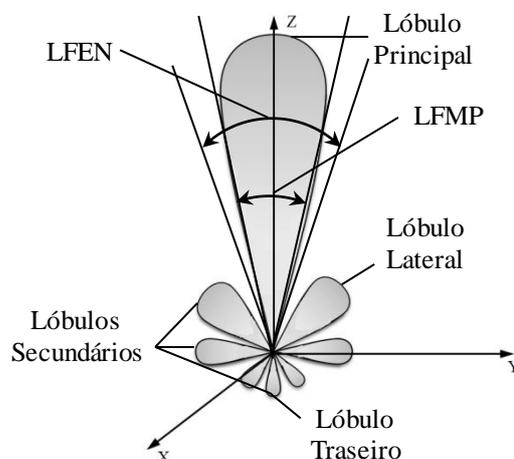


Figura 2: Diagrama de potência em duas dimensões.

Fonte: Autoria própria, 2016.

À medida que a largura de feixe cresce o nível dos lóbulos laterais da antena diminuem o mesmo acontece com o oposto. A largura de feixe também pode ser usada para distinguir entre duas fontes radiantes ou dois alvos de um radar em posições adjacentes. A capacidade de uma antena distinguir entre duas fontes é igual à  $LFEN/2$ , esse critério é utilizado como uma aproximação da LFMP (KRAUS, 1988). Essa relação de distancia é o menor valor para que uma antena possa distinguir de duas fontes separadas uma distância  $D$ .

### 3.2 DIRETIVIDADE

A diretividade pode ser entendida como a razão entre a intensidade de irradiação de uma antena em uma direção específica e a intensidade de irradiação média. A intensidade de irradiação média é a potência total radiada pela antena dividido por  $4\pi$  (MILLIGAN, 2005).

A Diretividade de uma antena não-isotrópica consiste na intensidade de irradiação em uma direção dividido pela intensidade de irradiação de uma antena isotrópica, essa relação pode ser observada pela Equação 1.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1)$$

Se a direção não for indicada fica entendido que a direção é aquela que apresentar maior intensidade de irradiação, logo.

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{U_{m\acute{a}x}}{U_0} = \frac{4\pi U_{m\acute{a}x}}{P_{rad}} \quad (2)$$

Sendo que:

$D$  é a Diretividade

$D_0$  Diretividade máxima

$U$  Intensidade de irradiação (W/ ângulo sólido)

$U_{m\acute{a}x}$  Máxima intensidade de irradiação (W/ ângulo sólido)

$U_0$  Intensidade de irradiação de uma fonte isotrópica (W/ ângulo sólido)

$P_{rad}$  Potência radiada total (W)

A diretividade parcial de antenas com polarização e direção de propagação quaisquer é compreendida como, uma parcela da intensidade de irradiação que aparece mediante a uma determinada polarização dividida pela intensidade de irradiação média. Essa nova definição permite afirmar que em uma direção qualquer a diretividade total é a soma das diretividades parciais, associadas a uma polarização qualquer e, portanto pode-se escrever a diretividade total máxima através da Equação 3.

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (3)$$

Em coordenadas esféricas, tal que  $D_\theta$  e  $D_\phi$  são dados pela Equação 4 e 5.

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (4)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (5)$$

Onde

$U_\theta$  Intensidade de irradiação, em uma dada direção, contida na componente  $\theta$  de campo.

$U_\phi$  Intensidade de irradiação, em uma dada direção, contida na componente  $\phi$  de campo.

$(P_{rad})_\theta$  Potência radiada em todas as direções, contida na componente  $\theta$  de campo.

$(P_{rad})_\phi$  Potência radiada em todas as direções, contida na componente  $\phi$  de campo.

### 3.3 EFICIÊNCIA DE ANTENAS

Existem vários tipos de eficiência associados a uma antena, a eficiência total de um sistema  $e_0$  deve considerar as perdas totais do sistema, as causas mais comuns de perdas são:

1. Reflexão causada por impedâncias mal casadas entre a LT e a carga.
2. Perdas  $I^2R$  em condutores e dielétricos.

A eficiência total pode ser escrita como:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (6)$$

Portanto:

$e_0$  é a eficiência total

$e_r$  é a eficiência de reflexão

$e_c$  é a eficiência de condução

$e_d$  é a eficiência dielétrica

$\Gamma$  o coeficiente de reflexão nos terminais de entrada da antena é dado por  $[\Gamma = (Z_{in} - Z_0)/(Z_{in} + Z_0)]$ , onde  $Z_{in}$  é a impedância de entrada da antena e  $Z_0$  é a impedância da linha de transmissão.

TOE ou a taxa da onda estacionária é outro parâmetro relevante e é definido como,  $[TOE = (1 + |\Gamma|)/(1 - |\Gamma|)]$ .

A Equação 7 apresenta a expressão para eficiência total:

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (7)$$

$e_{cd}$  é a eficiência de irradiação da antena, que é utilizada para relacionar a propriedade do ganho com a diretividade do mesmo.

### 3.4 GANHO

Ainda que o ganho seja profundamente ligado a diretividade, o ganho leva em consideração tanto a eficiência de uma antena como suas propriedades de irradiação.

O ganho é a razão entre a intensidade de irradiação, em uma direção e a intensidade que seria obtida se a potência fornecida à antena fosse radiada isotropicamente. A intensidade de irradiação corresponde a potência que uma antena hipotética irradia, essa é igual à potência recebida pela antena dividida por  $4\pi$  (SEYBOLD, 2005). O ganho é apresentado pela Equação 8.

$$\text{Ganho} = 4\pi \frac{\text{intensidade de irradiação}}{\text{potência total de entrada (aceita pela antena)}} \quad (8)$$

$$\text{Ganho} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}} \quad (9)$$

Pode-se expressar o ganho em termos de sua componente relativa. O ganho relativo é definido como a razão entre o ganho de potência em uma determinada direção e o ganho de potência de uma antena de referência em sua direção de referência (SEYBOLD, 2005). A potência de entrada deve ser a mesma para as duas antenas, é comum tomar como antena de referência um dipolo ou uma corneta, essa antena de referência deve ser uma fonte isotrópica sem perdas tal que seu ganho seja obtido pela Equação 10.

$$\text{Ganho} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{\text{in}}(\text{fonte isotrópica sem perdas})} \quad (10)$$

A expressão para a potência irradiada total é dada conforme a Equação 11.

$$P_{\text{rad}} = e_{\text{cd}} P_{\text{in}} \quad (11)$$

Onde  $e_{\text{cd}}$  é a eficiência por condução e dielétrica ou eficiência de irradiação e  $P_{\text{in}}$  a potência entregue por uma fonte isotrópica (*Special issue - IEEE*). Na Equação 12 o ganho não envolve o descasamento de impedâncias ou as perdas por polarização. Substituindo a Equação 10 em 11, obtêm-se:

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} \left[ 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (12)$$

Essa expressão é referida como ganho (G), e como mencionado anteriormente a expressão não considera as perdas por reflexão e polarização, porém, pode ser definido um novo ganho que considera essas perdas, define-se esse novo ganho como absoluto ( $G_{abs}$ ) onde o mesmo é escrito na Equação 16.

$$G_{abs}(\theta, \phi) = e_r G(\theta, \phi) \quad (13)$$

$$= e_r (1 - |\Gamma|^2) G(\theta, \phi) \quad (14)$$

$$= e_r e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (15)$$

$$= e_0 D(\theta, \phi) \quad (16)$$

De forma que  $e_0$  é a eficiência total definida na Equação 7. Caso a antena tenha a mesma impedância da linha, ou seja, caso a impedância da antena  $Z_{in}$  seja igual à impedância característica  $Z_c$  encontrada na linha de transmissão, as perdas por reflexão serão nulas ( $|\Gamma| = 0$ ) (BALANIS, 2005).

O ganho ainda pode ser definido como função da sua polarização em uma dada direção de propagação. O ganho total  $G_0$ , é a somatória de todos os ganhos parciais em quaisquer duas polarizações ortogonais. Em coordenadas esféricas o ganho é expresso em termos das suas componentes  $\theta$  e  $\phi$  e seu comportamento pode ser modelado pela Equação 17.

$$G_0 = G_\theta + G_\phi \quad (17)$$

A expressão para os ganhos parciais  $G_\theta$  e  $G_\phi$  é dada pelas equações 18 e 19.

$$G_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{P_{in}} \quad (18)$$

$$G_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{P_{in}} \quad (19)$$

Onde:

$U_{\theta}$  é a intensidade de irradiação contida na componente  $E_{\theta}$ .

$U_{\phi}$  é a intensidade de irradiação contida na componente  $E_{\phi}$ .

$P_{in}$  potência total de entrada

### 3.5 LARGURA DE BANDA

O intervalo de frequência no qual o desempenho da antena está de acordo com um padrão pré-estabelecido é chamado de largura de banda (BW). Também pode ser referida como uma faixa de valores de frequência onde às características da antena (impedância de entrada, diagrama de irradiação, ganho) estão dentro de um valor aceitável da frequência ressonante (BALANIS, 2005).

Para antenas, a largura de banda BW pode ser entendida como de banda estreita ou banda larga. Convencionalmente consideram-se de banda estreita as antenas onde o BW é inferior a 10% da frequência nominal. Já as antenas de banda larga, podem ter uma largura de 10% à 50% da frequência nominal. (SEYBOLD, 2005).

As Equações 20 e 21 são usadas para cálculos de BW:

$$BW = \frac{f_{sup}}{f_{inf}} \quad (20)$$

$$BW = \frac{f_{sup} - f_{inf}}{f_{central}} \quad (21)$$

Na Figura 3 pode ser observada a curva clássica de perda de retorno, nela são expressos a frequência superior inferior e a largura de banda.

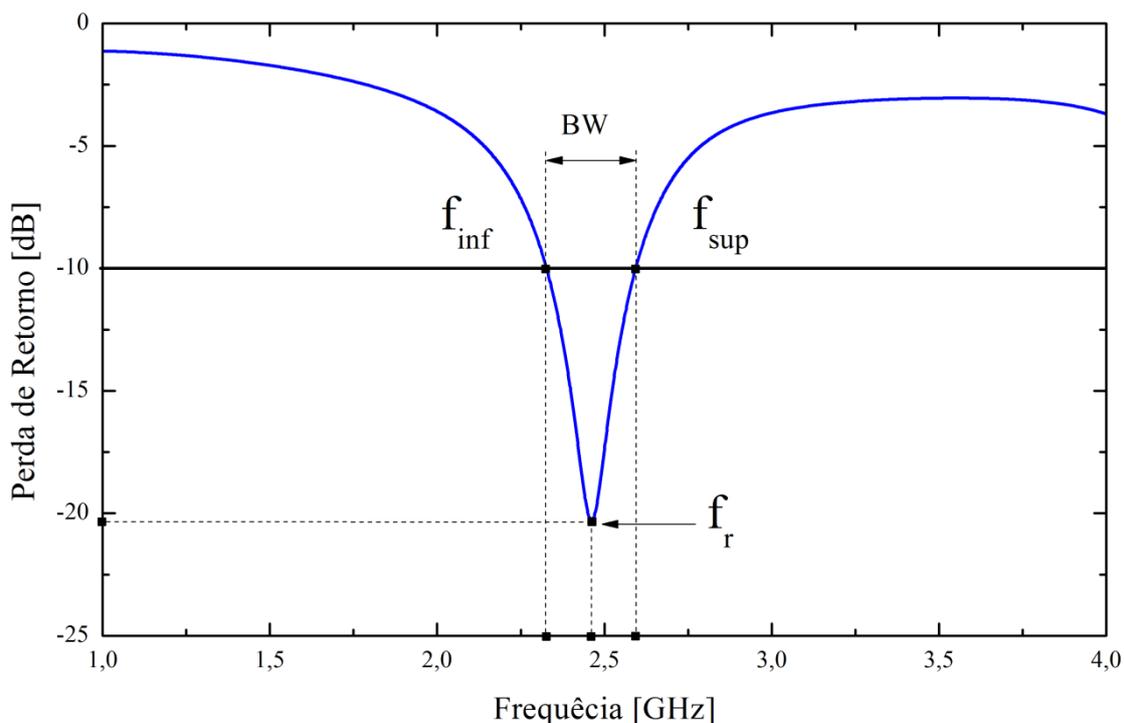


Figura 3: Curva de perda de retorno com as frequências de corte superior ( $f_{sup}$ ), inferior ( $f_{inf}$ ) e de ressonância ( $f_r$ ).

Fonte: Adaptado HOLANDA, 2016.

### 3.6 PERDA DE RETORNO

Um dos principais parâmetros de projeto para antenas é a perda de retorno (RL), a interconexão entre a linha de transmissão e a antena dispersa parte da energia que seria transmitida, e a perda de retorno quantifica os valores de potência refletida bem como a fornecida à carga.

Analisar quadripolos é uma prática comum em circuitos de Rádio Frequência (RF) para determinação dos parâmetros de espalhamento em termos das tensões complexas do circuito. Os parâmetros do quadripolo também conhecidos como parâmetros de espalhamento estão relacionados com a eficiência das antenas, de maneira que esses parâmetros modelam a linha que alimenta os circuitos planares (ANDERSON, 1967). Na Figura 4 é pode ser visto um quadripolo onde as tensões complexas normalizadas incidentes ( $a_1$  e  $a_2$ ) e refletidas ( $b_1$  e  $b_2$ ) são representadas.

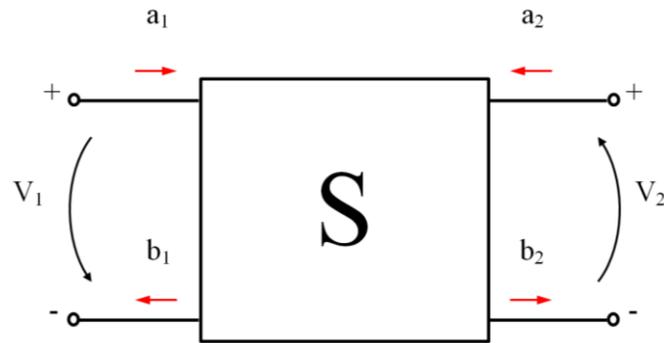


Figura 4: Modelo de quadripolo.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Assim as correntes e tensões eficazes totais nos terminais do quadripolo:

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\textit{onda de potência incidente em 1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (22)$$

$$a_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\textit{onda de potência incidente em 2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (23)$$

$$b_1 = \frac{V_1 - Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\textit{onda de potência incidente em 1}}{\sqrt{Z_0}} \quad (24)$$

$$b_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{\textit{onda de potência incidente em 2}}{\sqrt{Z_0}} \quad (25)$$

Onde  $Z_0$  é a impedância de referência.

Das equações 22 a 25 obtêm-se as equações lineares do sistema.

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (26)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (27)$$

Onde os termos  $S_{ij}$  são chamados de parâmetros de espalhamento do quadripolo. Esses parâmetros podem ser escritos também na forma matricial como apresentado na Equação 28.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Tal que:

$S_{11}$  é o coeficiente de reflexão da tensão no acesso 1

$S_{22}$  é o coeficiente de reflexão da tensão no acesso 2

$S_{21}$  é o ganho de tensão direta do quadripolo

$S_{12}$  é a isolação do quadripolo.

A Equação 29 apresenta a expressão para perda de retorno.

$$RL = -20 \text{Log}|S_{11}| \quad (29)$$

A obtenção da perda de retorno se dá por meio do logaritmo neperiano do parâmetro  $S_{11}$  da matriz de espalhamento (coeficiente de reflexão) multiplicado por 20.

## 4 ANTENAS DE MICROFITA

As antenas de microfita são derivadas das linhas de microfita, estruturas planares largamente utilizadas na indústria devido seu desempenho e características construtivas que serão discutidos nessa seção. Serão apresentados neste capítulo os conceitos fundamentais de uma antena de microfita, bem como os métodos de análise e alimentação.

### 4.1 CONCEITOS BÁSICOS

O conceito de radiadores de microfita foi introduzido por Deschamps em um simpósio das forças aéreas americanas. Deschamps propôs o uso de linhas de microfita no lugar das tradicionais guias de onda para alimentação dos sistemas de antenas, entretanto no primeiro momento os arranjos de antenas acoplados as linhas de microfita eram cornetas planares e não antenas de microfita. (DESCHAMPS & SICHAK, 1953).

Segundo Deschamps as vantagens obtidas com esses dispositivos são; menor volume ocupado, peso reduzido, baixo custo de fabricação e possibilidade de sobreposição dos sistemas.

Apesar da inovação proposta por Deschamps o uso efetivo das antenas de microfita ocorreu 20 anos mais tarde, com o desenvolvimento de modelos matemáticos para as antenas. Na década de 70 o avanço desses modelos levou a um aumento exponencial na aplicação das antenas em sistemas, especialmente na faixa de micro-ondas devido às baixas tangentes de perda e as características mecânicas desejáveis (GARG et al. 2001).

A primeira antena de microfita com as características construtivas tradicionais surgiu em 1972 com o trabalho de Munson, atualmente existem antenas com estruturas complexas e mais versáteis o que possibilitam sua utilização no campo aeroespacial (MUNSON, 1974).

Antenas de microfita são aplicadas nas mais diversas áreas do conhecimento, por exemplo: aeronáutica, aeroespaciais, satélites e mísseis. A utilização dessas antenas é justificável, por suas inúmeras vantagens. Existem também algumas características operacionais que na literatura são citadas como desvantagens, por exemplo: baixa eficiência, baixa potência, polarização mista, desempenho de varredura baixo, irradiação espúria e pequena largura de banda. Contudo existem métodos que permitem contornar as limitações impostas por essas estruturas.

## 4.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

As antenas na sua configuração mais simples consistem em uma placa metálica (*Patch*) posicionada na parte superior da antena, um (substrato) que possui constante dielétrica variável  $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$  e espessura consideravelmente menor que o comprimento de onda  $h \ll \lambda_0$  e outra placa metálica colocada na parte inferior da antena (Plano de terra), a estrutura de uma microfita retangular é apresentada na Figura 5.

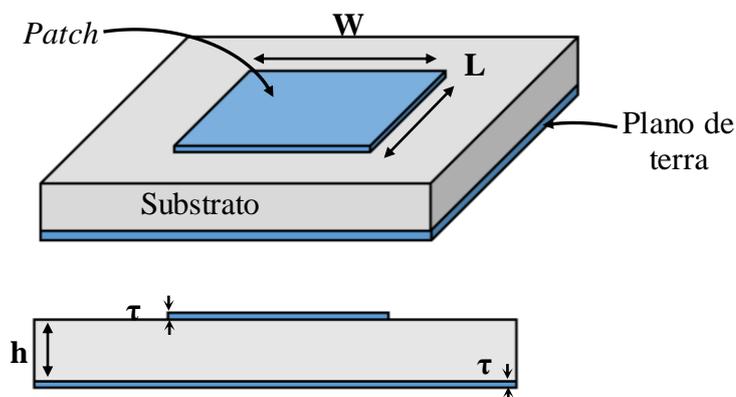


Figura 5: Antena de microfita com *patch* retangular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Onde:

$W$  é a largura do *patch*

$L$  é o comprimento do *patch*

$\tau$  é a espessura do cobre

$h$  é a espessura do substrato

O *patch* é a lâmina metálica que cobre a superfície da antena e funciona como o componente irradiador da antena, sua espessura é muito fina em relação ao comprimento de onda, o metal mais utilizado na sua composição é o cobre, porém em aplicações onde o comprimento de onda tem dimensões milimétricas pode-se utilizar ouro (FILHO, 2010).

Em outras literaturas as antenas de microfita são referidas como antenas de plaquetas (BALANIS, 2005). A plaqueta em questão (*patch*) pode ter qualquer geometria como as apresentadas na Figura 6, porém, para facilitar a análise dos elementos geralmente se opta por elementos como círculos, triângulos e retângulos, esse ultimo será utilizado nesse trabalho.

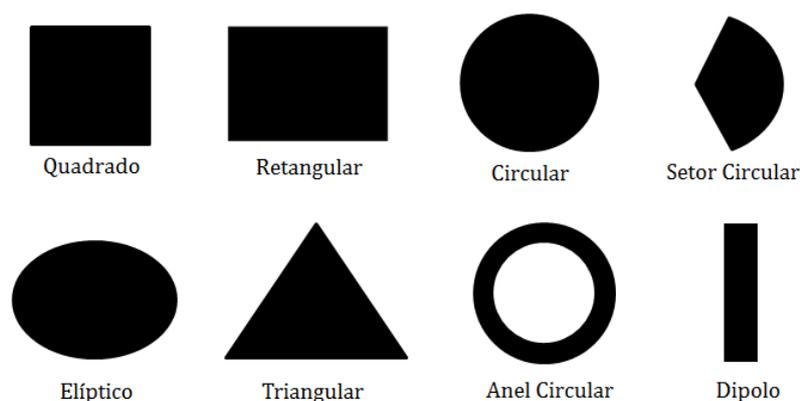


Figura 6: Exemplos de geometrias usadas nos *patches* das antenas de microfita.

Fonte: Adaptado BALANIS, 2005.

O substrato apresenta-se localizado entre *patch* e o plano de terra, é composto por materiais dielétricos, cuja função em uma antena de microfita é similar a um capacitor, que armazena energia de acordo com a frequência de operação. Suas características mecânicas, elétricas e sua geometria são determinantes no confinamento dos campos, irradiação e largura de banda da antena.

Normalmente os substratos com melhor desempenho são aqueles mais espessos com constante dielétrica baixa, porem sua fabricação tem um valor mais elevado. Já os substratos mais finos com constantes dielétricas mais altas são convenientes para a faixa de micro-ondas que tem como requisito campos mais confinados para minimizar irradiação e acoplamentos indesejáveis, entretanto, devido às perdas elevadas se comparados com os materiais de menor constante esses substratos são menos eficientes e possuem largura de banda relativamente menor (POZAR, 1995). Na Tabela 1 são apresentados os materiais comercialmente mais utilizados na fabricação de substrato de antenas de microfita.

Tabela 1: Materiais dielétricos comerciais mais utilizados.

<b>Materiais</b>	<b>Constate dielétrica (<math>\epsilon_r</math>)</b>	<b>Tangente de perdas (<math>\tan \delta</math>)</b>
Alumina	9,2	0,008
RT duróide 5880	2,2	0,0009
Ferrita	12	0
FR4-Epóxi	4,4	0,02
PTFE	2,5	0,002

Fonte: Morais, 2011.

Além de apresentar variadas formas de *Patch*, as antenas podem modificar seus substratos, ter o plano de terra modificado para atender as especificações de projeto estabelecidas. Assim como o *patch* o plano de terra é uma fita metálica, que está localizada na parte inferior do substrato da antena, a função do plano de terra é refletir as ondas incidentes, impedindo a formação de um lóbulo traseiro com intensidade elevada, funcionando ainda como aterramento (MILLIGAN, 2005). Uma das técnicas utilizadas para modificar o plano de terra é o truncamento do mesmo, essa técnica é capaz de aumentar a largura de banda.

### 4.3 MÉTODOS DE ALIMENTAÇÃO

Existem quatro técnicas que são frequentemente utilizadas na alimentação de antenas de microfita, a escolha da técnica de alimentação é feita analisando diversos fatores como: custo, dificuldade de fabricação e dificuldade de análise.

#### 4.3.1 Linha de microfita

Essa técnica de alimentação consiste em conduzir o sinal elétrico ao *patch* por meio de uma linha que tenha largura inferior ao mesmo como observado na Figura 7. A grande vantagem de se construir antenas com esse tipo de alimentação é a facilidade de construção, ambos os condutores utilizados no *patch* e plano de terra são impressos no mesmo substrato dielétrico. À medida que a espessura desse substrato cresce aumentam as ondas de superfície e irradiação espúria, esse comportamento limita a operação em termos de largura de banda a uma pequena faixa de 2% a 5%.

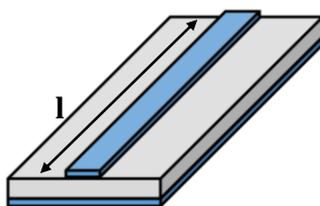


Figura 7: Linha de microfita.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Onde  $l$  é a linha de microfita

### 4.3.2 Cabo coaxial

Nesse método a onda é guiada para antena por um cabo que é afixado na parte inferior do substrato, a haste condutora do centro do cabo será conectada com *patch* e o condutor externo com o plano de terra. Um esquema detalhado dessa técnica de alimentação é apresentado na Figura 8, sua utilização é vantajosa e promove um melhor casamento de impedância e reduz significativamente a quantidade de irradiação espúria. A modelagem matemática do mesmo é difícil devido ao posicionamento do cabo.

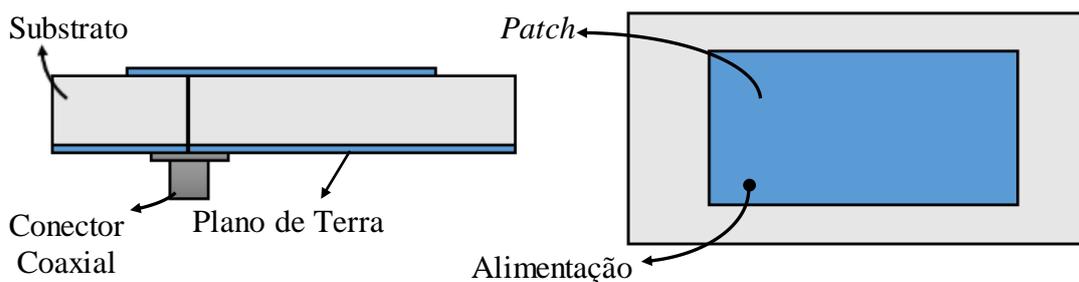


Figura 8: Alimentação por cabo coaxial: a) Vista lateral, b) Vista superior.

Fonte: Autoria Própria, 2016.

### 4.3.3 Acoplamento por abertura

Esse método consiste em dois substratos que estão separados por um plano de terra como pode ser observado na Figura 9. Abaixo do substrato 1 a linha de microfita que alimenta o *patch* com sinal através de uma abertura no plano de terra que divide as duas camadas do substrato, é vantajoso devido sua flexibilidade de projeto, tem casamento de impedância simples e baixíssimas radiações espúrias. Entretanto a técnica e fabricação são complicadas e seu custo final relevantemente mais elevado.

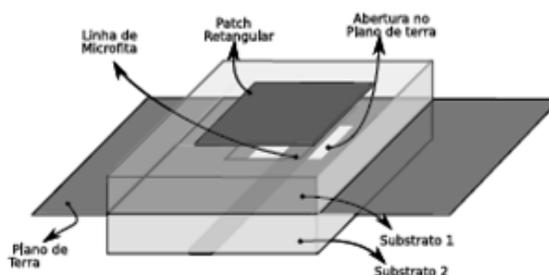


Figura 9: Alimentação por acoplamento de abertura.

Fonte: Adaptado BALANIS, 2009.

#### 4.3.4 Acoplamento por proximidade

A alimentação é feita através de uma linha de microfita colocada entre dois dielétricos, nessa técnica o *patch* que está localizado sobre o substrato 1 é alimentado com a proximidade da linha de microfita, o plano de terra está sob o substrato 2. A vantagem desse tipo de técnica é a alta largura de banda que advêm da sua utilização e baixo nível de irradiação espúria. A impedância é casada manipulando a altura dos substratos e a espessura da linha de microfita que alimenta o *patch*. Na Figura 10 um esquema básico de alimentação por proximidade.

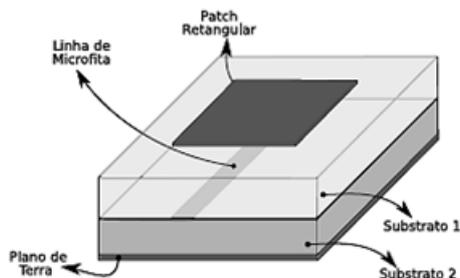


Figura 10: Alimentação de microfita através de acoplamento por proximidade.

Fonte: Adaptado BARROS, 2012.

Na Figura 11 podem ser observadas as representações dos circuitos elétricos equivalentes das quatro principais técnicas de alimentação, será adotado nesse trabalho o modelo da cavidade para dimensionar o *patch* da antena e da linha de microfita para o cálculo da alimentação.

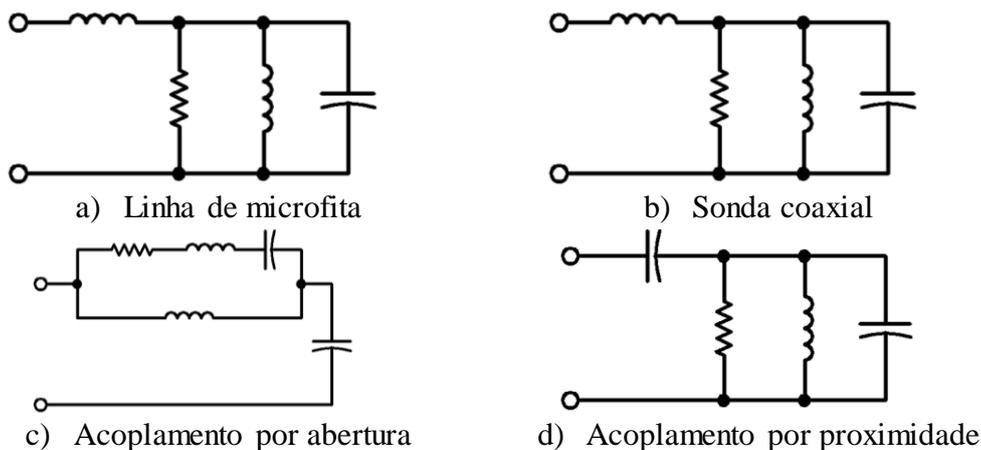


Figura 11: Esquemas elétricos equivalentes: a) Linha de microfita, b) Sonda coaxial, c) Acoplamento por abertura, d) Acoplamento por proximidade.

Fonte: Autoria própria, 2016.

## 4.4 MÉTODOS DE ANÁLISE

### 4.4.1 Método da Linha de Transmissão

Proposto inicialmente por Munson em 1974, é um dos métodos mais simples de se analisar uma antena, o modelo da linha de transmissão considera os efeitos de borda causados pela finitude das dimensões do *patch*, que por sua vez leva ao franjamento dos campos tanto no comprimento da antena quanto na sua largura, a magnitude de campo franjado é função do tamanho do *patch* ( $L$  e  $W$ ), da permissividade do material  $\epsilon_r$  e da altura  $h$  o substrato. Nas equações 30 e 31 são apresentadas as expressões para o comprimento e a largura do *patch* de antenas retangulares, pelo método da LT.

Portanto tem-se a largura do *patch*:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (30)$$

E o comprimento:

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (31)$$

Onde:

$f_r$  é a frequência de ressonância

$c$  velocidade da onda no espaço livre

$\epsilon_{eff}$  da permissividade efetiva do material

$\Delta L$  variação no comprimento elétrico

Ainda que seja um modelo bem simplificado produz resultados satisfatórios, provando ser viável para geometrias menos complexas, formas retangulares ou circulares. A Figura 12 apresenta uma representação do efeito de franjamento observado e modelado pelo método da LT (MILLIGAN, 2005).

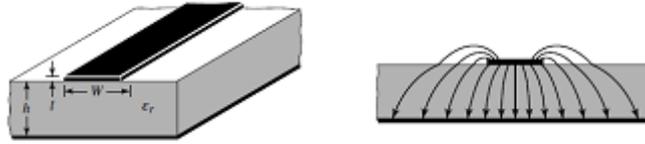


Figura 12: a) Linha de microfita isométrica, b) Vista frontal das linhas de campo.

Fonte: BALANIS, 2005.

Como é observável na Figura 12, o efeito de franjamento percorre tanto o espaço livre como o dielétrico que constitui o substrato. Para esse modelo, estipulasse uma permissividade de efetiva  $\epsilon_{eff}$ , que considera tanto a permissividade do ar quanto a do substrato. Logo a permissividade efetiva  $\epsilon_{eff}$  é definida como sendo a permissividade de um material hipotético que envolve a linha de microfita, assim, a linha de microfita que possui franjamento terá as mesmas características de uma linha ideal. A Equação 32 modela esse fenômeno.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (32)$$

Onde  $h$  é a espessura do substrato e  $W$  a largura do *patch*.

O efeito de borda produz nas antenas um comprimento efetivo diferente do comprimento físico, ou seja, o *patch* da antena que tinha um comprimento  $L$ , terá agora um acréscimo  $\Delta L$ , a Equação 33 mensura esse aumento.

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3) \left( \frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258) \left( \frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (33)$$

#### 4.4.2 Método da Cavidade

O modelo da cavidade consiste em considerar a antena como uma cavidade cujos limites são quatro paredes magnéticas laterais e duas paredes elétricas acima e abaixo da dessa estrutura (*patch* e plano de terra). A Figura 13 apresenta um esquema em perspectiva da fenda.

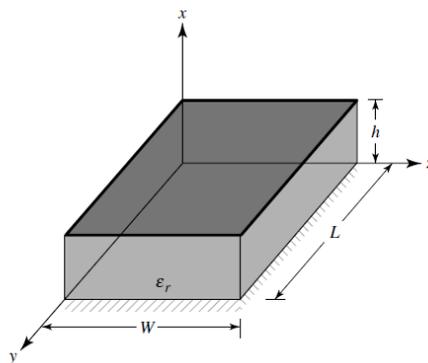


Figura 13: Modelo da cavidade ressonante.

Fonte: Adaptado BALANIS, 2005.

Os campos na antena são considerados como campos na cavidade, logo, serão expandidos em termos de modos ressoantes, como acontece com guias de onda. A frequência de ressonância de cada modo é dada pela Equação 34.

$$F_{r_{nmp}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{W}\right)^2} \quad (34)$$

Onde os índices  $m$ ,  $n$ ,  $p$  representam os modos de propagação.

Quando a antena é energizada surge uma distribuição de cargas no *patch* e outra simultaneamente no plano de terra, a Figura 14 apresenta essa distribuição.

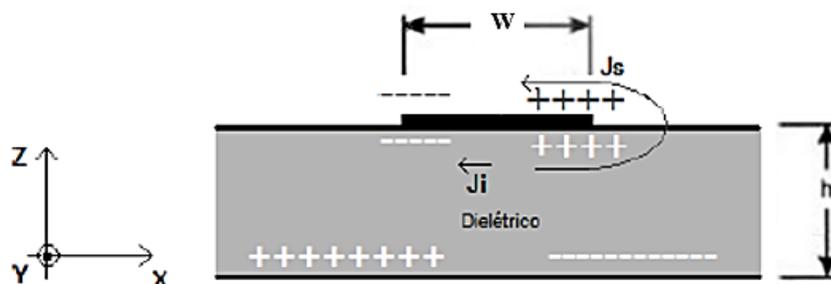


Figura 14: Comportamento das cargas na antena.

Fonte: Adaptado LACERDA et al. 2008.

A distribuição dessas cargas é dada pelo mecanismo da atração e repulsão (RICHARDS, 1988). As forças repulsivas entre as cargas na camada inferior da superfície deslocam para a

parte superior, através das bordas. Aparece a partir desse movimento uma densidade de corrente  $J_s$  e  $J_i$  na parte superior e inferior, ou seja, no *patch* e plano de terra respectivamente.

Como a altura do substrato é pequena a força de atração se sobressai sobre a de repulsão, tornando a densidade de corrente imediatamente abaixo do *patch* maior.

Aplicando o método da cavidade, descreve-se então o vetor potencial  $A_x$  que deve satisfazer a Equação 35:

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = 0 \quad (35)$$

Aplicando-se separação de variáveis tem-se:

$$A_x = [A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x)][A_2 \cos(k_y y) + B_2 \sin(k_y y)][A_3 \cos(k_z z) + B_3 \sin(k_z z)] \quad (36)$$

Tal que  $k_x$ ,  $k_y$  e  $k_z$  são os índices dos números de onda nas respectivas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , dado pelas condições de contorno. O campo elétrico relacionado ao vetor potencial é dado por:

$$E_x = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k^2 \right) A_x \quad H_x = 0 \quad (37)$$

$$E_y = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial y} \quad H_y = \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial z} \quad (38)$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_x}{\partial x \partial z} \quad H_z = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (39)$$

Tal que:

$$E_y(x' = h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (40)$$

$$H_y(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (41)$$

$$H_z(0 \leq x' \leq h, 0 \leq y' \leq L, 0 \leq z' \leq W) = 0 \quad (42)$$

Das condições de contorno obtêm-se  $B_1 = B_2 = B_3 = 0$  de maneira que o valor das constantes de propagação é dado pelas equações 43, 44 e 45:

$$k_x = \frac{m\pi}{h}, m = 0,1,2, \dots \quad (43)$$

$$k_y = \frac{n\pi}{L}, n = 0,1,2, \dots \quad (44)$$

$$k_z = \frac{p\pi}{W}, p = 0,1,2, \dots \quad (45)$$

Assim substituindo as constantes de propagação na função vetor potencial  $A_x$  têm-se pela expressão:

$$A_x = A_{mnp} \cos(k_x x') \cos(k_y y') \cos(k_z z') \quad (46)$$

O método da cavidade é simples de se implementar porém, suas aproximações podem ter desvantagens, dependendo da antena a ser estudada o modelo gerado não oferece um resultado aceitável, um exemplo dessa limitação são antenas com *patch* espesso, com *patch* empilhado ou arranjos de antenas. Caso a modelagem termine em algum dos casos citados a antena deverá ser modelada pelo método da onda completa.

#### 4.5 MÉTODO DA ONDA COMPLETA

A análise com modelos aproximados permite rapidez em simulações e baixo esforço computacional, entretanto, cada um desses modelos carrega uma parcela de erro inerente, que decorre das simplificações do modelo em questão, por exemplo: simplificações em alta frequência e materiais anisotrópicos. A análise pode ser feita com métodos matemáticos mais rigorosos. A propagação da microfita é alterada na fronteira dielétrico-ar, tornando-se um modo híbrido, o método de análise deve considerar esse comportamento híbrido. Os métodos que consideram esse comportamento são chamados de onda completa. Os mais citados na

literatura são: potenciais vetoriais de Hertz, Linha de Transmissão Equivalente e Linha de transmissão transversa.

## 5 METASSUPERFÍCIE

O estudo dos materiais é o fator que mais impulsionou o avanço tecnológico nos últimos anos, se estendendo por todos os campos da pesquisa científica. A descoberta de metamateriais por Bose em 1898 criou um novo campo de estudos e inúmeras possibilidades de aplicações. Nesse capítulo será apresentado um estudo sobre metamaterias/ Metassuperfície onde serão apresentadas suas principais características, propriedades e aplicações.

### 5.1 MATERIAIS ARTIFICIAIS

Os estudos iniciais sobre o conceito de materiais artificiais iniciam no final do século XIX, em 1898 Jagardis Chandra Bose realizou um experimento com estruturas torcidas que anos depois foram creditadas como meios quirais<sup>3</sup>. Em 1967 Victor Veselago estudava o comportamento de ondas planas propagando-se em materiais que apresentavam permeabilidade e permissividade simultaneamente negativas (VESELAGO, 1968).

A observação mostrou que a propagação de ondas nesse material seria diferente dos meios convencionais, tais como: velocidade de grupo e de fase antiparalelas, inversão do deslocamento Doppler, refração anômala, inversão do sinal das condições de contorno que relacionam as componentes normais do campo elétrico e magnético na interface entre um meio convencional e um meio metamaterial; nessa mesma interface, ocorre a inversão da lei de Snell e a refração negativa (EDVALDO, 2012).

Veselago especulou a respeito da existência e das implicações de um índice de refração negativo. Até recentemente essas estruturas obtinham separadamente índices de permissividade  $\epsilon$  e permeabilidade  $\mu$  negativos, por meio de fios finos e anéis partidos respectivamente (PENDRY, 1996; 1999). Essas estruturas foram posteriormente unidas para criar o primeiro elemento volumétrico com índice de refração negativo (NIM – *Negative-index Metamaterial*).

Os metamateriais são projetados de diversas maneiras distribuindo periodicamente ou não pequenas formas geométricas em um volume. Segundo Kuester esse conceito é facilmente estendido a uma estrutura bidimensional com mesmo padrão. Na literatura essas estruturas são tratadas como *metafilme* ou *Metassuperfície*.

---

<sup>3</sup>Um objeto quiral é aquele cuja imagem especular não coincide com o objeto – tal como uma mão esquerda tem, como imagem no espelho, uma mão direita (e vice-versa).

Simplificadamente os Metassuperfícies podem ser entendidos como um equivalente bidimensional de um metamaterial, eles também são considerados um caso especial de superfície seletora de frequência (ZHU, 2013).

Os metamateriais são objetos de estudo dos grandes centros de pesquisa e novas aplicações surgem a cada dia, por exemplo, (ZHU et al. 2013; 2014), apresentam propostas de antenas de microfita com possibilidade de ajuste de polarização ou banda de atuação. Em Marquís et al. 2002, os modos EM propagados na guia de onda estão abaixo da frequência de corte do modo fundamental o que corrobora com a teoria, e simultaneamente mostra as propriedades da permeabilidade  $\mu$  negativa de um SRR (*Split Ring Resonator*).

Aydin et al. apresenta em seu trabalho, uma relação da dependência da ressonância magnética de um SRR com sua geometria. No SRR os arcos metálicos são responsáveis pela reposta elétrica com comportamento e distribuição de carga similar a um dipolo, enquanto que seu gap é responsável por sua resposta magnética.

Em Holloway uma proposta de GSTCs - *generalized sheet transition conditions*, para interação de campos EM macroscópicos com *Metassuperfícies* em um meio homogêneo. Descritos originalmente em termos de superfícies macroscópicas polarizadas e posteriormente em termos de susceptibilidade ou ainda descritas em termos de suas impedâncias.

## 5.2 MATERIAIS RHM E LHM

Veselago postulou que caso a permeabilidade ou a permissividade do material fossem negativos, implicaria na impossibilidade de propagação de ondas eletromagnéticas (CAETANO et al. 2013). Esse fenômeno ficou conhecido como *electromagnetic band gap* (EBG). No caso de ambos os valores serem positivos surgem os materiais RHM (*right-handed materials*) onde a refração ocorre positivamente. Há também os materiais em que o índice de refração é positivo e os valores de permeabilidade e permissividade são ambos negativos a esses materiais dá-se o nome *left handed materials* – (LHM), onde ocorre refração negativa.

O índice de refração mensura como o feixe será defletido na transição entre dois meios distintos. Em caso de índice positivo a deflexão ocorre na direção oposta a normal à superfície de fronteira. Em caso de índice negativo o mesmo será defletido na direção da normal a superfície da onda incidente. Na Figura 15 é apresentado um esquema para os casos onde o índice de refração é positivo e negativo ilustrando a relação entre os materiais de mão direita e esquerda.

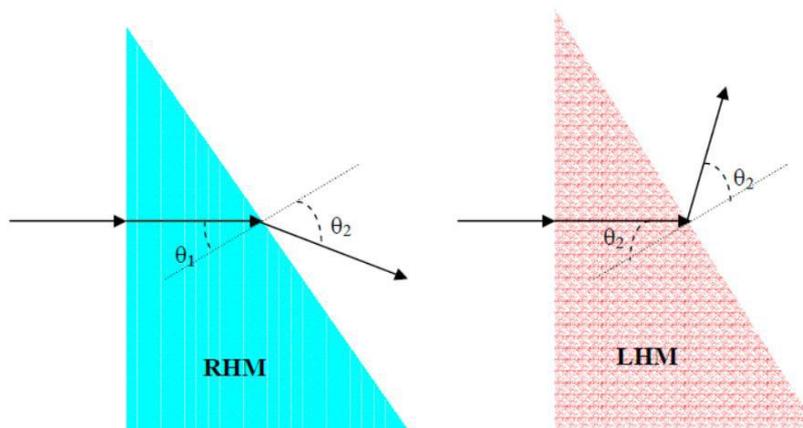


Figura 15: Propagação em um meio com índice de refração positivo (RHM) e com índice negativo (LHM).

Fonte: SUDHAKARAN et al. 2006.

Para os materiais RHM e LHM a velocidade de grupo mensura a quantidade de energia transportada pela onda, bem como a velocidade de fase caracteriza a direção de propagação.

Em materiais indicados como da mão direita RHM a energia e as frentes de onda EM, viajam afastando-se da fonte como a apresentado na Figura 16 a), análogo a esse comportamento em um material LHM as frentes de onda viajam na direção oposta, de volta para a fonte, em quanto que a energia continua a se afastar da fonte, como pode ser visto na Figura 16 b).

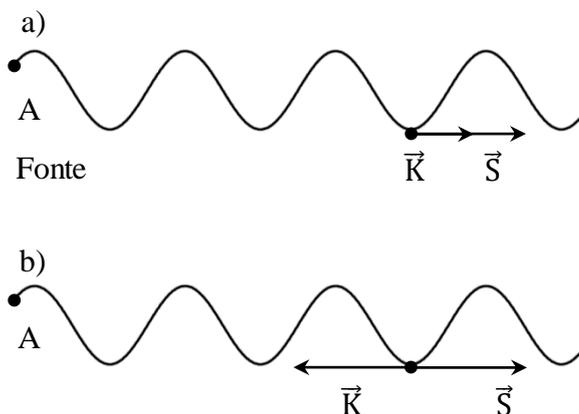


Figura 16: (a) Propagação da onda eletromagnética em um material da mão direita. (b) propagação da onda em um material da mão esquerda.

Fonte: Autoria própria, 2016.

O produto vetorial entre os campos  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  produz o vetor de onda  $\vec{k}$  que formam a trindade da mão direita. No caso de propagação convencional o vetor de onda está no sentido da direção de propagação, esse sentido é dado pelas equações de Maxwell na forma harmônica.

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (47)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} - j\omega\vec{D} \quad (48)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (49)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (50)$$

Tal que  $\vec{B} = \mu\vec{H}$  e  $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$

Resolvendo as equações para o caso fundamental do meio obtém-se a solução dada pela Equação 51 que representa o mecanismo de propagação convencional.

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\vec{B} \quad (51)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = \omega\vec{D} \quad (52)$$

O vetor  $\vec{k}$  é positivo, e representa um mecanismo de propagação que configura a trindade da mão direita, a Figura 17 representa a forma de propagação em questão.

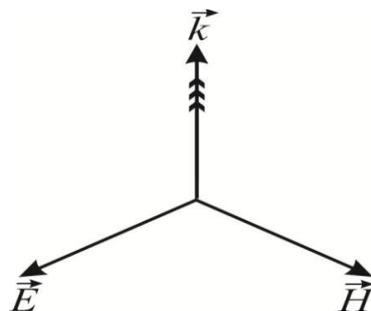


Figura 17: Representação do produto vetorial entre o campo elétrico.

Fonte: PIRES, 2012.

Na forma de propagação não-convencional o produto vetorial resulta no vetor de onda com sentido oposto à direção de propagação configurando a trindade da mão esquerda. Um material LHM é um meio eletromagnético que apresenta permissividade  $\epsilon$  e permeabilidade  $\mu$  negativas. A natureza dos parâmetros negativos aparece quando as ondas eletromagnéticas exibem velocidade de grupo e de fase anti-paralelas. As equações 53 e 54 Apresentam as funções de campo obtidas para o caso LHM.

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega \vec{B} \quad (53)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \vec{D} \quad (54)$$

onde

$$\epsilon = -\epsilon_1$$

$$\mu = -\mu_1$$

As Equações 53 e 54 estão representadas graficamente na Figura 18, o vetor  $\vec{k}$  se mostra negativo nessa configuração.

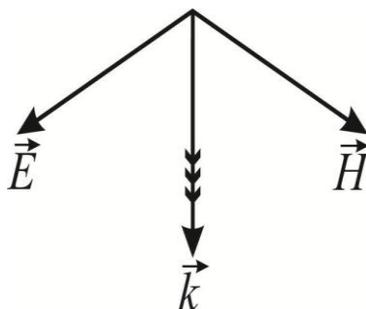


Figura 18: Representação do produto vetorial entre o campo elétrico, campo magnético e vetor de onda.

Fonte: PIRES, 2012.

Como a frequência é sempre positiva, a velocidade de fase ao longo da normal da onda, será sempre positiva em caso de  $k > 0$  e negativa caso o mesmo seja negativo  $k < 0$ .

### 5.3 PERMISSIVIDADE NEGATIVA

Os meios artificiais com permissividade negativa foram apresentados por volta de 1950, na época estudava-se como simular o comportamento do plasma. Em um trabalho apresentado em 1962 o plasma poderia ser simulado através de arranjos de fios condutores disposto paralelamente (ROTMAN, 1962). Construídos para baixas frequências esses meios começaram a serem implementados em 1990. A Figura 19 apresenta a configuração de fios finos dispostos paralelamente, essa configuração exibe uma forte resposta em uma faixa de frequência.

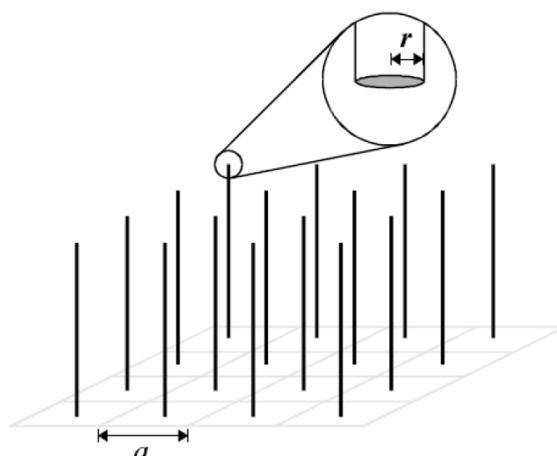


Figura 19: Arranjo de fios condutores dispostos de forma a produzir um meio com permissividade negativa.

Fonte: ROTMAN, 1962.

O diâmetro e o espaçamento dos fios devem ser dimensionados de maneira que esses sejam muito inferiores ao comprimento efetivo do condutor, assim, a onda eletromagnética que atravessa o material perceberá o arranjo de elementos como que uma estrutura homogênea. Portanto ainda que não seja fisicamente homogêneo o material será eletricamente homogêneo.

A permissividade efetiva  $\varepsilon_{ef}$  comporta-se com o modelo de Drude-Lorentz, para baixas frequências em arranjos de fios finos com utilização em metamateriais (PENDRY et al. 1996), essa relação é dada pela Equação 55.

$$\varepsilon_{ef}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2 - \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + j\omega\xi} \quad (55)$$

Tal que

$\omega_p$  é a frequência angular do plasma.

$\xi$  é a constante de amortecimento.

$\omega_0$  é a menor frequência angular que limita a banda elétrica inferior proibida.

A frequência  $\omega_p$  e a frequência  $\omega_0$  são determinadas pela geometria da malha, e não pela carga, massa efetiva  $m_{ef}$  ou pela densidade efetiva de elétrons  $n_{ef}$ . A frequência de plasma é apresentada na Equação 56.

$$\omega_p^2 = \frac{n_{ef}e^2}{\epsilon_0 m_{ef}} \quad (56)$$

O deslocamento de elétrons produz uma densidade de elétrons  $n$ .

$$n_{ef} = n \frac{\pi r^2}{a^2} \quad (57)$$

De maneira que  $r$  é o raio do condutor e  $a$  é o parâmetro de rede da estrutura da Figura 20. portanto obtêm-se a massa efetiva dos elétrons pela expressão.

$$m_{ef} = n \frac{\mu_0 \pi r^2 e^2 n}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{r}\right) \quad (58)$$

Considerando as expressões para a massa e para a densidade de elétrons a Equação para frequência de plasma é:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (59)$$

Para o caso  $\omega_0 < \omega < \omega_p$ , a permissividade é negativa. Como a frequência de plasma pode se fixada em qual quer valor, alguns fenômenos que aparecem em frequências podem ser adequadas a frequências mais baixas. Caso os fios apresentem alguma descontinuidade elétrica surge então uma frequência  $\omega_0$  não nula, que resulta na diminuição da região de

permissividade negativa que será confinada ao intervalo entre  $\omega_0$  e  $\omega_p$ . Para esse sistema a constante de amortecimento é dada por:

$$\xi = \frac{\varepsilon_0 a^2 \omega_p^2}{\pi \sigma r^2} \quad (60)$$

Onde  $\sigma$  é a condutividade do metal

Na Figura 20 pode ser observado o diagrama de dispersão para uma estrutura com fios de 20  $\mu\text{m}$  de espessura. Para esse arranjo a frequência de plasma é de aproximadamente 9 GHz, para valores menores que esse a permissividade é negativa e o vetor de onda é imaginário (PENDRY et al. 1998).

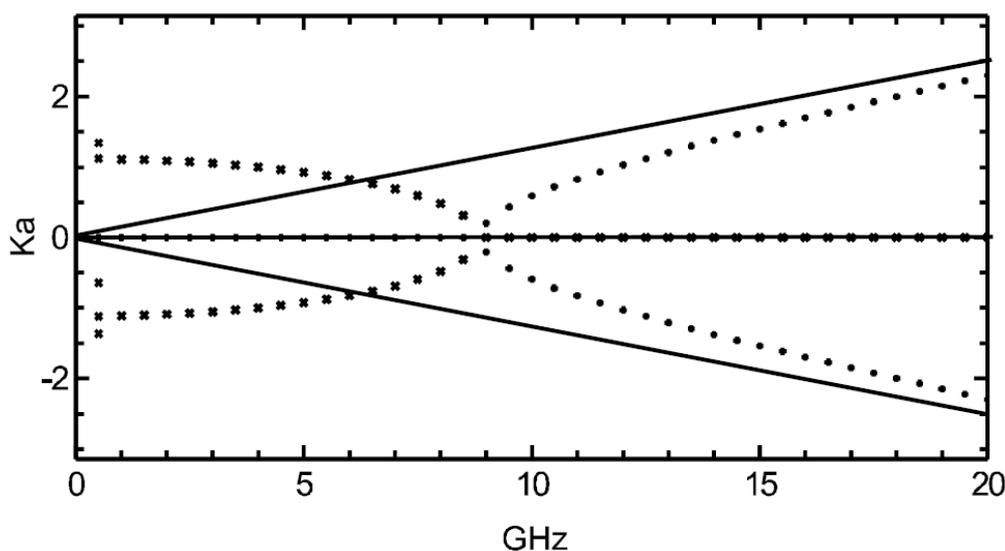


Figura 20: Diagrama de dispersão. A linha contínua é a dispersão da luz no espaço livre; o tracejado em xis é a parte imaginária e o tracejado em ponto é a parte real.

Fonte: PENDRY et al. 1998.

#### 5.4 PERMEABILIDADE NEGATIVA

A obtenção de materiais artificiais com permeabilidade negativa foi iniciada por Pendry em 1999. Para produzir uma permeabilidade negativa Pendry utilizou-se de vários ressoadores na forma de anéis com fenda (SRR – *Split Ring Resonator*) e com esses construiu um arranjo periódico de elementos. Na Figura 21 pode-se observar uma ilustração dos anéis propostos por Pendry (PENDRY et al. 1999).

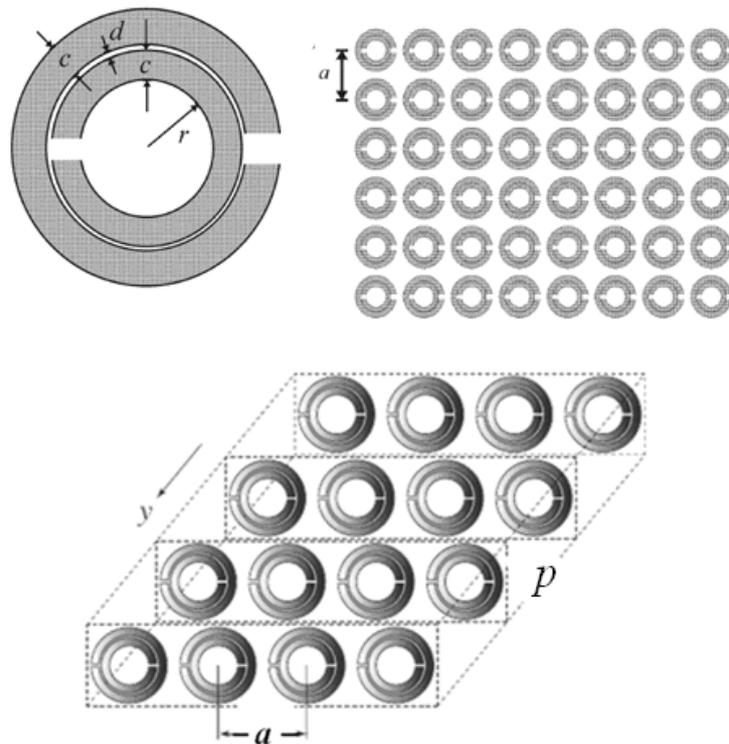


Figura 21: Ressonador em forma de anel (SRR).

Fonte: PENDRY et al. 1999.

Um campo magnético variante no tempo de maneira que sua propagação seja perpendicular à face da estrutura produz uma força eletromotriz no plano, provocando o deslocamento de cargas no condutor. O *gap* no anel produz um efeito capacitivo no circuito planar dando origem a uma frequência de ressonância magnética, que é definida pela geometria do elemento. O anel interno deve gerar uma grande capacitância para poder diminuir a frequência de ressonância.

Cara SRR pode ser visto como um átomo magnético de um material. A Equação 61 traz a relação que descreve o comportamento da permeabilidade efetiva no material.

$$\mu_{ef} = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + j\omega\gamma} \quad (61)$$

De maneira que:

$\omega_{0m} = \frac{3Pc_0^2}{\pi \ln\left(\frac{2cr^3}{d}\right)}$  é a frequência de ressonância magnética. Essa expressão depende

diretamente da geometria do elemento e do arranjo.

$\gamma = \frac{2PR}{r\mu_0}$  é o fator de amortecimento devido as perdas no condutor.

$F = \frac{\pi r^2}{a^2}$  é a área fracional da célula unitária ocupada pelo SRR onde  $r$  é o raio interno do anel,  $c$  é a largura do anel,  $d$  é o espaço radial entre os anéis concêntricos,  $R$  é a resistividade e  $P$  é o período espacial do eixo ordenado  $y$  e  $a$  é a periodicidade em  $x$ .

Considere o caso onde a permeabilidade efetiva  $\mu_{ef} < 0$  e a frequência de ressonância esta definida no intervalo,  $\omega_{0m} < \omega < \omega_{pm} = \frac{\omega_{0m}}{\sqrt{1-F}}$ , onde  $\omega_{pm}$  é a frequência de plasma.

## 5.5 ÍNDICE DE REFRAÇÃO NEGATIVO

Ondas eletromagnéticas inclusive a luz podem ser entendidas pela regra da mão direita. Essa regra caracterizada pelo posicionamento dos dedos da mão direita, onde a direção do polegar indica a direção do campo  $\vec{E}$  o indicador e referem-se à direção do campo magnético  $\vec{H}$  e a direção de propagação é dada pelo dedo médio, ambos defasados  $90^\circ$ .

Das equações de Maxwell tem-se:

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (62)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (63)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (64)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (65)$$

Onde  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  e  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ , substituindo os termos nas equações de Maxwell têm-se:

$$\nabla_x \nabla_x \vec{E} = -\nabla_x \frac{\partial \mu \vec{H}}{\partial t} \quad (66)$$

$$\nabla_x \nabla_x \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\mu \frac{\partial(\nabla_x \vec{H})}{\partial t} \quad (67)$$

Considere  $\nabla_x \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  e  $\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) = \nabla \cdot \vec{D} = 0$ , assim obtêm-se:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \frac{\partial^2 \vec{D}}{\partial t^2} \quad (68)$$

Por fim aplicando novamente a constante constitutiva na Equação 66 obtêm-se a expressão para o campo elétrico no espaço livre:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (69)$$

Analogamente obtêm-se o campo magnético.

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (70)$$

A solução para o caso de ambos (permissividade  $\varepsilon$  e permeabilidade  $\mu$ ) serem negativos é uma forma exponencial onde  $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$  é o índice de refração, e  $k$  é o numero de onda, a relação entre o numero de onda e o índice de refração é dado por (PENDRY et al., 1999).

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu} = k_0 n; (k = \alpha + j\beta) \quad (71)$$

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n} \quad (72)$$

$$Z = \frac{k}{\omega \varepsilon} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \xi Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \cdot Z_0 \quad (73)$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz  $k_0$  é o número de onda no espaço livre,  $Z_0$  é a impedância no espaço livre,  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa e  $\mu_r$  é a permeabilidade relativa. Essas considerações possibilitam chegar à expressão para uma onda plana que se propaga na direção Z (CALOZ; ITOH, 2006).

$$\vec{E} = E_0 e^{jkz - j\omega t} \vec{a}_x \quad (74)$$

$$\vec{H} = H_0 e^{jkz - j\omega t} \vec{a}_y \quad (75)$$

O vetor de *Poynting*, que indica a direção de propagação e a quantidade de energia da onda surge do produto vetorial dos campos  $E$  e  $H$ , é dado pela Equação 76.

$$\vec{S} = \frac{1}{2} Re(\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad (76)$$

$$\vec{S} = \frac{|E_0|^2}{2} Re\left(\frac{1}{Z^*}\right) e^{-2\alpha z} \vec{a}_z \quad (77)$$

Os materiais artificiais podem apresentar comportamento anisotrópico e portanto, seriam representados mais adequadamente por tensores (CALOZ; ITOH, 2006). Essa relação pode ser dada pelas equações 78 e 79.

$$[\epsilon] = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (78)$$

$$[\mu] = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zz} \end{bmatrix} \quad (79)$$

## 5.6 INVERSÃO DA LEI DE SNELL

Uma onda plana com TEM incidente em um meio cuja polarização é paralela a sua propagação, têm a forma:

$$\vec{E}_{inc} = \vec{E}_i e^{j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \quad (80)$$

A propagação da onda parte do meio 1 até chegar a uma região de fronteira com o meio 2, onde normalmente uma parte da energia será refletida e a outra será transmitida. As equações 81 e 82 apresentam as formas para Equação de transmissão e reflexão.

$$\vec{E}_{refl} = \vec{E}_r e^{j\vec{k}_r \cdot \vec{r}} \quad (81)$$

$$\vec{E}_{trans} = \vec{E}_t e^{j\vec{k}_t \cdot \vec{r}} \quad (82)$$

Essa situação pode ser observada na Figura 22 onde o comportamento das ondas é apresentado por meio de um esquema de transmissão e reflexão.

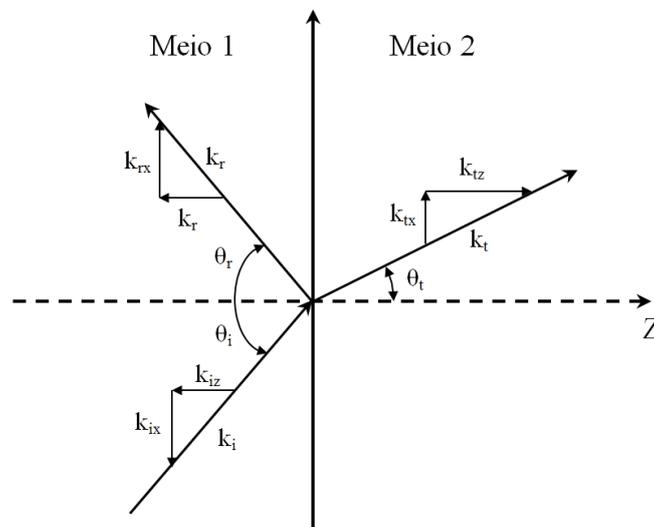


Figura 22: Incidência de ondas planas na fronteira entre dois meios.

Fonte: Autoria própria, 2016.

As componentes de tangenciais do campo tanto elétrico como magnético são nulas no ponto  $Z = 0$ . Dessa forma as componentes de campo devem ser contínuas para todos os valores de  $x$  e  $y$  no plano  $Z$ . Assim, o campo total é a soma dos campos incidentes e refletidos no Meio 1 e o campo transmitido no Meio 2 (CALOZ; ITOH, 2006). Essas duas últimas considerações podem ser escritas através da Equação 83.

$$\vec{E}_i e^{-j(k_{ix}x+k_{iy}y)} + \vec{E}_r e^{-j(k_{rx}x+k_{ry}y)} = \vec{E}_t e^{-j(k_{tx}x+k_{ty}y)} \quad (83)$$

Considerando um casamento de fase na interface, ou seja, as constantes e fase ao longo dos eixos  $x$  e  $y$  são iguais para ambas às ondas. Portanto as componentes tangenciais de cada vetor podem ser expressas com uma decomposição vetorial como observado anteriormente na Figura 22, tem-se que:

$$k_{ix} = k_i \text{sen}(\theta_i) \quad (84)$$

$$k_{rx} = k_r \text{sen}(\theta_r) \quad (85)$$

$$k_{tx} = k_t \text{sen}(\theta_t) \quad (86)$$

Utilizando-se das condições de contorno impostas as equações das componentes tangencias surgem as expressões.

$$k_i \text{sen}(\theta_i) = k_r \text{sen}(\theta_r) \quad (87)$$

$$k_0 n_i \text{sen}(\theta_i) = k_0 n_r \text{sen}(\theta_r) \quad (88)$$

Como se trata de um mesmo meio  $n_i = n_r$ .

$$\text{sen}(\theta_i) = \text{sen}(\theta_r) \quad (89)$$

$$\theta_i = \theta_r \quad (90)$$

Essa recorrência é conhecida como lei da reflexão de Snell, onde a mesma pode ser aplicada em meios RH e LH. Isso é possível por que os campos incidentes e refletidos estão relacionados através do mesmo meio. Para a relação de meios distintos obtêm-se.

$$k_0 n_i \text{sen}(\theta_i) = k_0 n_t \text{sen}(\theta_t) \quad (91)$$

$$n_i \text{sen}(\theta_i) = n_t \text{sen}(\theta_t) \quad (92)$$

Segundo a lei da refração de Snell para essa configuração, diz que o sinal apresentará resposta contrária ao convencional caso parta de um meio RH e incida em um meio LH, o mesmo vale para o inverso partindo de um meio LH para incidir em um meio RH.

A mudança é esperada em decorrência do aparecimento do sinal negativo no índice de refração do meio LH. Observa-se na Figura 23 que o ângulo do feixe de onda transmitido se altera quando em um meio LH. O vetor de onda  $\vec{k}$  e o vetor de Poynting  $\vec{s}$  apareceram com mesmo sentido de propagação para o meio RH, já no meio LH vetor de onda tem sentido contrario a propagação, porem, o vetor de Poynting permanece em seu sentido anterior.

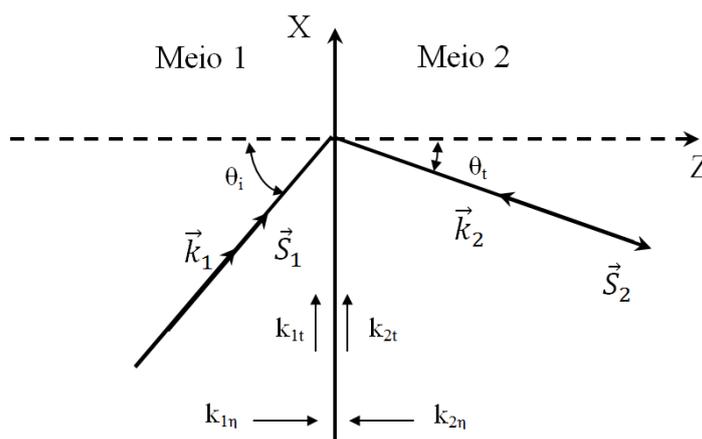


Figura 23: Refração negativa em dois meios diferentes.

Fonte: Autoria própria, 2016.

No caso do meio 1 e 2 serem LH ocorrerá um cancelamento mútuo dos dois sinais negativos dos índices de refração de ambos.

## 5.7 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS ARTIFICIAIS

A combinação dos arranjos das diferentes estruturas como os SRR e os fios finos por exemplo, podem gerar basicamente quatro tipos de meios (RICHARD, 2006).

- O meio onde a permissividade  $\epsilon$  e a permeabilidade  $\mu$  são positivos, ou duplamente positivos.
- O meio elétrico com permissividade  $\epsilon$  negativa e permeabilidade  $\mu$  positiva.
- O meio elétrico que possui permissividade  $\epsilon$  positiva e permeabilidade  $\mu$  negativa.
- O meio artificial que possui tanto a permissividade  $\epsilon$  como a permeabilidade  $\mu$  negativos, meios duplamente negativos.

Na Figura 24 abaixo são apresentados às quatro configurações de tipos de meios, baseando-se nos parâmetros elétricos.

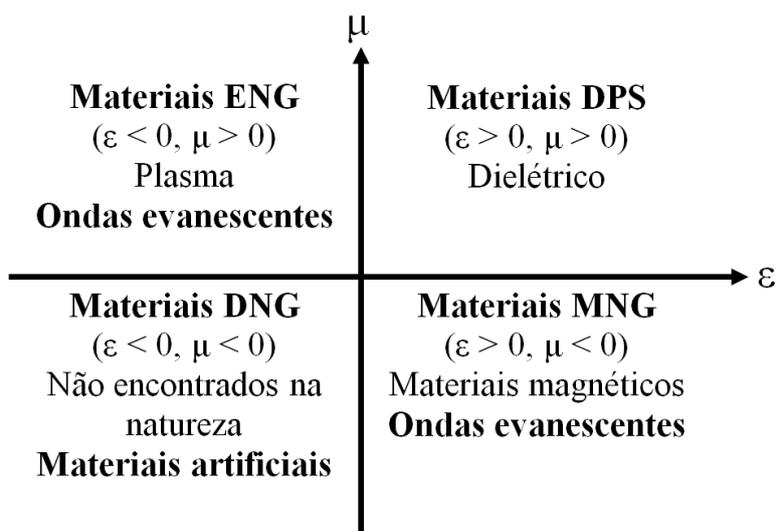


Figura 24: Classificação dos parâmetros dos meios eletromagnéticos possíveis.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Onde ENG Épsilon negativo, DPS Duplamente positivo, DNG Duplamente negativo, MNG Mi negativo.

Materiais de mão esquerda são interessantes fisicamente, constituídos artificialmente por fios finos (TW) e anéis partidos (SRR), tem limitações no que diz respeito à transmissão<sup>4</sup>. As estruturas artificiais em questão apresentam altas perdas e largura de banda estreita.

Essas perdas foram constatadas por (SMITH et al., 2000) e (SMITH; KROLL, 2000), a otimização dos mecanismos de acoplamento apresentada posteriormente melhoraram o desempenho das estruturas LH de maneira que as perdas passaram de 30 para 4 dB, na faixa de frequência de 13.6 a 14.8 GHz. Esses valores de desempenho ainda estão distantes dos parâmetros de engenharia praticados para a maior parte das aplicações.

Devido a baixa capacidade de transmissão outras aplicações tem sido desenvolvidas com meios LH, um exemplo, é “invisibilidade” parcial obtida por objetos metálico na faixa de 8.5 GHz (SCHURIG et al., 2006) e (MACI, 2010).

<sup>4</sup> Geralmente, estruturas constituídas de elementos ressonantes não constituem um bom meio de transmissão para um sinal modulado.

## 6 METODOLOGIA

Na literatura existem inúmeras possibilidades para adequação de uma antena de microfita às condições de projeto. Podem ser utilizadas modificações como mudanças no substrato e elementos de superfície que modificam diretamente o *patch*. Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento das antenas de microfita de referência e com a estrutura Metassuperfície proposta.

### 6.1 ANTENA PADRÃO

O projeto utilizou o método da cavidade ressonante (RICHARDS, 1988) para o cálculo das dimensões do *patch* e a alimentação do mesmo foi feita através de uma linha de microfita cujas medidas foram obtidas através do método da linha de transmissão (BALANIS, 2005). A análise das antenas de referência e das antenas com estruturas Metassuperfície aplicadas foi realizada previamente em um estudo computacional por meio do programa HFSS®.

A antena padrão escolhida foi uma microfita retangular projetada para a frequência de 2.45 GHz. Três tipos de materiais foram utilizados nas simulações. A Tabela 2 contém as especificações dos materiais utilizadas no processo de fabricação.

Tabela 2: Materiais utilizados na fabricação das antenas.

<b>Material</b>	<b>RT5880</b>	<b>FR4</b>	<b>RT6010</b>
<b>h (mm)</b>	1.5700	1.5700	1.9000
<b><math>\epsilon_R</math></b>	2.2000	4.4000	10.2000
<b>Tan(<math>\delta</math>)</b>	0.0009	0.0200	0.0023

Fonte: Autoria própria, 2016.

Com os materiais apresentados na Tabela 2 e uma frequência de operação conhecida foram projetadas as antenas de referência através das equações referentes ao capítulo de microfita do presente trabalho. Foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN 77 para dimensionar as antenas. Na Figura 25 são apresentados os parâmetros de uma microfita retangular com *inset feed*.

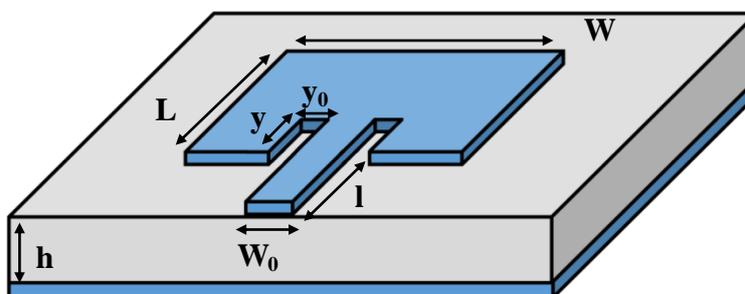


Figura 25: Antena padrão simulada.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tal que

$W$  é a largura da plaqueta do *patch*

$L$  é o comprimento do *patch*

$W_0$  é a largura da linha de microfitas

$h$  é a espessura do substrato

$y_0$  é a largura do *inset feed*

$y$  é o comprimento do *inset feed*

$l$  é o comprimento da linha de transmissão

Na Tabela 3 estão apresentadas as medidas referentes às antenas projetadas.

Tabela 3: Dimensões das antenas projetadas em (mm).

<b>Material</b>	<b>RT5880</b>	<b>FR4</b>	<b>RT6010</b>
<b>W</b>	48.4000	37.2600	25.8700
<b>L</b>	40.5000	28.8400	18.8600
<b>W<sub>0</sub></b>	4.8370	3.0020	1.7820
<b>y<sub>0</sub></b>	2.4190	1.5010	0.8910
<b>y</b>	12.3700	9.5760	6.8280
<b>l</b>	24.9280	18.3820	12.6820

Fonte: Autoria própria, 2016.

As células foram aplicadas na forma de um arranjo periódico (Metassuperfície) no *patch* e no plano de terra das antenas (ARAÚJO, 2009).

## 6.2 PROJETO DA CÉLULA METASSUPERFÍCIE

As estruturas artificiais escolhidas para serem implantadas nas antenas foram baseadas nas desenvolvidas por Rotmant, 1862 e Pendry, 1999. A célula desenvolvida consiste de uma adaptação da estrutura em anel partido com fio fino para uma forma planar, nela os elementos foram sobrepostos de maneira a tornarem-se uma representação 2D do padrão original em 3D. Na Figura 26 podem ser observados os modelos propostos utilizados no projeto das antenas.

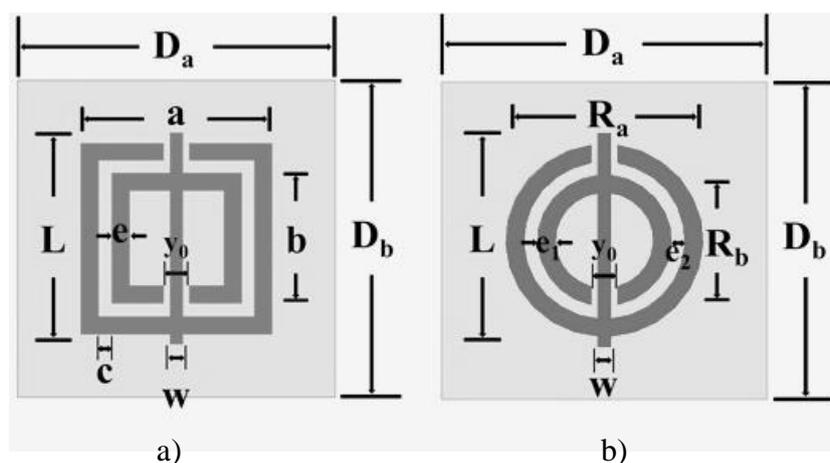


Figura 26: Estruturas Metassuperfície a) retangular, b) circular.

Fonte: Aatoria própria, 2016.

A célula utilizada neste estudo foi desenvolvida em função do comprimento de onda como citado em (ZHUL, 2013). Os valores escolhidos são frações do comprimento de onda ( $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  ou 12,24, 8,16 e 6,12 mm), as medidas da estrutura proposta são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Dimensões utilizadas nas células do tipo retangular (mm).

$\lambda/20$								
$D_a$	$D_b$	$a$	$b$	$e$	$w$	$c$	$L$	$y_0$
12.2400	12.2400	5.5000	3.7600	0.5000	0.3500	0.3700	6.1200	0.7500
$\lambda/15$								
$D_a$	$D_b$	$a$	$b$	$e$	$w$	$c$	$L$	$y_0$
14.2800	14.2800	7.3600	5.0000	0.6700	0.4700	0.5100	8.1600	1.0000
$\lambda/10$								
$D_a$	$D_b$	$a$	$b$	$e$	$w$	$c$	$L$	$y_0$
18.3600	18.3600	11.0400	7.5000	1.000	0.7000	0.7700	12.2400	1.5000

Fonte: Aatoria própria, 2016.

Tabela 5: Dimensões utilizadas nas células do tipo circular (mm).

$\lambda/20$								
Da	Db	Ra	Rb	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	w	L	y <sub>0</sub>
12.2400	12.2400	5.5000	3.7600	0.5000	0.3700	0.3500	6.1200	0.7500
$\lambda/15$								
Da	Db	Ra	Rb	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	w	L	y <sub>0</sub>
14.2800	14.2800	7.3600	5.0000	0.6700	0.5100	0.4700	8.1600	1.0000
$\lambda/10$								
Da	Db	Ra	Rb	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	w	L	y <sub>0</sub>
18.3600	18.3600	11.0400	7.5000	1.0000	0.7700	0.7000	12.2400	1.5000

Fonte: Aatoria própria, 2016.

Embora o tamanho da estrutura seja variável, o parâmetro de rede se mantém constante, ou seja, a distribuição dos elementos terá sempre o mesmo comprimento em todos os materiais como observado na Figura 27.

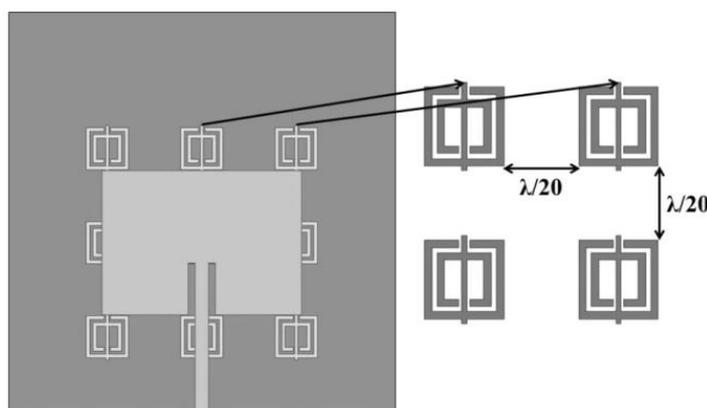


Figura 27: Células Metassuperfície espaçadas  $\lambda/20$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

Já a célula da Metassuperfície terá seu tamanho determinado conforme a fração de comprimento de onda que ela representa como mencionado nas Tabelas 4 e 5, o valor da constante de rede será  $\lambda/20$  independente do tamanho da célula.

### 6.3 APLICAÇÃO DAS CÉLULAS

O processo de aplicação das Metassuperfícies foi dividido em dois tipos, os que dizem respeito à aplicação no plano de terra e aqueles referentes ao *patch* da microfita. Em ambos os

casos as respostas das antenas foram alteradas após a inserção das estruturas Metassuperfície. A aplicação das geometrias no plano de terra e no *patch* tem como objetivo analisar os parâmetros das antenas (largura de banda, perda de retorno e diagramas de irradiação) mediante a modificação imposta e ponderar a respeito das alterações sofridas com base nos valores obtidos da estrutura de referência.

### 6.3.1 No Patch

A aplicação das estruturas consistiu de uma forma impressa no *patch* da antena, e essa geometria foi subtraída do cobre para diversos tamanhos de células, variando os comprimentos de onda pré-selecionados  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ . A aplicação foi realizada em todos os materiais, resultando num total de 18 antenas. Na Figura 28 são apresentadas as células quadrada e circular impressas no *patch* da antena FR4. A geometria em questão tem dimensão  $\lambda/10$  para ambos os casos.

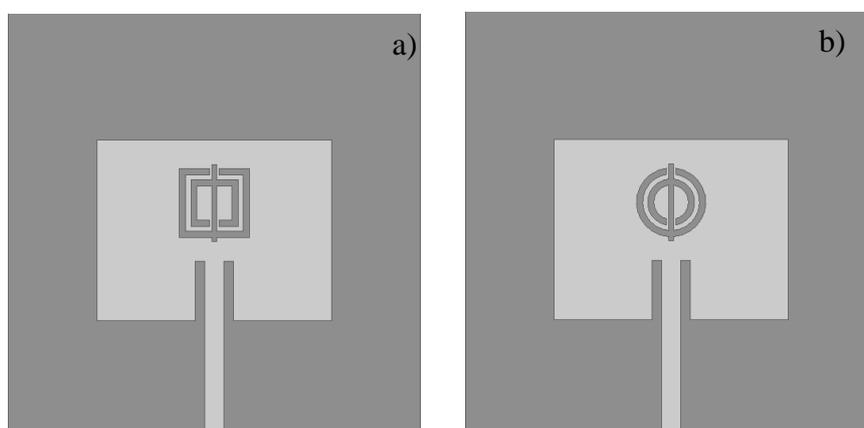


Figura 28: Metassuperfície desenvolvido para a antena FR4 com comprimento  $\lambda/10$  a) retangular, b) circular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Conforme a literatura, tais elementos podem ser comparados com antenas com elementos parasitas no *patch*. Em Xu et al. (2013), González-Ovejero et al. (2015) e Cai et al. (2015) são apresentadas algumas possíveis modificações de superfície. A possibilidade de reconfigurar parâmetros de uma antena modificando sua superfície é uma característica das Metassuperfícies.

### 6.3.2 No Patch (arranjo periódico)

As geometrias aplicadas foram replicadas no *patch* de maneira que o número de termos para cada antena dependerá da dimensão do mesmo, bem como a dimensão da própria célula. Partindo do centro da placa metálica essas formas serão distribuídas com espaçamento  $\lambda/20$  até que toda a superfície do *patch* esteja preenchida pelas células. Em todos os casos as geometrias foram distribuídas de forma periódica.

Na Figura 29 são apresentadas as antenas projetadas com material RT5880 para o comprimento de ondas  $\lambda/20$  de células com geometria retangular e circular.

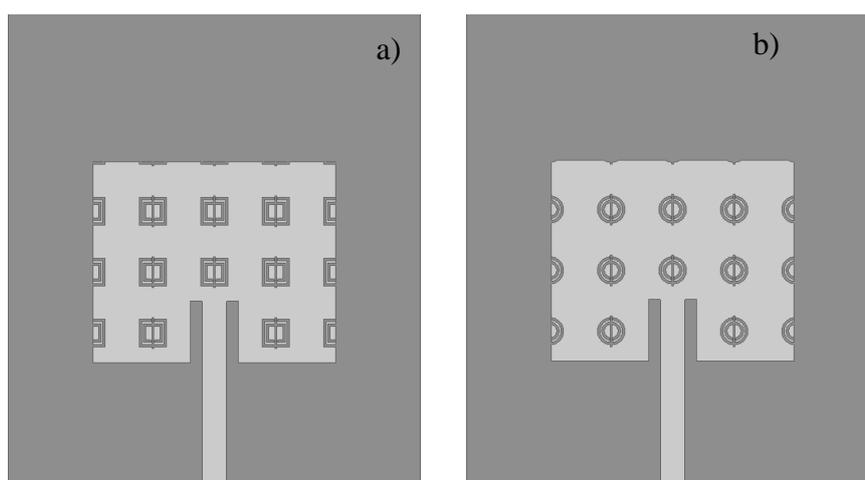


Figura 29: Metassuperfície desenvolvida para a antena RT5880 com comprimento  $\lambda/20$  a) retangular, b) circular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

As formas foram aplicadas em todos os materiais gerando um total de 18 antenas. O processo de replicar as células não foi possível em todas as antenas devido o tamanho reduzido de alguns exemplares.

A aplicação das células com tamanho  $\lambda/10$  provou ser inadequada para as antenas projetadas com material RT6010 e tornou impraticável a utilização de um arranjo já que a mesma tinha dimensão semelhante ao tamanho da célula. Na Figura 30, a antena simulada com RT6010 é apresentada junto com a célula da Metassuperfície com tamanho  $\lambda/10$  quadrada e circular.

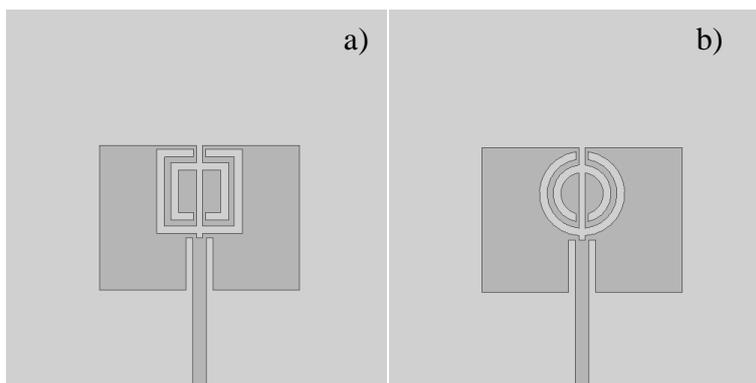


Figura 30: Antenas simuladas com RT6010 e célula de comprimento  $\lambda/10$  a) retangular, b) circular.

Fonte: Aatoria própria, 2016.

### 6.3.3 Plano de terra

As estruturas foram distribuídas em dois grupos, o primeiro com um arranjo de  $3 \times 3$  elementos simetricamente distribuídos e segundo com  $4 \times 4$  elementos também igualmente distribuídos para formar a Metassuperfície. Na Figura 31 são apresentados os arranjos propostos, sendo: a) arranjo de  $3 \times 3$  elementos, b) arranjo de  $4 \times 4$  elementos para ambas as geometrias.

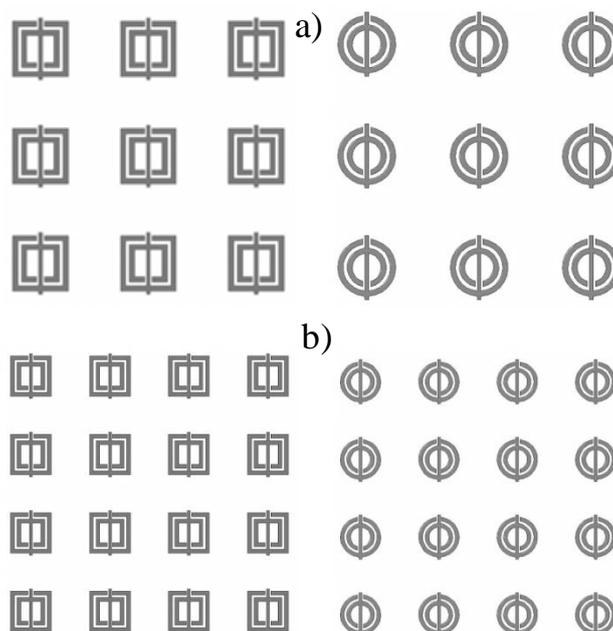


Figura 31: Arranjo Metassuperfície a)  $3 \times 3$  elementos, b)  $4 \times 4$  elementos.

Fonte: Aatoria própria, 2016.

O arranjo foi aplicado no plano de terra das antenas. Na Figura 32 são apresentadas as antenas de material RT6010 com comprimento de onda  $\lambda/20$  para o arranjo com 16 elementos. O grande número de células do arranjo de  $4 \times 4$  elementos tornou impraticável sua execução em todos os valores de comprimento de onda, apenas as estruturas com dimensão  $\lambda/20$  puderam gerar sistemas com dezesseis elementos aplicados ao plano de terra.

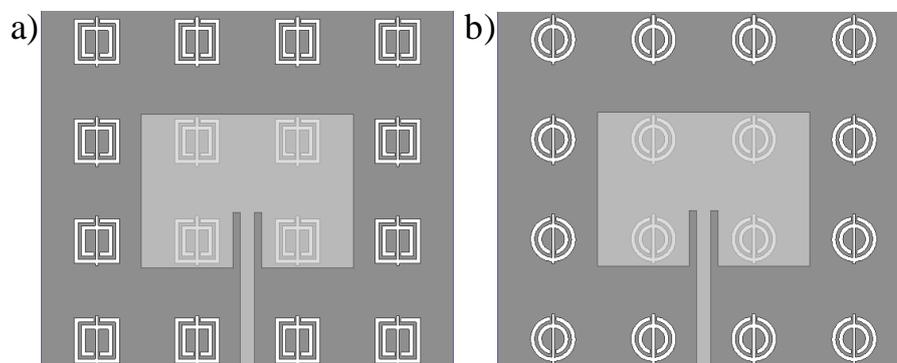


Figura 32: Antena RT6010 com Metassuperfície a) Retangular, b) Circular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Quatro antenas do material FR4 foram fabricadas sendo duas com geometria retangular e duas com geometria circular. A escolha e o processo de fabricação serão mais detalhados na próxima seção.

#### 6.4 CONFECÇÃO DAS ANTENAS

Algumas das antenas projetadas apresentaram características de operação como, deslocamento da frequência de operação, largura de banda melhorada e formação de novos modos. Embora um número considerável de exemplares tenha apresentado características aceitáveis, as antenas com Metassuperfície aplicados ao plano de terra apresentaram o conjunto de características que mais se enquadrava na perspectiva deste trabalho, (ganho próximo ao ganho da antena de referência e formação de modos em valores diferentes da frequência de projeto). A soma desses fatores influenciou na escolha da antena para fabricação, também foi considerada a disponibilidade do material e a dificuldade na execução do projeto.

Os exemplares com material FR4 com células aplicadas ao plano de terra de tamanho  $\lambda/20$  foram escolhidos para serem fabricados devido à disposição do material e a conformidade dos resultados simulados com as necessidades deste trabalho.

O primeiro passo para fabricação das antenas foi a impressão, uma impressora *laser* do fabricante Mimaki modelo (UJF-3042FX UV PRINTER) foi utilizada nesse processo. Na Figura 33 é apresentada uma foto da impressora em questão.



Figura 33: Impressora Mimaki.

Fonte: Mimaki, 2016.

Foi feito um lixamento da superfície da placa (cobre), assim, a tinta utilizada na impressão apresenta uma melhor aderência. Na Figura 34 é apresentado o resultado da impressão.

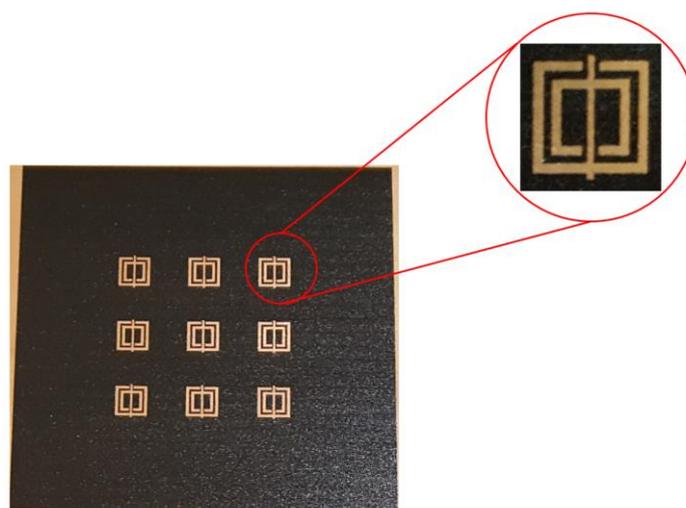


Figura 34: Impressão final do arranjo 3x3.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Com o processo de impressão finalizado o passo seguinte foi corroer o plano de terra com Percloroeto de Ferro ( $\text{FeCl}_3$ ). Na Figura 35 os equipamentos utilizados no processo de corrosão são apresentados. Para proteção do cobre foram aplicadas em três camadas esmalte plástico para garantir a proteção da placa.

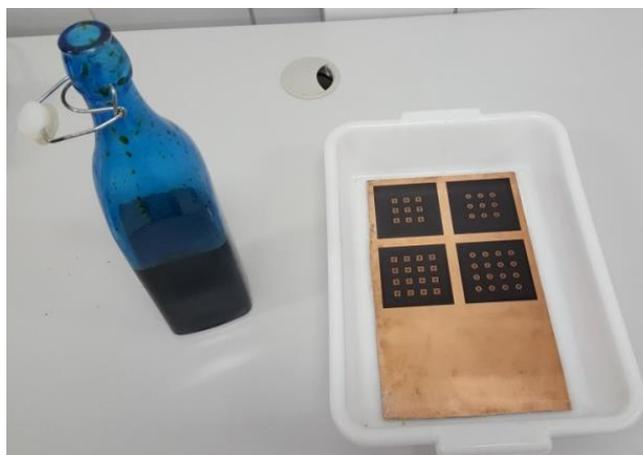


Figura 35: Processo de corrosão da placa FR4.

Fonte: Autoria própria.

A etapa seguinte no processo de fabricação foi recortar os retângulos com o plano de terra, foi utilizada uma serra convencional para o recorte e um conjunto de lixas para remover imperfeições e fazer o acabamento das peças. Na Figura 36 é apresentada uma das antenas produzidas.



Figura 36: Antena FR4 antes da segunda corrosão.

Fonte: Autoria própria.

A segunda corrosão foi realizada para obter o *patch* retangular. Neste caso foi utilizado um adesivo plástico que foi centralizado na antena. Após o processo foram obtidas quatro

antenas em material FR4 com Metassuperfície de tamanho  $\lambda/20$ . Na última etapa do processo de fabricação, os conectores SMA do tipo fêmea reto para P.C.I de 4 pinos de frequência foram soldados nas antenas, os conectores em questão são apresentados na Figura 37.



Figura 37: Conector SMA.

Fonte: Sena, 2016.

Os dispositivos estão aptos para a conexão no analisador de redes vetoriais e assim realizar as medições após a fixação dos conectores SMA. As quatro antenas podem ser vistas na Figura 38.

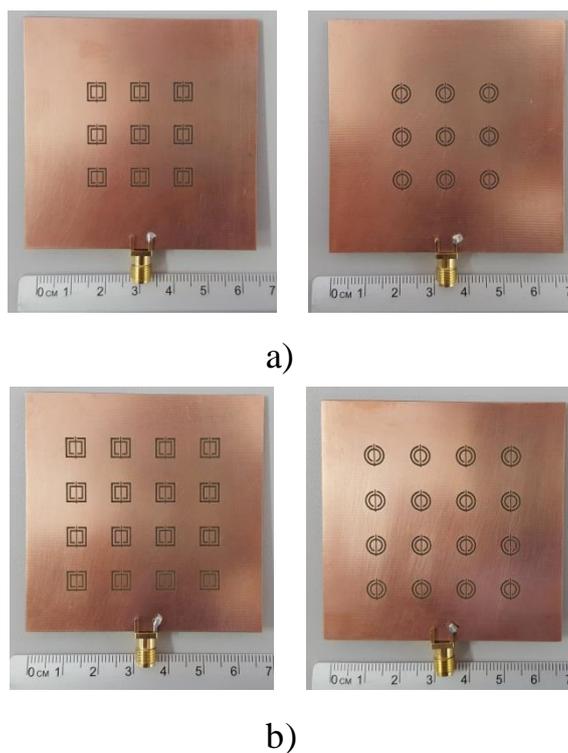


Figura 38: a) Antena FR4 com 3x3 elementos, b) Antena FR4 com 4x4 elementos.

Fonte: Aatoria própria, 2016.

A metodologia aplicada para fabricação das antenas pode ser simplificada no fluxograma da Figura 39.

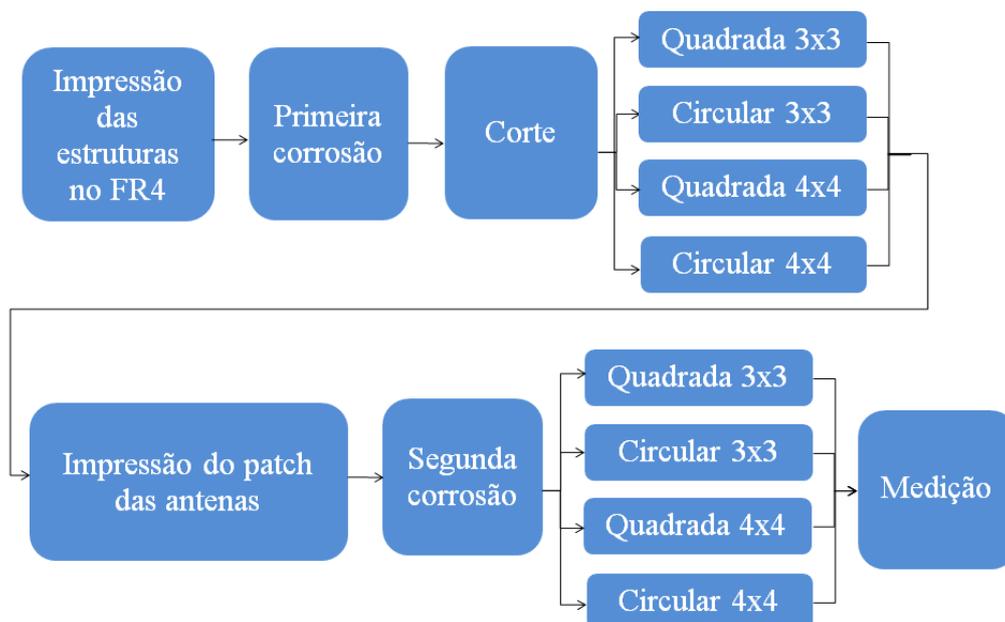


Figura 39: Fluxograma do processo de fabricação das antenas.

Fonte: Autoria própria, 2016.

O fluxograma da Figura 39 ilustra o processo para aquisição das antenas, esse processo está dividido em: impressão das células no plano de terra das antenas, primeira corrosão, corte das antenas, impressão do patch das antenas, segunda corrosão e medição.

## 7 RESULTADOS

Com os resultados computacionais foi possível observar o comportamento das antenas e suas características decorrentes da inclusão das estruturas Metassuperfície. Neste capítulo serão apresentados os resultados das antenas de microfita padrão e aquelas com Metassuperfícies aplicadas, também serão apresentados os resultados experimentais.

### 7.1 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

#### 7.1.1 Antenas padrão

No capítulo de metodologia foram projetadas e simuladas as antenas padrão. Os resultados para frequência de ressonância, perda de retorno, ganho e largura de banda são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros das antenas padrão.

<b>Material</b>	<b>Frequência de Ressonância (GHz)</b>	<b>Perda de retorno (dB)</b>	<b>Ganho (dB)</b>	<b>Largura de banda (MHz)</b>
RT5880	2,45	-25,65	7,52	30
FR4	2,45	-15,36	3,28	30
RT6010	2,42	-12,45	5,38	20

Fonte: A autoria própria, 2016.

Os resultados das antenas de padrão serão à base desse estudo, de maneira que todas as modificações feitas no *patch* ou plano de terra serão referidos a respectiva antena de referência.

#### 7.1.2 Antenas com modificação do tipo de célula

Foram realizadas as simulações referentes às antenas com Metassuperfícies, onde as análises das mesmas foram divididas entre três categorias; tipo de célula, comprimento de onda e número de células no plano de terra, todavia essa última comparação só foi realizada para as antenas com célula de tamanho  $\lambda/20$ , devido à impossibilidade de aplicar células de

tamanhos maiores que  $\lambda/20$  em arranjos de 4x4 elementos. Os parâmetros observados serão a perda de retorno, os diagramas de irradiação em duas e três dimensões e a largura de banda.

Nessa seção serão analisados os tipos de células (retangular ou circular), a partir da observação da perda de retorno, ganho e largura de banda. As antenas apresentadas aqui terão células aplicadas ao *patch* e plano de terra com tamanhos variados, todavia o parâmetro analisado é o tipo de célula. Na Figura 40 é apresentada a curva de perda de retorno para o material RT5880 padrão e com células retangular e circular de tamanho  $\lambda/10$  inserido no *patch*.

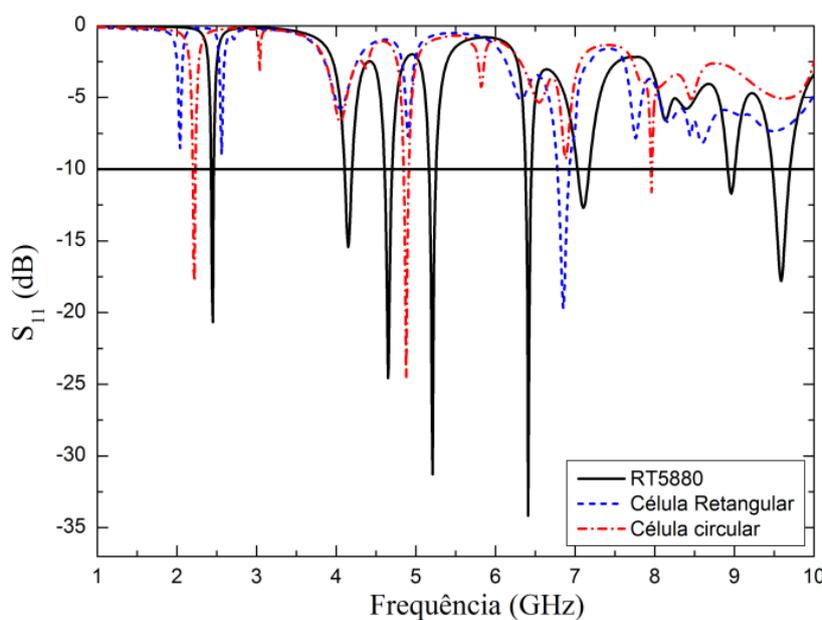


Figura 40: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/10$  para as geometrias (retangular e circular).

Fonte: A autoria própria, 2016.

Em ambos os casos (retangular e circular) as antenas apresentaram um ganho inferior ao apresentado pela antena padrão, sendo o ganho da antena com geometria retangular igual a (6,93 dB) para uma frequência de (2,62 GHz) e o ganho da antena circular (5,99 dB) para a frequência de (2,27 GHz). A antena com geometria retangular parou de operar como antena para as frequências próximas a de projeto.

Na Tabela 7 são apresentados os dados de frequência de ressonância e largura de banda, e nas Figuras 41 e 42 são apresentados os diagramas de irradiação da antena RT5880 com a mudança do tipo de célula.

Tabela 7: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT5880 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/10$	6,92	6,78	6,85	140
Célula Circular $\lambda/10$	2,23	2,2	2,22	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

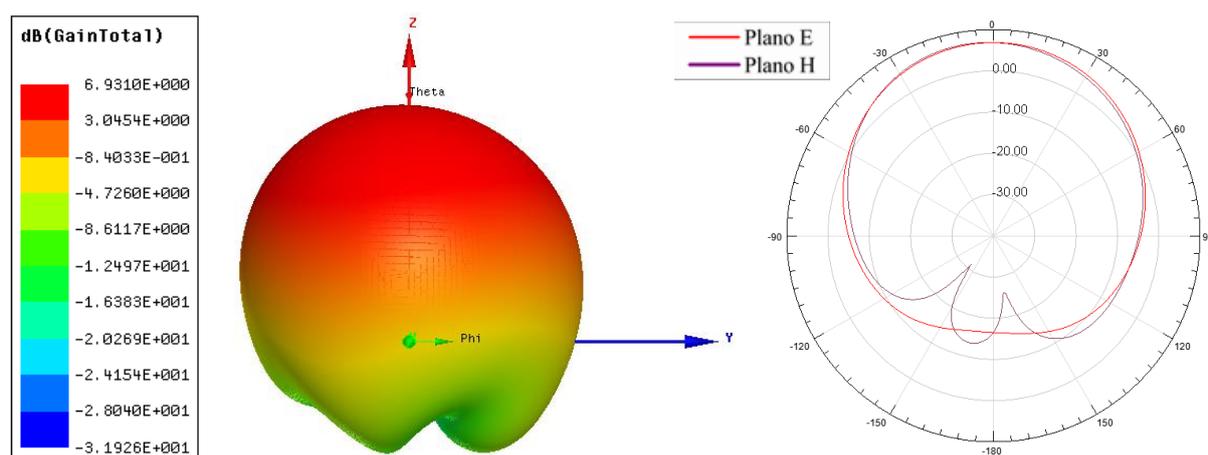


Figura 41: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

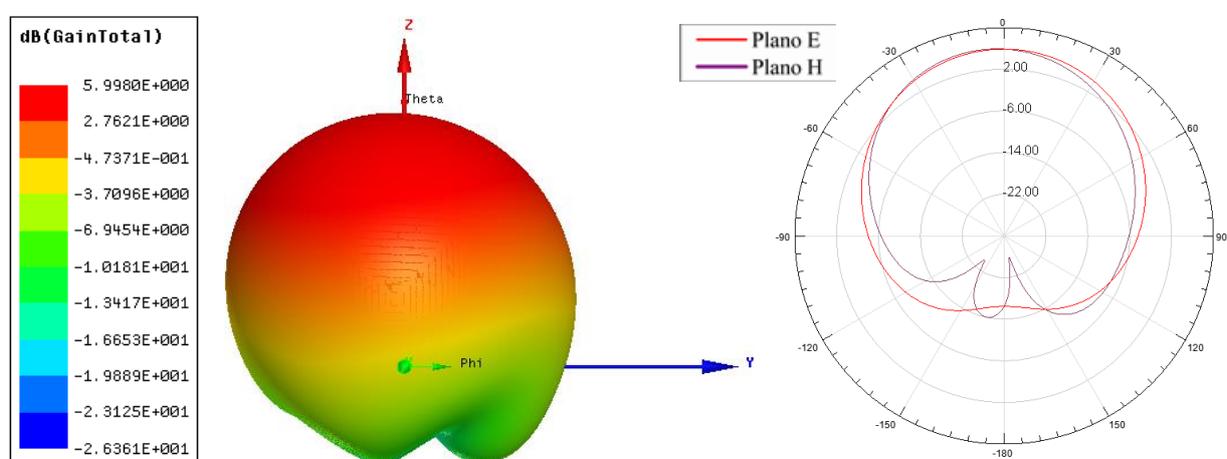


Figura 42: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 43 é pode ser observada a perda de retorno para as antenas fabricadas com material FR4 padrão e com células retangular e circular de tamanho  $\lambda/10$  inserido no *patch*.

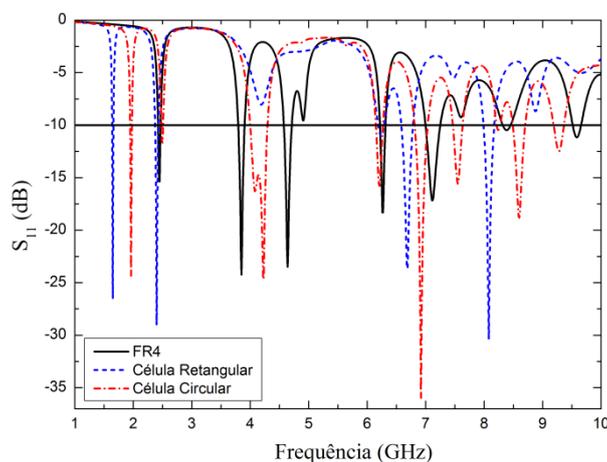


Figura 43: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/10$  para as geometrias (retangular e circular).

Fonte: Autoria própria, 2016.

O primeiro modo se deslocou para valores menores de frequência nas antenas com Metassuperfície, ocorreu ainda uma intensificação de outros modos. O ganho máximo nessa estrutura foi de (-0,11 dB) na frequência (1,65 GHz) para estrutura retangular e (1,98 dB) na frequência de (2,52 GHz) para estrutura circular. A largura de banda reduziu em ambos os casos. Na Tabela 8 os resultados da perda de retorno podem ser observados e as Figuras 44 e 45 contêm os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 8: Frequência de ressonância e largura de banda para antena FR4 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/10$	1,66	1,65	1,65	10
Célula Circular $\lambda/10$	1,97	1,95	1,96	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

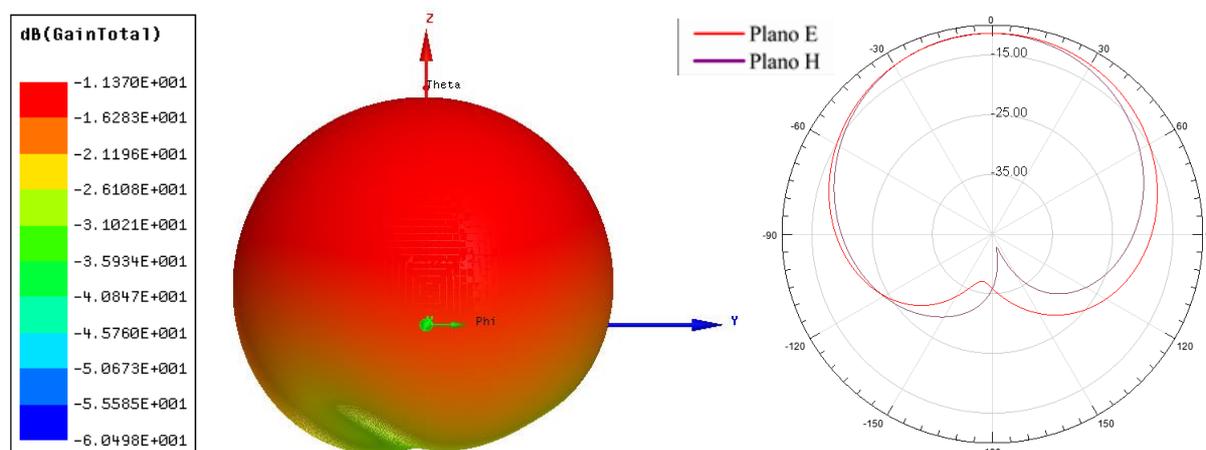


Figura 44: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .  
Fonte: Autoria própria, 2016.

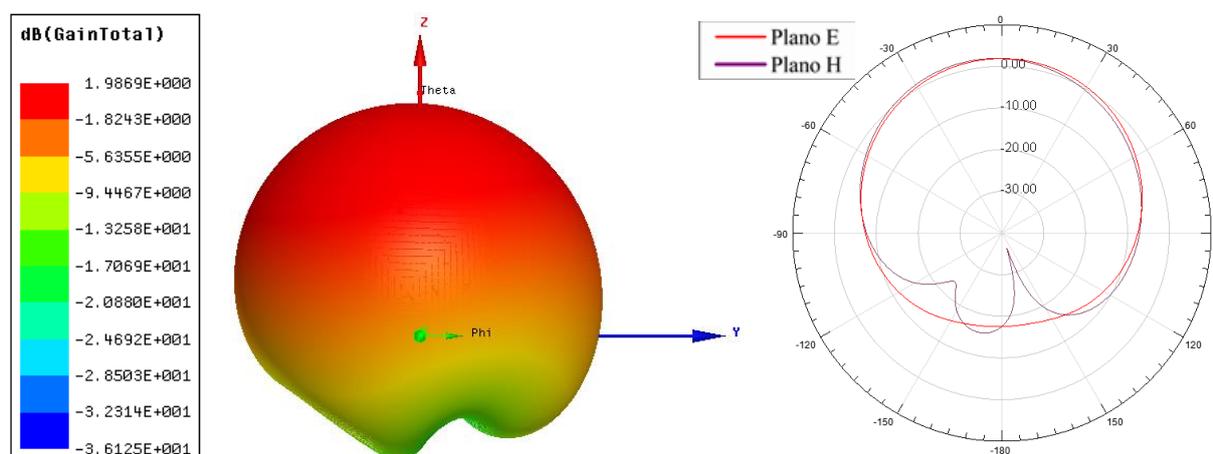


Figura 45: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .  
Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 46 pode ser vista a perda de retorno para as antenas fabricadas com material RT6010. Foi observada a atenuação dos modos das antenas na frequência de projeto fazendo com que as antenas com Metassuperfície retangular como a quanto a circular, parassem de operar como antena na frequência de projeto.

Ambas as geometrias apresentaram múltiplos modos de operação para valores mais elevados de frequência, o ganho reduziu em ambas as estruturas. Na retangular o ganho ficou em (1,90 dB) para frequência de (4,78 GHz) e para a antena com forma circular o ganho é (5,19 dB) na frequência (4,57 GHz). A largura de banda cai de 20 MHz para 10 MHz na antena com célula circular.

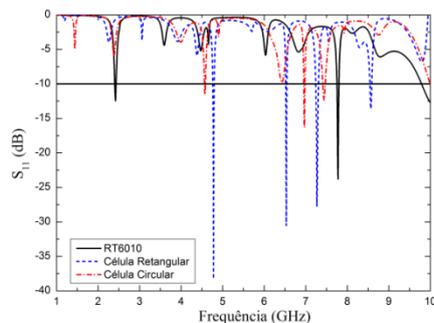


Figura 46: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Tabela 9 são observados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 47 e 48 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 9: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT6010 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/10$	4,79	4,77	4,78	20
Célula Circular $\lambda/10$	4,58	4,57	4,57	10

Fonte: Autoria própria, 2016.

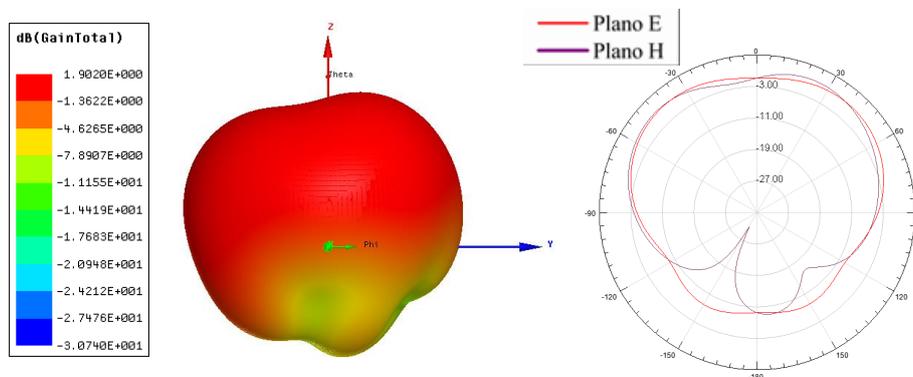


Figura 47: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

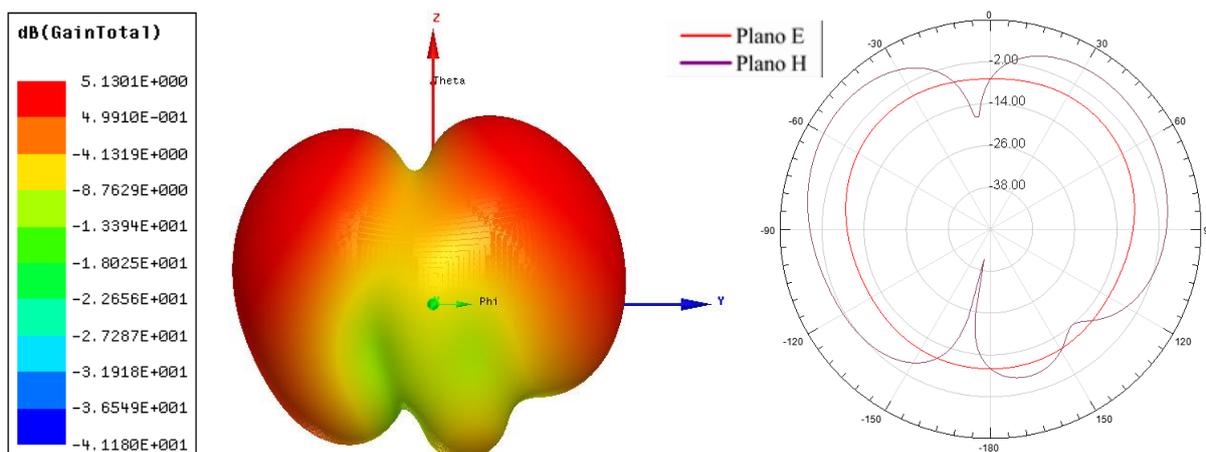


Figura 48: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 49 pode ser visto o gráfico de perda de retorno para a antena simulada com RT5880, na qual são inseridos células retangulares e circulares de tamanho  $\lambda/15$ .

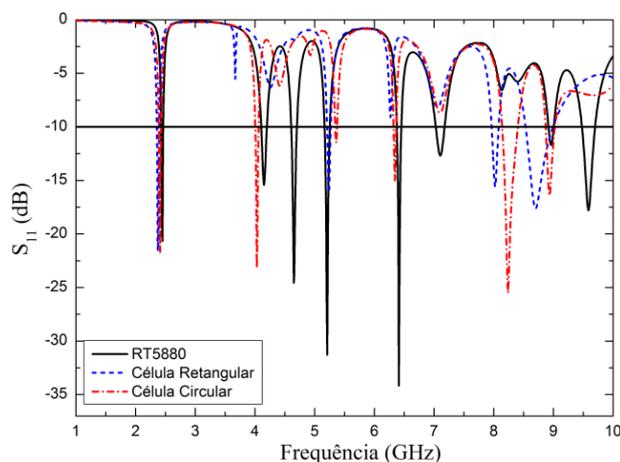


Figura 49: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Mediante a aplicação das estruturas ocorreu um deslocamento do primeiro modo para valores menores de frequência, não foi observada mudança na largura de banda. O ganho das antenas com Metassuperfície aplicadas foi de 7,52 dB na antena de referência para 6,48 dB na antena com célula retangular e 6,50 dB na antena com célula circular. Na Tabela 10 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 50 e 51 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 10: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT5880 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/15$	2,39	2,36	2,37	30
Célula Circular $\lambda/15$	2,42	2,39	2,41	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

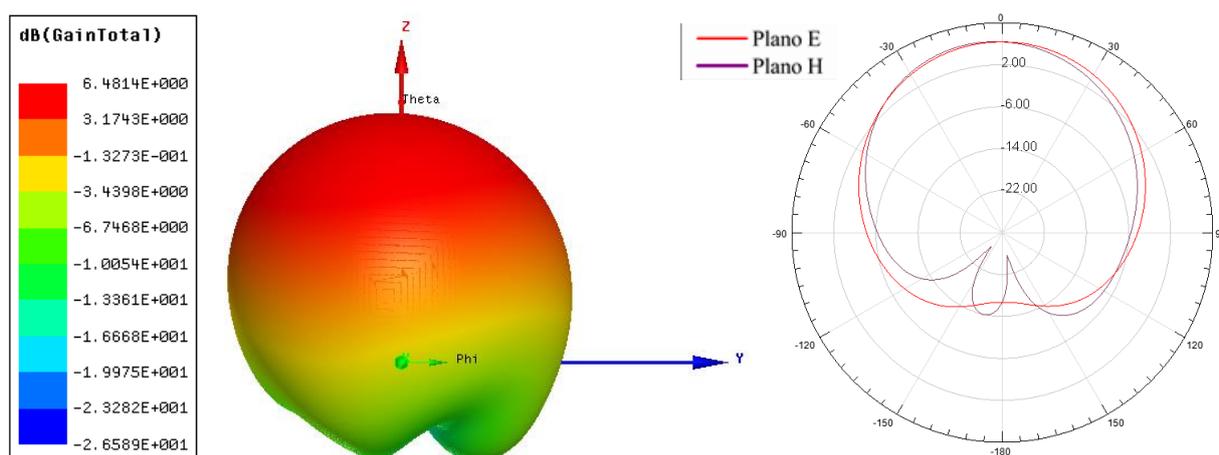


Figura 50: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

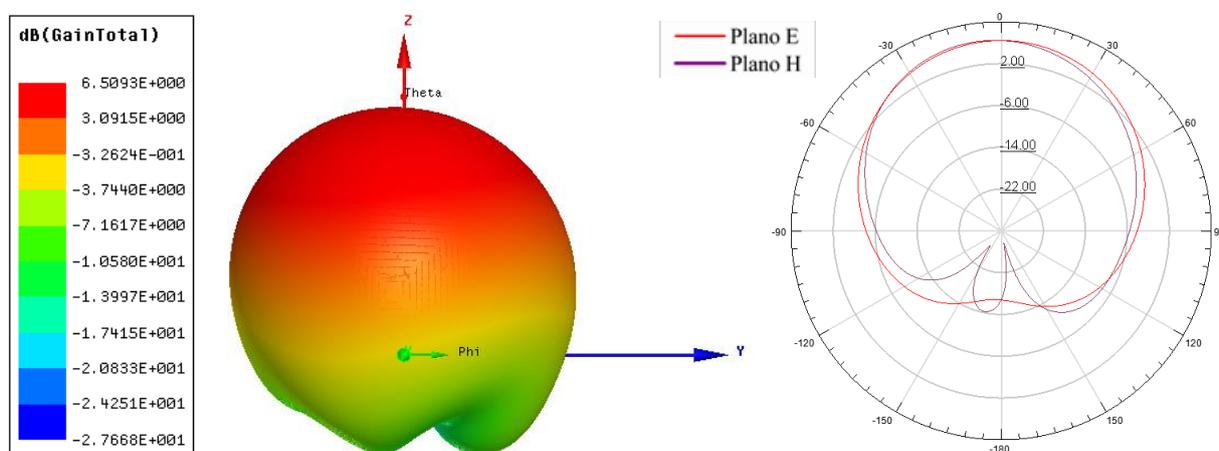


Figura 51: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 52 pode-se observar a perda de retorno para as antenas com material FR4 simuladas para o comprimento de onda  $\lambda/15$ .

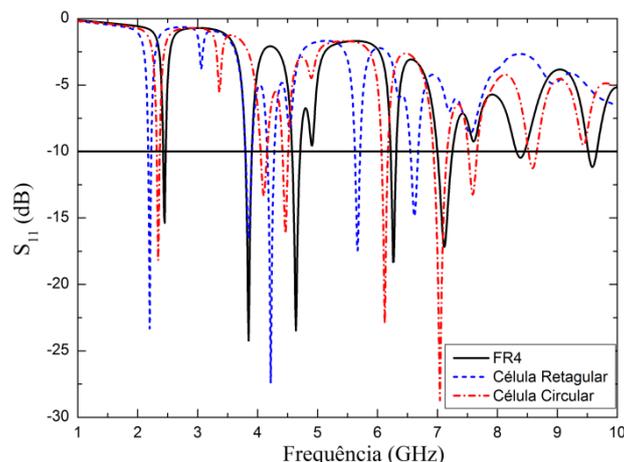


Figura 52: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

As antenas com células retangular e circular apresentaram um deslocamento do modo principal para valores menores de frequência, o ganho apresentou redução na sua intensidade em ambas as antenas. Na antena com geometria retangular o ganho foi de - 0,741 dB e na antena com célula circular esse foi de 1,92 dB. Na Tabela 11 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 53 e 54 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 11: Frequência de ressonância e largura de banda para antena FR4 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/15$	2,22	2,18	2,2	40
Célula Circular $\lambda/15$	2,36	2,32	2,34	40

Fonte: Autoria própria, 2016.

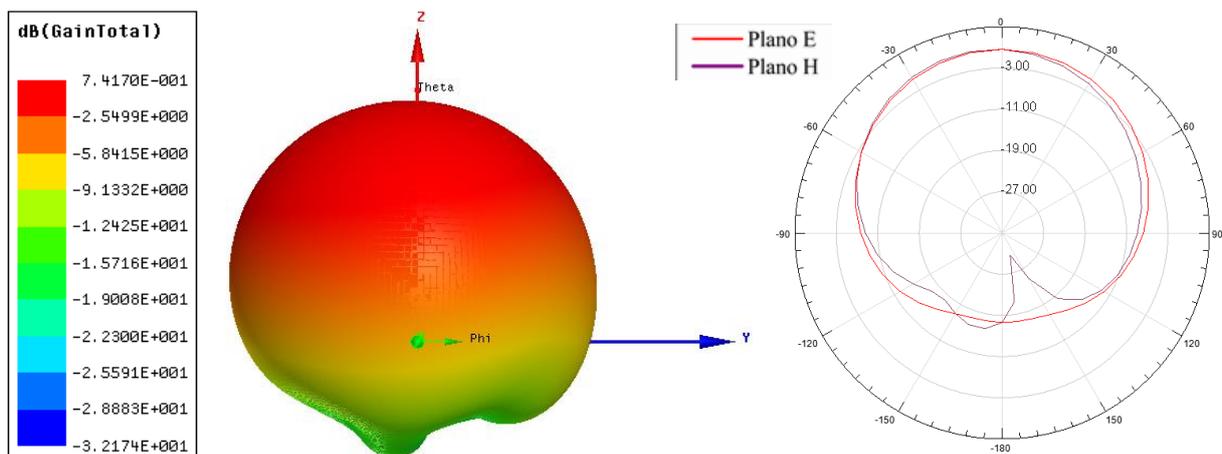


Figura 53: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

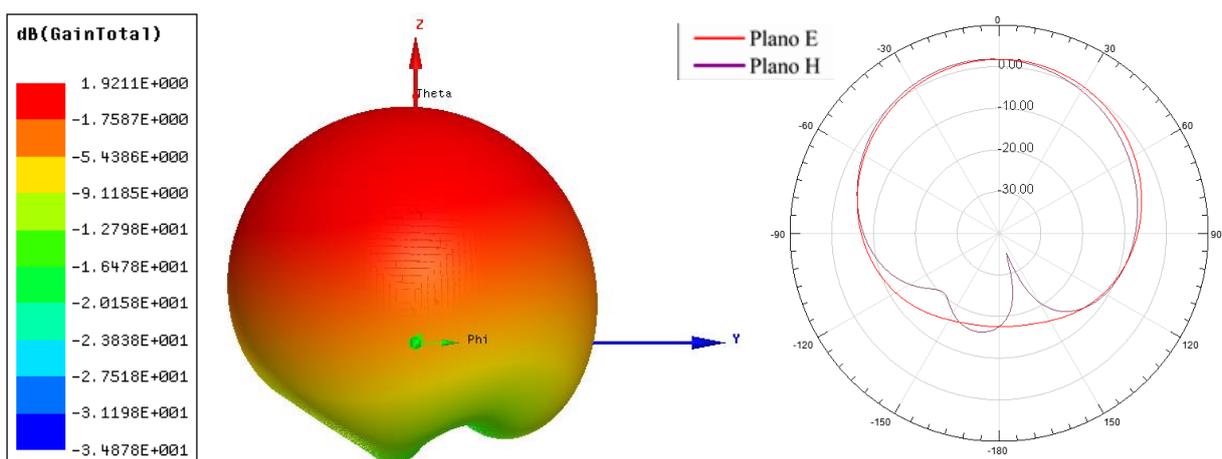


Figura 54: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena RT6010 tem a curva de perda de retorno apresentada na Figura 55.

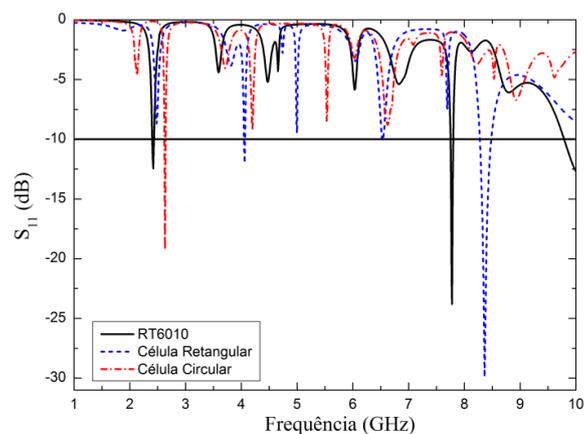


Figura 55: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com célula retangular parou de operar como antena nas proximidades da frequência de projeto, já a antena circular ressoou em valores mais elevados de frequência. No que se refere ao ganho a antena com estrutura retangular teve o diagrama de irradiação alterado com valor de ganho máximo de 4,58 dB. A antena com célula circular apresentou uma perda maior no ganho saindo de 5,38 dB na antena padrão para 2,94 dB na antena com célula circular. A largura de banda foi reduzida para as antenas com Metassuperfície.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 56 e 57 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 12: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT6010 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/15$	4,06	4,05	4,06	10
Célula Circular $\lambda/15$	2,64	2,63	2,63	10

Fonte: Autoria própria, 2016.

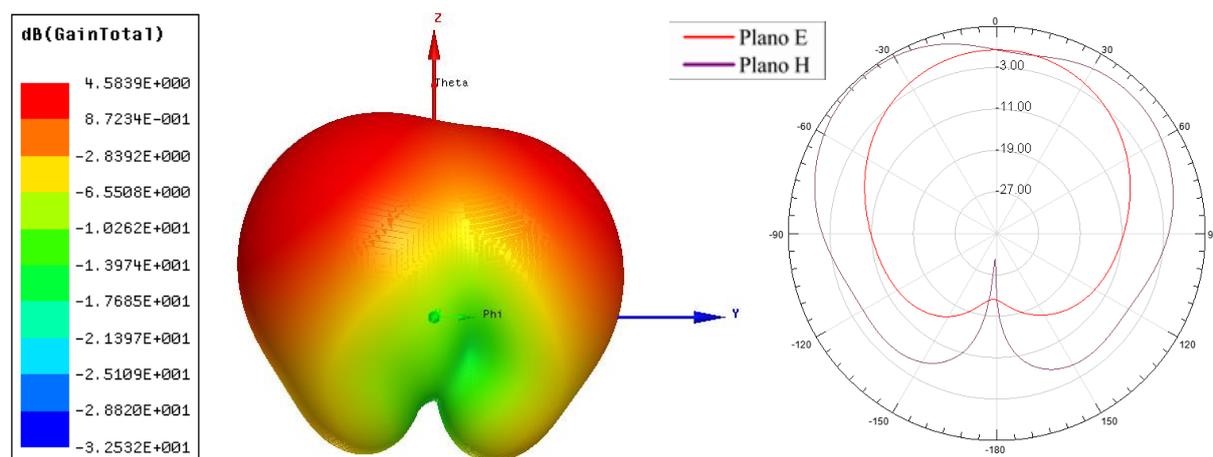


Figura 56: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

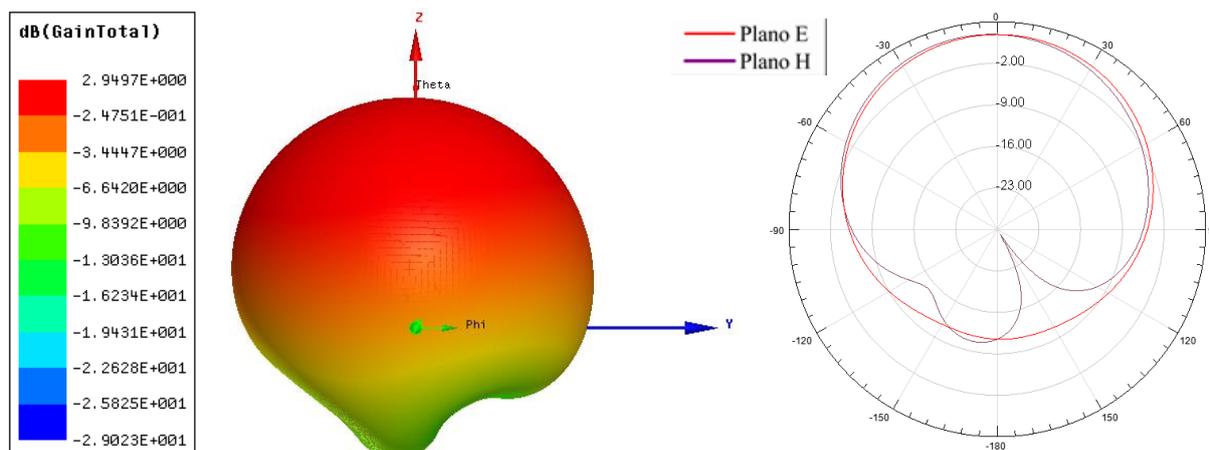


Figura 57: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 58 são apresentadas as curvas de perda de retorno para a antena simulada com material RT5880 com Metassuperfície de tamanho  $\lambda/20$  aplicado ao *patch*.

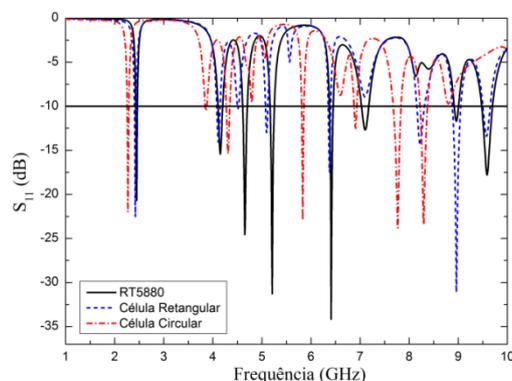


Figura 58: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com célula retangular apresentou deslocamento do primeiro modo para valores menores de frequência e não foi observado variação na largura de banda. A antena com célula circular apresentou um comportamento similar também deslocando o primeiro modo para valores menores de frequência. O ganho em ambas as antenas retangular e circular caíram de 7,52 dB para 6,49 e 5,44 dB, respectivamente. A largura de banda foi mantida nos mesmos patamares na antena com estrutura retangular, entretanto na antena com célula circular esse valor diminuiu. Na Tabela 13 podem ser vistos os resultados da perda de retorno e nas Figuras

59 e 60 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 13: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT5880 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/20$	2,44	2,41	2,42	30
Célula Circular $\lambda/20$	2,28	2,26	2,27	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

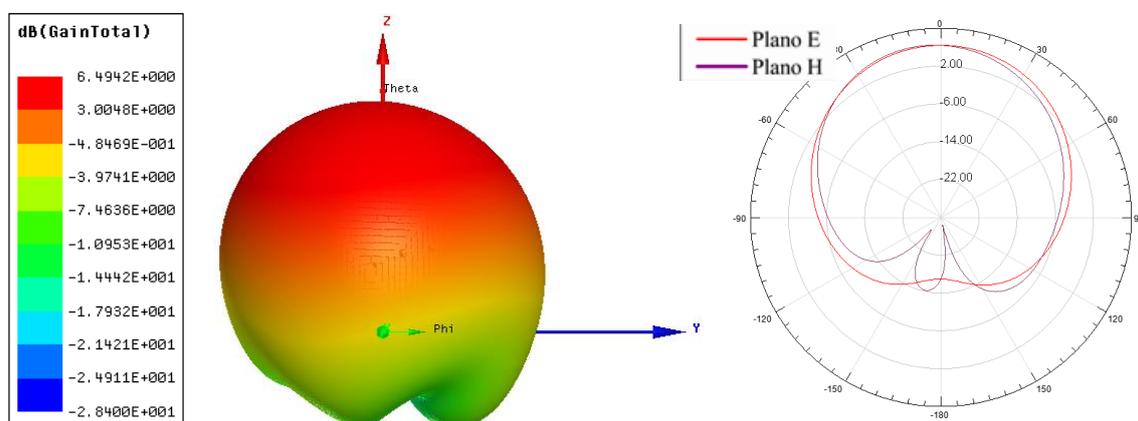


Figura 59: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

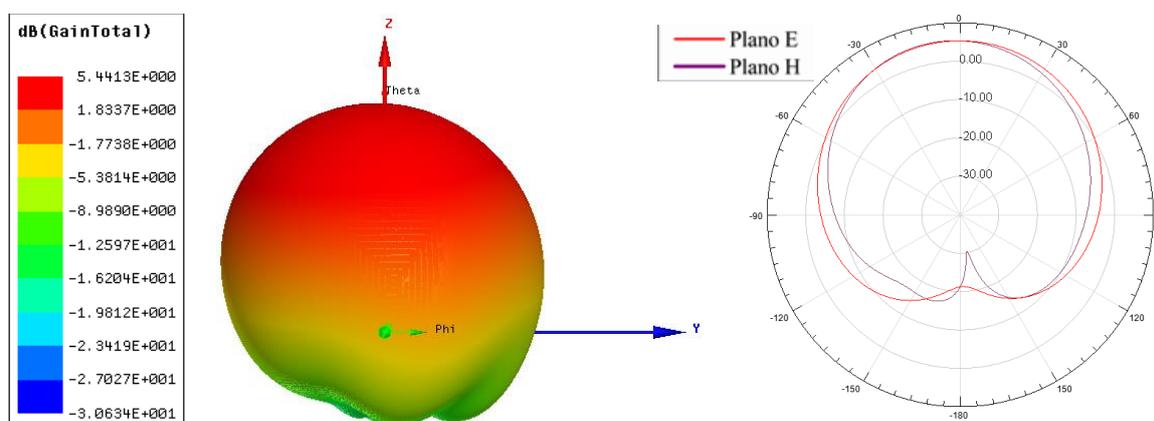


Figura 60: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

Na Figura 61 é apresentada a curva de perda de retorno para as antenas simuladas com material FR4 com célula retangular e circular de tamanho  $\lambda/20$  aplicados no *patch*.

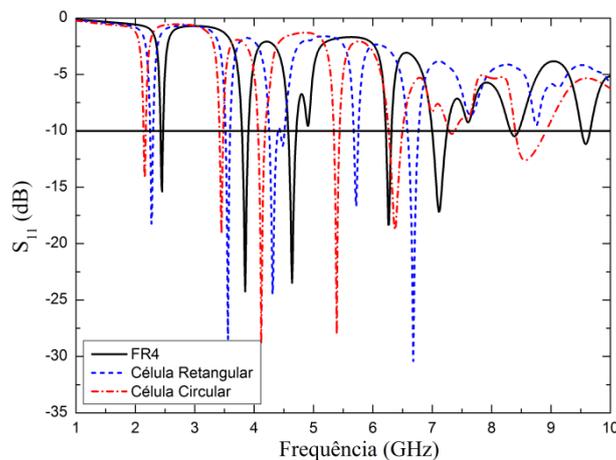


Figura 61: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

As antenas com células circular e retangular tiveram o modo principal deslocado na direção dos menores valores de frequência, sendo o modulo da perda de retorno intensificado para antena retangular e atenuado para antena circular. O ganho da antena retangular foi de 1,32 dB e a antena com célula circular apresenta ganho 2,21 dB. A largura de banda se manteve constante para antena circular, e sofreu um aumento para antena de célula retangular. Na Tabela 14 podem ser vistos os resultados da perda de retorno e nas Figuras 62 e 63 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 14: Frequência de ressonância e largura de banda para antena FR4 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/20$	2,29	2,25	2,27	40
Célula Circular $\lambda/20$	2,17	2,14	2,16	30

Fonte: Aatoria própria, 2016.

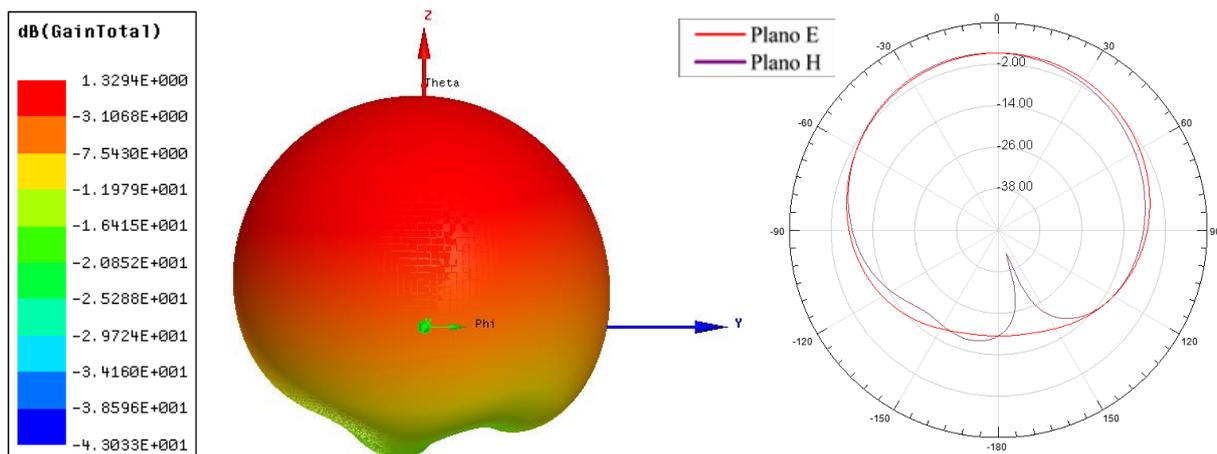


Figura 62: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

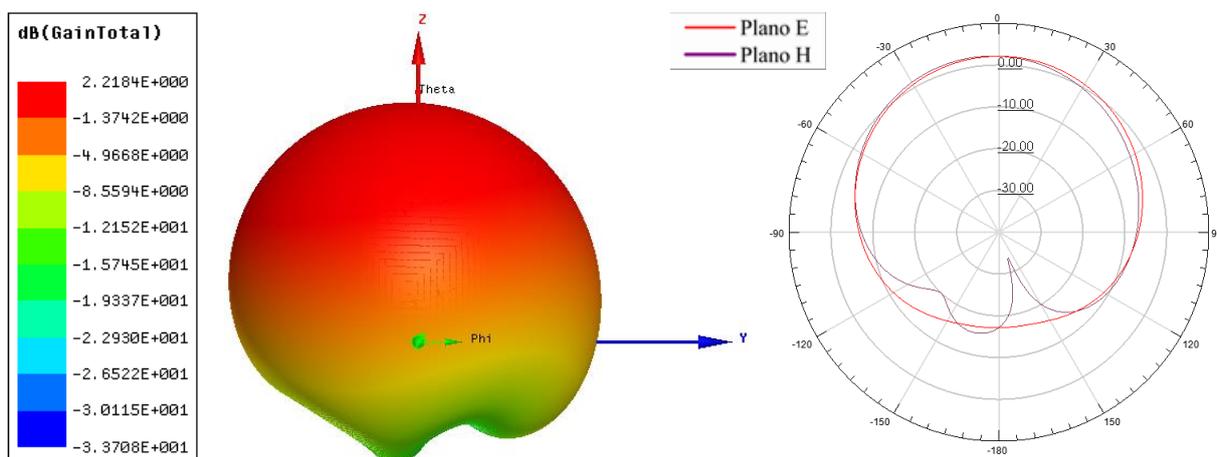


Figura 63: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 64 pode-se observar a perda de retorno da antena RT6010 com modificação no *patch*.

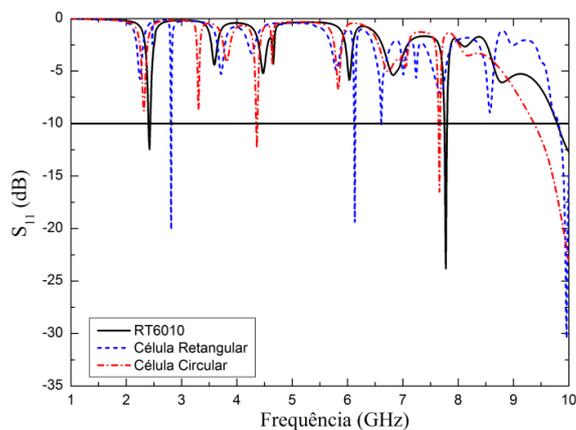


Figura 64: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no *patch* e comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

Com a inserção das células foi possível observar que a antena com estrutura circular parou de operar como antena nas proximidades da frequência de operação e a antena com geometria retangular deslocou seu modo para valores maiores de frequência. O ganho foi de 5,38 dB antena padrão para 3,98 dB na antena retangular e 4,06 dB na antena com célula circular. Na antena circular apareceram lobos não observados anteriormente conferindo a antena características bidirecionais. A largura de banda se manteve na antena com forma circular. Na Tabela 15 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 65 e 66 observam-se os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 15: Frequência de ressonância e largura de banda para antena RT6010 com aplicação de MS no *patch*  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	MW (GHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/20$	2,81	2,81	2,81	0
Célula Circular $\lambda/20$	4,37	4,35	4,36	20

Fonte: Aatoria própria, 2016.

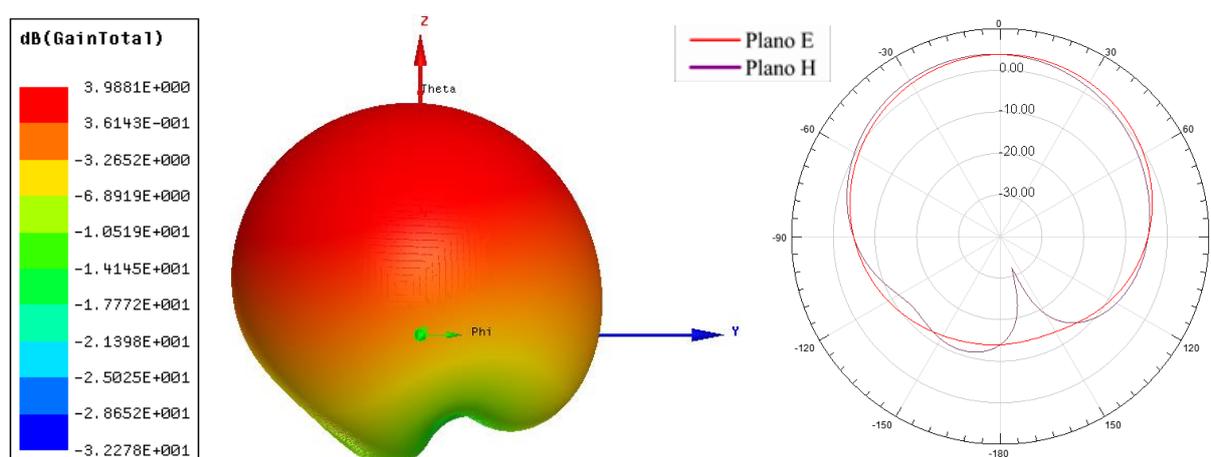


Figura 65: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

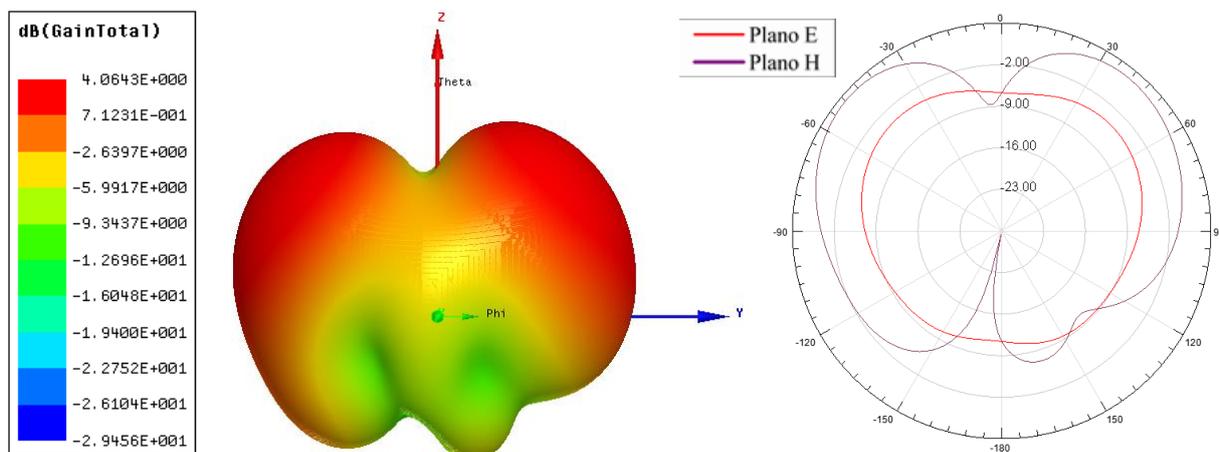


Figura 66: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 67 podem ser vistos as curvas da perda de retorno para antenas fabricadas com RT5880 com *patch* com arranjo periódico com tamanho  $\lambda/10$ .

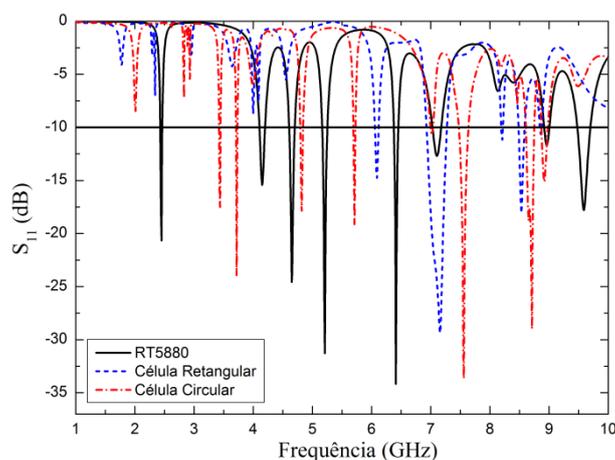


Figura 67: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

As antenas com geometria circular e retangular pararam de operar como antenas nas proximidades da frequência de projeto. O ganho passou de 7,52 dB na antena padrão para 9,38 dB na retangular e 5,86 dB na circular. A largura de banda passou de 30 MHz na antena de referência para 50 MHz na antena retangular e 10 MHz na circular. A Tabela 16 contém os resultados da perda de retorno e nas Figuras 68 e 69 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 16: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/10$	6,11	6,06	6.10	50
Célula Circular $\lambda/10$	3,44	3,43	3,44	10

Fonte: Autoria própria, 2016.

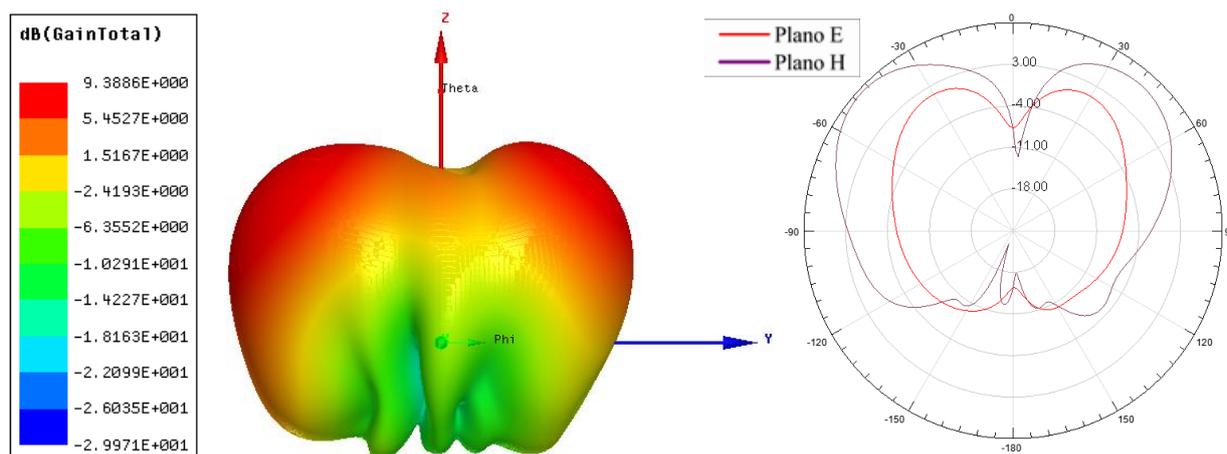


Figura 68: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

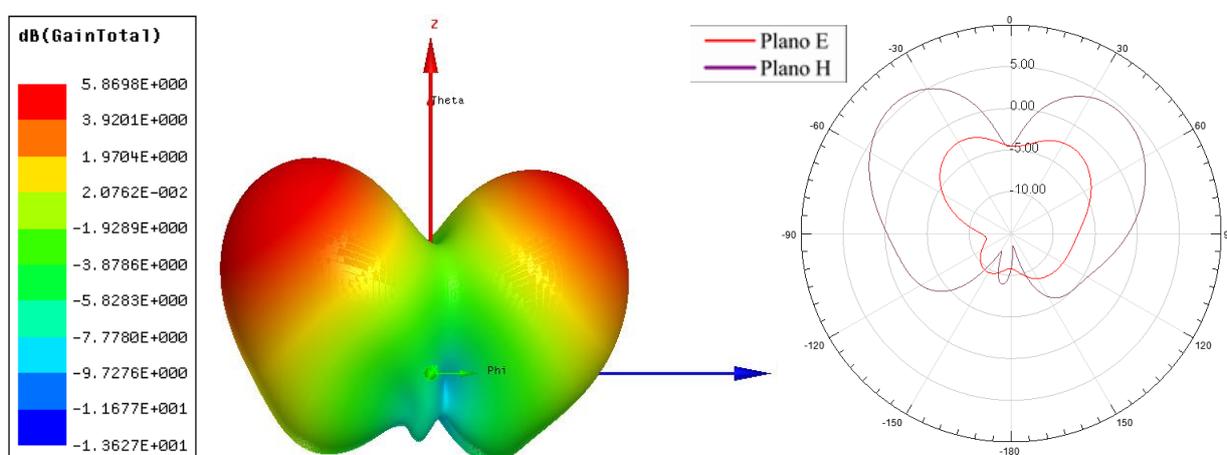


Figura 69: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 70 é apresentado o gráfico da perda de retorno para antenas fabricadas com FR4 com *patch* replicado de tamanho  $\lambda/10$ .

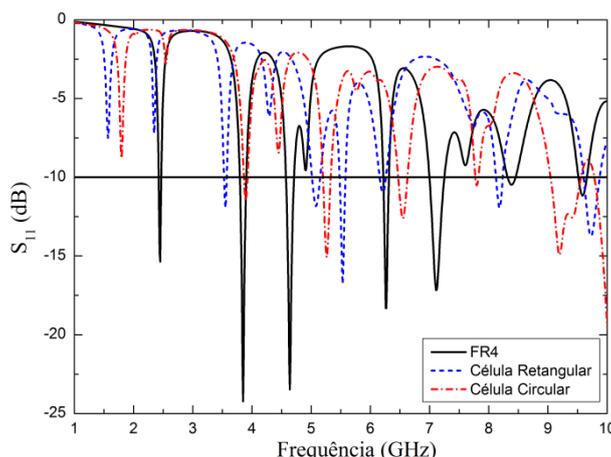


Figura 70: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Em ambas as antenas a aplicação das células resultou na interrupção da operação das mesmas na frequência de projeto. O ganho das antenas passou de 3,28 dB na antenna padrão para -4,05 dB na antenna com geometria circular e -0,15 dB para geometria retangular. A largura de banda aumentou em ambos os casos saindo de 30 MHz na antenna padrão para 40 MHz na antenna retangular e 50 MHz na antenna com geometria circular. Na Tabela 17 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 71 e 72 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 17: Frequência de ressonância e largura de banda de antenna FR4 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	0,03
Célula Retangular $\lambda/10$	2,57	2,53	3,55	0,04
Célula Circular $\lambda/10$	3,92	3,87	3,89	0,05

Fonte: Autoria própria, 2016.

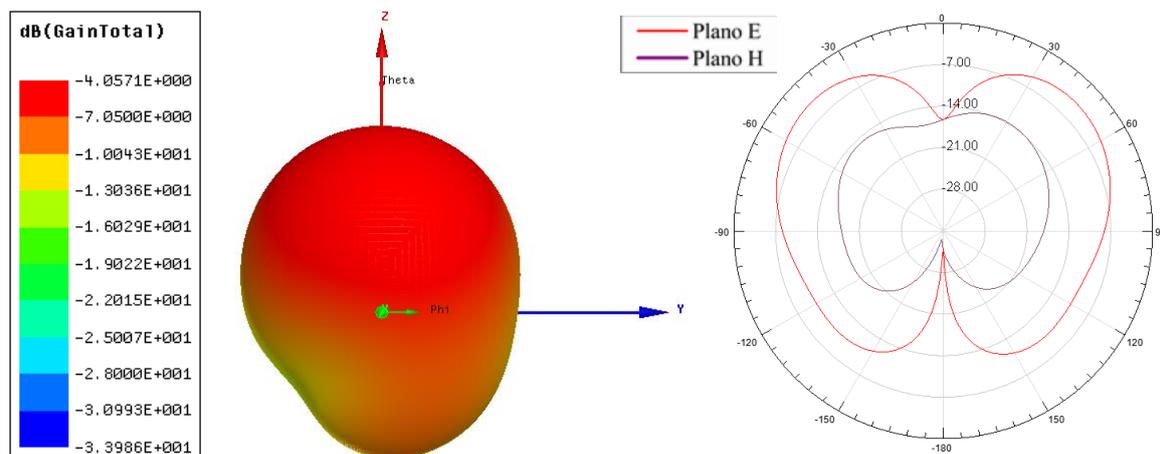


Figura 71: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

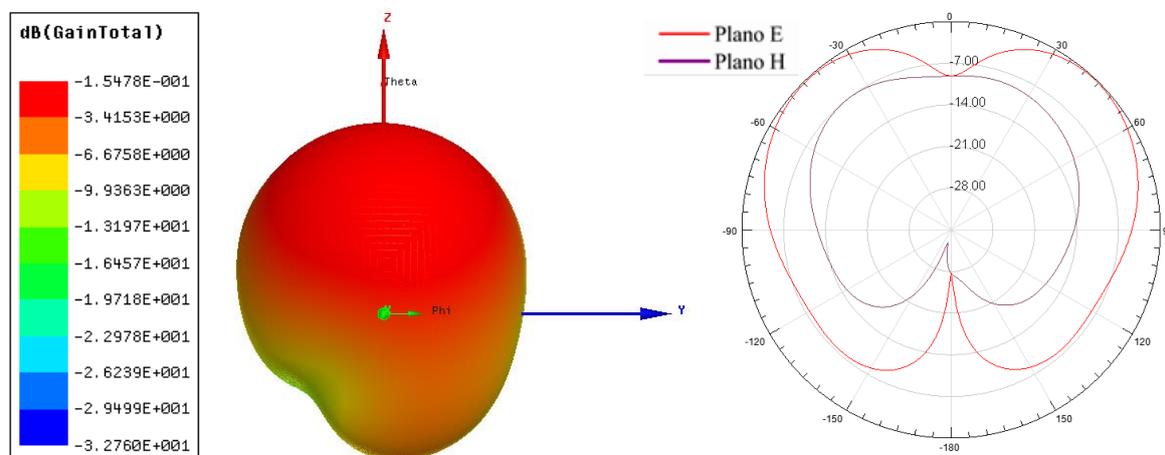


Figura 72: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 73 é apresentada a curva da perda de retorno para as antenas simuladas com RT6010 que apresentam periodicidade no *patch* para o comprimento de onda  $\lambda/10$ .

Com a aplicação das estruturas retangular e circular as antenas param de operar na frequência de projeto, ainda é possível observar a formação de alguns modos em valores mais elevados de frequência. O ganho ficou em 2,07 dB na antena retangular e 5,23 dB na antena circular. A largura de banda foi mantida na antena com célula circular em 20 MHz e aumentou para 30 MHz na antena com célula retangular. Na Tabela 18 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 74 e 75 têm-se os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

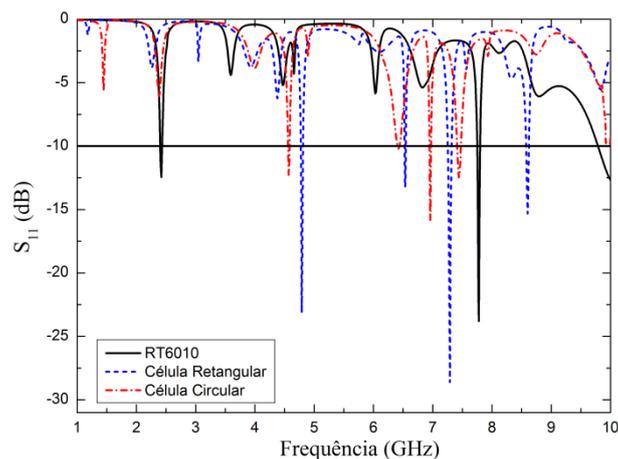


Figura 73: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 18: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/10$	4,81	4,78	4,79	30
Célula Circular $\lambda/10$	4,58	4,56	4,57	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

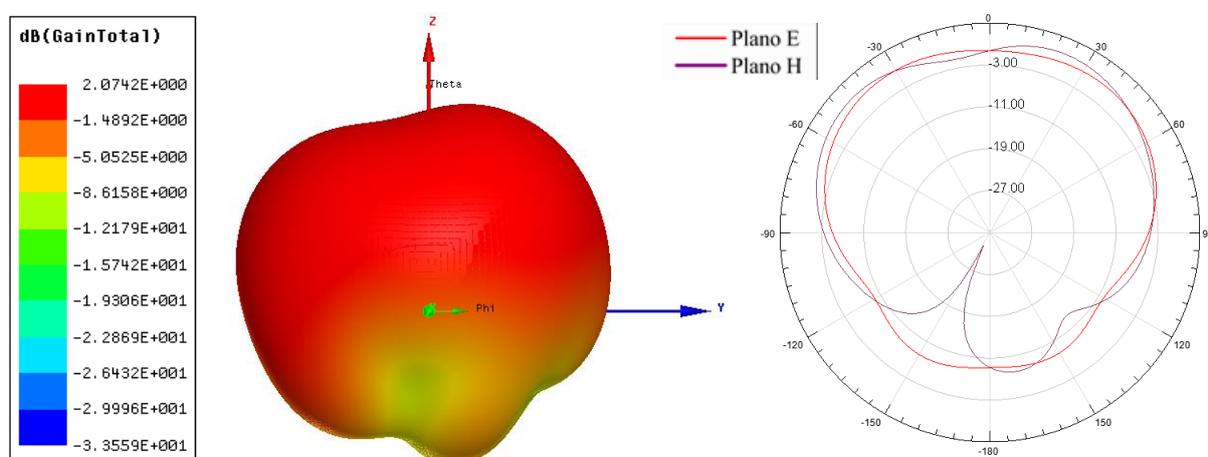


Figura 74: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

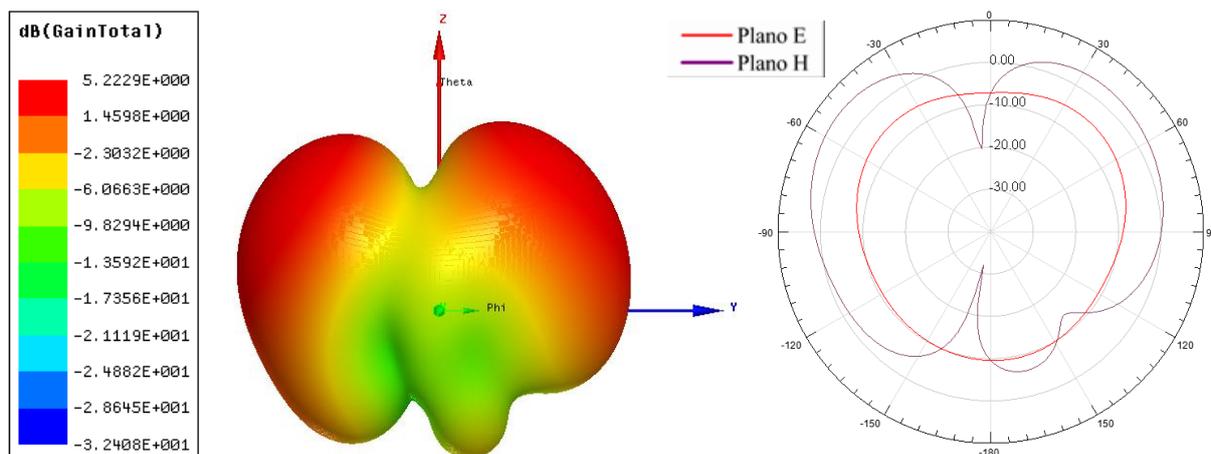


Figura 75: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

As antenas com células periódicas de tamanho  $\lambda/15$  podem ser vistas na Figura 76.

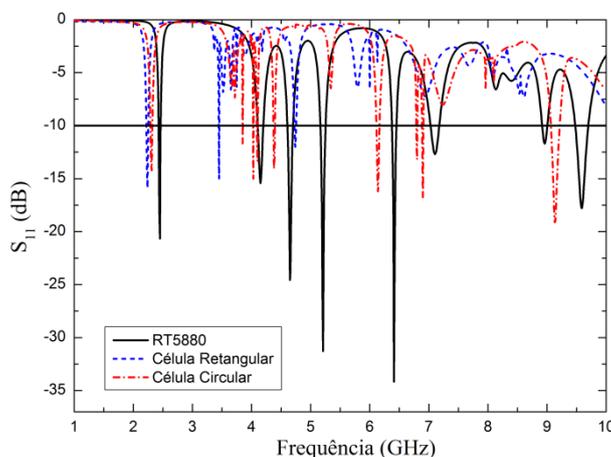


Figura 76: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Ao adicionar as células ocorreu redução na intensidade da perda de retorno e deslocamento do primeiro modo para valores menores de frequência. O ganho na antena retangular foi de 5,99 dB e a antena circular 6,20 dB. A largura de banda saiu de 30 MHz na antena de referência para 20 MHz nas antenas circular e retangular.

Na Tabela 19 podem ser vistos os resultados da perda de retorno e nas Figuras 77 e 78 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 19: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/15$	2,25	2,23	2,24	20
Célula Circular $\lambda/15$	2,32	2,3	2,31	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

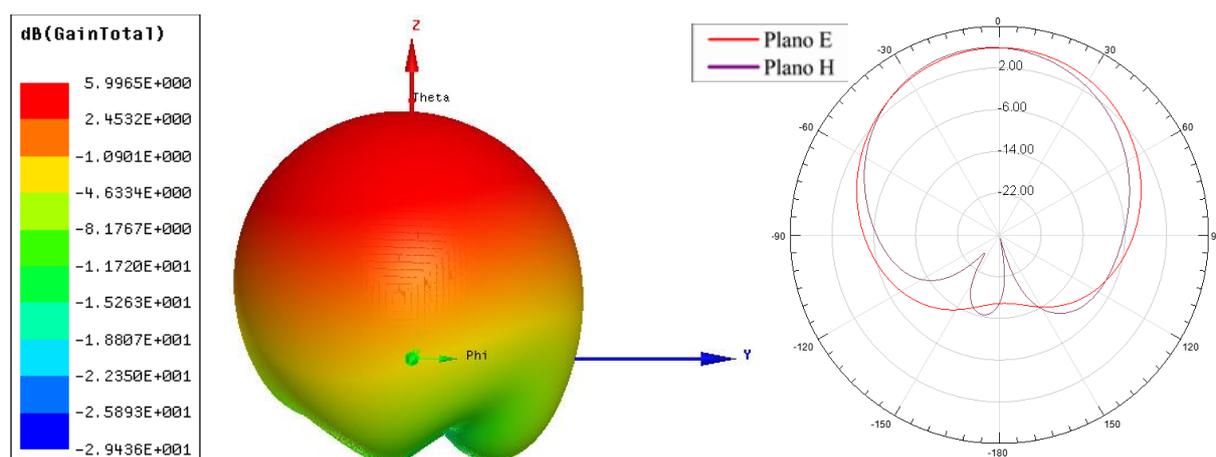


Figura 77: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

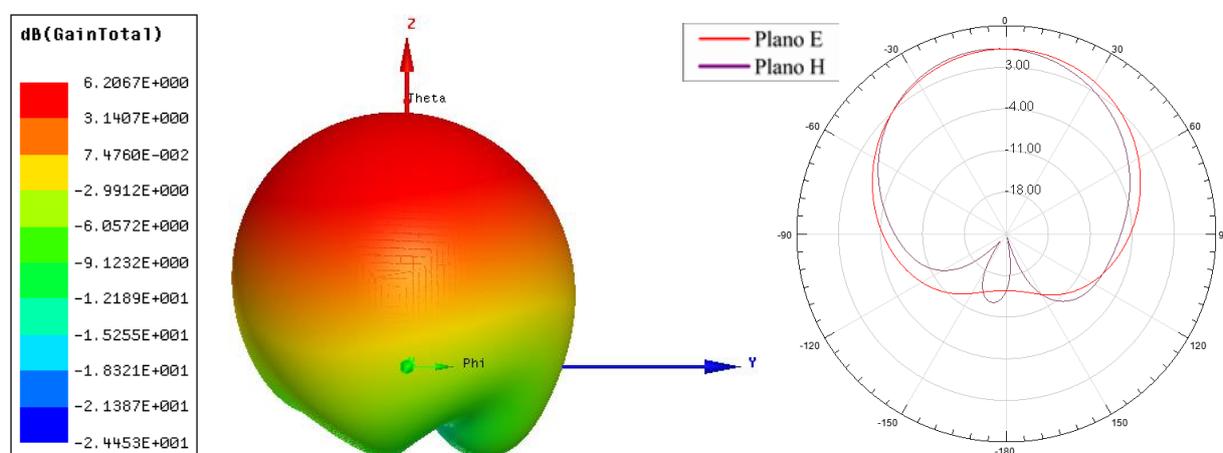


Figura 78: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A configuração circular e retangular para o material FR4 com comprimento de onda igual a  $\lambda/15$  pode ser vista na Figura 79.

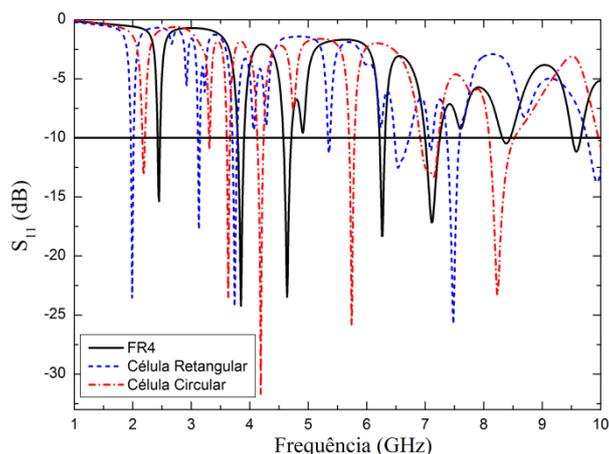


Figura 79: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com célula retangular deslocou o modo de ressonância para valores menores de frequência. A antena com célula circular também deslocou o modo para valores menores de frequência e reduziu a sua intensidade. O ganho na antena retangular foi -0,98 dB e a antena circular foi 0,645 dB. A largura de banda aumentou para a antena com Metassuperfície retangular saindo de 30 MHz na antena de referência para 40 MHz. Na Tabela 20 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 80 e 81 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 20: Frequência de ressonância e largura de banda de antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/15$	2,01	1,97	1,99	40
Célula Circular $\lambda/15$	2,2	2,17	2,19	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

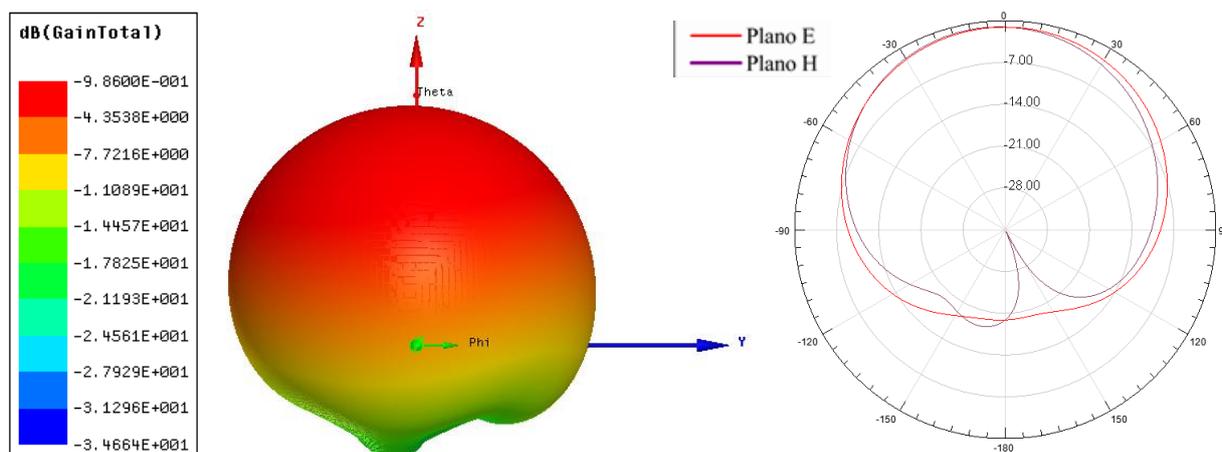


Figura 80: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

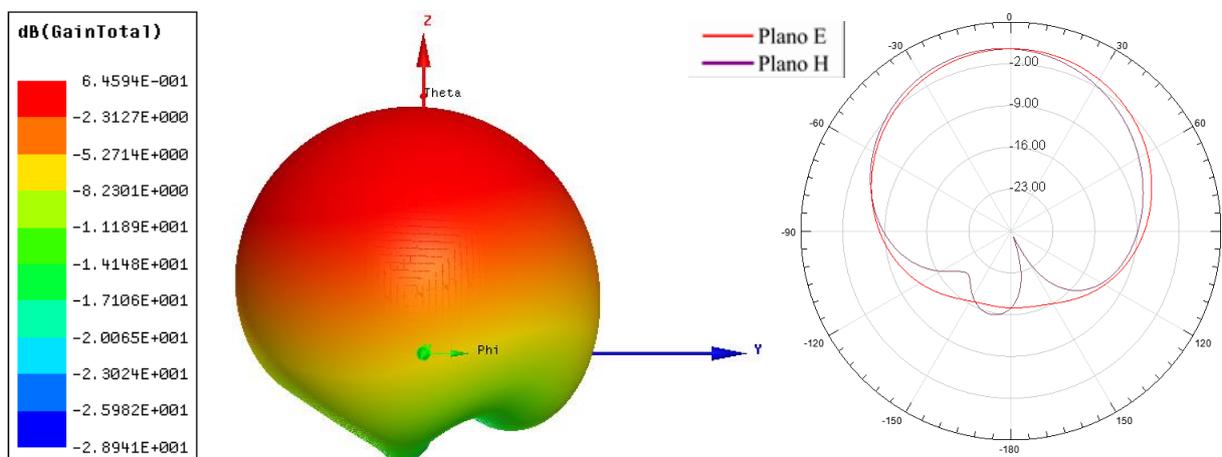


Figura 81: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 82 pode-se observar a curva de perda de retorno para a antena padrão simulada com RT6010.

A antena de geometria retangular parou de operar como antena na frequência de projeto e a antena com geometria circular apresentou deslocamento dos modos na direção dos valores maiores de frequência, o ganho foi de 3,86 dB na antena com estrutura retangular e 3,37 dB na antena com geometria circular. A largura de banda para o primeiro modo reduziu em ambos os casos.

Na Tabela 21 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 83 e 84 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

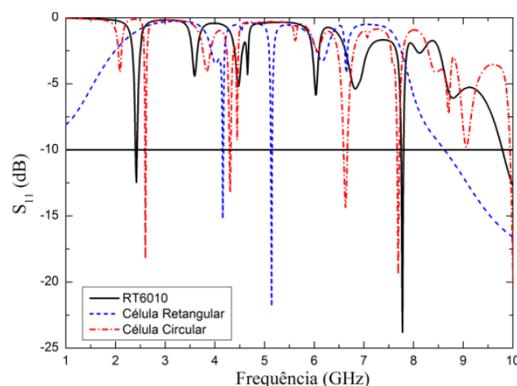


Figura 82: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 21: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/15$	4,17	4,16	4,16	10
Célula Circular $\lambda/15$	4,31	4,3	4,31	10

Fonte: Autoria própria, 2016.

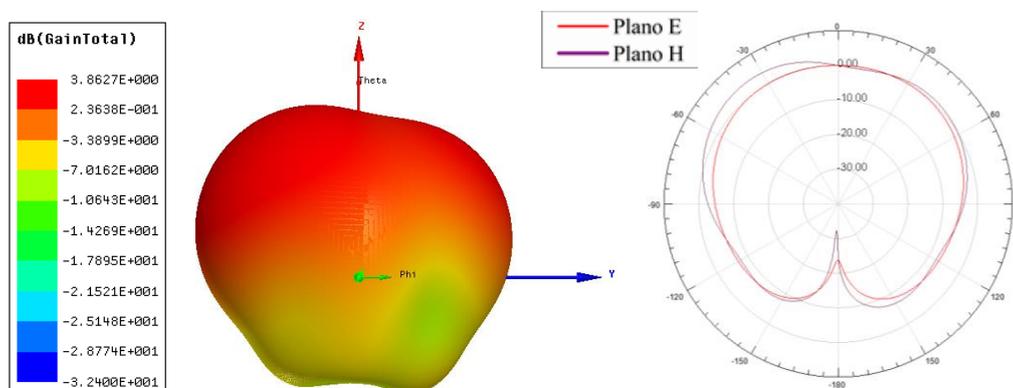


Figura 83: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

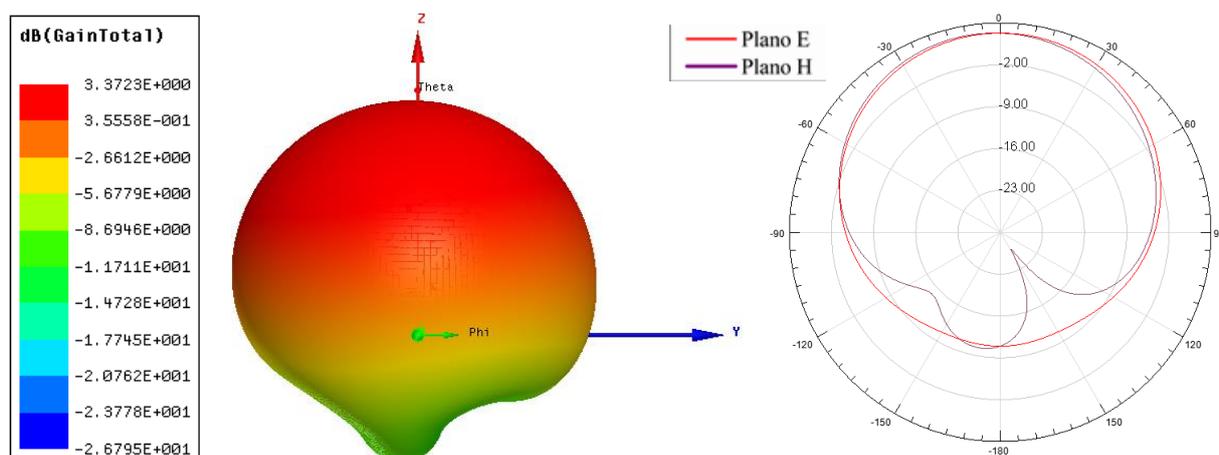


Figura 84: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 85 é apresentada a curva  $S_{11}$  da antena com Metassuperfície retangular e circular de tamanho  $\lambda/20$ .

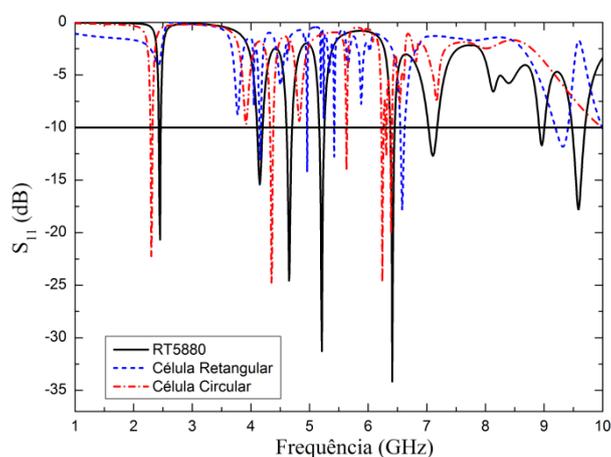


Figura 85: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com geometria retangular parou de operar como antena na frequência de projeto, já a antena com geometria circular moveu o primeiro modo para valores menores de frequência. A antena de célula retangular com 6,94 dB a antena com célula circular apresentou ganho de 6,05 dB. A largura de banda reduziu para 20 MHz na antena com Metassuperfície retangular.

Na Tabela 22 podem ser vistos os resultados da perda de retorno e nas Figuras 86 e 87 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 22: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/20$	4,17	4,15	4,16	20
Célula Circular $\lambda/20$	2,32	2,29	2,3	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

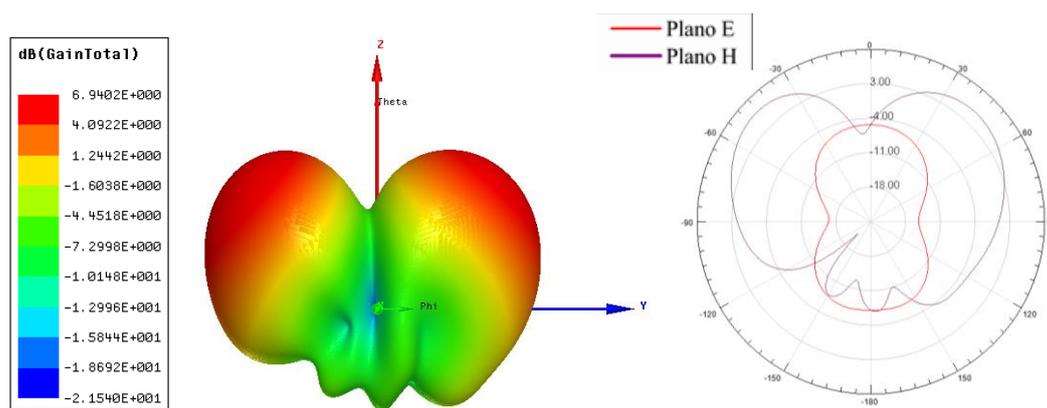


Figura 86: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

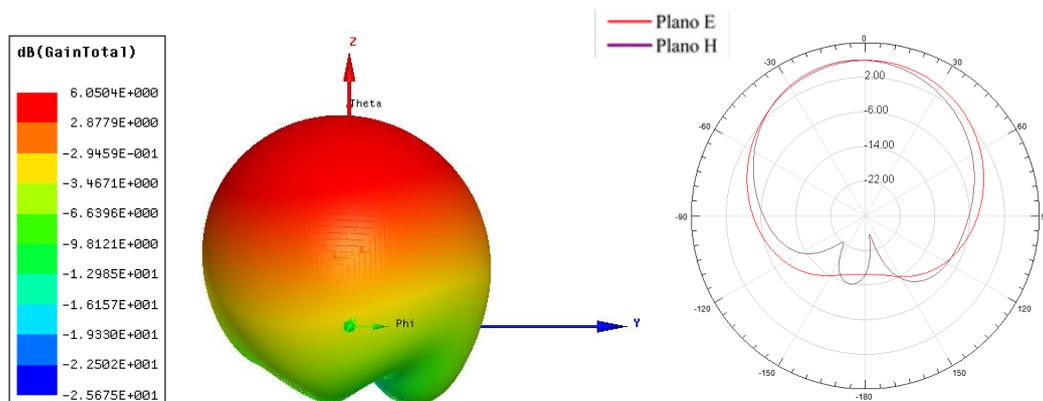


Figura 87: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 88 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material FR4 para o tamanho  $\lambda/20$ .

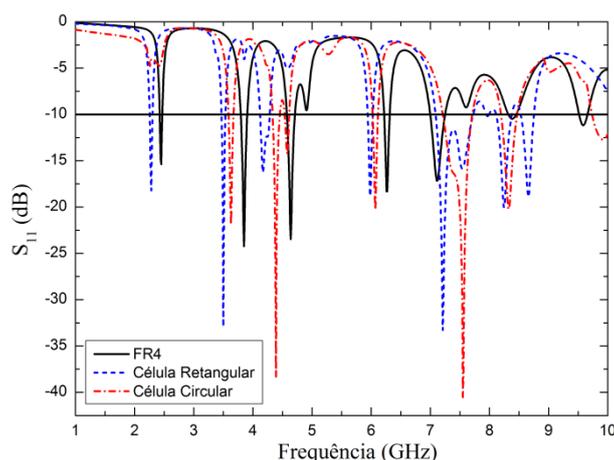


Figura 88: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com geometria circular parou de operar na frequência de projeto, a antena com geometria retangular intensificou a perda de retorno e moveu o primeiro modo para valores menores de frequência o ganho foi de 1,47 dB, já o ganho na antena com geometria circular foi 0,49 dB. A largura de banda aumentou para antena com célula circular.

Na Tabela 23 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 89 e 90 podem servistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 23: Frequência de ressonância e largura de banda de antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/20$	2,3	2,26	2,28	40
Célula Circular $\lambda/20$	3,67	3,59	3,63	80

Fonte: Autoria própria, 2016.

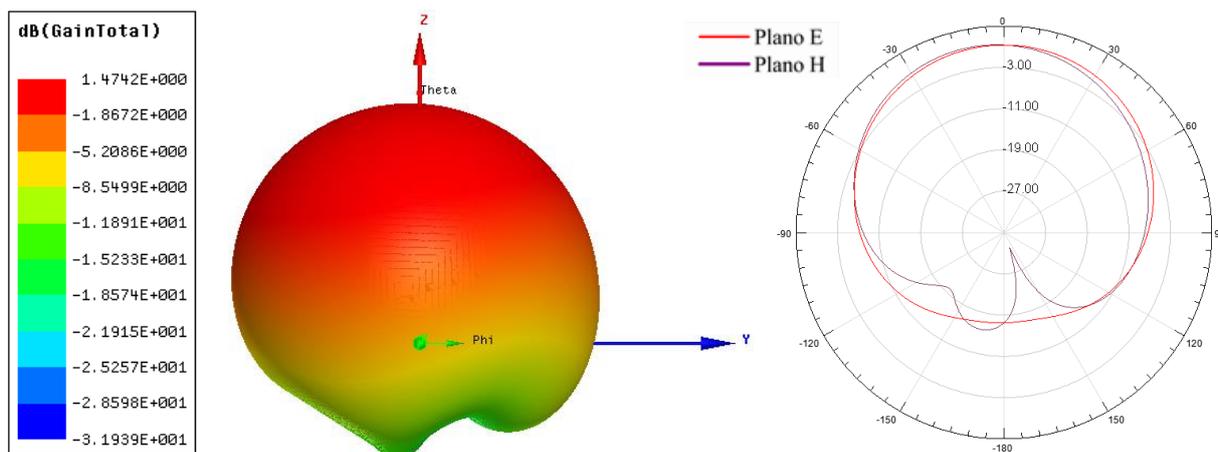


Figura 89: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

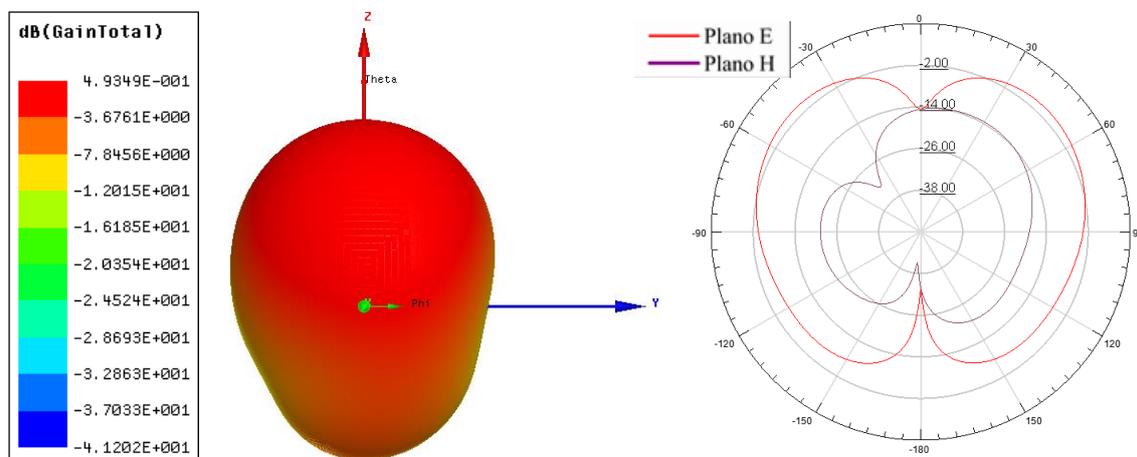


Figura 90: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

No material RT6010 foram impressas células retangular e circular e replicadas para observar o desempenho dessas antenas, na Figura 91 pode-se observar o resultado dessa construção através do  $S_{11}$ . A antena com estrutura retangular e circular pararam ambas de operar nas proximidades da frequência de projeto, entretanto, apresentaram características multibanda. O ganho das antenas passou de 5,38 dB antena padrão para 3,1 dB antena com célula retangular e -3,34 dB para antena circular. A largura de banda aumentou no caso da antena com geometria circular para 40 MHz.

Na Tabela 24 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 92 e 93 têm-se os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

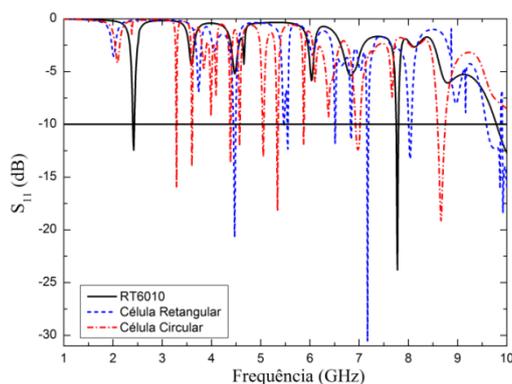


Figura 91: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no *patch* com periodicidade e comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 24: Frequência de ressonância e largura de banda de antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no *patch* com periodicidade  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/20$	4,49	4,45	4,47	40
Célula Circular $\lambda/20$	3,29	3,29	3,29	0

Fonte: Autoria própria, 2016.

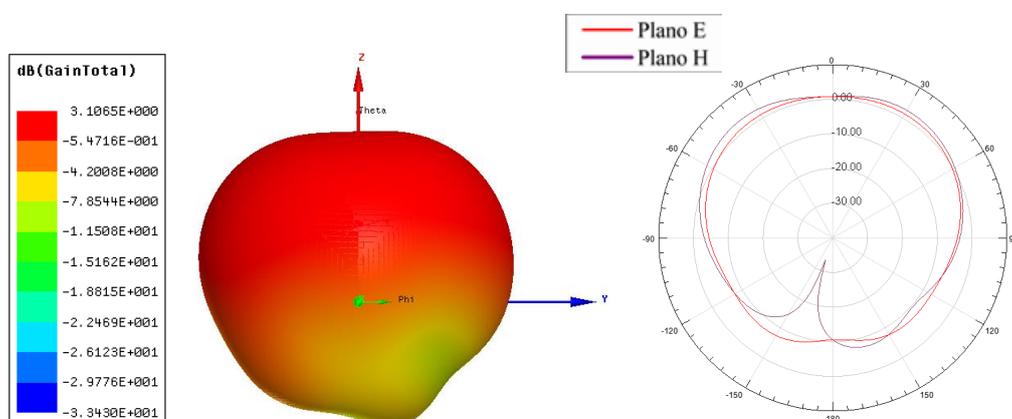


Figura 92: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

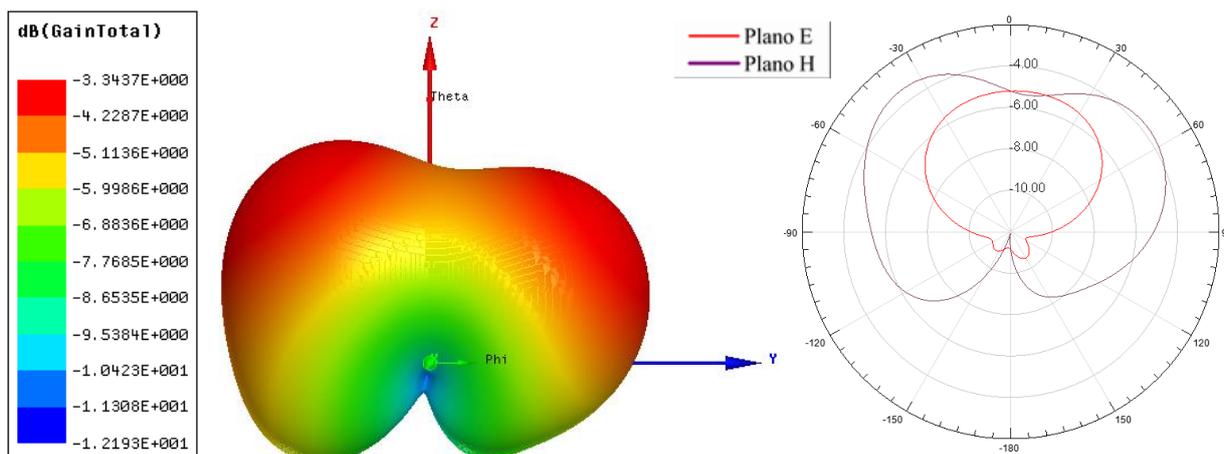


Figura 93: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 94 são apresentadas as curvas de perda de retorno das antenas fabricadas com material RT5880 para o arranjo 3x3, onde foram inseridas as células Metassuperfície no plano de terra com dimensão  $\lambda/10$ .

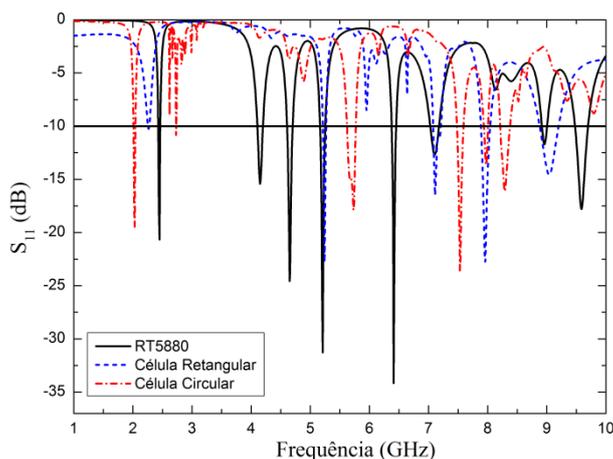


Figura 94: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena retangular apresentou uma atenuação no primeiro modo deixando de operar como antena. A antena circular deslocou o modo para valores menores de frequência. O ganho no caso retangular foi -0,782 dB e na antena circular o ganho foi 4,84 dB.

Na Tabela 25 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 95 e 96 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 25: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/10$	2,27	2,26	2,27	10
Célula Circular $\lambda/10$	2,04	2,01	2,03	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

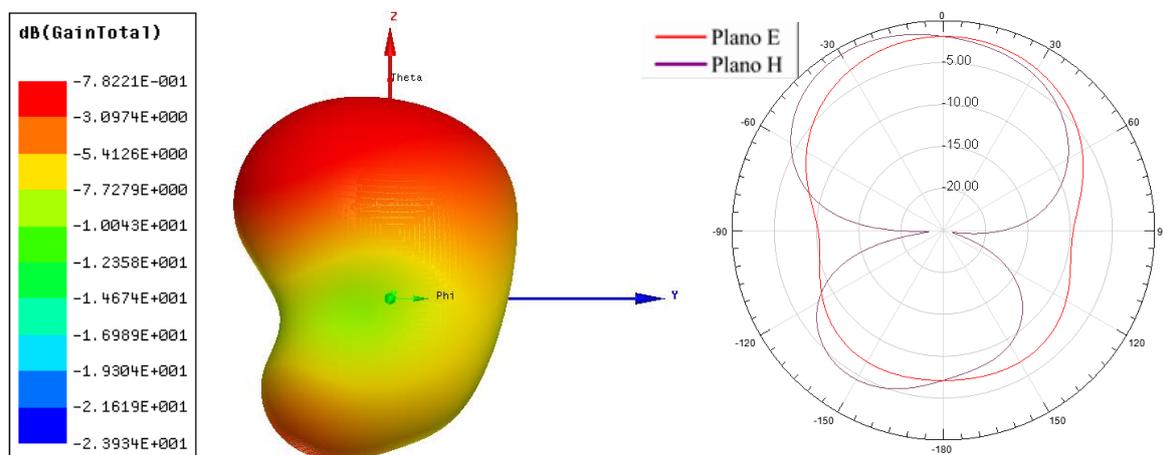


Figura 95: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

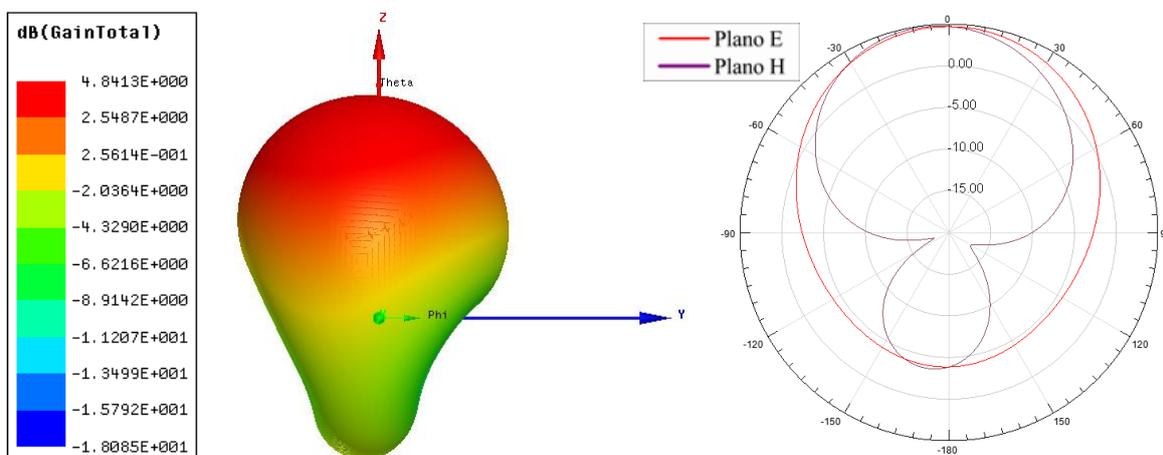


Figura 96: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 97 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material FR4 para o arranjo 3x3.

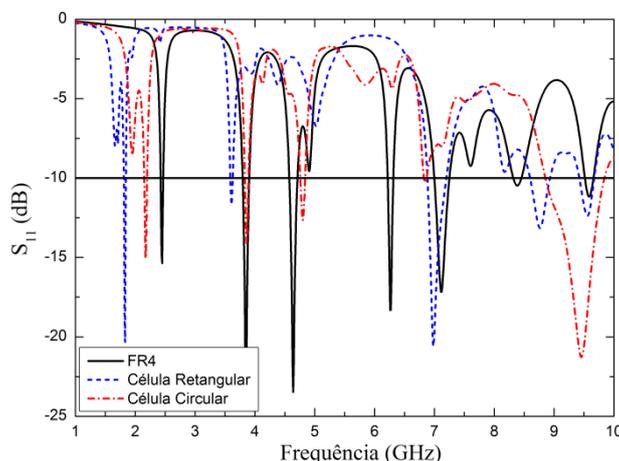


Figura 97: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/10$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

As antenas retangular e circular deslocaram o modo de ressonância para valores menores de frequência, o primeiro modo apresentou atenuação na antena com célula circular e se intensificou na antena com célula retangular. O diagrama de irradiação na antena com estrutura retangular apresentou o comportamento próximo do omnidirecional, na antena com forma retangular o ganho ficou na ordem de  $-0,103$  dB e na antena com forma circular foi de  $-6,76$  dB. A largura de banda ficou 10 MHz na antena com geometria retangular e 30 MHz a antena com geometria circular.

Na Tabela 26 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 98 e 99 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 26: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/10$	1,84	1,81	1,83	30
Célula Circular $\lambda/10$	2,19	2,15	2,17	40

Fonte: Aatoria própria, 2016.

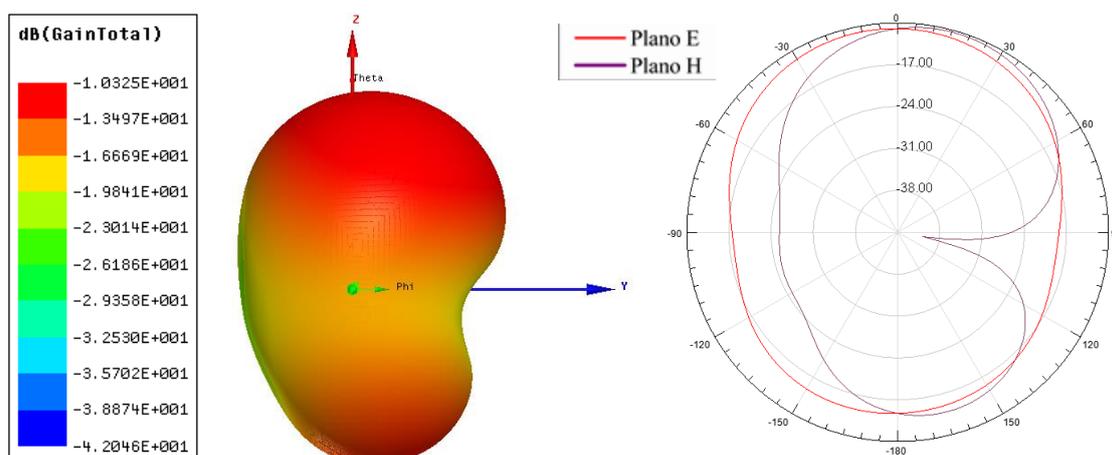


Figura 98: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

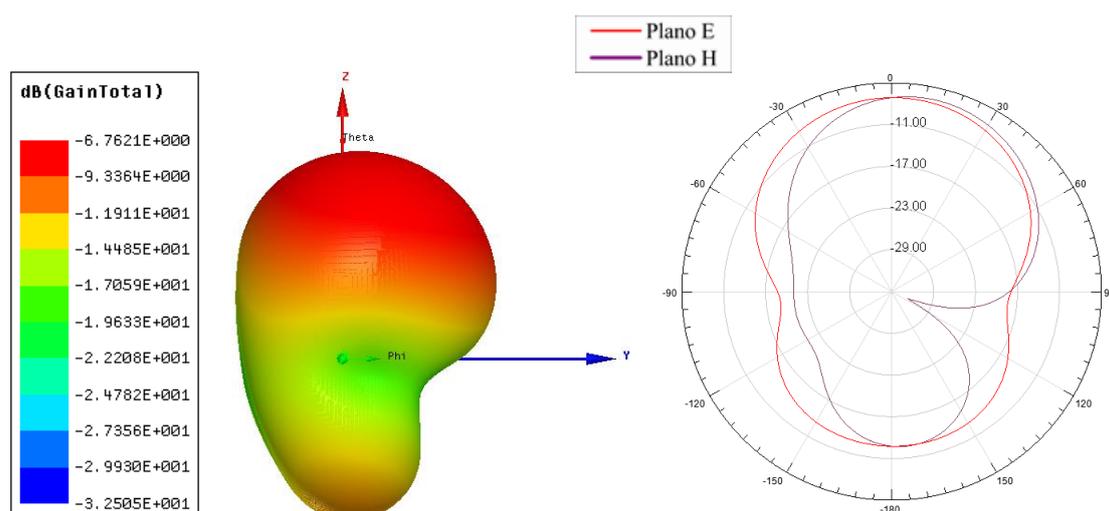


Figura 99: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

N Figura 100 é apresentada a perda de retorno para antena RT6010 com arranjo 3x3.

As antenas com geometrias circular e retangular pararam de operar como antena nas proximidades da frequência de projeto, apresentando vários modos em outros valores de frequência. O diagrama de irradiação da antena com célula retangular apresentou ganho de -2 dB, e na antena circular o ganho ficou 1,54 dB. A largura de banda saiu de 20 MHz na antena de referência para 100 MHz na antena com geometria circular e 0 MHz na antena com geometria retangular.

A Tabela 27 contém os resultados da perda de retorno e nas Figuras 101 e 102 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

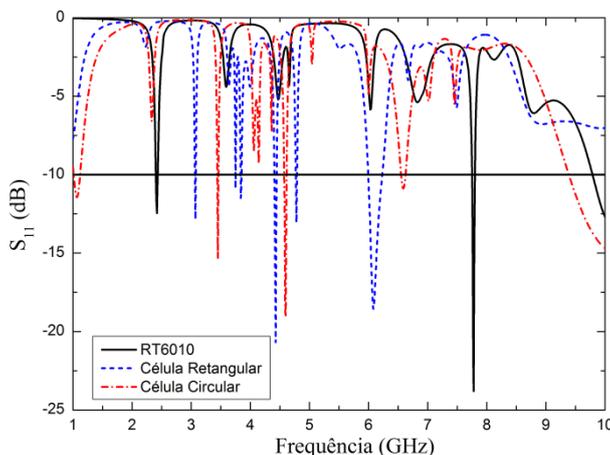


Figura 100: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 27: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/10$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/10$	3,07	3,07	3,07	0
Célula Circular $\lambda/10$	1,12	1,02	1,07	100

Fonte: Autoria própria, 2016.

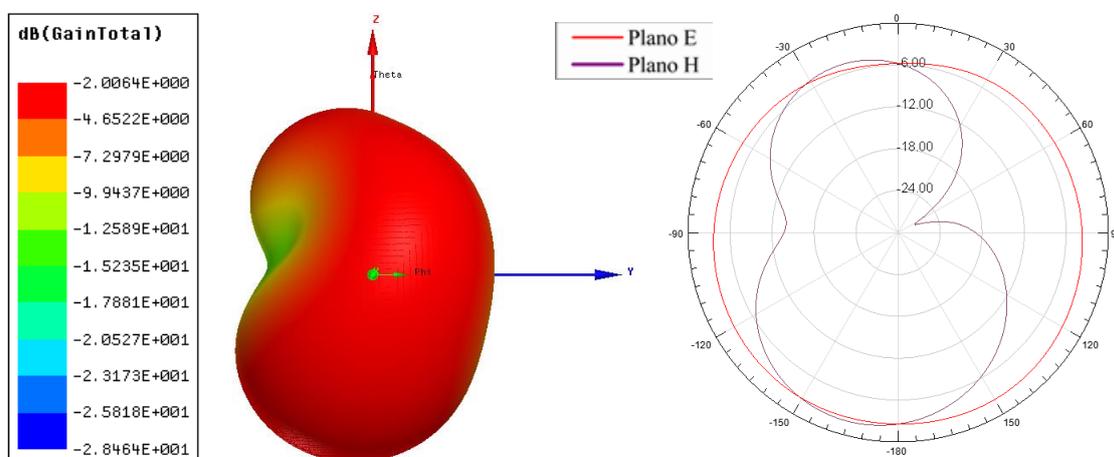


Figura 101: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

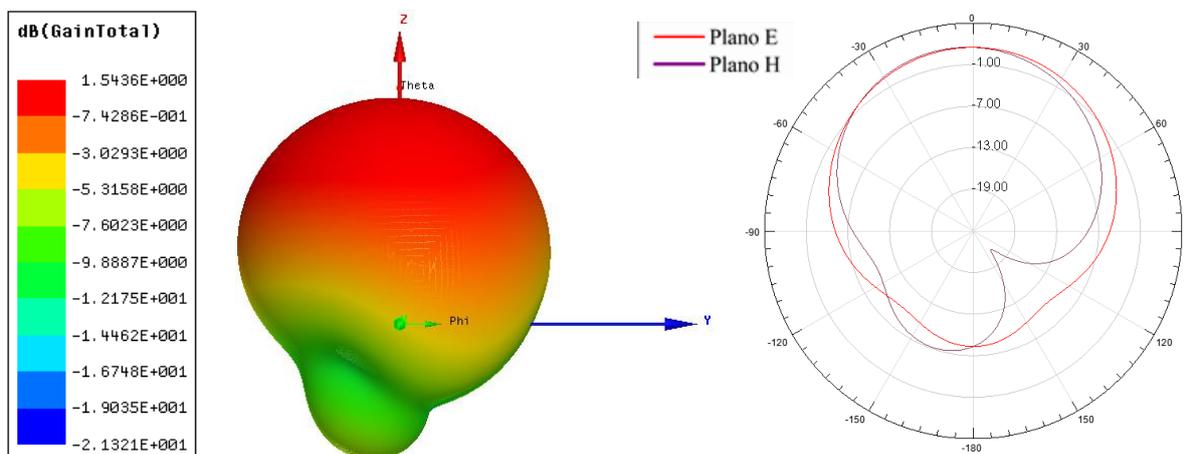


Figura 102: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 103 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 com células de tamanho  $\lambda/15$  com arranjo 3x3.

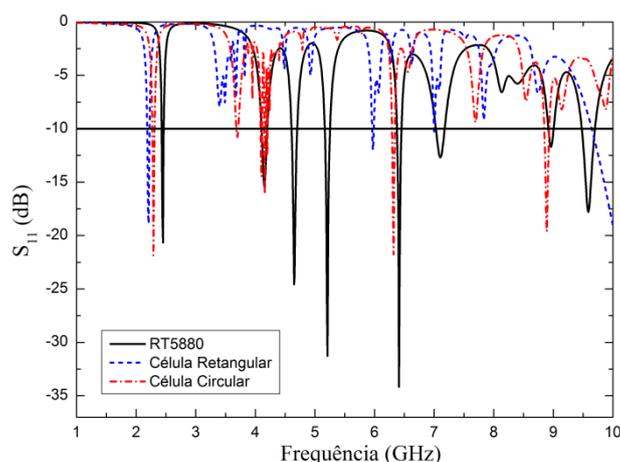


Figura 103: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

As antenas com célula retangular e circular apresentaram deslocamento dos modos para valores menores de frequência. O ganho da antena com célula retangular foi de 5,76 dB e na circular 6,11 dB, a largura de banda passou de 30 MHz na antena padrão para 20 MHz na antena com células circulares. Na Tabela 28 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 104 e 105 pode ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 28: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/15$	2,22	2,19	2,21	30
Célula Circular $\lambda/15$	2,3	2,28	2,29	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

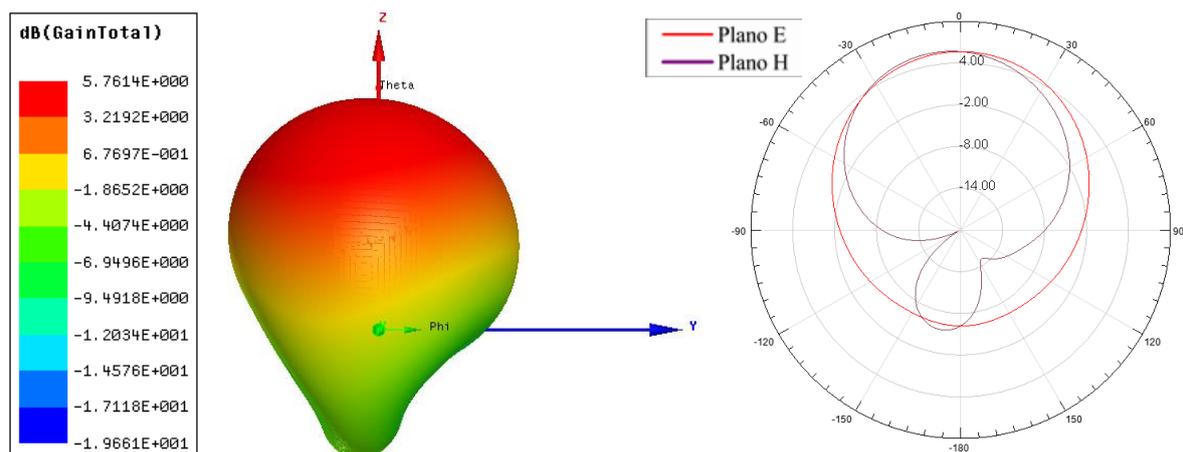


Figura 104: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

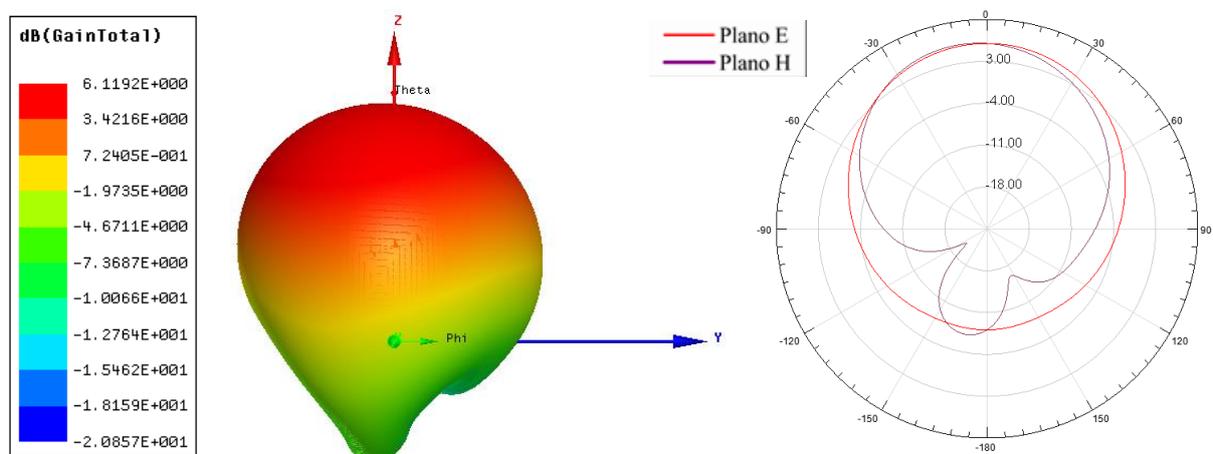


Figura 105: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 106 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material FR4 com células de tamanho  $\lambda/15$  com arranjo 3x3.

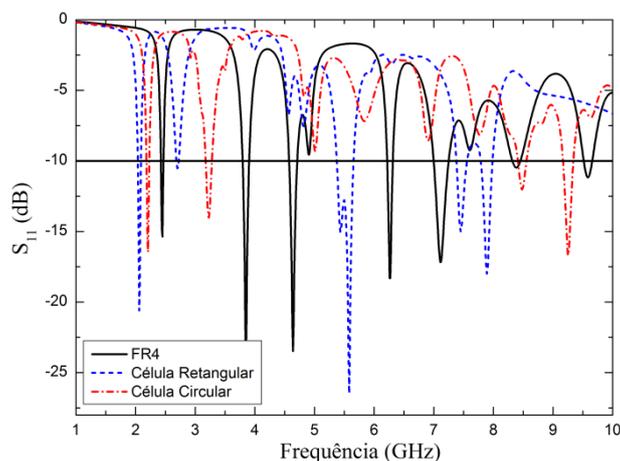


Figura 106: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: A autoria própria, 2016.

As antenas com célula retangular e circular apresentaram deslocamento dos modos para valores menores de frequência. O ganho da antena com célula retangular ficou 1,22 dB e da antena circular foi 1,91 dB.

Na Tabela 29 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 107 e 108 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 29: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/15$	2,08	2,04	2,06	40
Célula Circular $\lambda/15$	2,23	2,19	2,21	40

Fonte: A autoria própria, 2016.

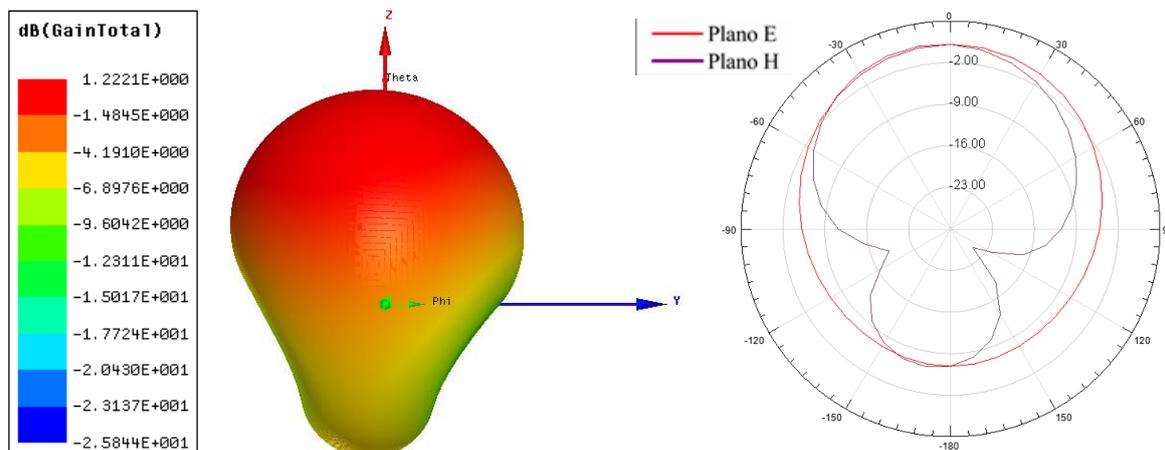


Figura 107: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

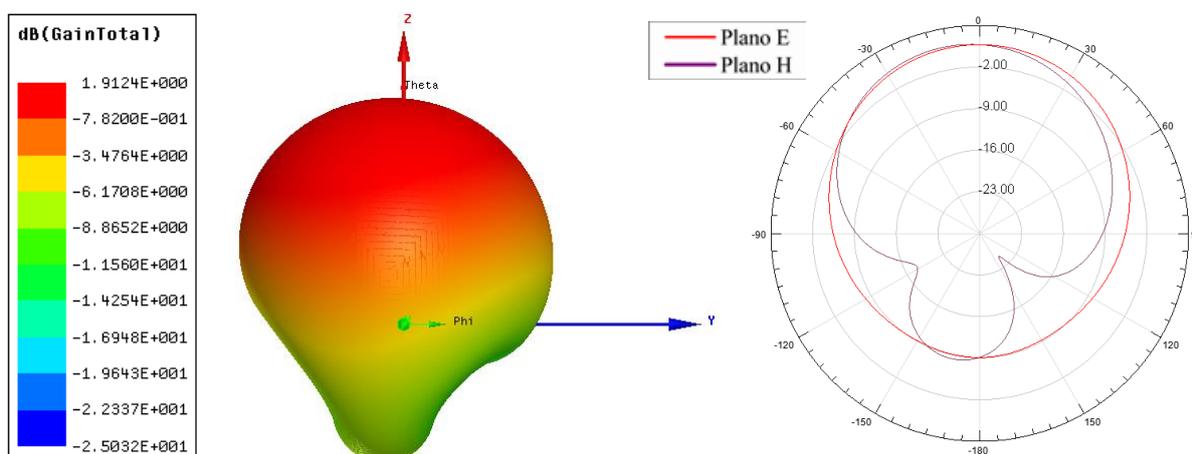


Figura 108: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A Figura 109 contém a perda de retorno para antena RT6010 com  $\lambda/15$  e arranjo 3x3.

A antena com célula retangular parou de operar como antena na frequência de projeto, já a antena com célula circular apresentou deslocamento do modo para valores menores de frequência e intensificou a perda de retorno. O ganho ficou 2,87 dB e na antena com célula circular o ganho foi de 1,84 dB.

Na Tabela 30 são observados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 110 e 111 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

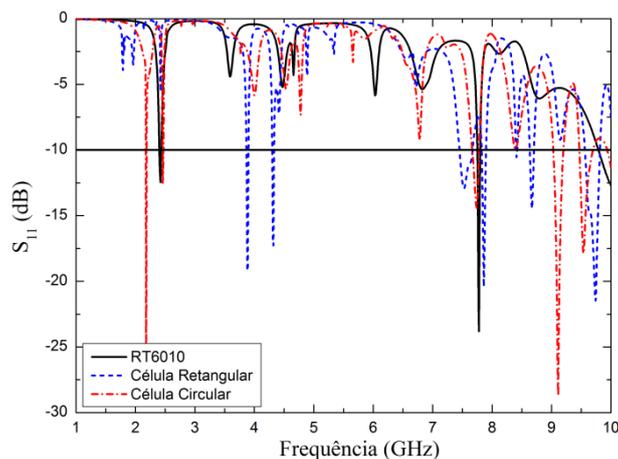


Figura 109: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 30: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/15$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/15$	3,9	3,87	3,88	30
Célula Circular $\lambda/15$	2,18	2,18	2,18	0

Fonte: Autoria própria, 2016.

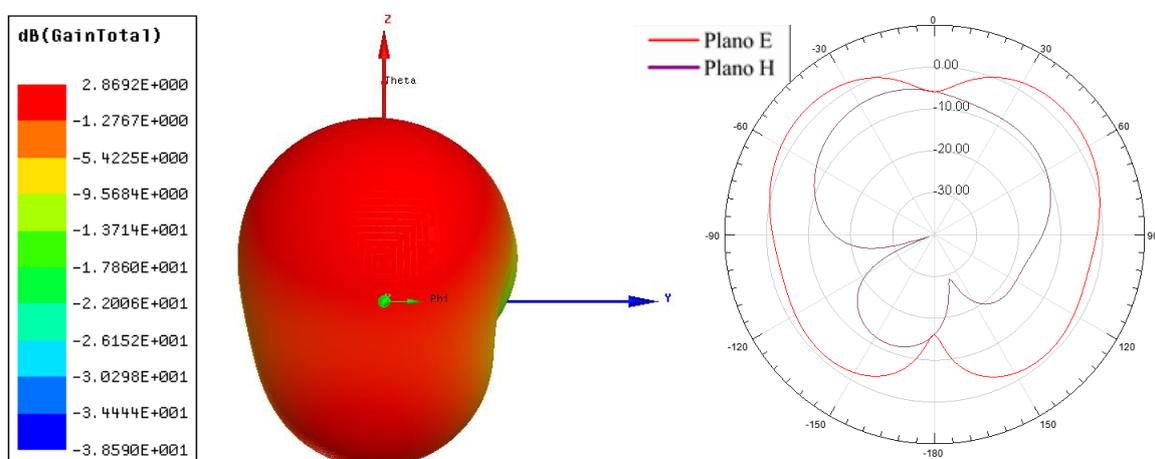


Figura 110: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

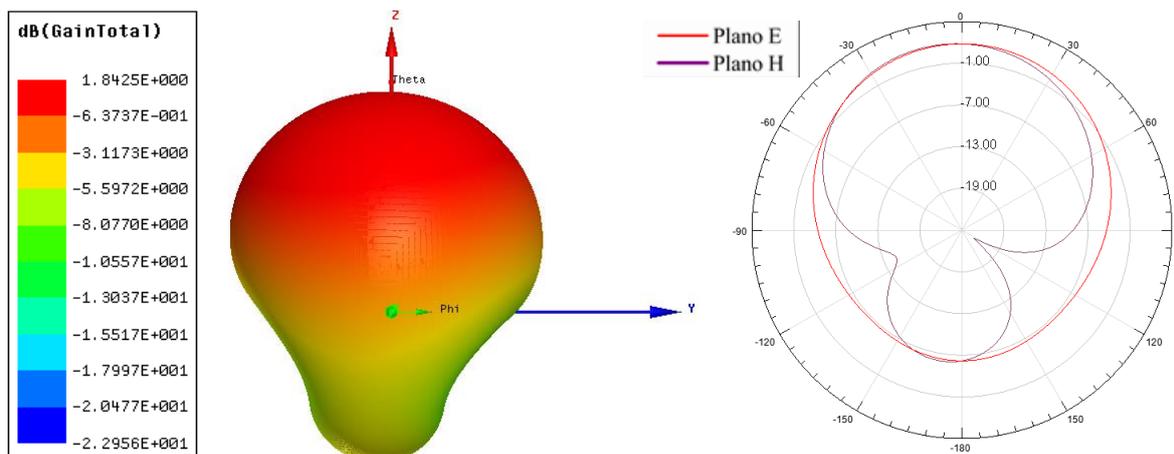


Figura 111: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 112 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 com células de tamanho  $\lambda/20$  com arranjo 3x3.

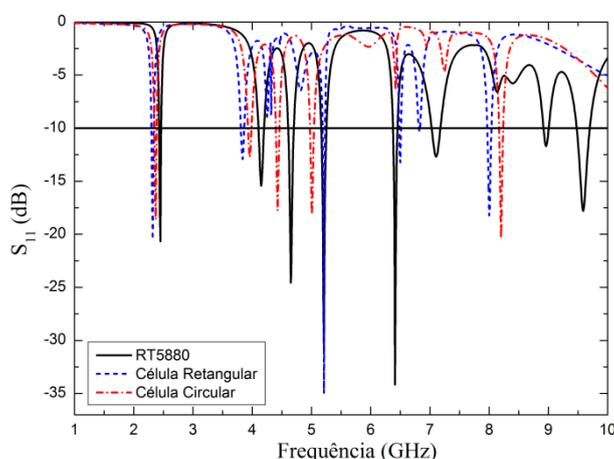


Figura 112: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

As antenas com as células retangular e circular apresentaram deslocamento do modo para valores menores de frequência não foi observada significante variação na largura de banda. O ganho da antena com célula retangular foi 6,23 dB e o da antena com célula circular é 6,41 dB.

Na Tabela 31 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 113 e 114 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 31: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/20$  arranjo 3x3.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/20$	2,33	2,3	2,32	30
Célula Circular $\lambda/20$	2,38	2,35	2,37	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

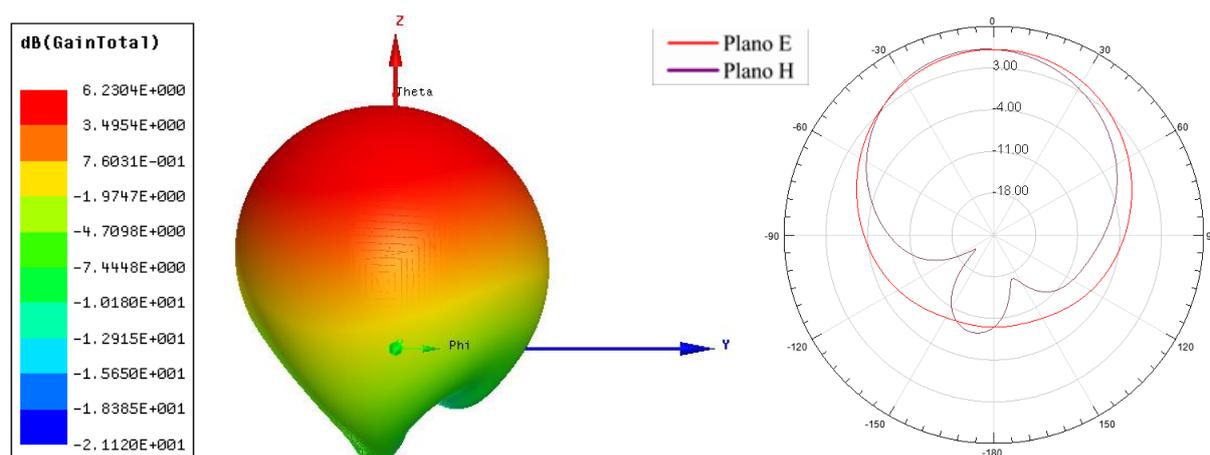


Figura 113: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

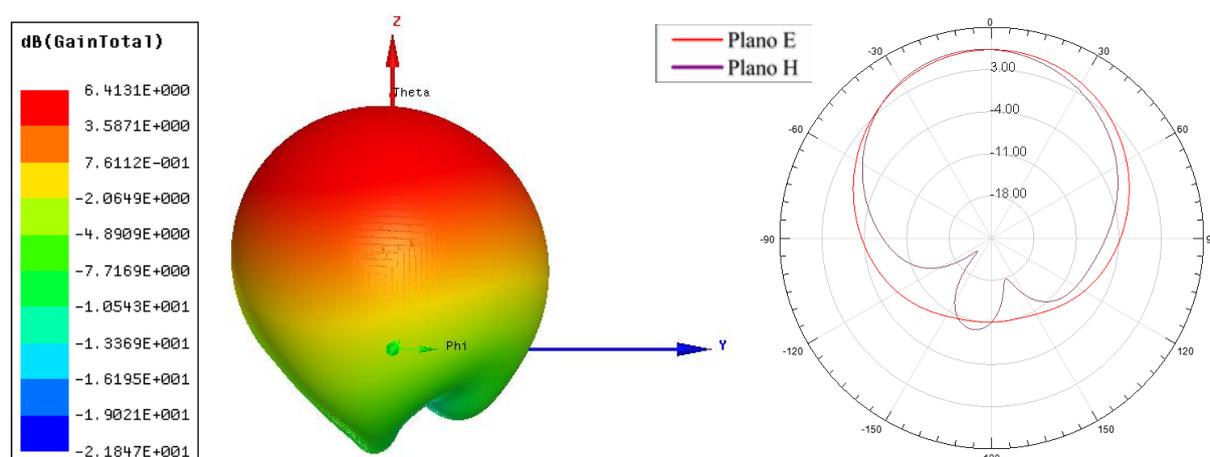


Figura 114: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 115 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material FR4 com células de tamanho  $\lambda/20$  com arranjo 3x3.

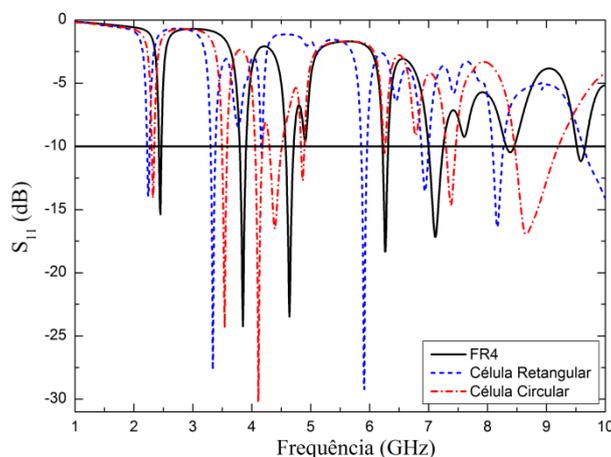


Figura 115: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Com a inserção das células retangular e circular as antenas deslocaram o modo ressonante para valores menores de frequência. Não foi observada mudança na largura de banda. O ganho foi de 2,10 dB para antena de célula retangular e 2,21 dB para antena de célula circular.

Na Tabela 32 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 116 e 117 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 32: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/20$  arranjo 3x3.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/20$	2,26	2,23	2,24	30
Célula Circular $\lambda/20$	2,34	2,31	2,32	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

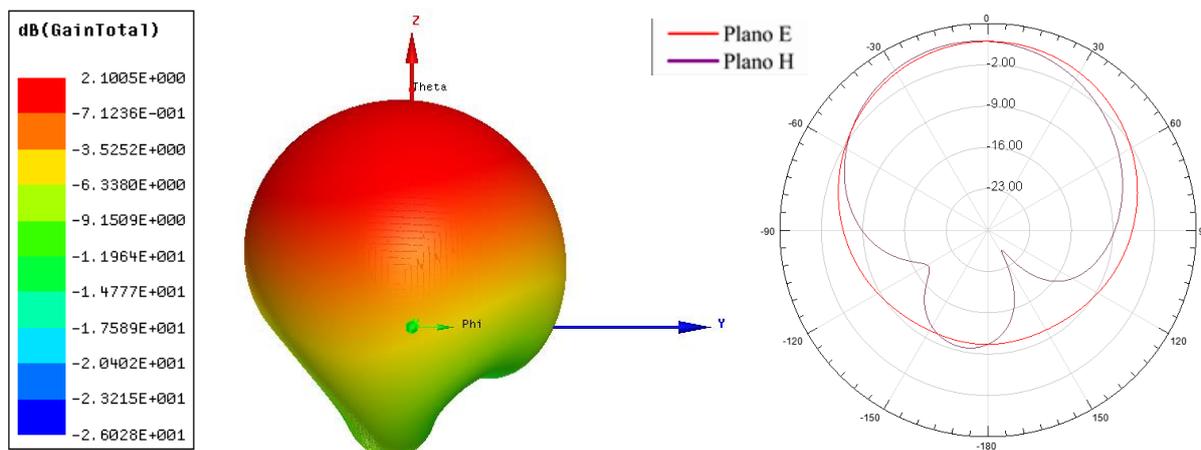


Figura 116: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

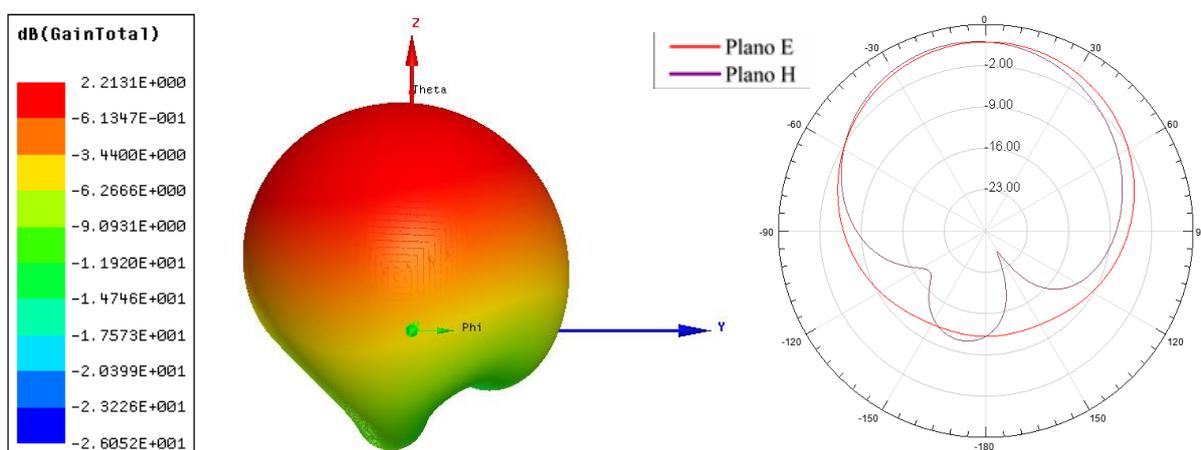


Figura 117: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 118 a perda de retorno da antena RT6010 fabricada com arranjo 3x3.

A antena com célula retangular deslocou o modo para valores maiores de frequência, já a com célula circular parou de operar como antena nas proximidades da frequência de operação. O ganho foi de 0,47 dB para antena com célula retangular e de 3,29 dB na antena de célula circular. A largura de banda reduziu em ambos os casos.

Na Tabela 33 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 119 e 120 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

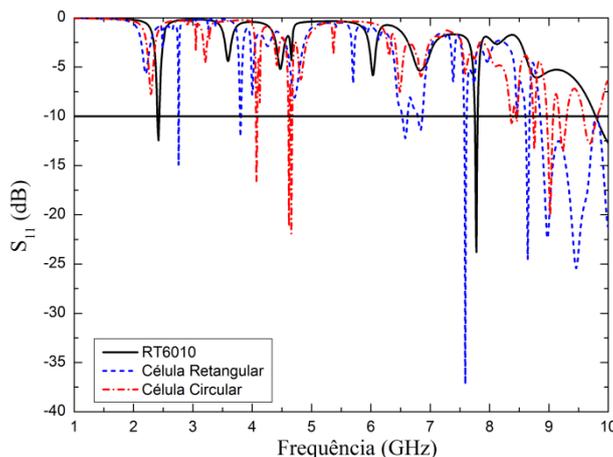


Figura 118: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 33: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/20$  arranjo 3x3.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/20$	2,76	2,76	2,76	0
Célula Circular $\lambda/20$	4,08	4,07	4,07	10

Fonte: Autoria própria, 2016.

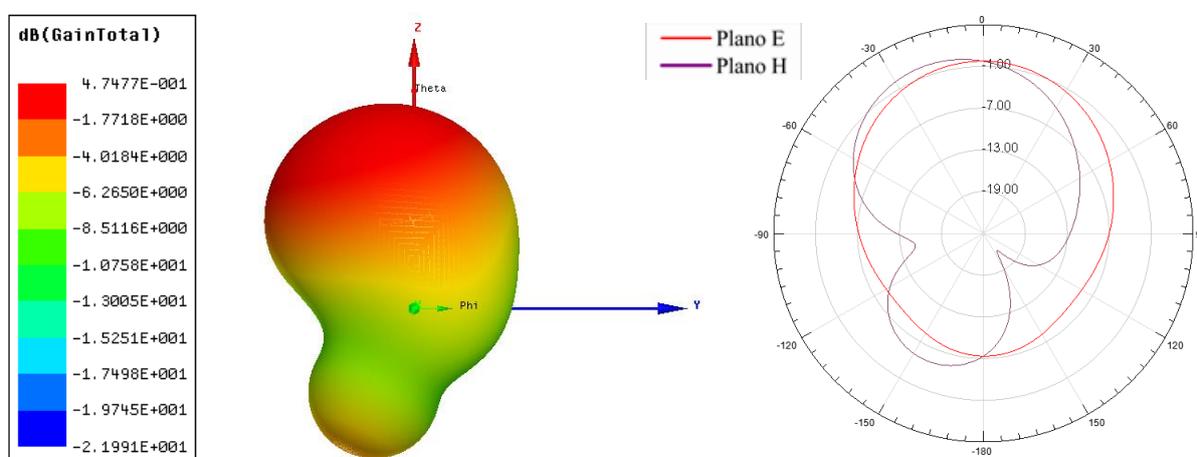


Figura 119: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

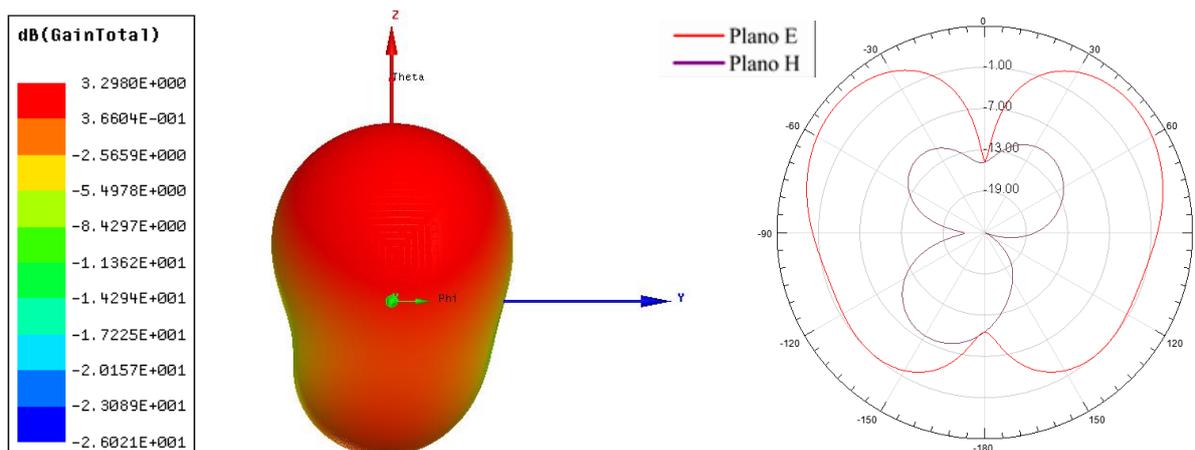


Figura 120: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 121 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 com células de tamanho  $\lambda/20$  com arranjo 4x4.

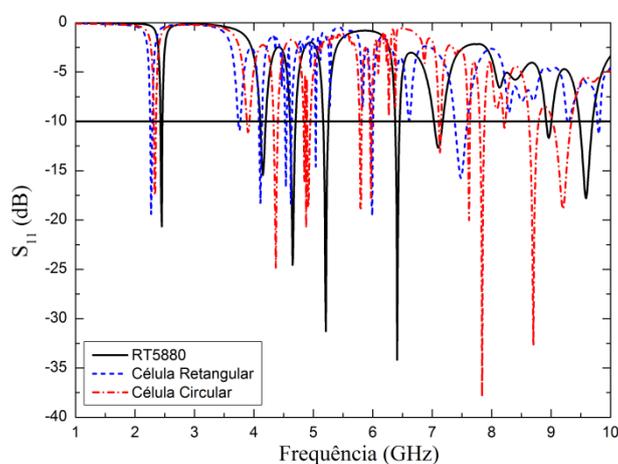


Figura 121: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT5880 4x4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

As antenas com as células retangular e circular apresentaram deslocamento do modo para valores menores de frequência, não ocorreu variação na largura de banda, o ganho para antena com célula retangular foi 6,05 dB e o circular foi 6,29 dB.

Na Tabela 34 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 122 e 123 têm-se os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 34: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/20$  arranjo 4x4.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/20$	2,29	2,26	2,27	30
Célula Circular $\lambda/20$	2,35	2,32	2,33	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

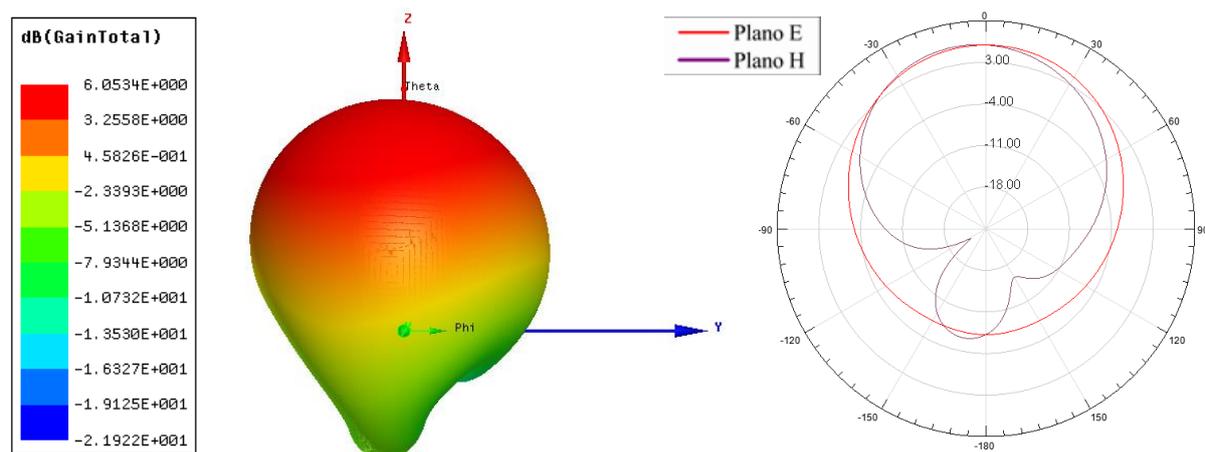


Figura 122: Antena RT5880 retangular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

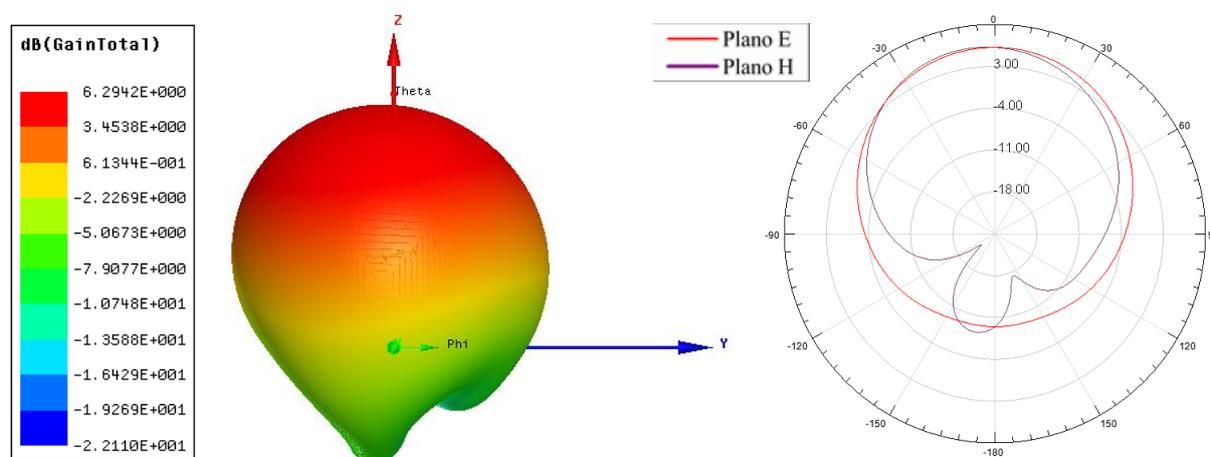


Figura 123: Antena RT5880 circular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 124 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material FR4 com arranjo 4x4.

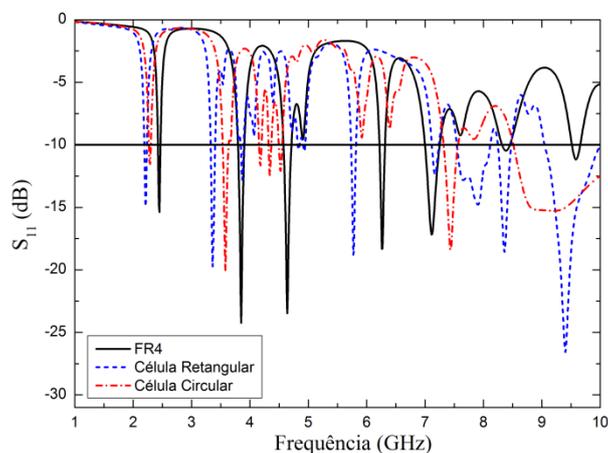


Figura 124: Perda de retorno para antenas simuladas com material FR4 4x4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com célula retangular deslocou o primeiro modo para valores menores de frequência, a antena com célula circular deslocou o primeiro modo para valores menores de frequência em ambos os casos não foi observada mudança na largura de banda. O ganho observado foi de 2,14 dB para célula retangular e 2,27 dB para célula circular.

A Tabela 35 traz os resultados da perda de retorno e nas Figuras 125 e 126 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

Tabela 35: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/20$  arranjo 4x4.

<b>Material</b>	<b>Frequência Superior (GHz)</b>	<b>Frequência Inferior (GHz)</b>	<b>Frequência Ressonância (GHz)</b>	<b>BW (MHz)</b>
FR4	2,46	2,43	2,45	30
Célula Retangular $\lambda/20$	3,03	3	3,01	30
Célula Circular $\lambda/20$	2,3	2,27	2,29	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

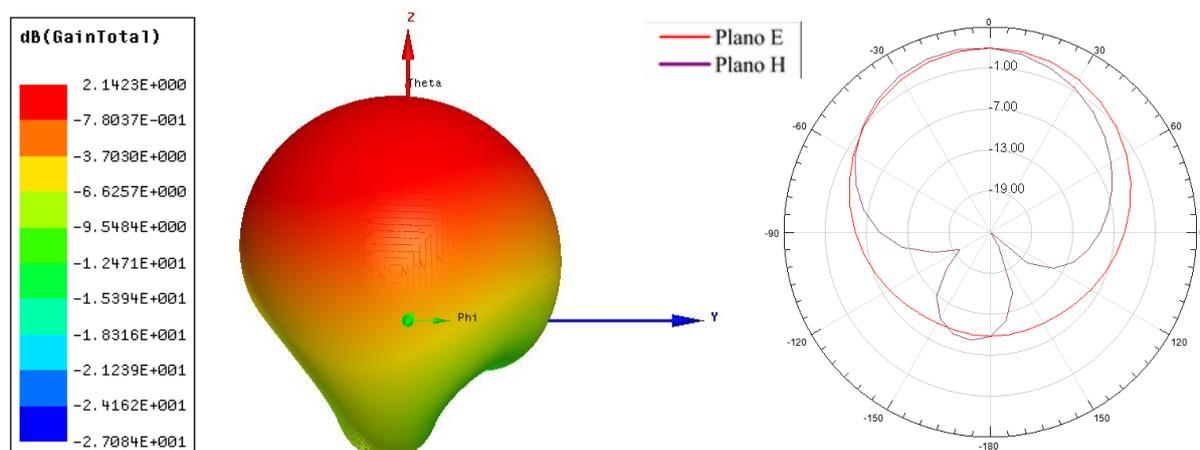


Figura 125: Antena FR4 retangular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

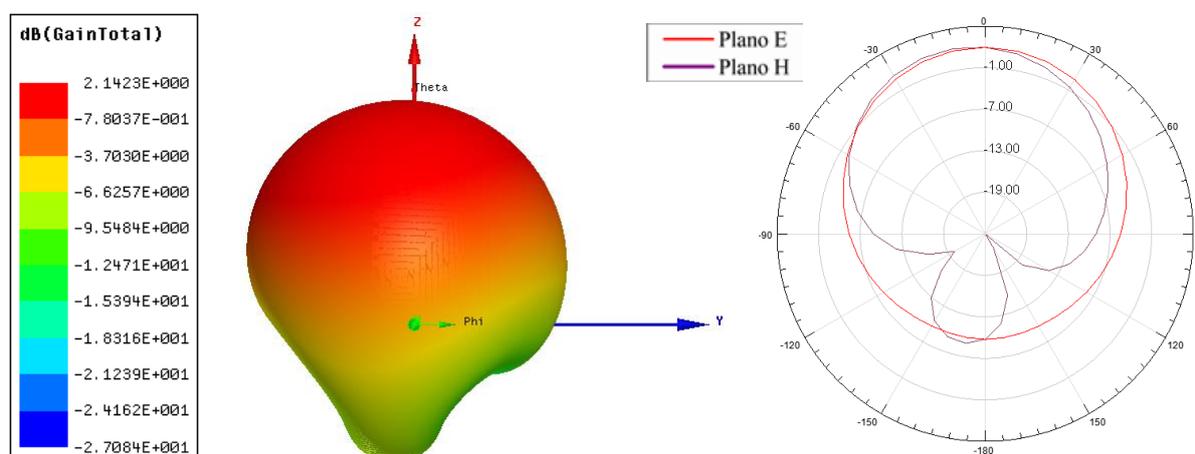


Figura 126: Antena FR4 circular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A curva descrita a Figura 127 abaixo pertence à antena simulada com material RT6010 com arranjo 4x4.

As antenas com as células circular e retangular pararam de operar como antena nas proximidades da frequência de projeto. O ganho foi de 3,71 dB para antena com célula retangular e 2,94 dB para antena com célula circular. A largura de banda manteve-se em 20 MHz com a aplicação da célula retangular e diminuiu para a célula circular.

Na Tabela 36 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 128 e 129 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células circular e retangular.

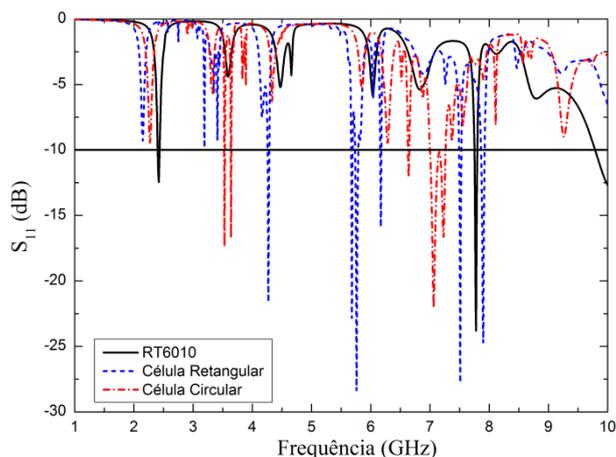


Figura 127: Perda de retorno para antenas simuladas com material RT6010 4x4 modificados no Plano de terra, com comprimento de onda  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 36: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com aplicação de Metassuperfície no plano de terra  $\lambda/20$  arranjo 4x4.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
Célula Retangular $\lambda/20$	4,28	4,26	4,27	20
Célula Circular $\lambda/20$	3,53	3,53	3,53	0

Fonte: Autoria própria, 2016.

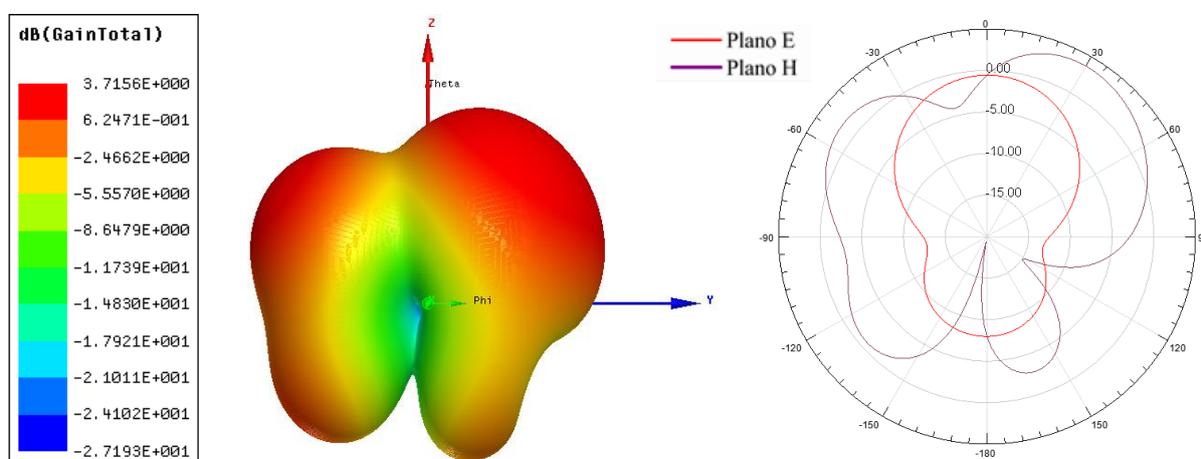


Figura 128: Antena RT6010 retangular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

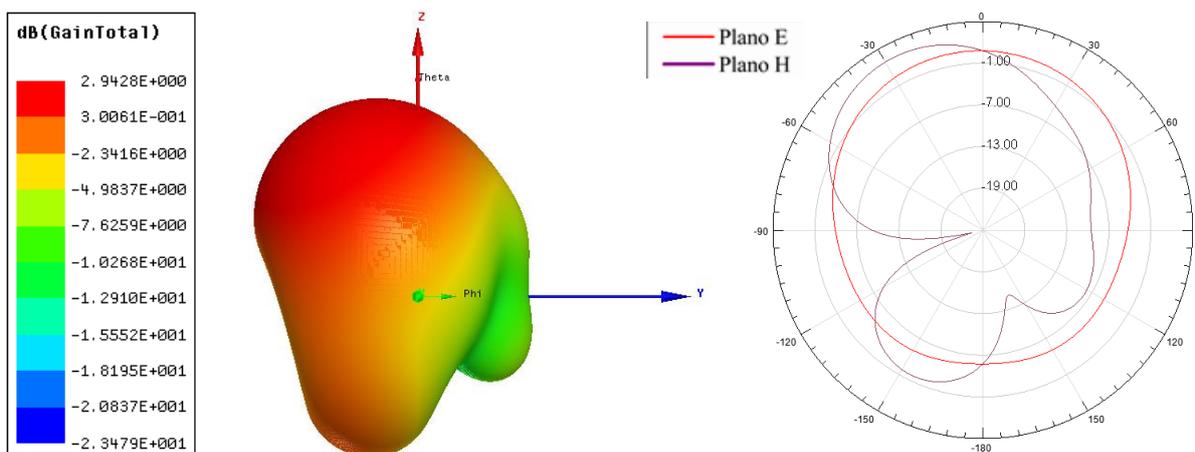


Figura 129: Antena RT6010 circular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

### 7.1.3 Antenas com modificação do comprimento de onda

As antenas apresentadas nessa seção tiveram o comprimento de onda variado nos tamanhos  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ . Várias respostas foram observadas respostas como, aumento na largura de banda, aparecimento de novos modos e mudanças nos padrões de irradiação. Na Figura 130 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 com Metassuperfície no *patch* de tamanho  $\lambda/10$ .

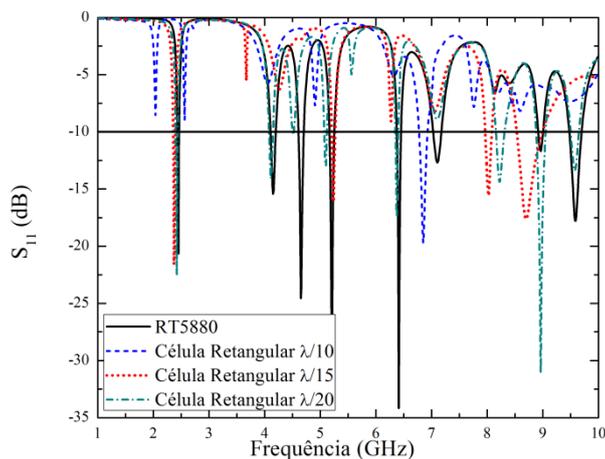


Figura 130: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular no *patch* de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Ao aplicar as estruturas retangulares foi observado que a antena com célula  $\lambda/10$  deslocou seu modo para valores elevados de frequência, as antenas com célula  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$

ocorreu um deslocamento no sentido dos valores menores de frequência, bem como a formação de vários modos em valores mais elevados de frequência. A largura de banda do primeiro modo que antes era 30 MHz na antena padrão passou para 140 MHz na antena com célula  $\lambda/10$ . Na Tabela 37 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 131, 132 e 133 podem-se observar os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

Tabela 37: Variação do comprimento de onda nos valores de  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  para as antenas RT5880 com célula retangular.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	6,92	6,78	6,85	140
$\lambda/15$	2,39	2,36	2,37	30
$\lambda/20$	2,44	2,41	2,42	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

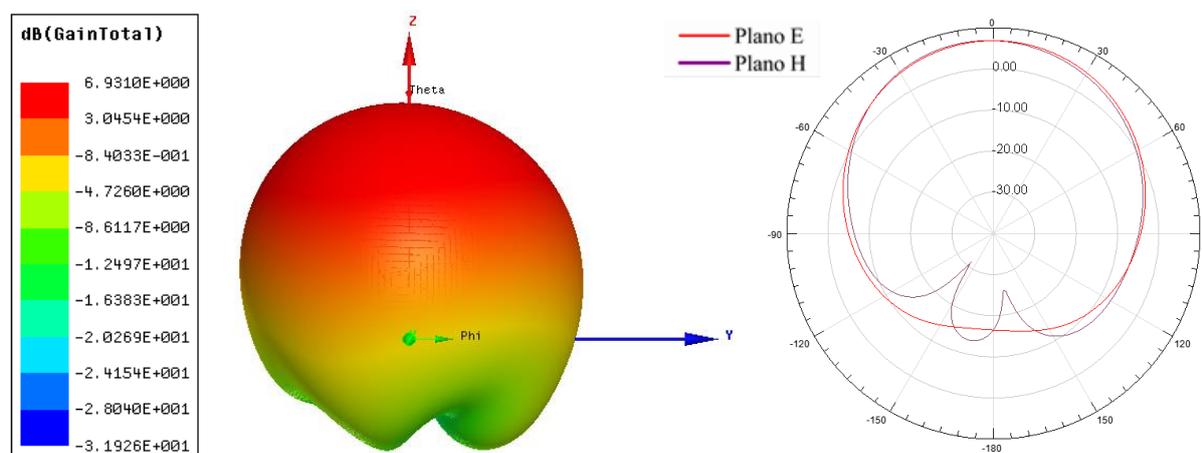


Figura 131: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

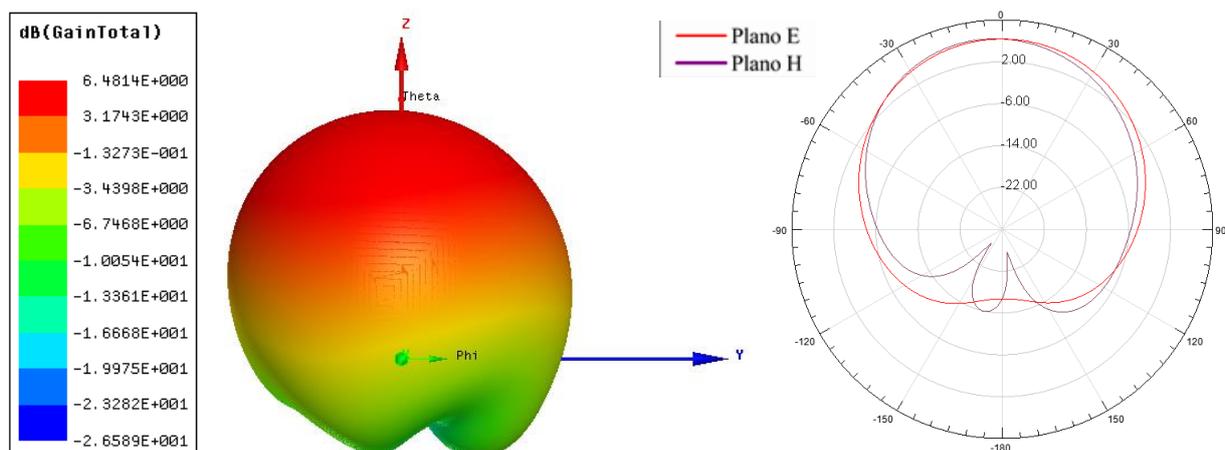


Figura 132: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

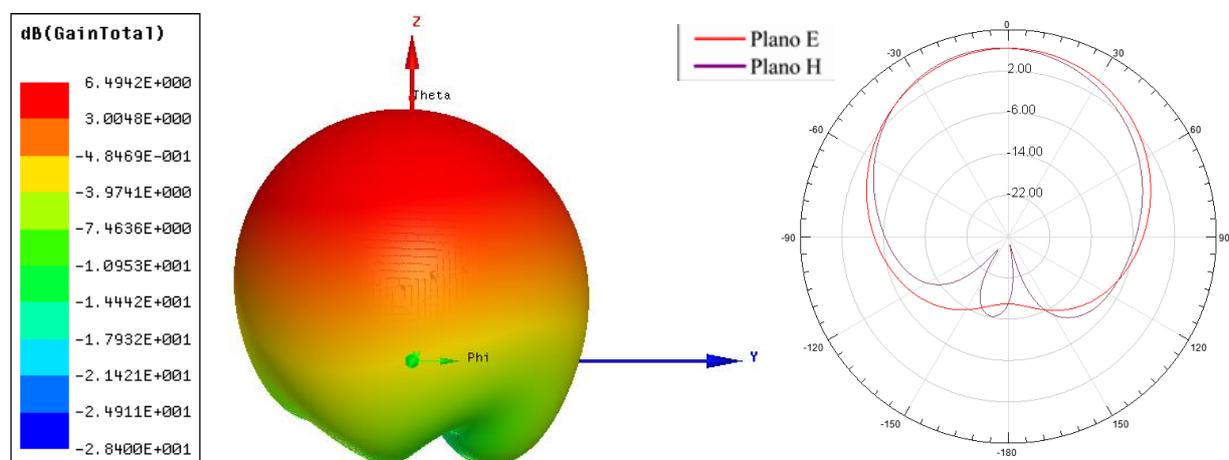


Figura 133: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 134 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 para diferentes comprimentos de onda.

A aplicação das células com tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  deslocou o primeiro modo das antenas para valores menores de frequência, foi observada a formação de alguns modos em valores mais elevados de frequência. A largura de banda se manteve inalterada apresentando redução para a antena com célula de tamanho  $\lambda/20$ .

Na Tabela 38 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 135, 136 e 137 têm-se os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

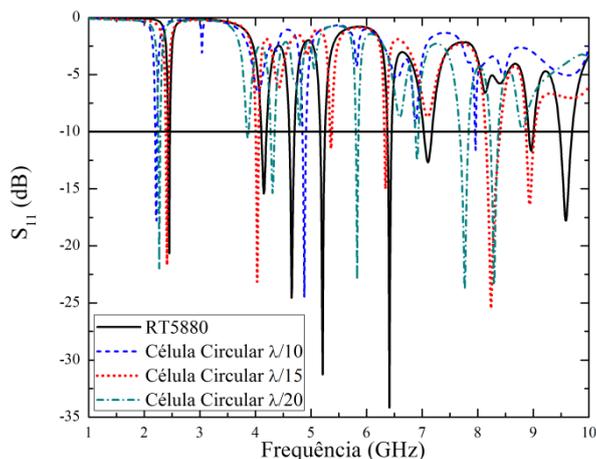


Figura 134: Antena RT5880 com Metassuperfície circular no *patch* de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 38: Variação do comprimento de onda nos valores de  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  para as antenas RT5880 com célula circular.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	2,23	2,2	2,22	30
$\lambda/15$	2,42	2,39	2,41	30
$\lambda/20$	2,28	2,26	2,27	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

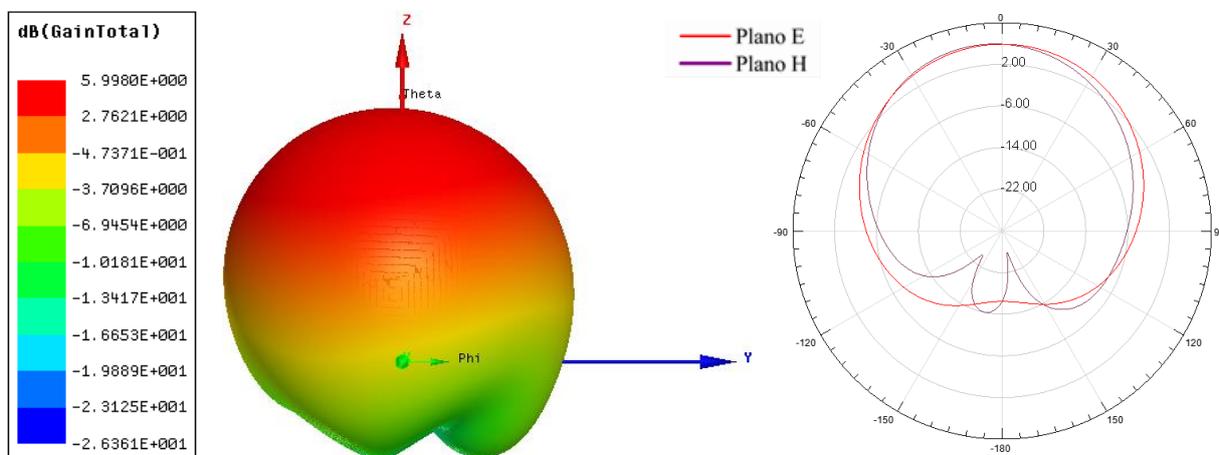


Figura 135: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

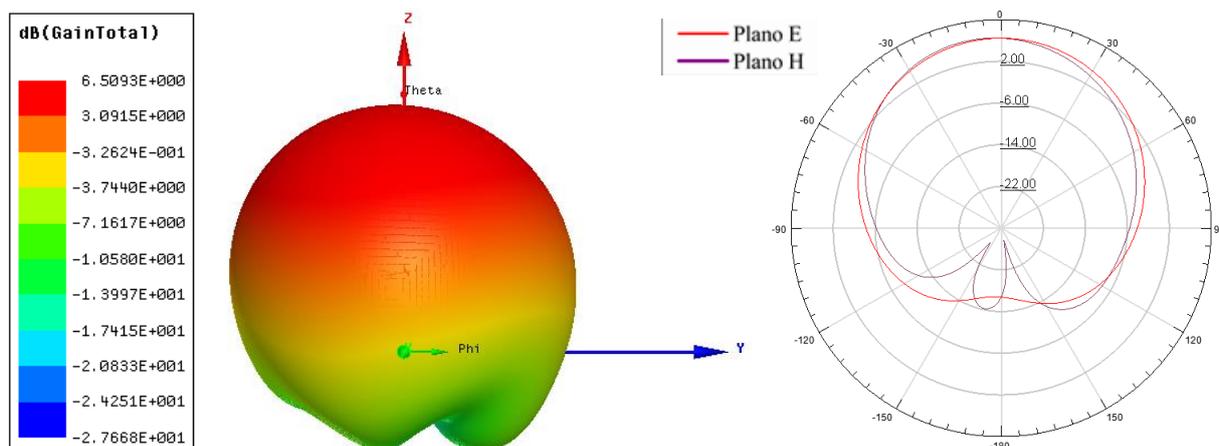


Figura 136: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

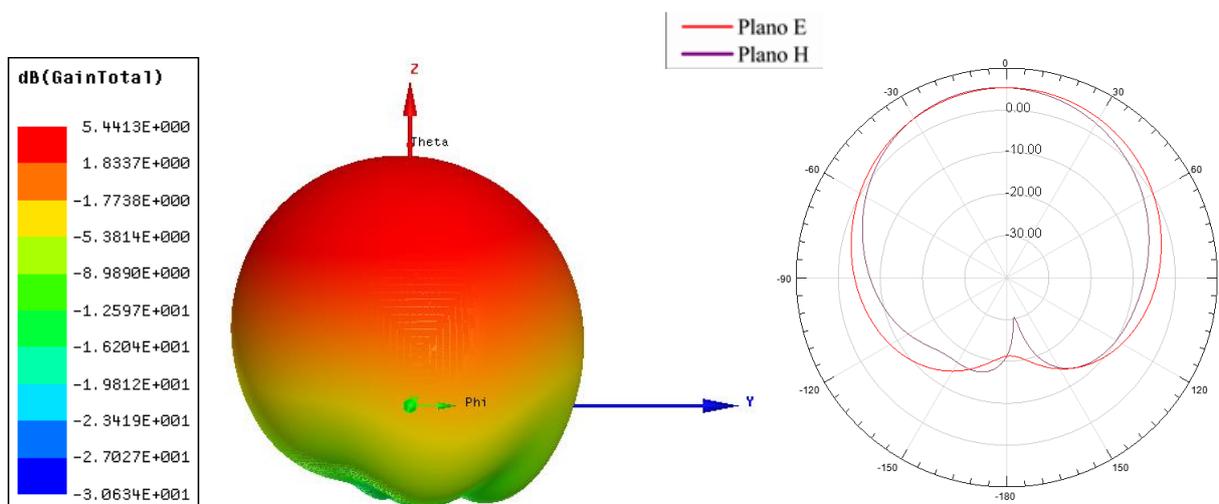


Figura 137: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 138 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 com células retangulares de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  respectivamente.

A aplicação das células retangulares de tamanho  $\lambda/10$  e  $\lambda/20$  deslocou para valores mais elevados de frequência o primeiro modo da antena com material RT5880, produzindo ainda outros modos nesses valores, já a antena com célula  $\lambda/15$  deslocou o modo na direção dos valores menores de frequência. A antena com maior largura de banda foi a com célula  $\lambda/10$  que apresentou 50 MHz.

Na Tabela 39 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 139, 140 e 141 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

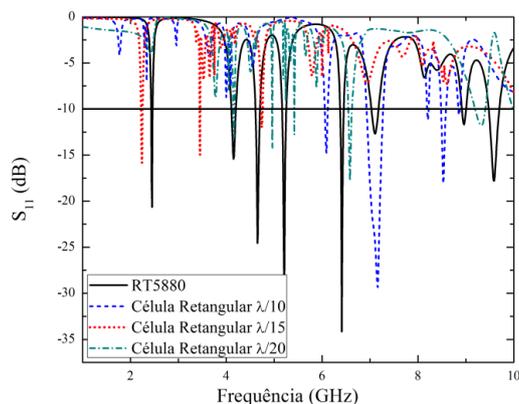


Figura 138: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular no (*patch* periódico) de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 39: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com periodicidade no *patch* retangular para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	6,11	6,06	6,09	50
$\lambda/15$	2,25	2,23	2,24	20
$\lambda/20$	4,17	4,15	4,16	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

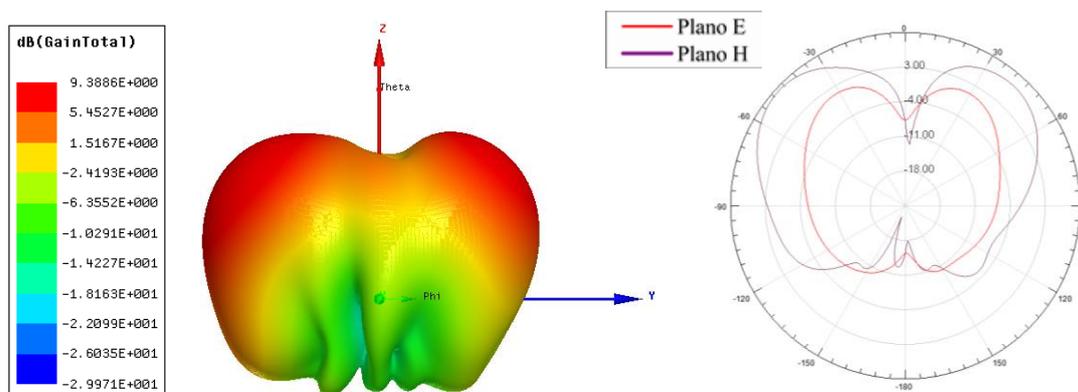


Figura 139: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

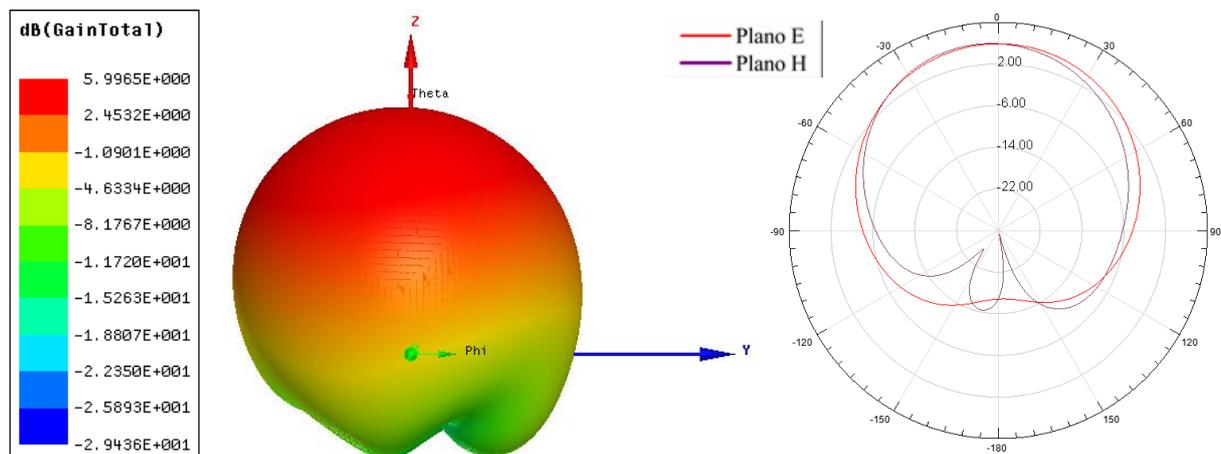


Figura 140: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

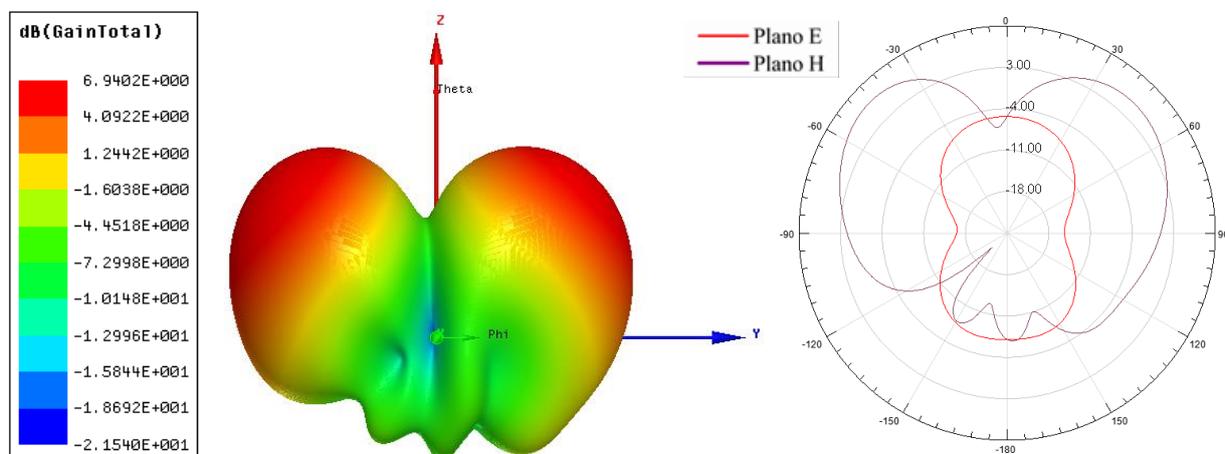


Figura 141: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 142 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 com células circulares de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  respectivamente.

A antena com célula circular  $\lambda/10$  deslocou o primeiro modo para valores elevados de frequência, onde ainda apresentou outros modos. As antenas com  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  deslocaram o modo para valores menores de frequência e a antena com  $\lambda/20$  intensificou a perda de retorno. A largura de banda foi reduzida nas antenas com células  $\lambda/10$  e  $\lambda/15$  para 10 e 20 MHz respectivamente. Na Tabela 40 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 143, 144 e 145 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

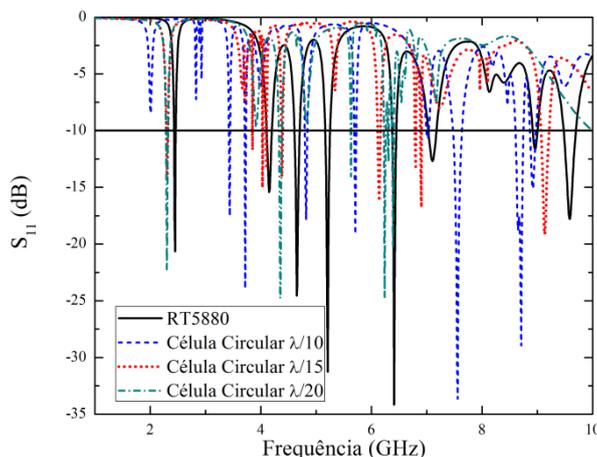


Figura 142: Antena RT5880 com Metassuperfície circular no (*patch* periódico) de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 40: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com periodicidade no *patch* circular para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	3,44	3,43	3,44	10
$\lambda/15$	2,32	2,3	2,31	20
$\lambda/20$	2,32	2,29	2,3	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

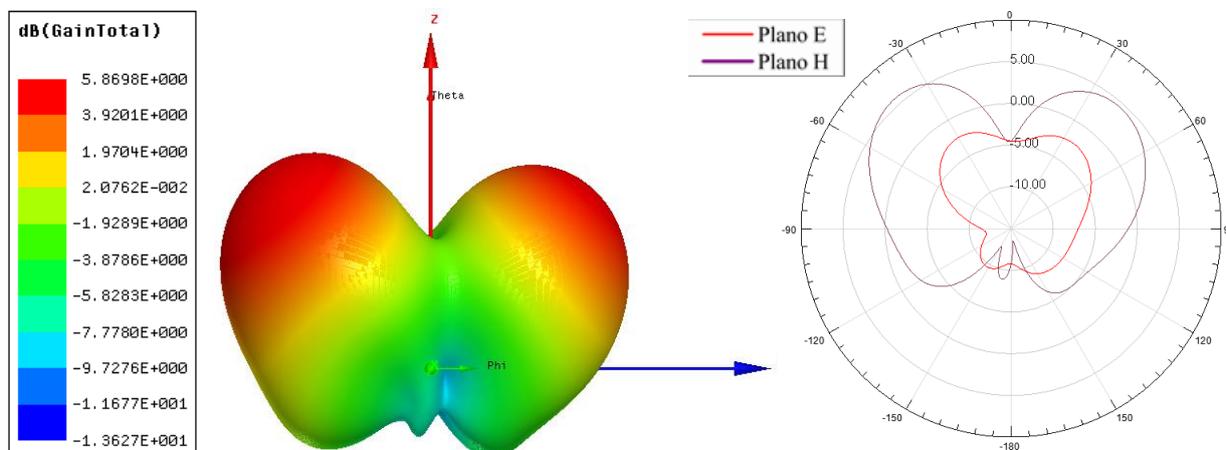


Figura 143: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

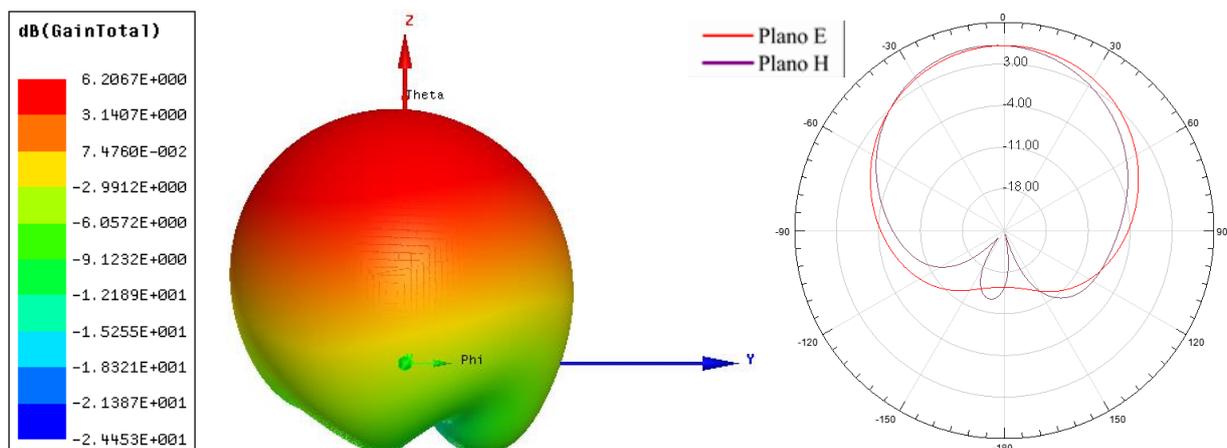


Figura 144: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

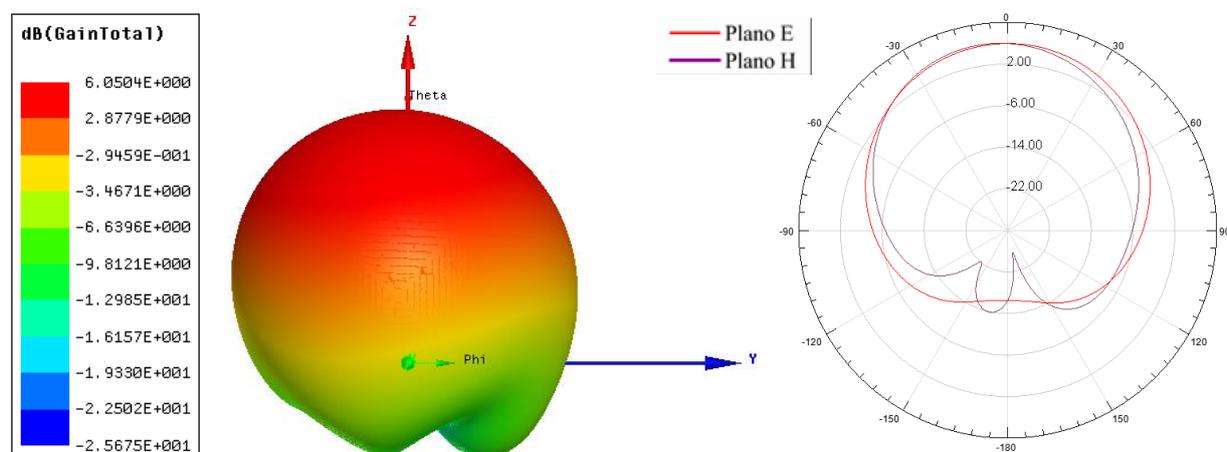


Figura 145: Antena RT5880 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 146 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 com célula retangular de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  aplicadas ao plano de terra.

A inserção das células  $\lambda/10$  retangulares na antena de material RT5880 deslocou o primeiro modo para valores menores de frequência. As antenas com células  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  deslocaram o primeiro modo para valores menores de frequência. A largura de banda na antena padrão foi de 30 MHz e passou para 10 MHz na antena com célula  $\lambda/10$ . Na Tabela 41 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 147, 148 e 149 podem ser

vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

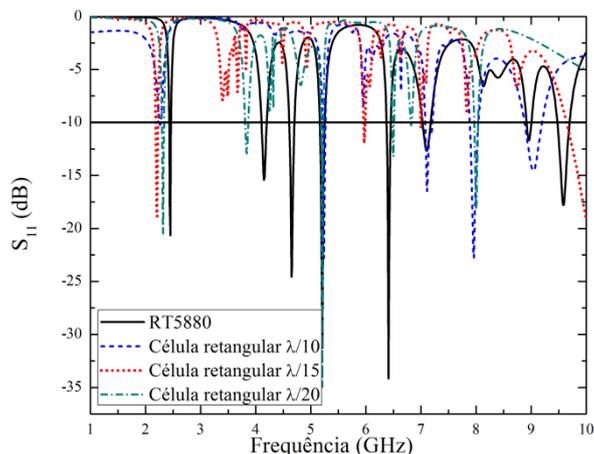


Figura 146: Antena RT5880 com Metassuperfície retangular no (plano de terra) de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 41: Freqüência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com célula retangular no plano de terra para variação de  $\lambda$ .

Material	Freqüência Superior (GHz)	Freqüência Inferior (GHz)	Freqüência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	2,27	2,26	2,27	10
$\lambda/15$	2,22	2,19	2,21	30
$\lambda/20$	2,33	2,3	2,32	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

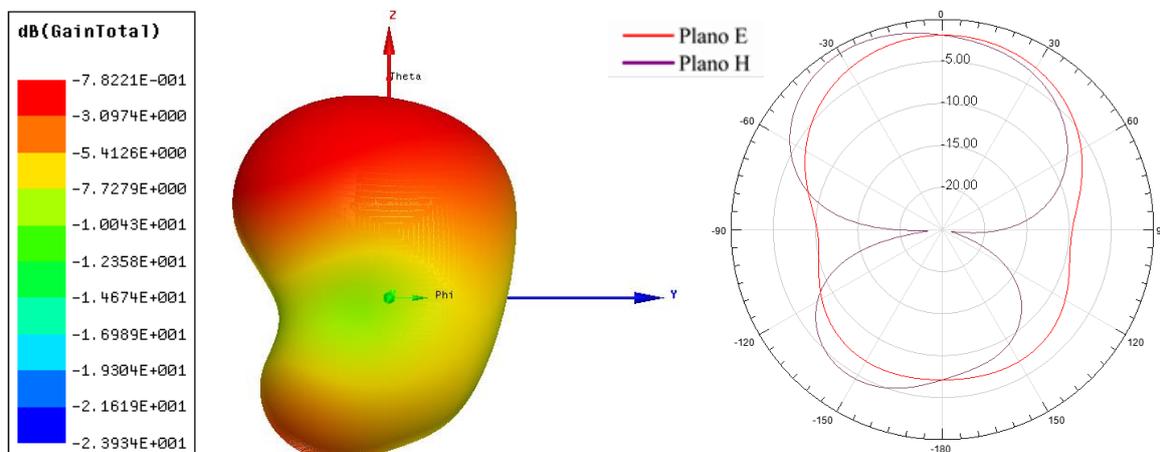


Figura 147: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

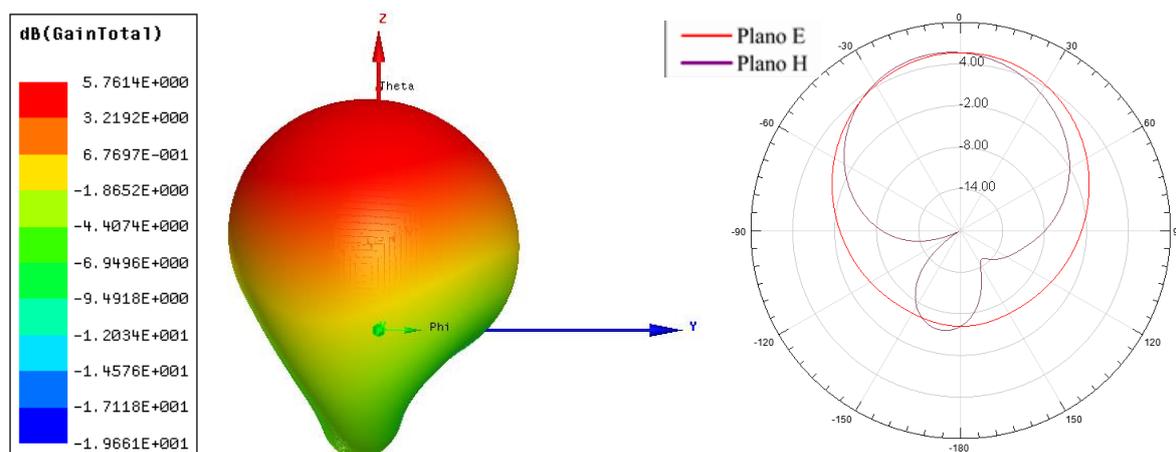


Figura 148: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

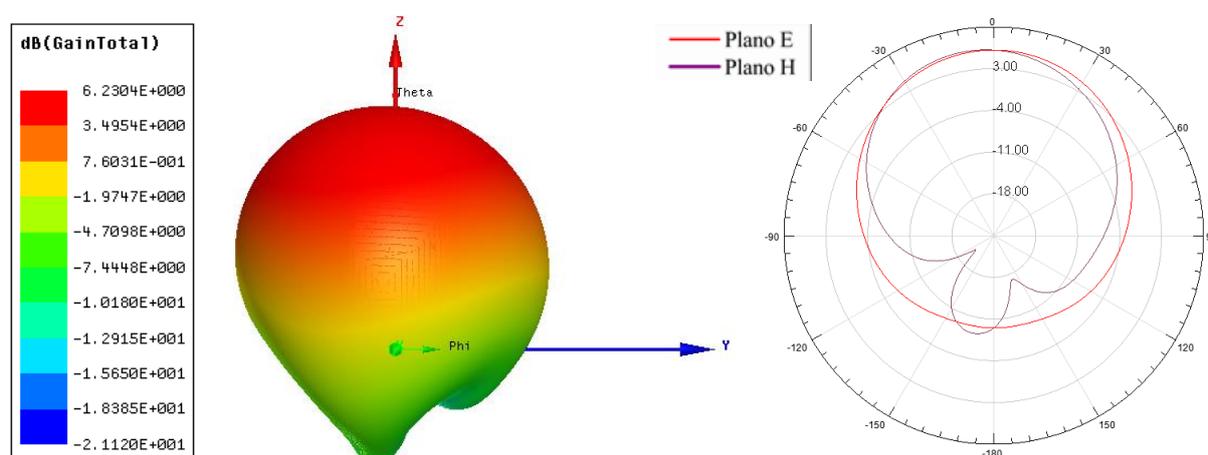


Figura 149: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 150 a perda de retorno para a antena fabricada com RT5880.

A inserção da célula circular na antena deslocou o primeiro modo das antenas para valores menores de frequência, sendo o modo que apresentou o maior valor de deslocamento foi o de tamanho  $\lambda/10$  seguido pelo de tamanho  $\lambda/15$  e finalizando com o de tamanho  $\lambda/20$ . Foi observado a formação de outros modos em valores maiores de frequência, a largura de banda caiu para 20 MHz na antena com célula de tamanho  $\lambda/15$ .

Na Tabela 42 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 151, 152 e 153 contêm os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

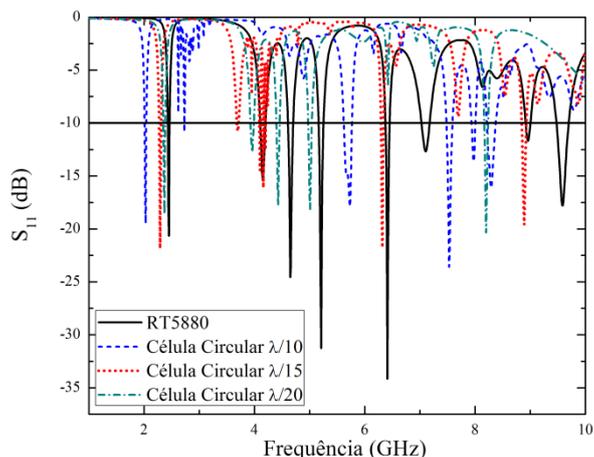


Figura 150: Antena RT5880 com Metassuperfície circular no (plano de terra) de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 42: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com célula circular no plano de terra para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	2,04	2,01	2,03	30
$\lambda/15$	2,3	2,28	2,29	20
$\lambda/20$	2,38	2,35	2,37	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

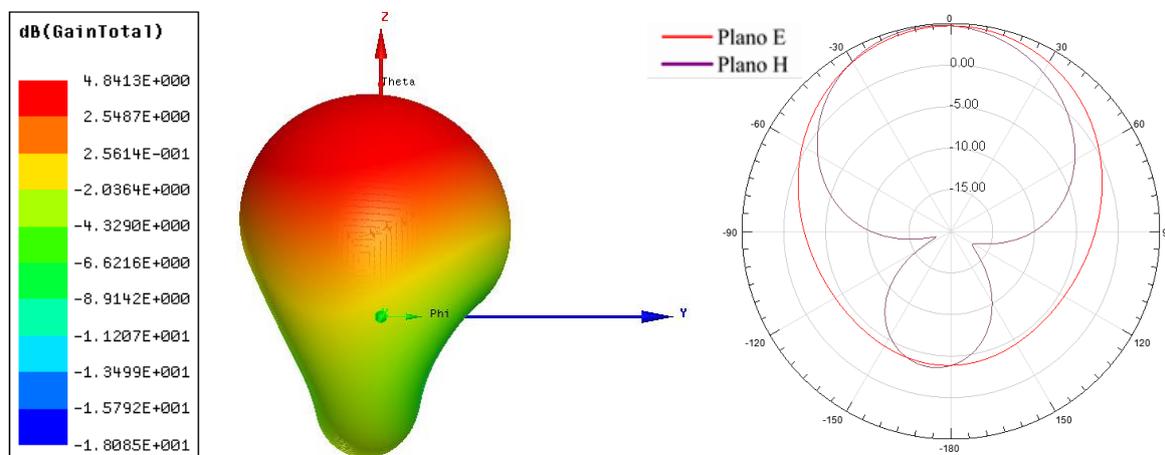


Figura 151: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

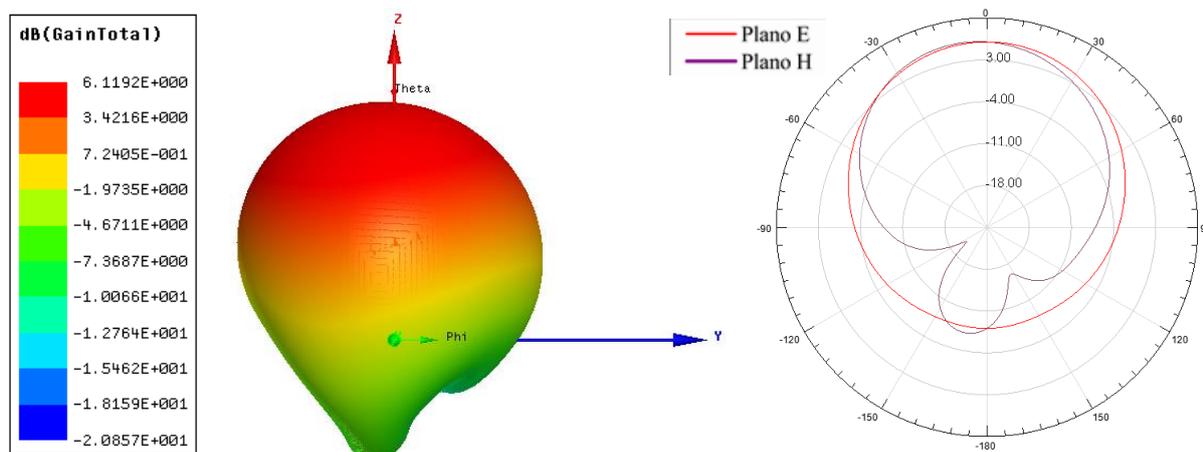


Figura 152: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

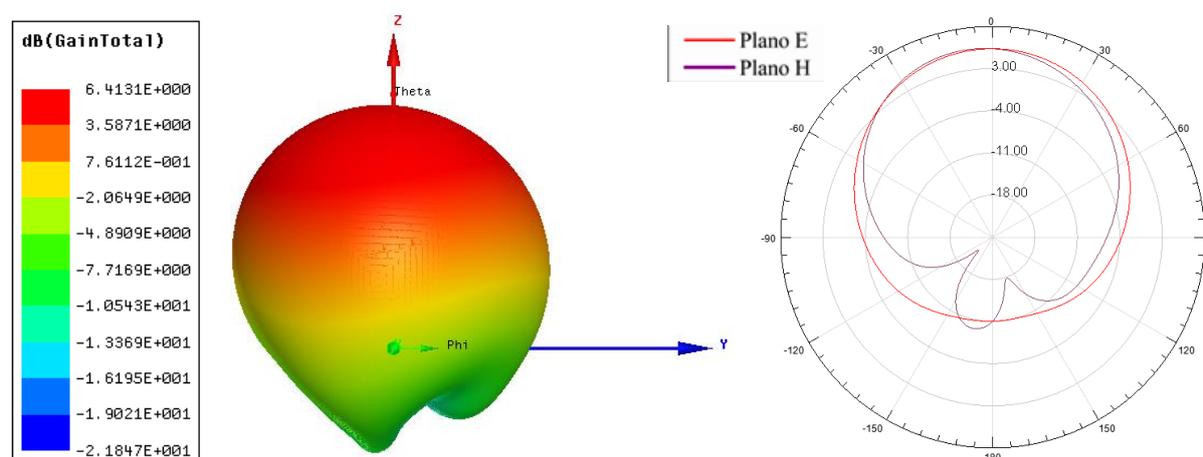


Figura 153: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 154 pode ser observada a perda de retorno para a antena com material FR4 com células nos tamanhos  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

As antenas FR4 com células retangulares de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  deslocaram o primeiro modo para valores menores de frequência, de maneira que a antena com  $\lambda/10$  apresentou maior deslocamento, foi observado que surgiram novos modos em valores superiores de frequência. A largura de banda reduziu para 10 MHz na antena com célula  $\lambda/10$  e aumentou para 40 MHz para as antenas  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Na Tabela 43 podem ser vistos os resultados da perda de retorno e nas Figuras 155, 156 e 157 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

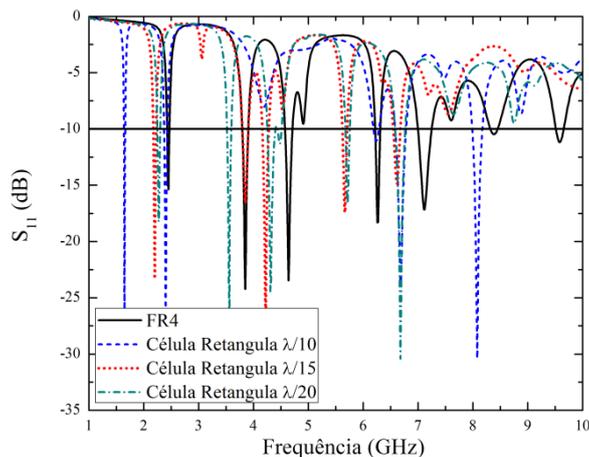


Figura 154: Antena FR4 com Metassuperfície retangular no *patch* de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 43: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula retangular de  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	1,66	1,65	1,65	10
$\lambda/15$	2,22	2,18	2,2	40
$\lambda/20$	2,29	2,25	2,27	40

Fonte: Autoria própria, 2016.

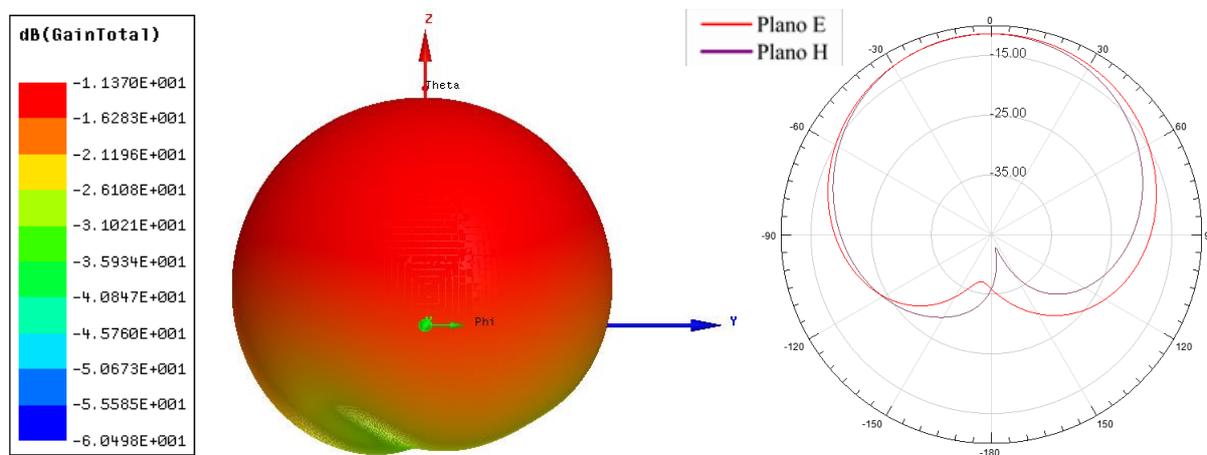


Figura 155: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

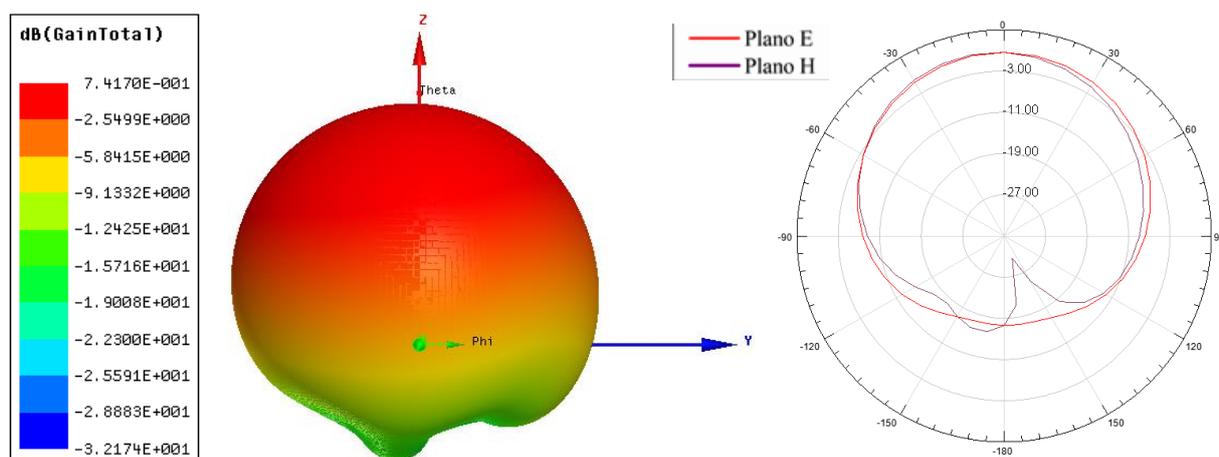


Figura 156: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

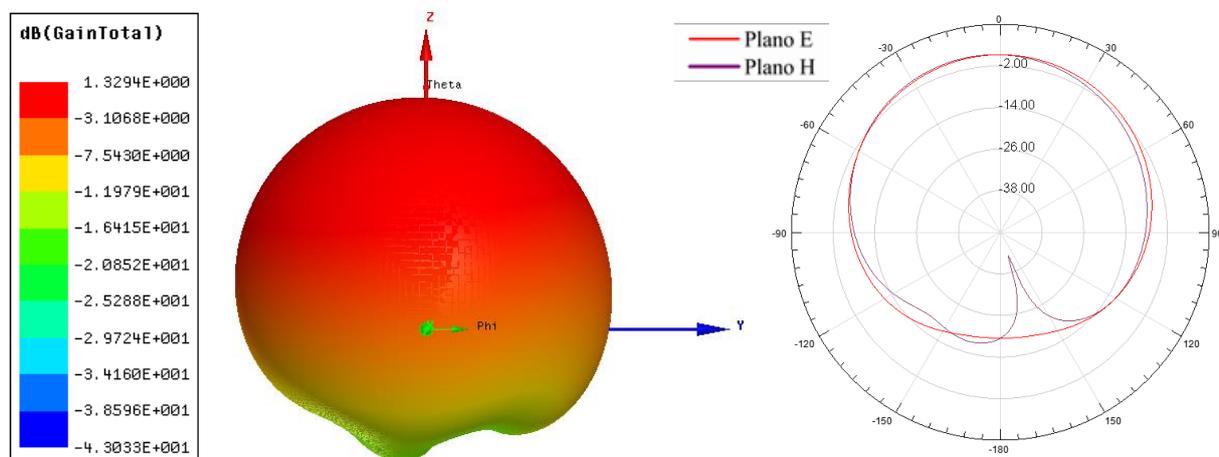


Figura 157: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A aplicação da célula circular no *patch* da antena FR4 pode ser observada na Figura 158.

A aplicação das células nas antenas com tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  provocou o deslocamento do primeiro modo para valores menores de frequência, bem como o surgimento de novos modos. A largura de banda das antenas com células  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  foi 20, 40 e 30 GHz respectivamente.

Na Tabela 44 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 159, 160 e 161 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

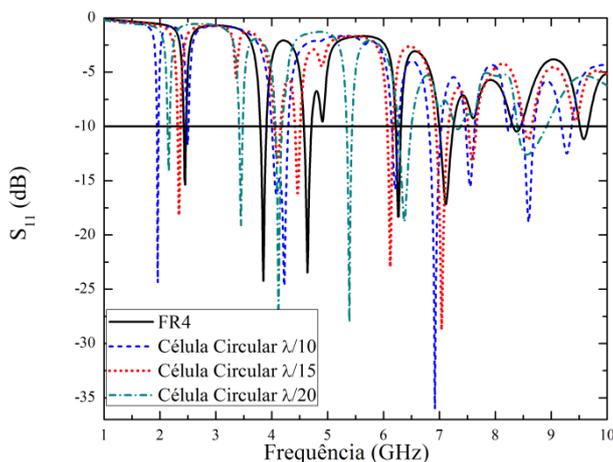


Figura 158: Antena FR4 com Metassuperfície circular no *patch* de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 44: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula circular de  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	1,97	1,95	1,96	20
$\lambda/15$	2,36	2,32	2,34	40
$\lambda/20$	2,17	2,14	2,16	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

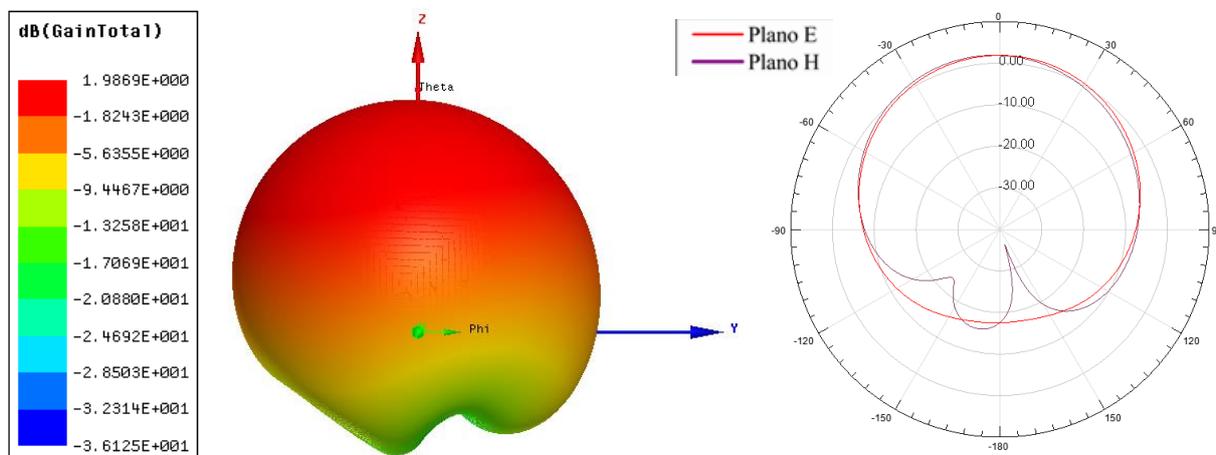


Figura 159: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

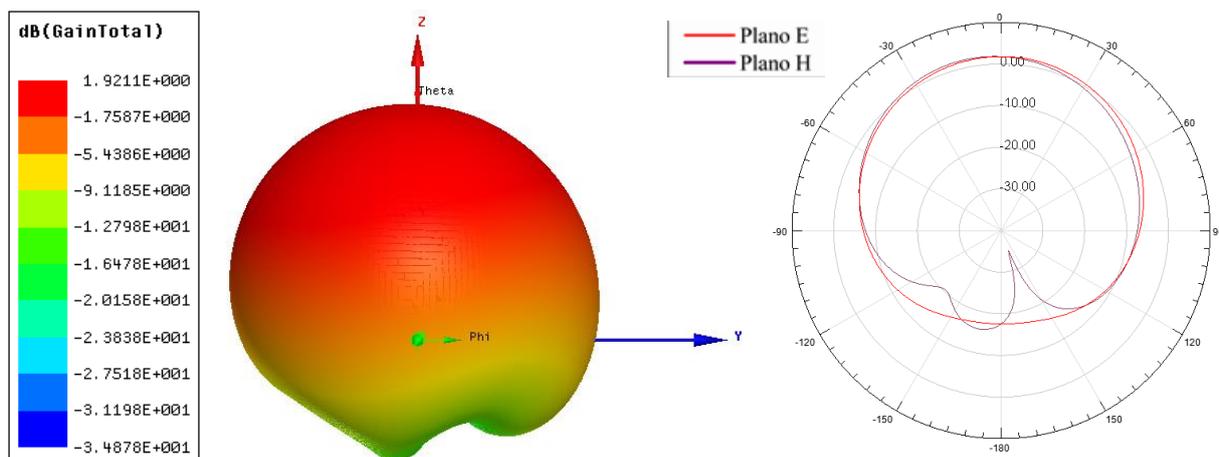


Figura 160: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

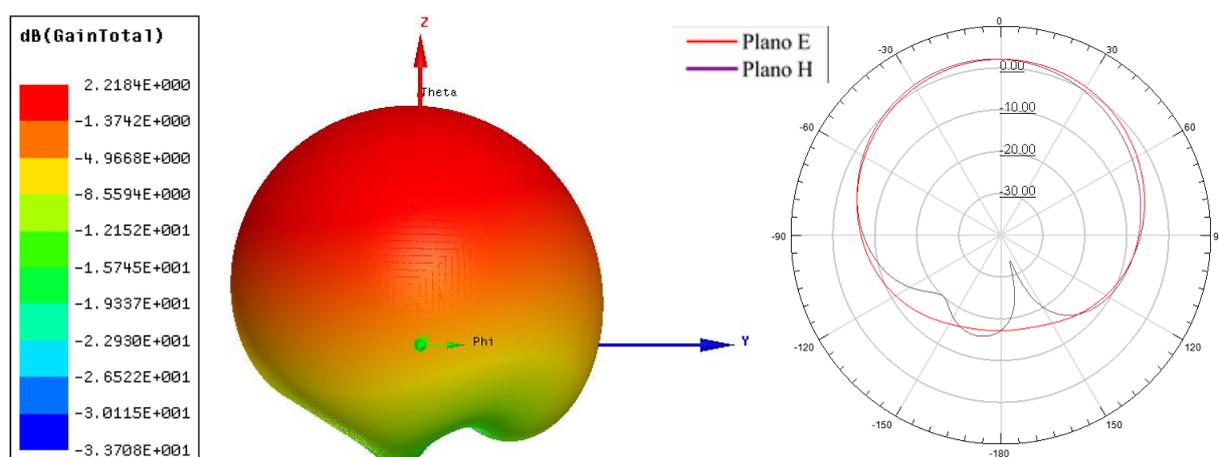


Figura 161: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 162 pode ser observada a perda de retorno para as antenas com material FR4 com células de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

A inserção das células  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  deslocaram o primeiro modo para valores menores de frequência, a célula de tamanho  $\lambda/10$  deslocou o primeiro modo para valores maiores de frequência. Em ambos os casos apresentaram a formação de outros modos em frequências mais altas. A largura de banda foi aumentada para as três antenas.

Na Tabela 45 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 163, 164 e 165 podem-se observar os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

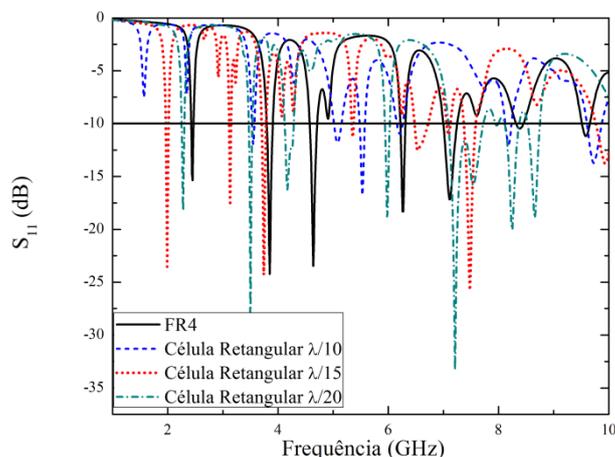


Figura 162: Antena FR4 com Metassuperfície retangular no (*patch* periódico) de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 45: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com periodicidade no *patch* retangular para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	3,57	3,53	3,55	40
$\lambda/15$	2,01	1,97	1,99	40
$\lambda/20$	2,3	2,26	2,28	40

Fonte: Autoria própria, 2016.

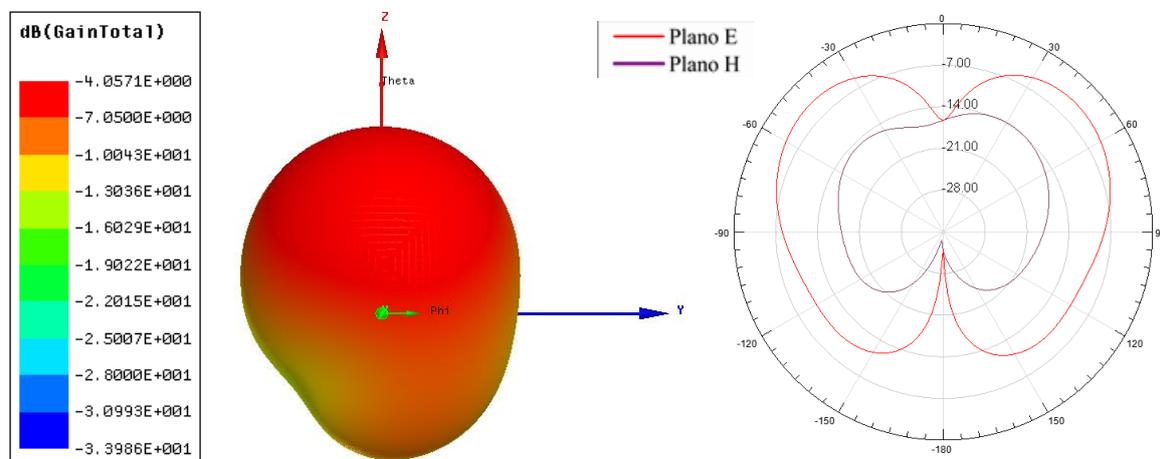


Figura 163: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

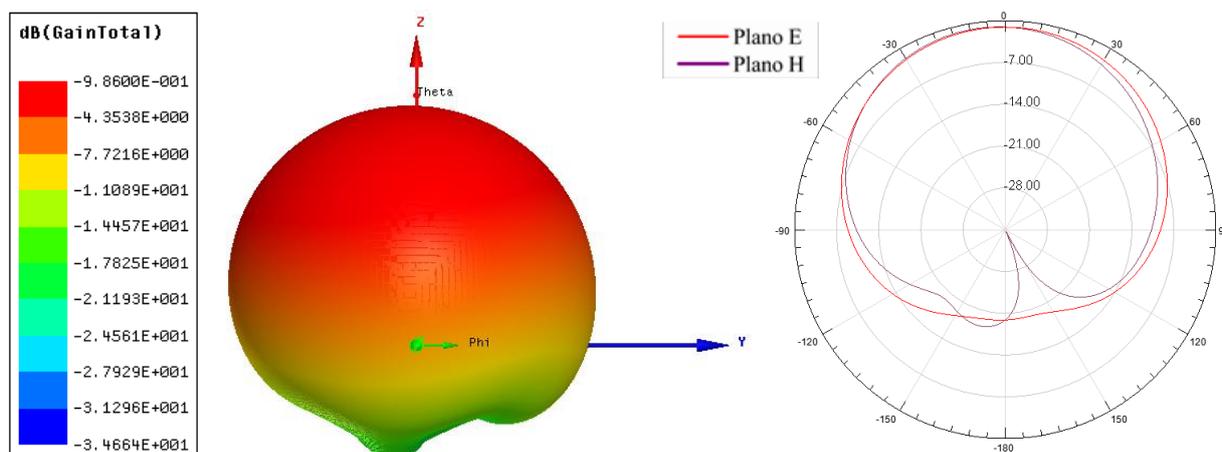


Figura 164: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

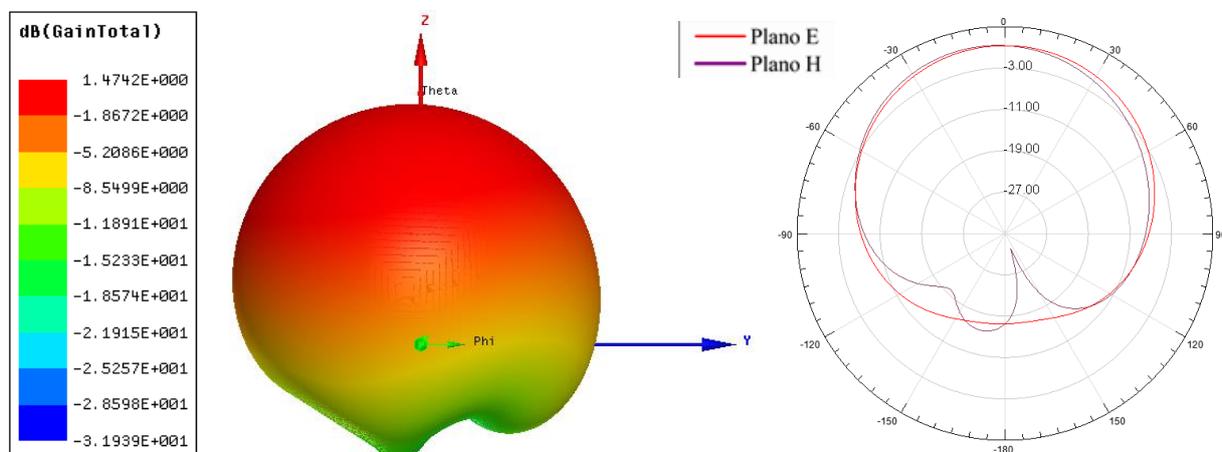


Figura 165: Antena FR4 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

As células circulares replicadas no *patch* foram simuladas nos comprimentos de onda  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ . A antena padrão FR4 e as células para esse comprimentos de onda podem ser vistas na Figura 166.

A inserção das células circulares de tamanho  $\lambda/10$  e  $\lambda/20$  deslocaram o primeiro modo para valores maiores de frequência, a célula de tamanho  $\lambda/15$  deslocou o primeiro modo para valores menores de frequência. A largura de banda na antena com célula  $\lambda/20$  foi de 80 MHz. Na Tabela 46 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 167, 168 e 169 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

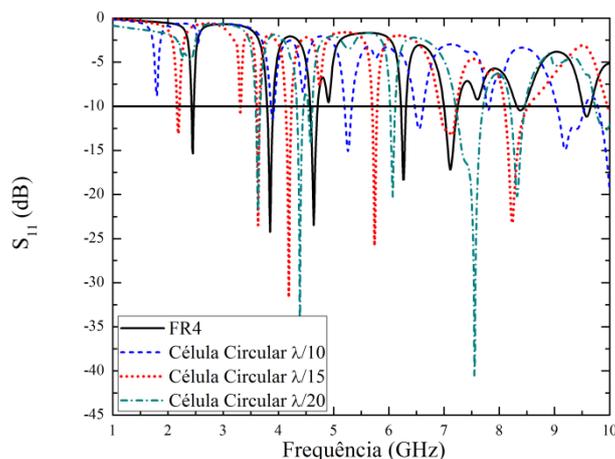


Figura 166: Antena FR4 com Metassuperfície circular no (*patch* periódico) de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 46: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com periodicidade no *patch* circular para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	3,92	3,87	3,89	50
$\lambda/15$	2,2	2,17	2,19	30
$\lambda/20$	3,67	3,59	3,63	80

Fonte: Autoria própria, 2016.

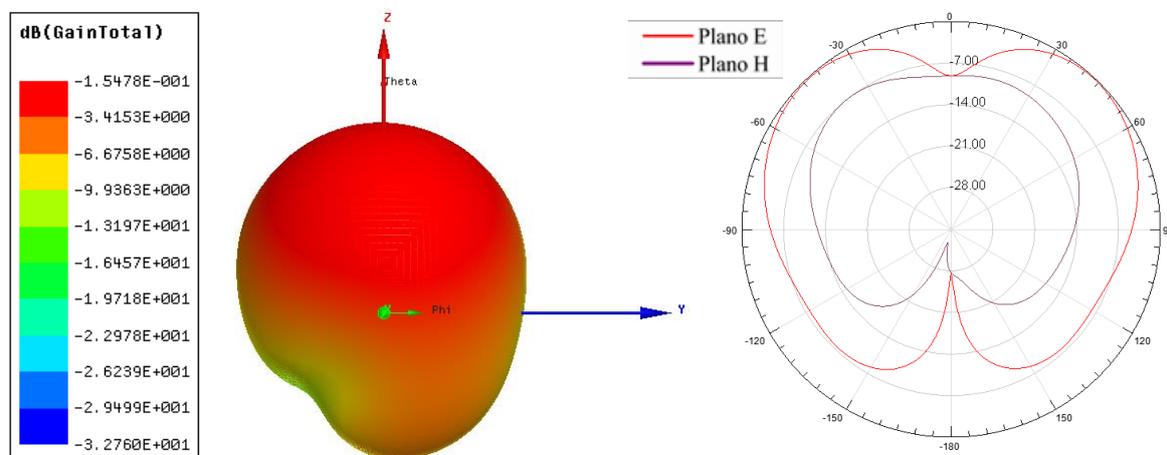


Figura 167: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

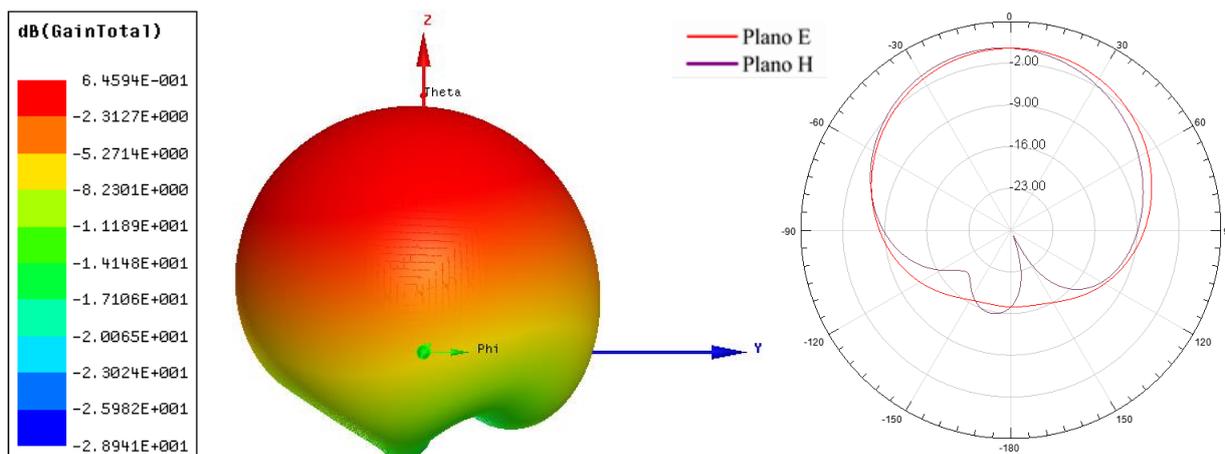


Figura 168: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

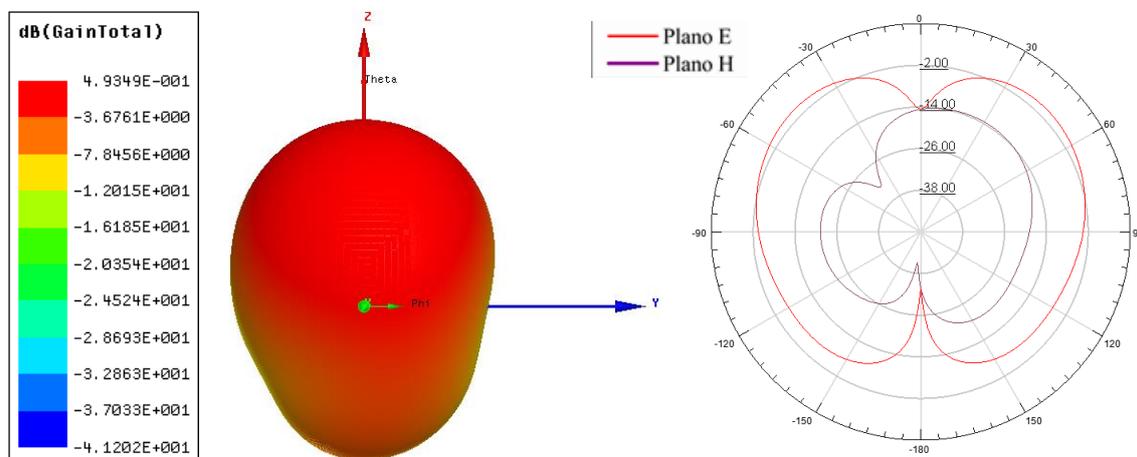


Figura 169: Antena FR4 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 170 pode ser observado a perda de retorno para antena FR4 padrão e para as antenas com células de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ . A inserção das células retangulares deslocou o primeiro modo da antena com material FR4 para valores menores de frequência, bem como criou novos modos. As células que apresentaram maior deslocamento do primeiro modo foram  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ , respectivamente. Ainda foi observado aumento na intensidade da perda de retorno nos primeiros modos das antenas com células  $\lambda/10$  e  $\lambda/15$ . A largura de banda aumentou na antena com célula  $\lambda/15$  com 40 MHz, as demais se mantiveram constantes. Na Tabela 47 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras

171, 172 e 173 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

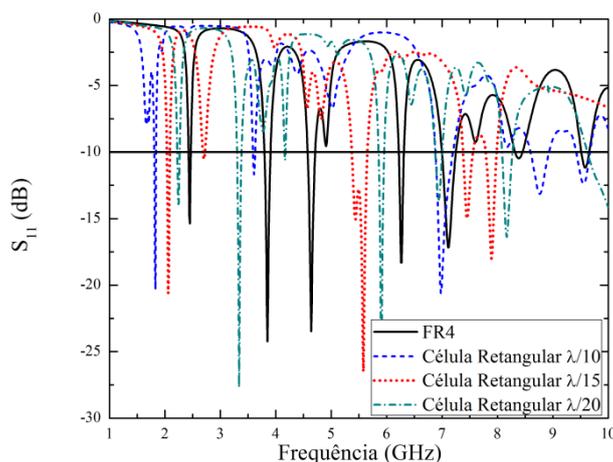


Figura 170: Antena FR4 com Metassuperfície retangular no plano de terra de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 47: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula retangular no plano de terra para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	1,84	1,81	1,83	30
$\lambda/15$	2,08	2,04	2,06	40
$\lambda/20$	2,26	2,23	2,24	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

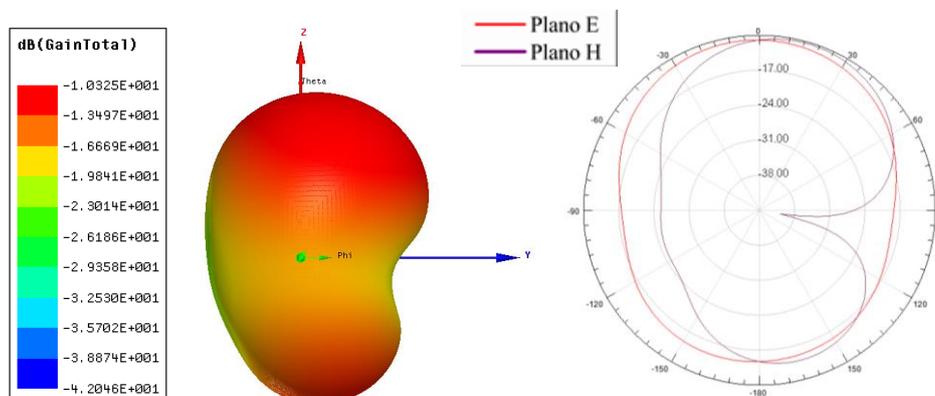


Figura 171: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

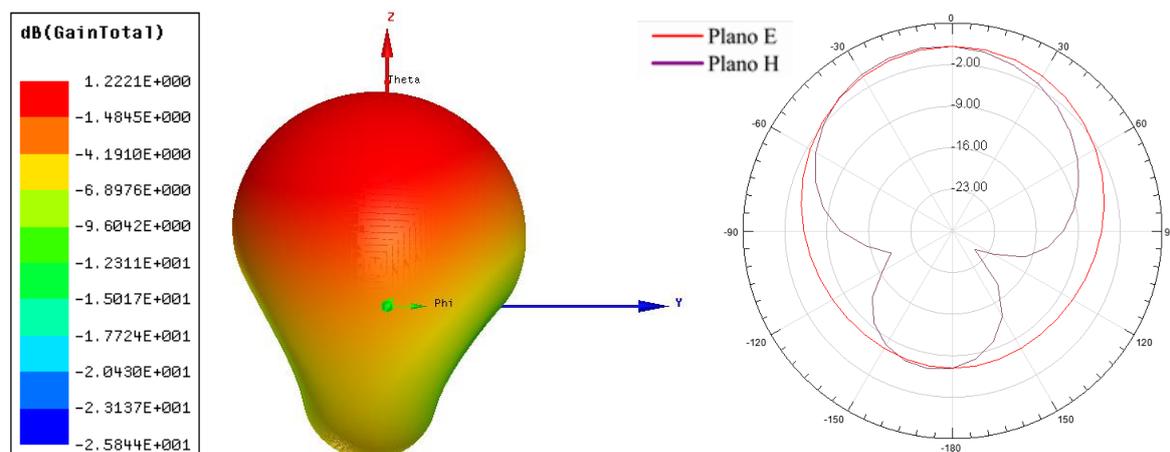


Figura 172: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

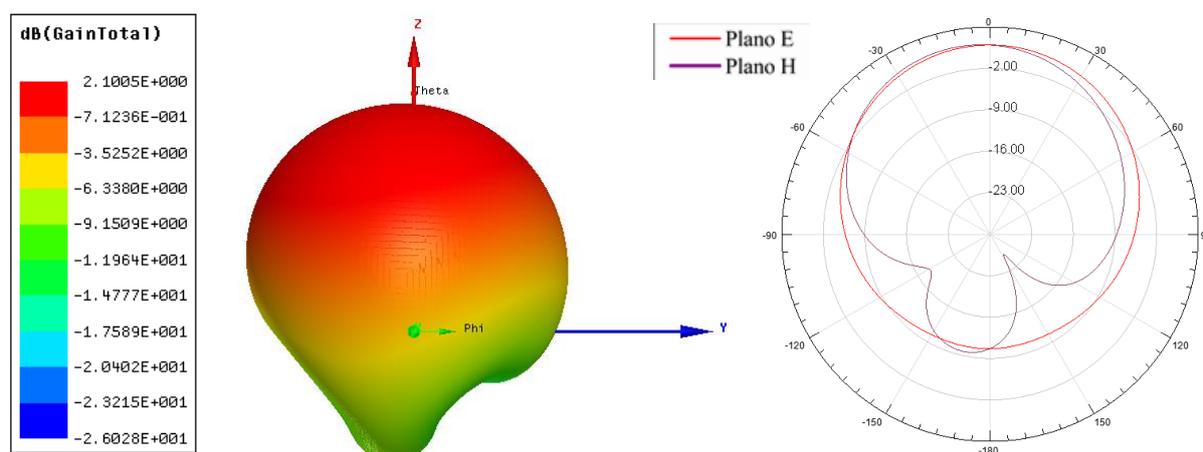


Figura 173: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 174 pode ser observada a perda de retorno para a antena com material FR4 com células de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Ao inserir as células circulares o modo das antenas com células em todos os tamanhos foi deslocado para valores menores de frequência, à medida que o tamanho da célula diminuía esse deslocamento tornava-se menor. Assim, o deslocamento decrescente foi  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ , respectivamente. A largura de banda se manteve constante para todos os tamanhos de células.

Na Tabela 48 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 175, 176 e 177 têm-se os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

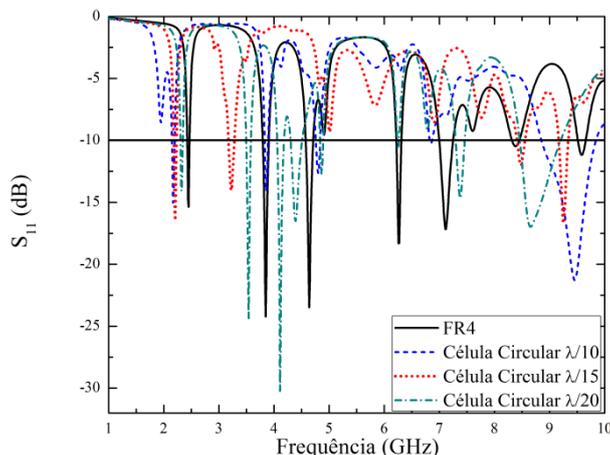


Figura 174: Antena FR4 com Metassuperfície circular no plano de terra de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

Tabela 48: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula circular no plano de terra para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
$\lambda/10$	2,19	2,15	2,17	40
$\lambda/15$	2,23	2,19	2,21	40
$\lambda/20$	2,35	2,31	2,32	40

Fonte: Aatoria própria, 2016.

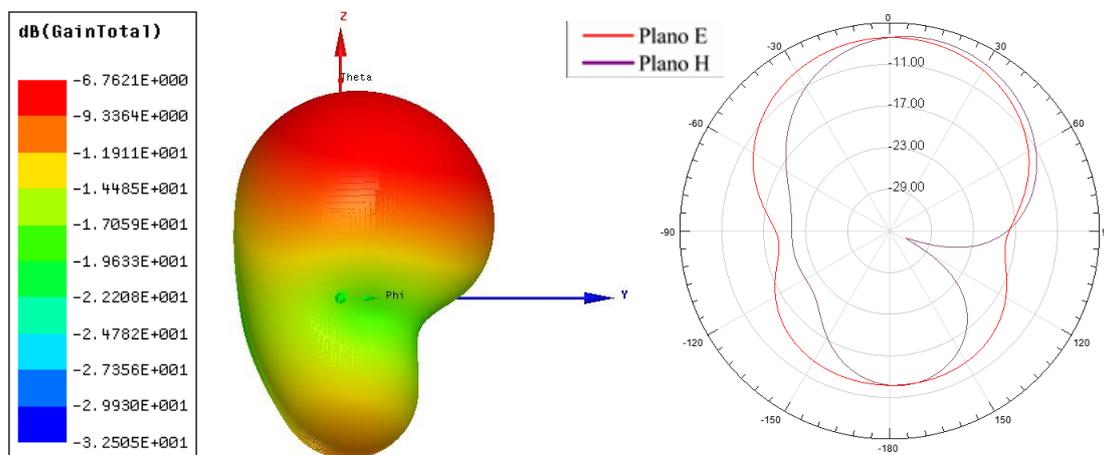


Figura 175: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

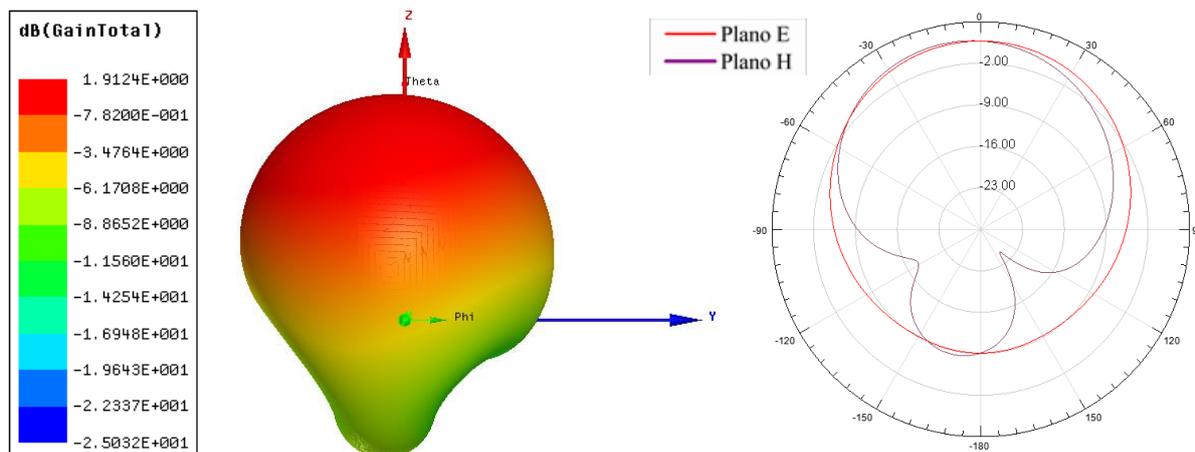


Figura 176: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

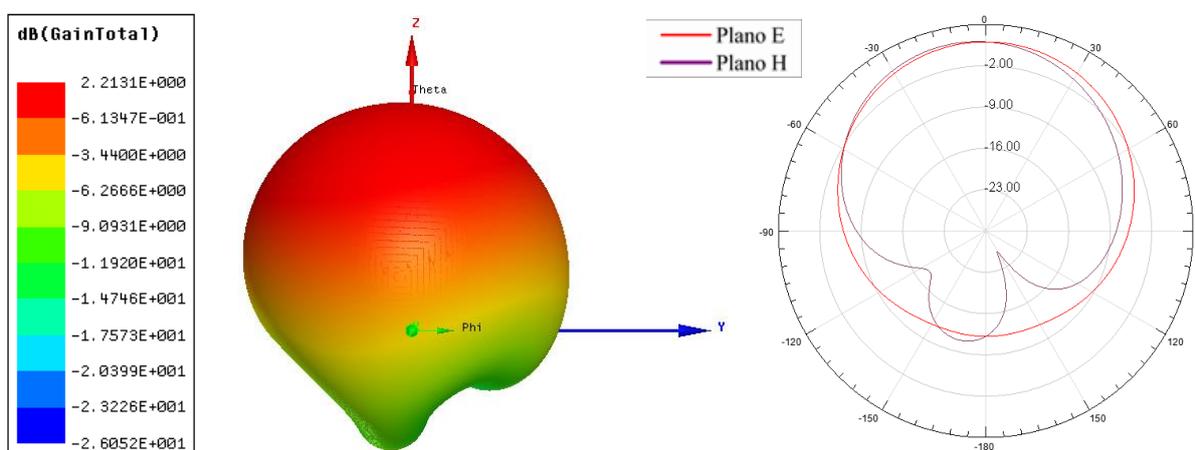


Figura 177: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A resposta das antenas com aplicação das células de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  e da antena de referência fabricada com material RT6010 podem ser vistas na Figura 178.

A inserção das células deslocou para valores mais altos de frequência o primeiro modo de todas as antenas  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ , também foi possível observar a intensificação de vários modos bem como o alargamento de outros. A largura de banda das antenas foi reduzida quando comparados com o primeiro modo da antena padrão, terminando em 0 GHz na antena de célula  $\lambda/20$ .

Na Tabela 49 podem-se observar os resultados da perda de retorno e nas Figuras 179, 180 e 181 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

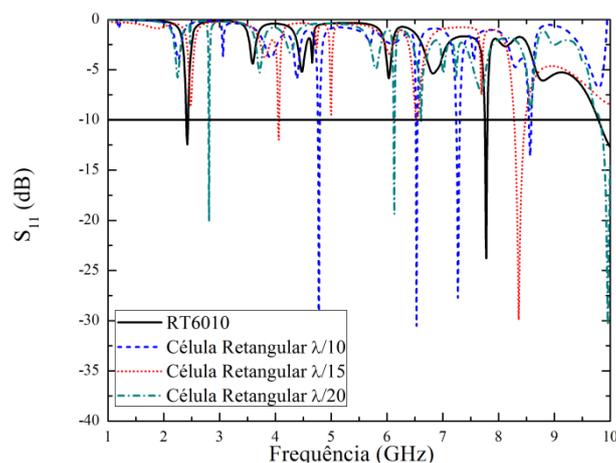


Figura 178: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular no *patch* de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 49: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula retangular de  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
$\lambda/10$	4,78	4,77	4,78	10
$\lambda/15$	4,06	4,05	4,06	10
$\lambda/20$	2,81	2,81	2,81	0

Fonte: Autoria própria, 2016.

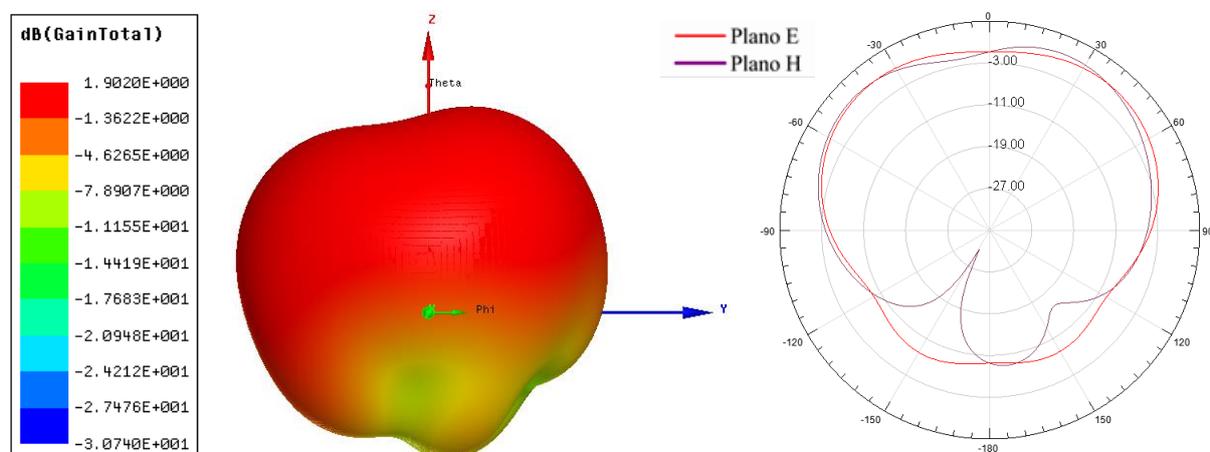


Figura 179: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

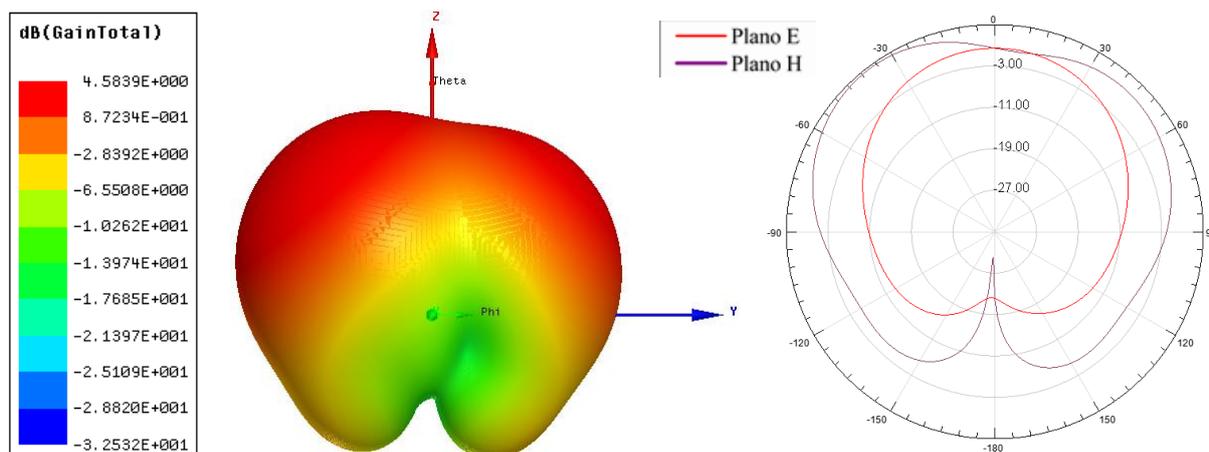


Figura 180: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

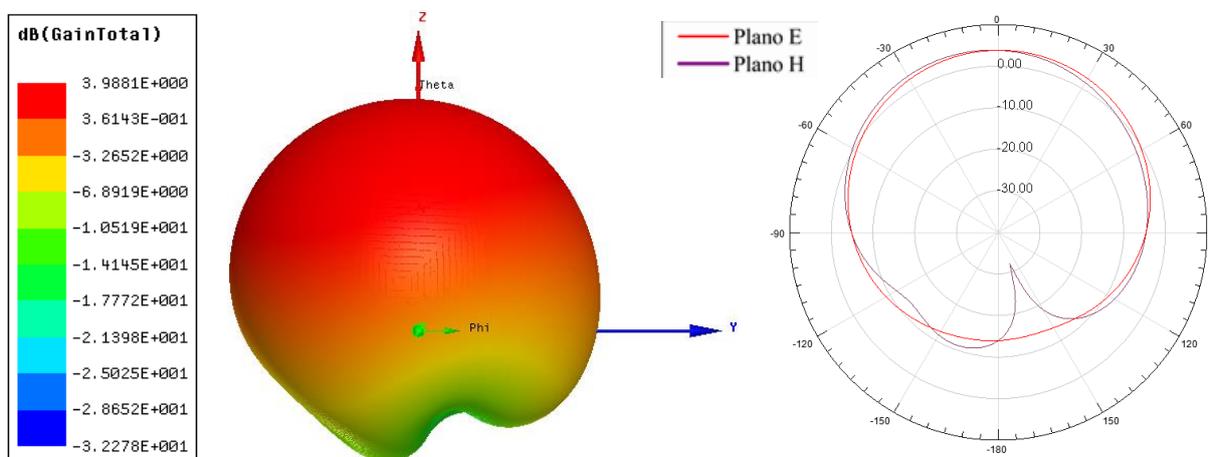


Figura 181: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A inserção de células de distintos tamanhos pode ser observada na Figura 182 juntamente com a antena padrão para RT6010.

Ao inserir as células  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  na antena padrão foi observado o deslocamento do primeiro modo para valores mais elevados de frequência. Para o primeiro modo a largura de banda reduziu para a antena com célula  $\lambda/15$  e se manteve constante nas demais.

Na Tabela 50 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 183, 184 e 185 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

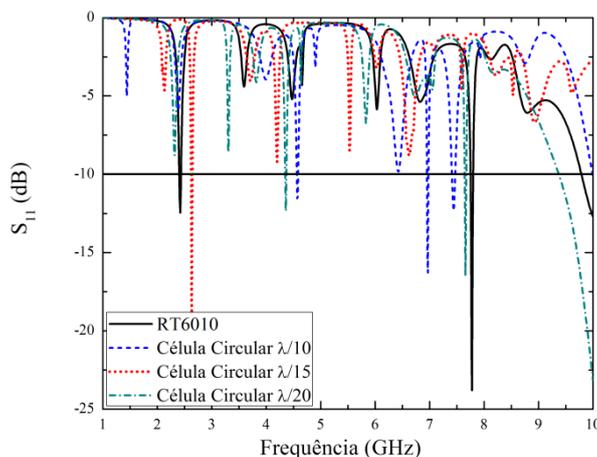


Figura 182: Antena RT6010 com Metassuperfície circular no *patch* de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 50: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula circular de  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
$\lambda/10$	4,58	4,56	4,57	20
$\lambda/15$	2,64	2,63	2,63	10
$\lambda/20$	4,37	4,35	4,36	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

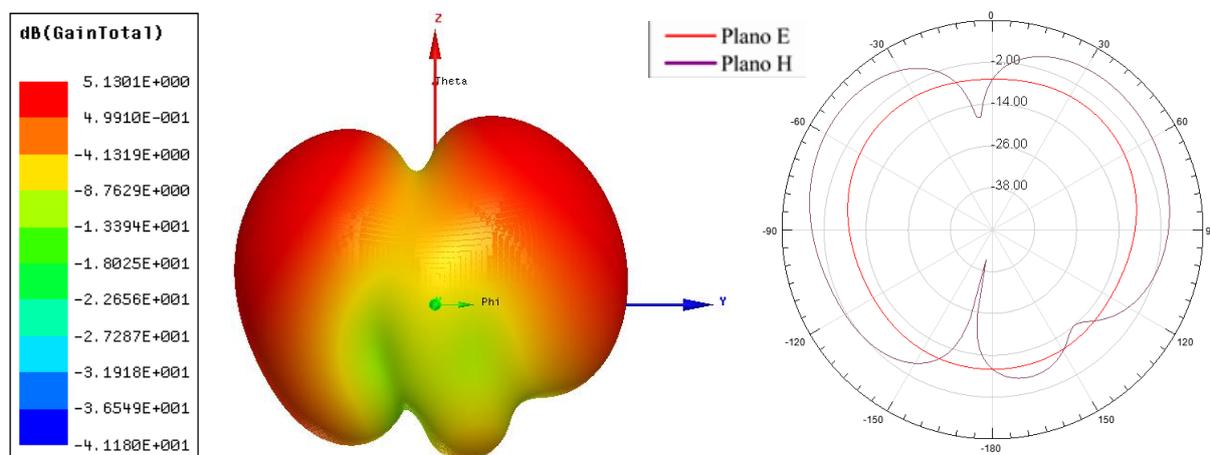


Figura 183: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

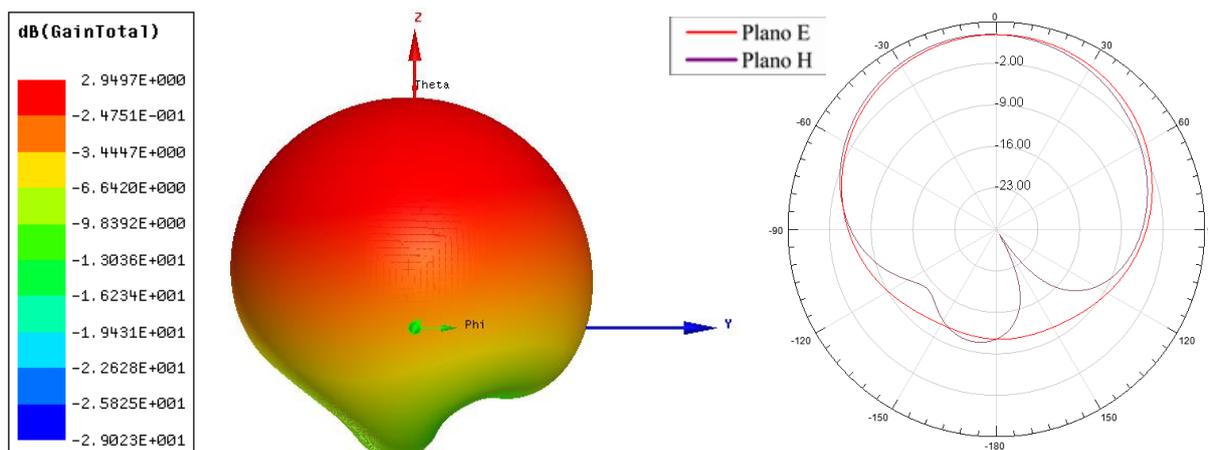


Figura 184: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

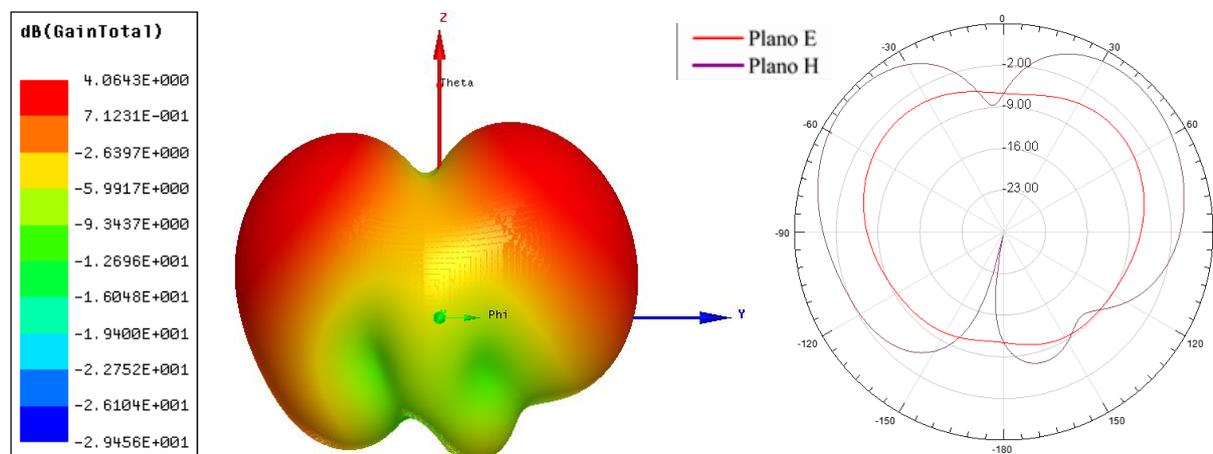


Figura 185: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 186 é apresentada a perda de retorno para antena fabricada com RT6010 padrão e as antenas com células retangulares replicadas  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Mediante a aplicação da Metassuperfície de célula retangular no plano de terra das antenas de material RT6010, pôde ser observado que a inserção provocou o deslocamento do primeiro modo para valores mais altos de frequência. A largura de banda foi reduzida para a antena com célula  $\lambda/15$ .

Na Tabela 51 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 187, 188 e 189 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

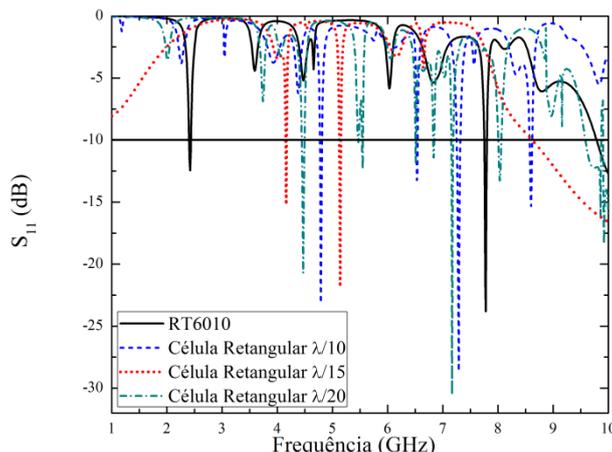


Figura 186: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular no (*patch* periódico) de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 51: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com periodicidade no *patch* retangular para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
$\lambda/10$	4,81	4,78	4,79	30
$\lambda/15$	4,17	4,16	4,16	10
$\lambda/20$	4,49	4,45	4,47	40

Fonte: Autoria própria, 2016.

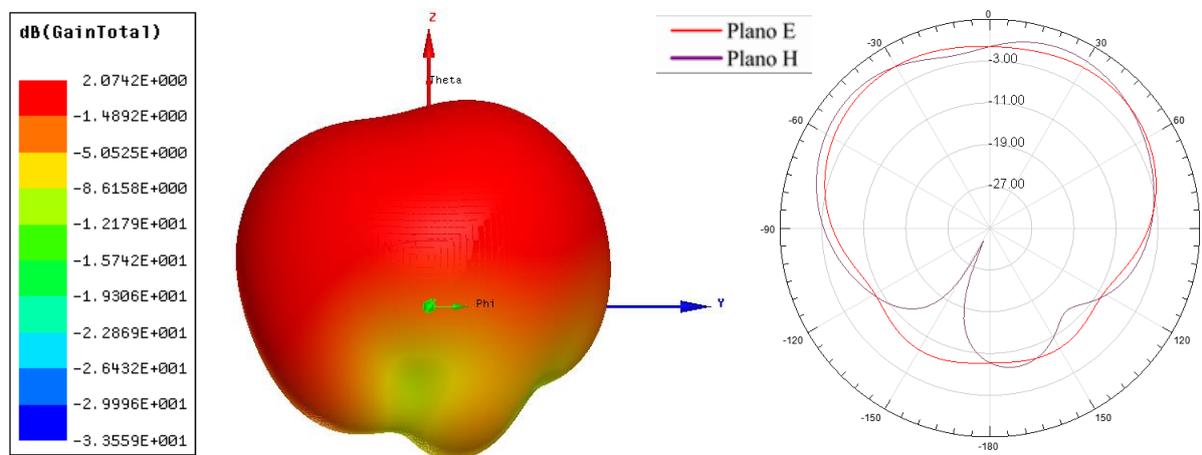


Figura 187: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

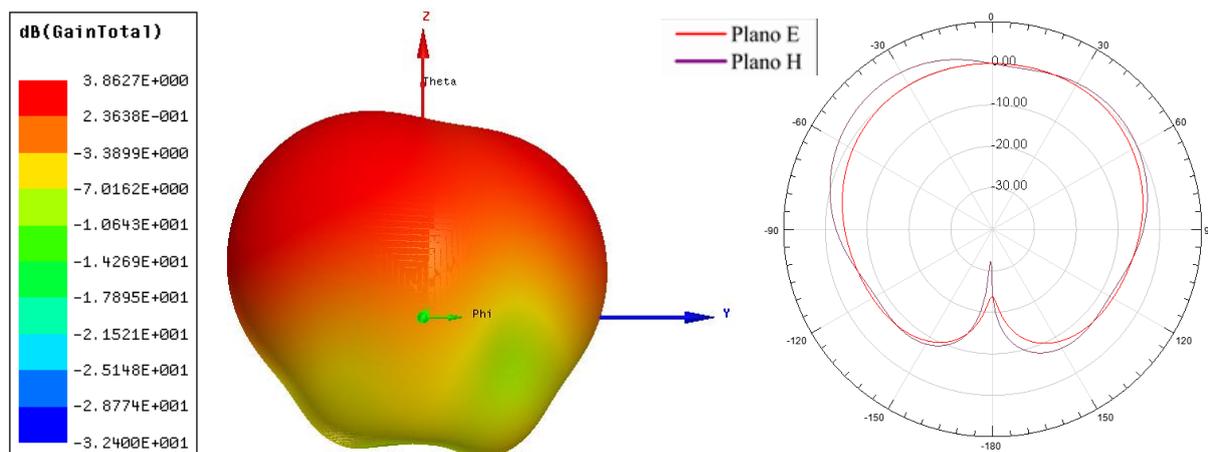


Figura 188: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

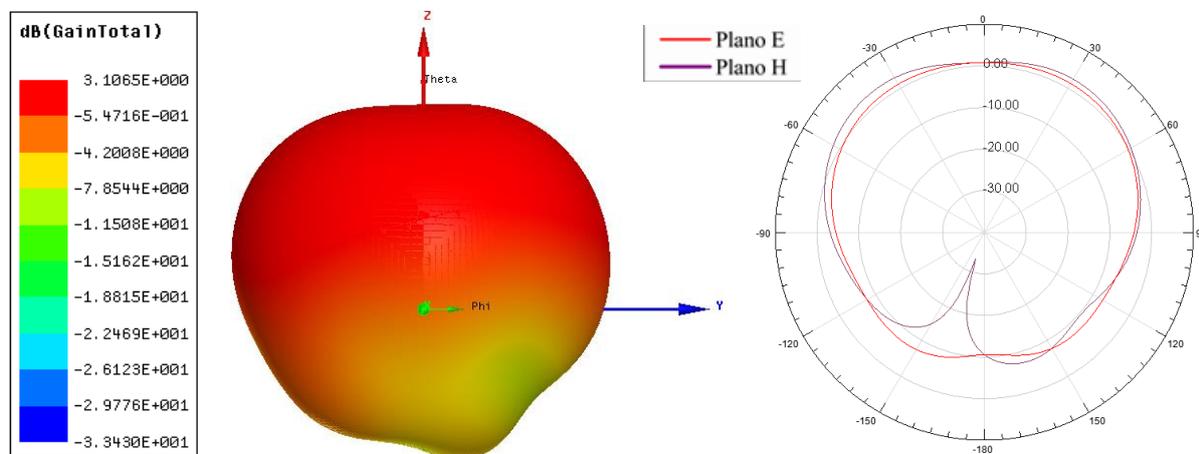


Figura 189: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 190 pode ser observada a perda de retorno para a antena com material RT6010 com células de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Ao inserir as células circulares o primeiro modo das antenas se deslocou para valores mais altos de frequência, ainda foi observada a formação de outros modos, bem como o aumento de intensidade dos mesmos. A largura de banda das antenas foi reduzida de modo que a antena com célula  $\lambda/20$  teve a largura de banda levada à zero.

Na Tabela 52 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 191, 192 e 193 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

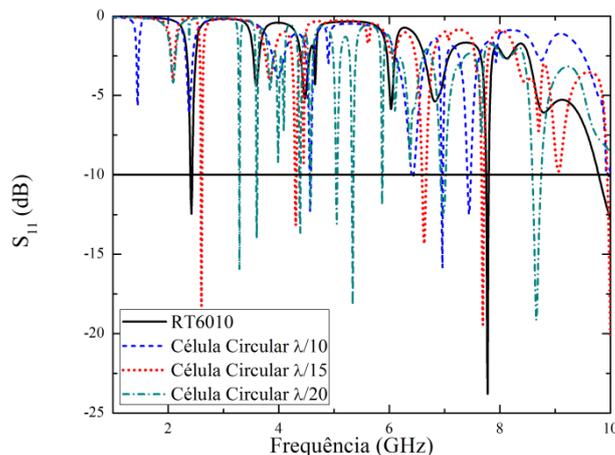


Figura 190: Antena RT6010 com Metassuperfície circular no (*patch* periódico) de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 52: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com periodicidade no *patch* circular para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
$\lambda/10$	4,58	4,56	4,57	20
$\lambda/15$	2,61	2,6	2,6	20
$\lambda/20$	3,29	3,29	3,29	0

Fonte: Autoria própria, 2016.

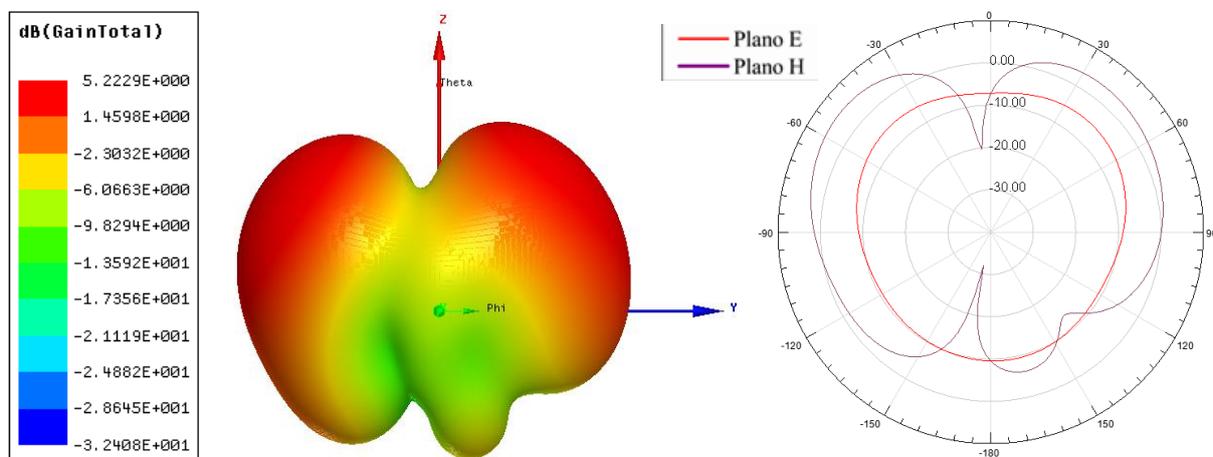


Figura 191: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

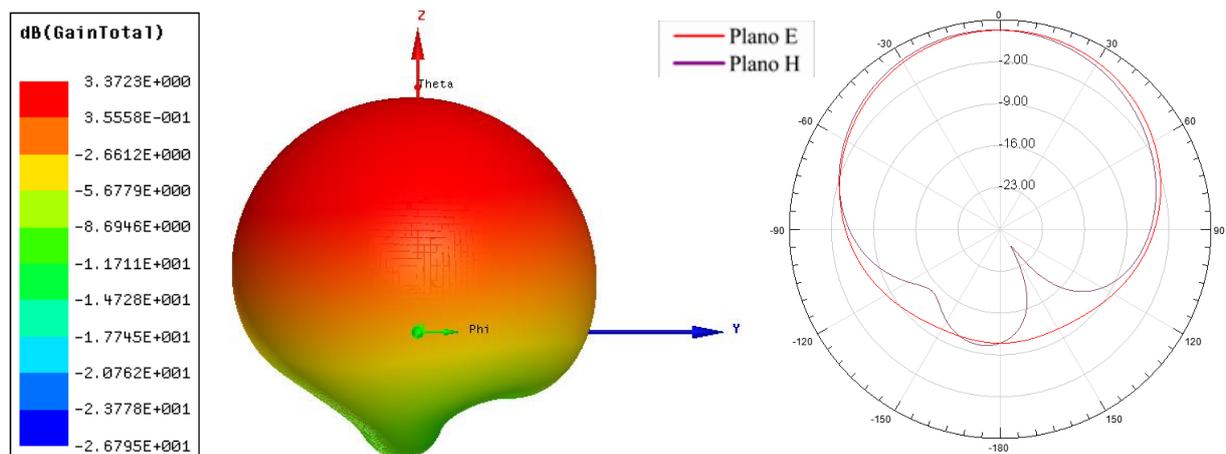


Figura 192: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

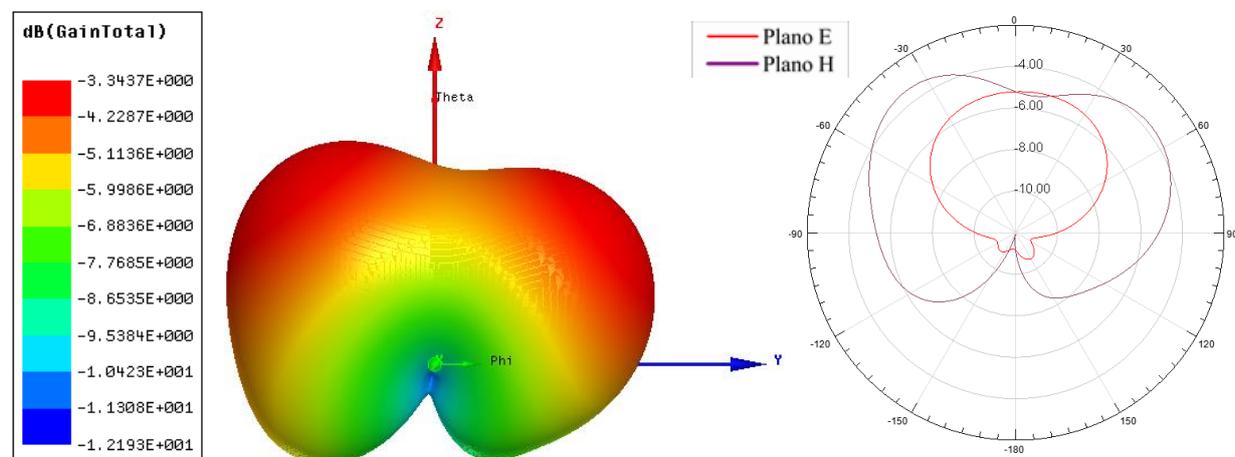


Figura 193: Antena RT6010 com Metassuperfície circular aplicado no *patch* com periodicidade e tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 194 é apresentado o gráfico da perda de retorno para a antena fabricada com material RT6010 com células de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$  retangulares inseridos no plano de terra.

Com a aplicação das células as antenas deslocaram o primeiro modo para valores mais elevados de frequência, formando regiões com largura de banda considerável dentro da banda X. A largura de banda foi reduzida a zero nos primeiros modos das antenas com células de tamanho  $\lambda/10$  e  $\lambda/20$ . Na Tabela 53 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 195, 196 e 197 são observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

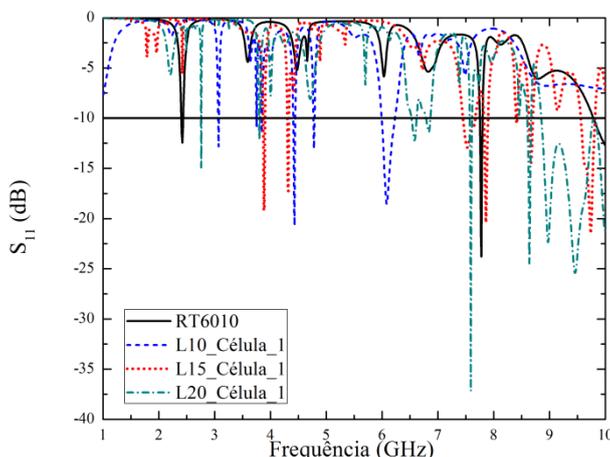


Figura 194: Antena RT6010 com Metassuperfície retangular no plano de terra de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

Tabela 53: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula retangular no plano de terra para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
$\lambda/10$	3,07	3,07	3,07	0
$\lambda/15$	3,9	3,87	3,88	30
$\lambda/20$	2,76	2,76	2,76	0

Fonte: Aatoria própria, 2016.

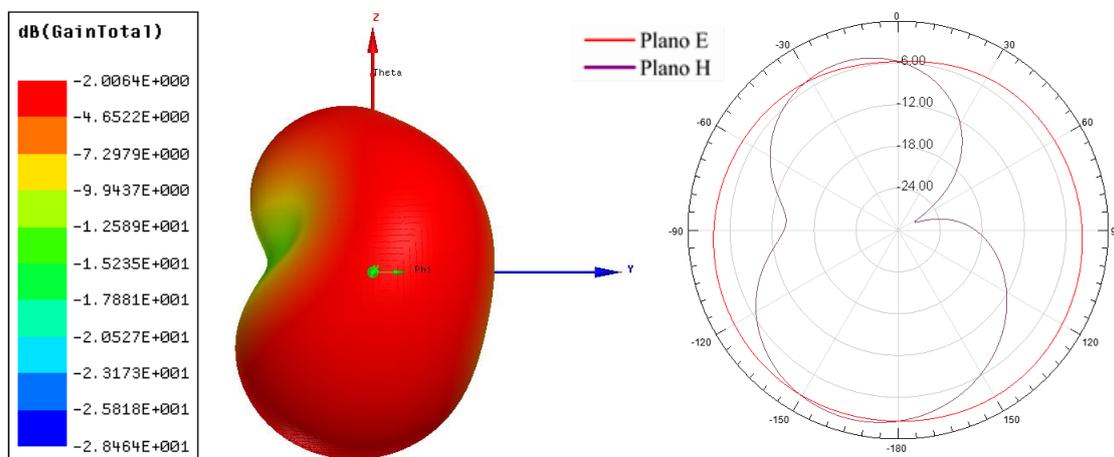


Figura 195: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

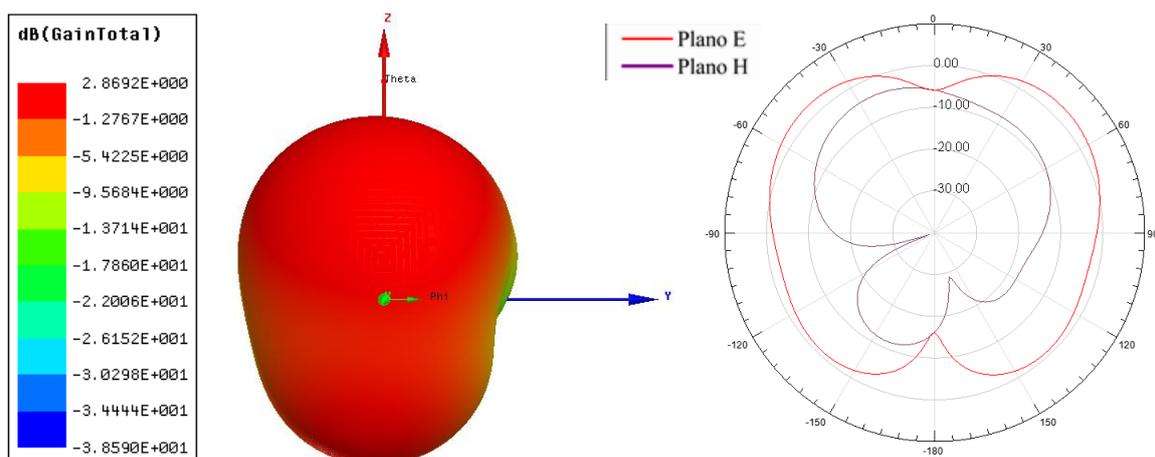


Figura 196: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

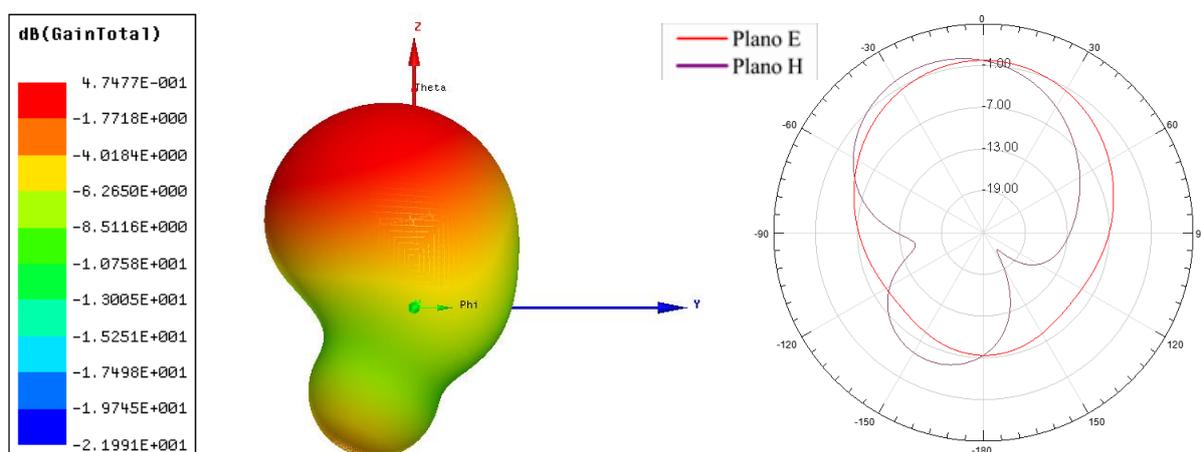


Figura 197: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 198 é apresentada a perda de retorno para antena fabricada com RT6010 padrão e as antenas com células circulares  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Ao aplicar as células circulares, as antenas com células de tamanho  $\lambda/10$  e  $\lambda/20$  deslocaram o primeiro modo para valores maiores de frequência, porém a antena com célula  $\lambda/15$  deslocou o primeiro modo para valores menores de frequência. A largura de banda na antena de célula  $\lambda/10$  aumentou para 100 MHz para o primeiro modo de operação.

Na Tabela 54 podem ser vistos os resultados da perda de retorno e nas Figuras 199, 200 e 201 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com células de tamanhos variados.

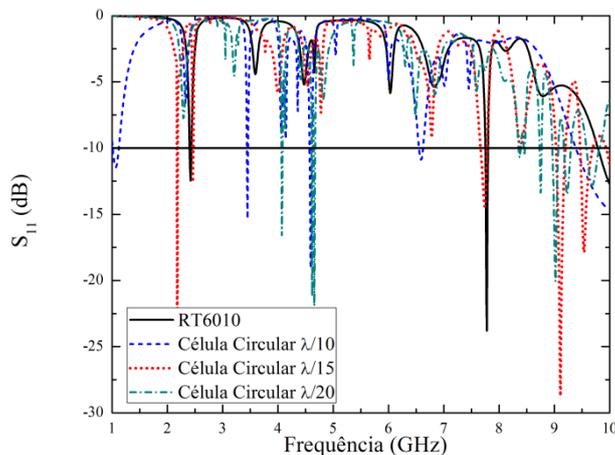


Figura 198: Antena RT6010 com Metassuperfície circular no plano de terra de tamanho  $\lambda/10$ ,  $\lambda/15$  e  $\lambda/20$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

Tabela 54: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula circular no plano de terra para variação de  $\lambda$ .

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
$\lambda/10$	1,12	1,02	1,07	100
$\lambda/15$	2,47	2,46	2,46	10
$\lambda/20$	4,08	4,07	4,07	10

Fonte: Aatoria própria, 2016.

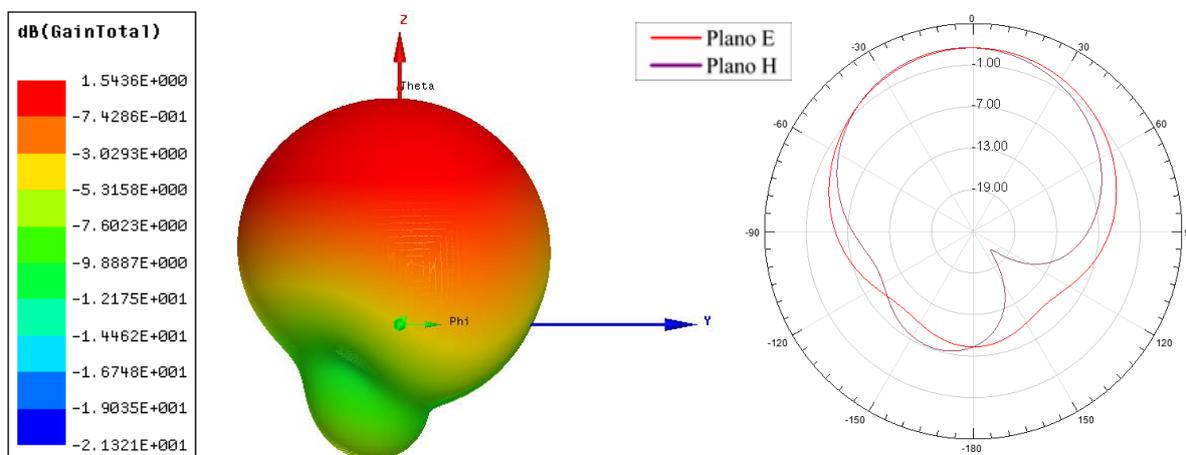


Figura 199: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/10$ .

Fonte: Aatoria própria, 2016.

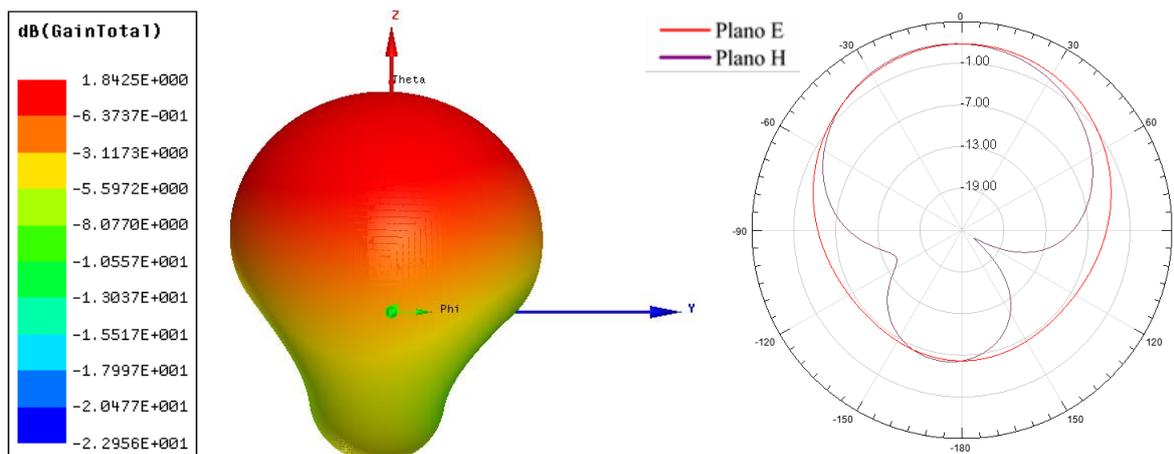


Figura 200: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/15$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

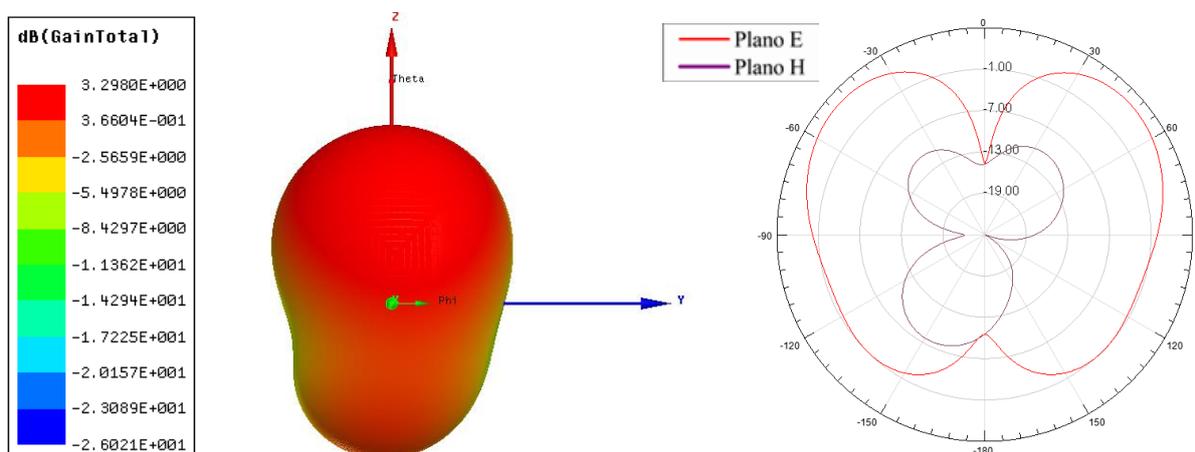


Figura 201: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

#### 7.1.4 Antenas com modificação do número de células no plano de terra

As antenas nesta seção são as que apresentam células no plano de terra, elas estão organizadas em arranjos de 3x3 e 4x4 elementos e tem tamanho exclusivamente igual à  $\lambda/20$ , os motivos para as análises estarem restritas a essa fração do comprimento de onda já foram abordados no capítulo de metodologia.

Assim como as demais modificações de superfícies realizadas nas seções anteriores as modificações aqui propostas também apresentaram respostas variadas como, deslocamento da frequência de ressonância, formação de novos modos ressonantes e alteração do ganho. Na Figura 202 é apresentada a curva de perda de retorno para antena fabricada com material RT5880 com arranjo 3x3 e 4x4.

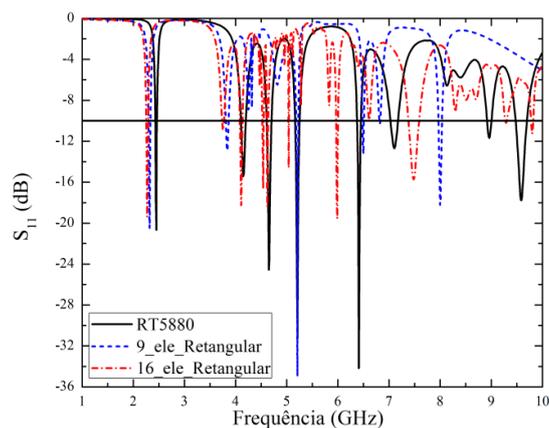


Figura 202: Perda de retorno para antena RT5880, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos retangular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

As antenas de célula retangular com 3x3 e 4x4 elementos deslocaram o primeiro modo ressonante para valores menores de frequência, não foi observada mudança na largura de banda do primeiro modo para em nenhum dos arranjos. O ganho apresentou redução saindo de 7,52 dB para 6,23 dB na antena com arranjo 3x3 e de 7,52 dB para 6,05 dB na antena com arranjo 4x4.

Na Tabela 55 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 203 e 204 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com diferentes arranjos.

Tabela 55: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com célula retangular no plano de terra para diferentes arranjos.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
9ele	2,33	2,3	2,32	30
16ele	2,29	2,26	2,27	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

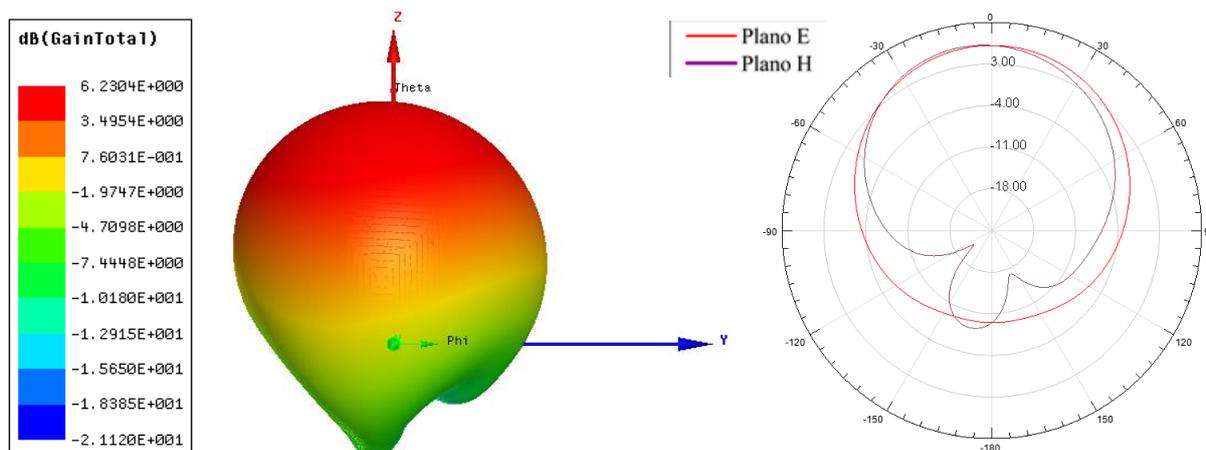


Figura 203: Antena RT5880 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

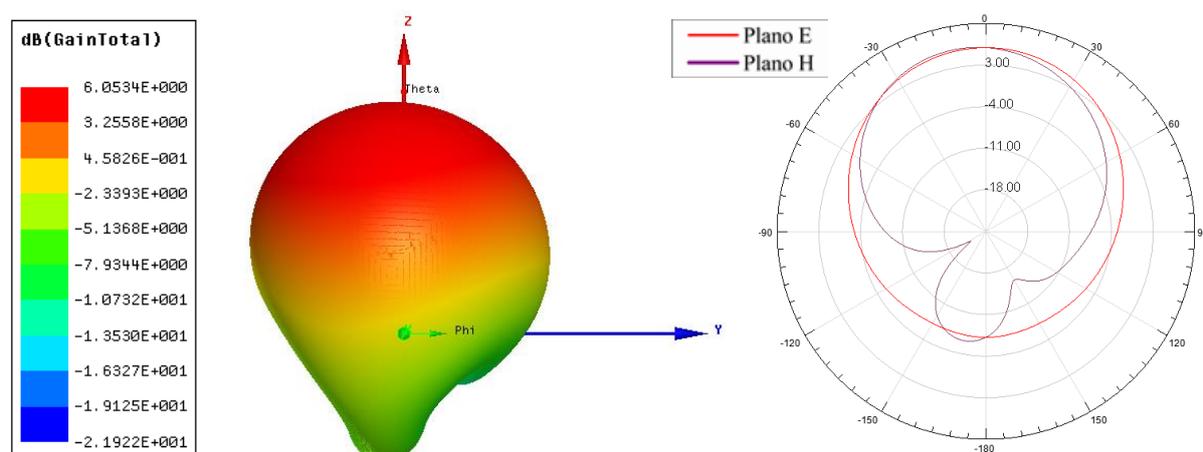


Figura 204: Antena RT5880 retangular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 205 é apresentado o gráfico de perda de retorno para a antena simulada com RT5880, onde são inseridos arranjos de 3x3 e 4x4 elementos circulares.

As antenas com célula circular com 3x3 e 4x4 elementos deslocaram o primeiro modo para valores menores de frequência quando comparados com a antena de referência. Não foi observada mudanças na largura de banda. Em ambos os casos o ganho reduziu saindo de 7,52 dB para 6,41 dB para antena com arranjo 3x3 e de 7,52 dB para 6,29 dB na antena com arranjo 4x4. Ainda foi possível observar a formação de vários modos em valores mais elevados de frequência para as antenas com Metassuperfície.

Na Tabela 56 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 206 e 207 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com diferentes arranjos.

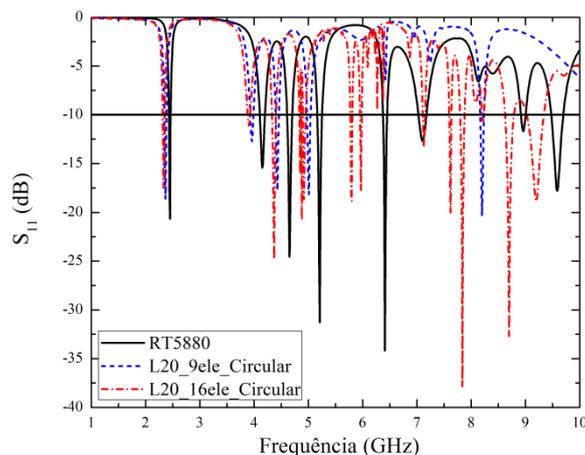


Figura 205: Perda de retorno para antena RT5880, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos circular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 56: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT5880 com célula circular no plano de terra para diferentes arranjos.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT5880	2,46	2,43	2,45	30
9ele	2,38	2,35	2,37	30
16ele	2,35	2,32	2,33	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

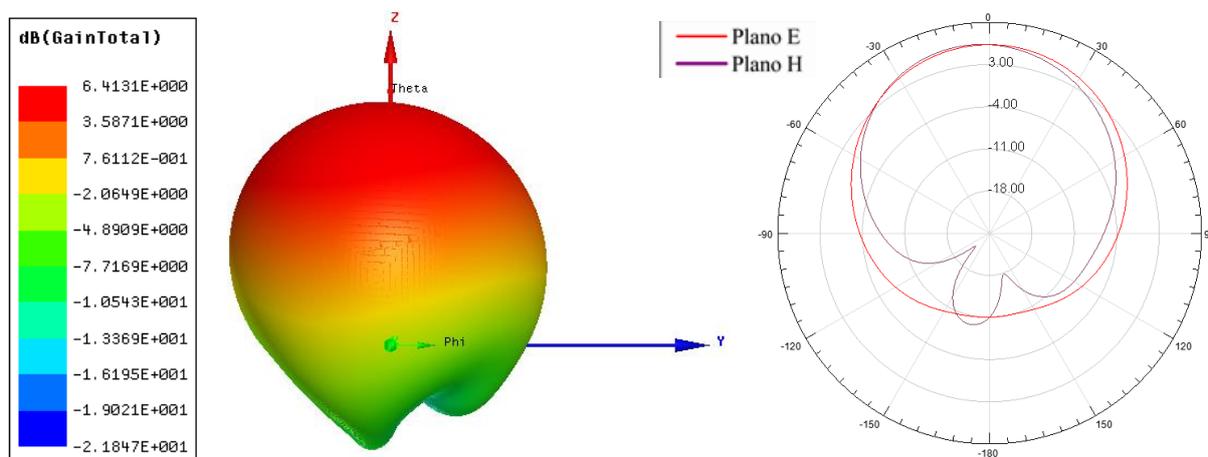


Figura 206: Antena RT5880 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

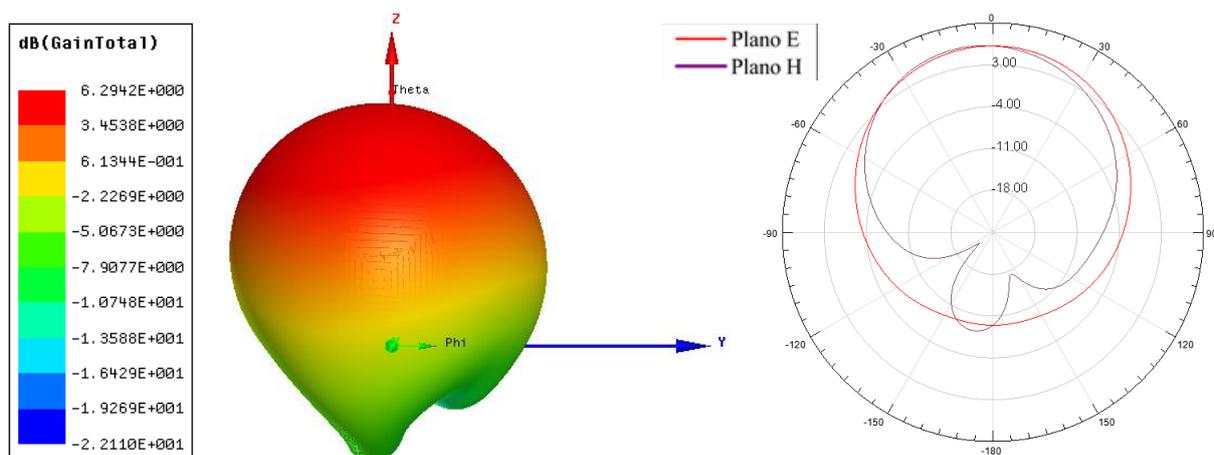


Figura 207: Antena RT5880 circular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 208 é apresentada a curva de perda de retorno para as antenas simuladas com material FR4 com célula retangular.

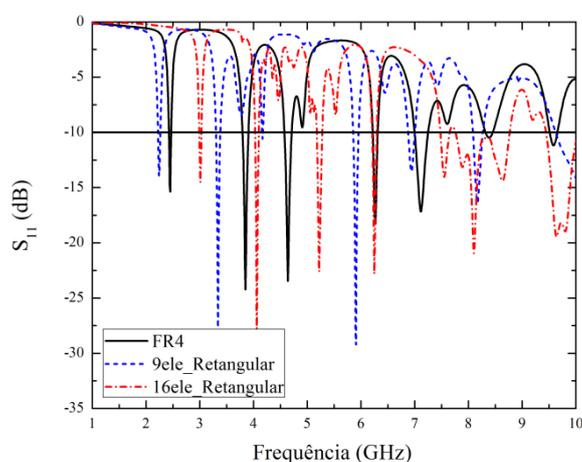


Figura 208: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos retangular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena de célula retangular com 3x3 elementos deslocou o primeiro modo para valores menores enquanto que a antena com 4x4 elementos deslocou na direção de valores maiores de frequência. Não foi observada mudança na largura de banda, o ganho diminui em ambas as antenas saindo de 3,28 para 2,10 dB na antena com arranjo 3x3 e de 3,28 para 2,14 dB na antena com arranjo 4x4.

Na Tabela 57 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 209 e 210 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com diferentes arranjos.

Tabela 57: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula retangular no plano de terra para diferentes arranjos.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
9ele	2,26	2,23	2,24	30
16ele	3,03	3	3,01	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

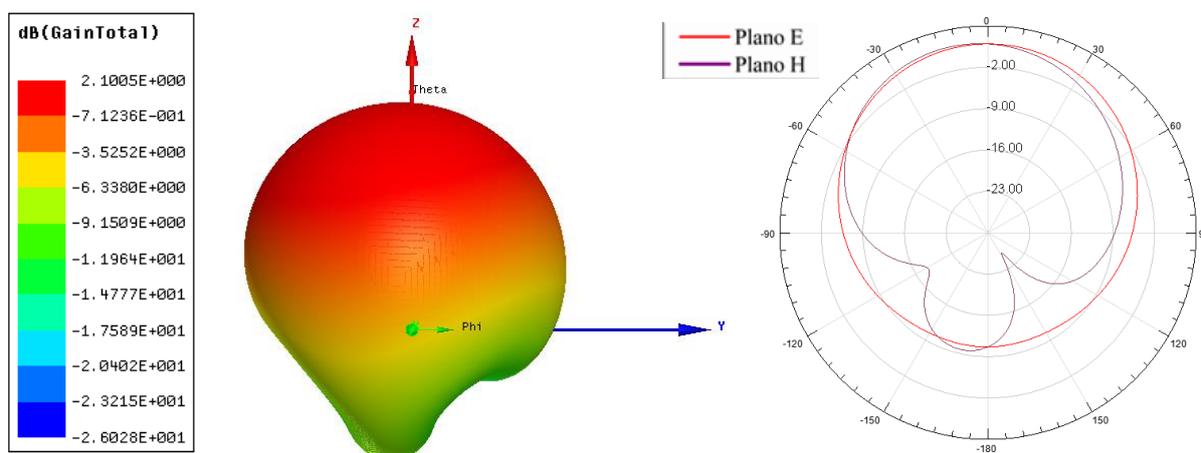


Figura 209: Antena FR4 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

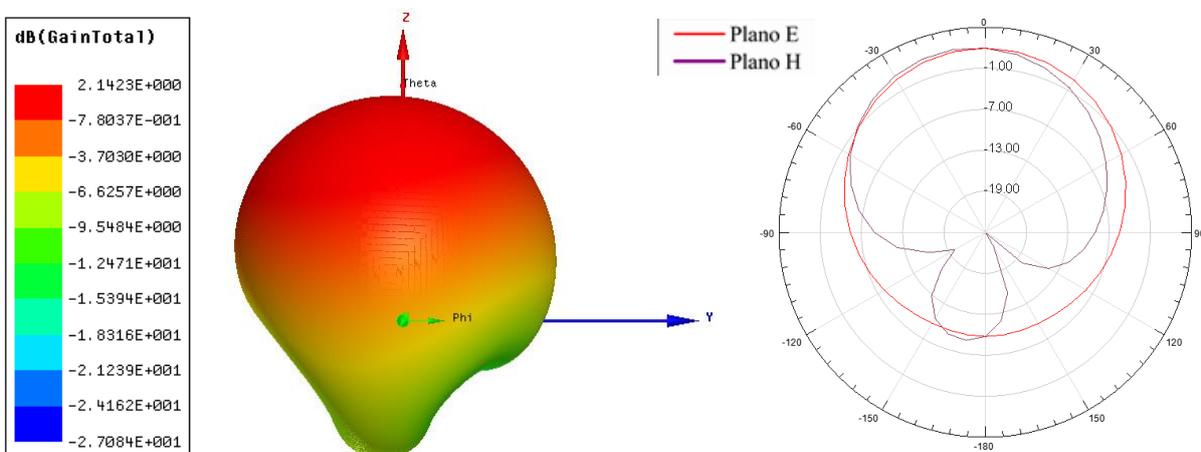


Figura 210: Antena FR4 retangular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 211 são apresentadas as curvas de perda de retorno para a antena simulada com material FR4 com célula circular.

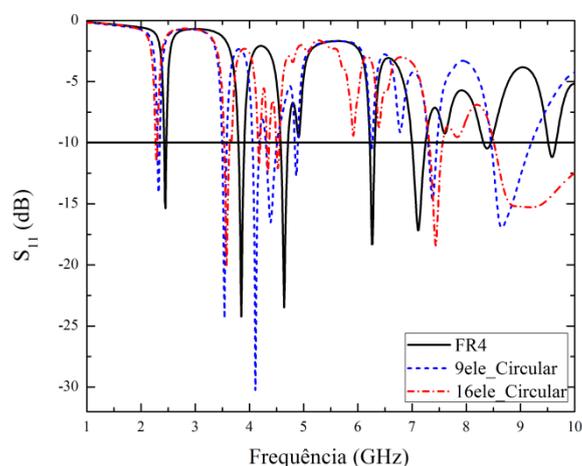


Figura 211: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos circular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com célula circular com 3x3 e 4x4 elementos deslocaram o primeiro modo para valores menores de frequência, em ambas as antenas surgiram modos em valores maiores de frequência. O ganho reduziu de 3,28 dB para 2,21 dB na antena com arranjo de 3x3 e de 3,28 dB para 2,27 dB na antena com arranjo de 4x4.

Na Tabela 58 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 212 e 213 podem ser vistos os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com diferentes arranjos.

Tabela 58: Frequência de ressonância e largura de banda da antena FR4 com célula circular no plano de terra para diferentes arranjos.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
FR4	2,46	2,43	2,45	30
9ele	2,34	2,31	2,32	30
16ele	2,3	2,27	2,29	30

Fonte: Autoria própria, 2016.

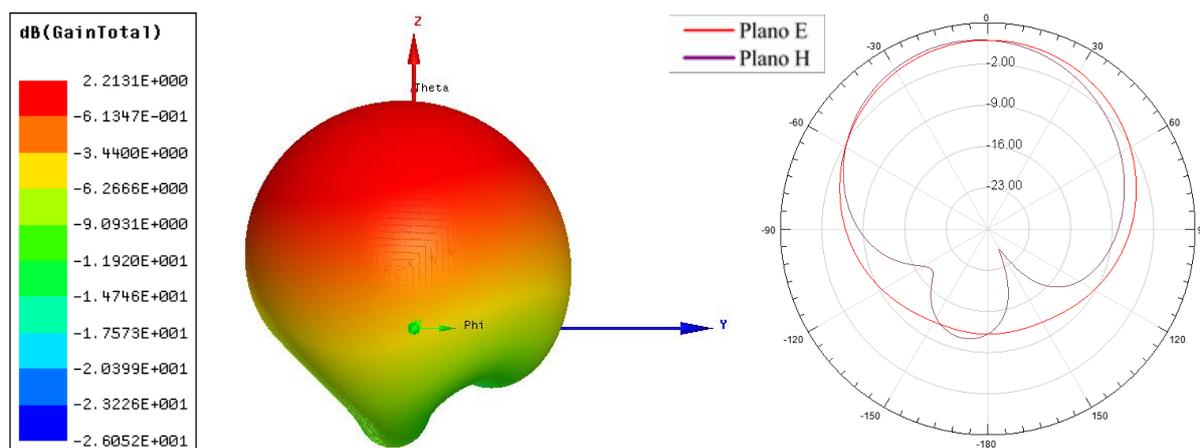


Figura 212: Antena FR4 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

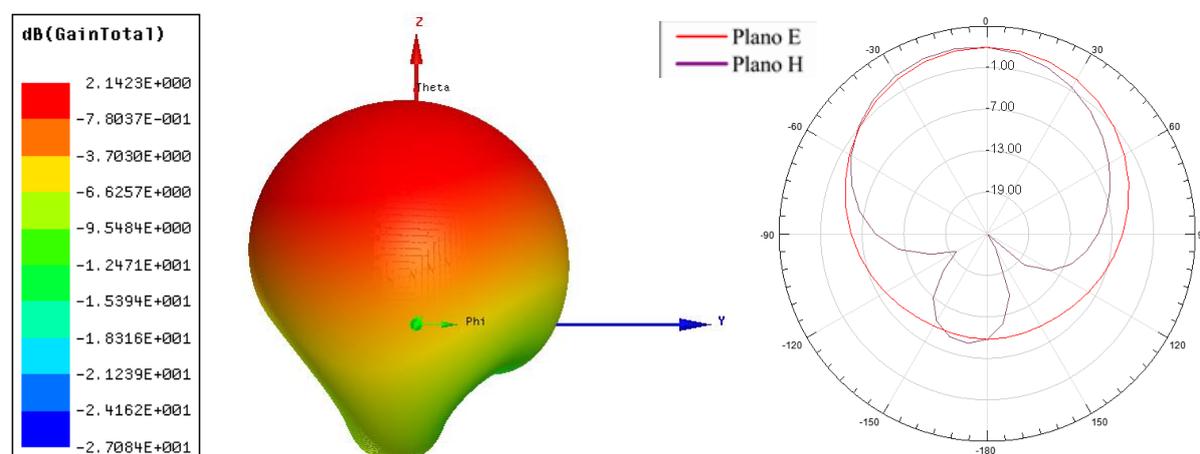


Figura 213: Antena FR4 circular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com material RT6010 tem a curva de perda de retorno apresentada na Figura 214 junto com as antenas com Metassuperfície.

A antena com célula retangular e 3x3 elementos deslocou o primeiro modo de ressonância na direção dos maiores valores de frequência, já a antena com 4x4 elementos parou de operara nas proximidades da frequência de projeto. O ganho apresentou redução para ambas as antenas saindo de 5,38 dB para 4,74 dB na antena com arranjo 3x3 e de 5,38 dB para 3,31 dB na antena com arranjo 4x4.

Na Tabela 59 podem ser vistos os resultados da perda de retorno e nas Figuras 215 e 216 são apresentados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com diferentes arranjos.

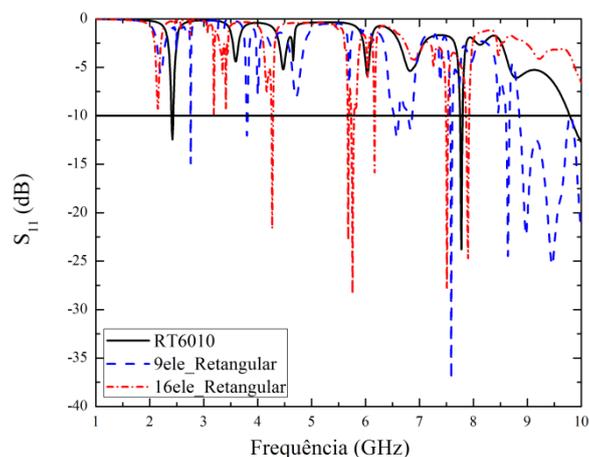


Figura 214: Perda de retorno para antena RT6010, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos retangular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 59: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula retangular no plano de terra para diferentes arranjos.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
9ele	2,76	2,76	2,76	0
16ele	4,28	4,26	4,27	20

Fonte: Autoria própria, 2016.

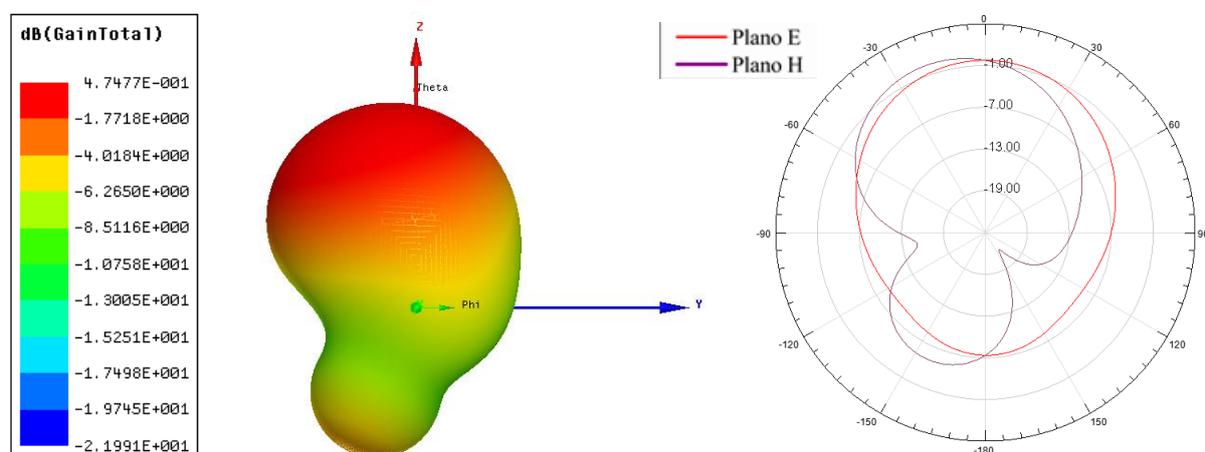


Figura 215: Antena RT6010 retangular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

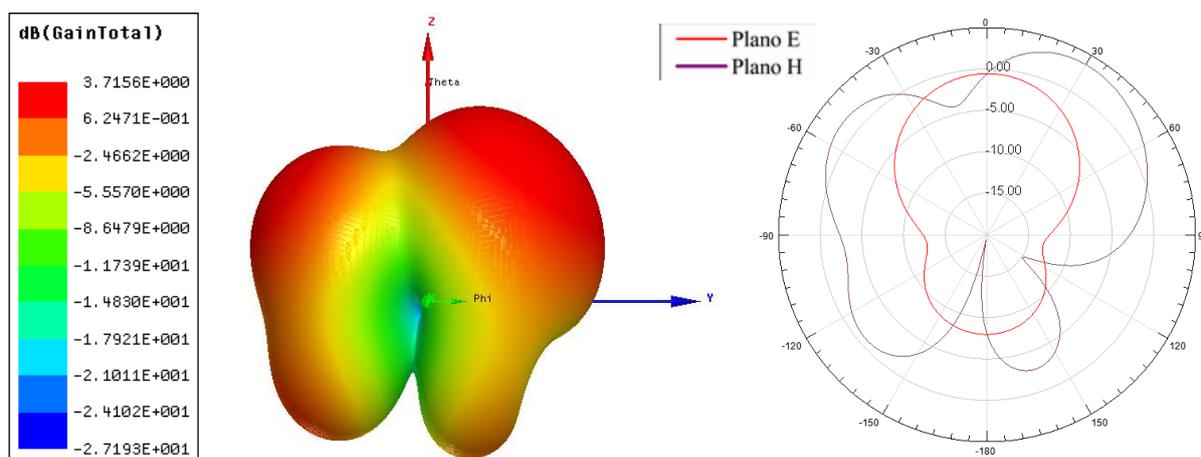


Figura 216: Antena RT6010 retangular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 217 é apresentada a curva de perda de retorno para a antena com material RT6010 e as antenas com 3x3 elementos e 4x4 elementos, ambos circulares.

Em ambas as antenas com célula circular de 3x3 e 4x4 elementos foi observado que as mesmas não operavam como antenas na frequência de projeto. O ganho foi reduzido saindo de 5,38 dB para 3,29 dB na antena com arranjo 3x3 e de 5,38 dB para 2,94 dB para antena com arranjo 4x4.

Na Tabela 60 são apresentados os resultados da perda de retorno e nas Figuras 218 e 219 podem ser observados os resultados dos parâmetros de irradiação para as antenas com diferentes arranjos.

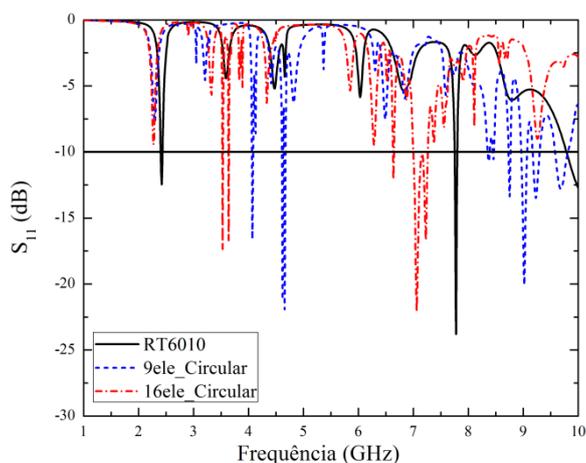


Figura 217: Perda de retorno para antena RT6010, com arranjo de 3x3 e 4x4 elementos Circular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Tabela 60: Frequência de ressonância e largura de banda da antena RT6010 com célula circular no plano de terra para diferentes arranjos.

Material	Frequência Superior (GHz)	Frequência Inferior (GHz)	Frequência Ressonância (GHz)	BW (MHz)
RT6010	2,43	2,41	2,42	20
9ele	4,08	4,07	4,07	10
16ele	3,53	3,53	3,53	0

Fonte: Autoria própria, 2016.

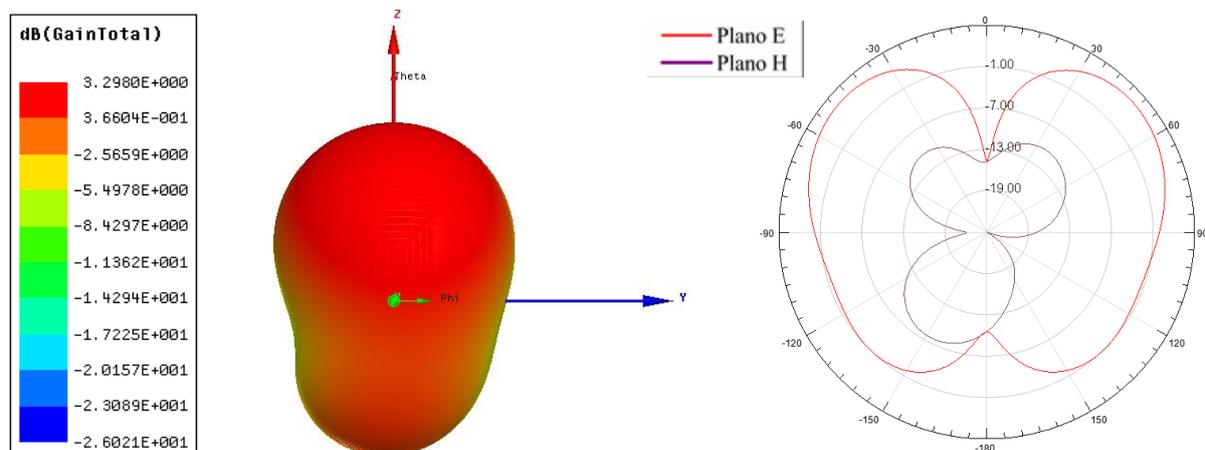


Figura 218: Antena RT6010 circular com 3x3 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

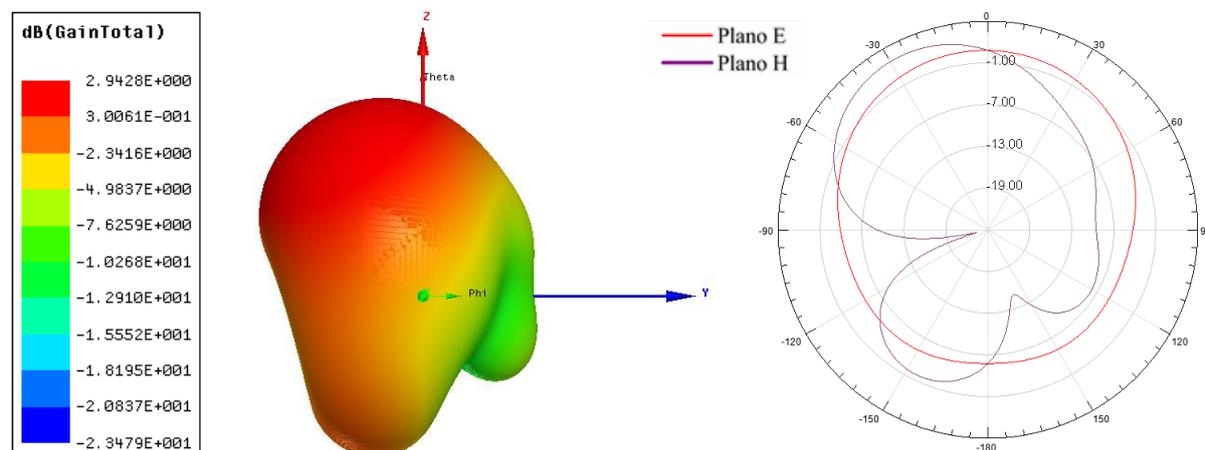


Figura 219: Antena RT6010 circular com 4x4 elementos de tamanho  $\lambda/20$ .

Fonte: Autoria própria, 2016.

## 7.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção tratará dos resultados obtidos a partir dos dispositivos construídos. No total foram construídas quatro antenas com material FR4 com as células circulares e retangulares aplicadas no plano de terra. Partindo dos resultados simulados e medidos serão feitas as ponderações a respeito dos padrões de irradiação das antenas. A medição das antenas fabricadas foram feitas por meio de um analisador de redes vetoriais (Microwave Network Analyzer -VNA) do fabricante ROHDE & SCHWARZ modelo ZVB 20, que opera de 10 MHz a 20 GHz. O analisador em questão pode ser observado na Figura 220.

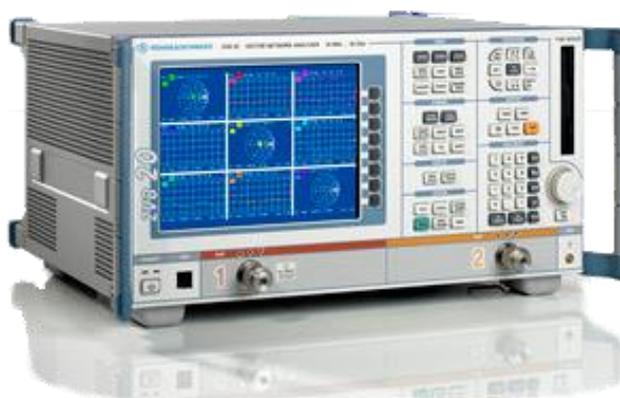


Figura 220: Analisador de redes vetoriais.

Fonte: ROHDE & SCHWARZ, 2016.

A análise do comportamento das antenas de microfita fabricadas foi realizada no intervalo de 1 a 4 GHz correspondentes as bandas L e X, essa faixa de frequência engloba o intervalo do ISM - (*Industrial Scientific and Medical*), possibilitando vários tipos de aplicações.

Na Figura 221 é possível observar a resposta da antena fabricada com FR4 medida no VNA e da antena obtida através de simulação com arranjo (3x3 circular)

Os modos observados na Figura 221 da antena simulada estão nas frequências de 2,32 GHz com intensidade de -12,90 dB e 3,55 GHz com intensidade de -20,05 dB, para a antena fabricada esses valores foram 2,31 GHz com intensidade de -19,68 dB e 3,25 GHz com intensidade de -17,63 dB. Na antena medida a largura de banda foi incrementada no primeiro e no segundo modo, quando comparados com os resultados simulados, o BW para os primeiro e segundo modo foram 20 MHz e 300 MHz, respectivamente.

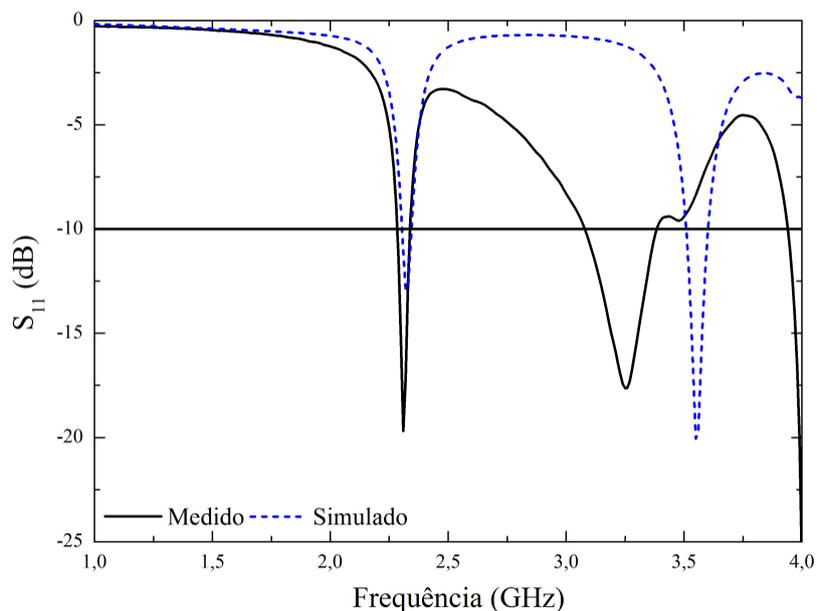


Figura 221: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 3x3 circular simulado e medido.

Fonte: Autorial própria, 2016.

A curva do coeficiente de reflexão das antenas com arranjo 4x4 circular aplicado ao plano de terra podem ser observados na Figura 222.

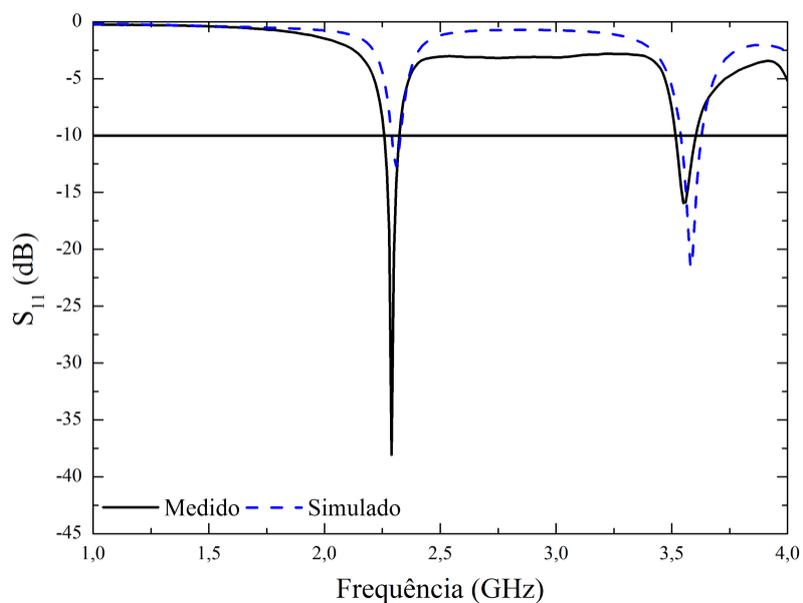


Figura 222: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 4x4 circular simulado e medido.

Fonte: Autorial própria, 2016.

Na Figura 222 com a utilização do arranjo 4x4 foi observada a intensificação do primeiro modo saindo de 2,31 GHz a -12,71 dB na antenna simulada para 2,29 GHz a -38,05 dB na antenna medida. No segundo modo o inverso foi observado a antenna simulada apresentou maior intensidade na perda de retorno 3,58 GHz a -21,56 dB em comparação com os 3,56 GHz a -15,87 dB da antenna fabricada. A largura de banda para antenna medida apresentou aumento no primeiro modo saindo de 20 MHz para 40 MHz, e no segundo modo se manteve constante com valor de 80 MHz.

Na Figura 223 é apresentada a curva com o coeficiente de reflexão para as antenas simuladas e fabricadas com arranjo de 3x3 retangular.

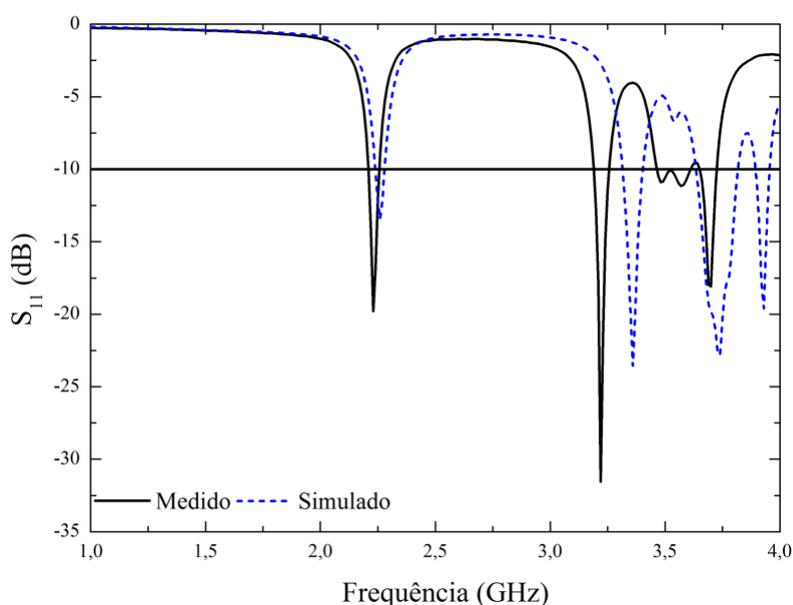


Figura 223: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 3x3 retangular simulado e medido.

Fonte: Aatoria própria, 2016.

O primeiro modo da curva do coeficiente de reflexão na Figura 223 ressoou na frequência de 2,26 GHz a -13,42 dB para antenna simulada, já a antenna medida ficou na frequência de 2,23 GHz a -19,78 dB, no segundo modo a frequência da antenna simulada foi de 3,36 GHz a -23,56 dB e a antenna medida ficou em 3,22 GHz a -31,54 dB. A largura de banda no primeiro modo na antenna simulada foi de 30 MHz e na antenna medida foi de 40 MHz, no segundo modo a antenna medida apresentou 50 MHz e a antenna simulada ficou com 80 MHz. Ainda foram observados na antenna simulada outros modos dentro da banda S que não foram observados na medição.

Na Figura 224 é possível observar a resposta da antenna fabricada e simulada com o arranjo 4x4 retangular.

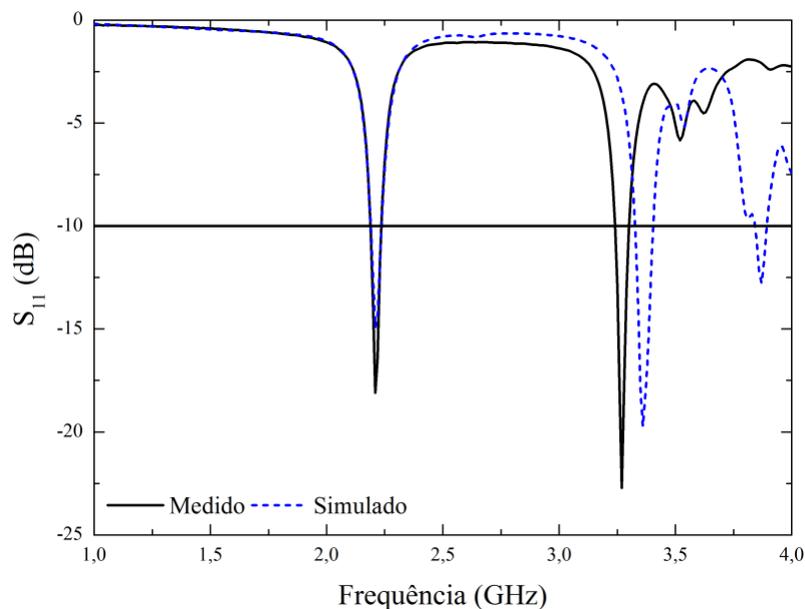


Figura 224: Perda de retorno para antena FR4, com arranjo de 4x4 retangular simulado e medido.

Fonte: Aatoria própria, 2016.

No primeiro modo da curva  $S_{11}$  na Figura 224 foi observado que a intensidade da perda de retorno da antena medida foi de -18,01 dB em comparação com -14,93 dB da antena simulada, a largura de banda se manteve constante no primeiro modo. No segundo modo a antena medida apresentou maior intensidade sendo 3,27 GHz a -22,72 dB para a antena medida e 3,36 GHz a -19,73 para antena simulada, entretanto foi observado que a maior largura de banda ocorreu na antena simulada.

A Figura 225 apresenta a perda de retorno para as antenas com 9 e 16 elementos circulares aplicados no plano de terra.

A antena com arranjo 4x4 cuja a curva do coeficiente de reflexão está plotada na Figura 225 apresentou o primeiro modo com maior intensidade se comparado com a antena com arranjo 3x3, a largura de banda do primeiro modo foi maior na antena com arranjo de 4x4 elementos com 60 MHz. No segundo modo a antena com arranjo 3x3 apresentou perda de retorno de -17,63 dB e largura de banda de 82 MHz.

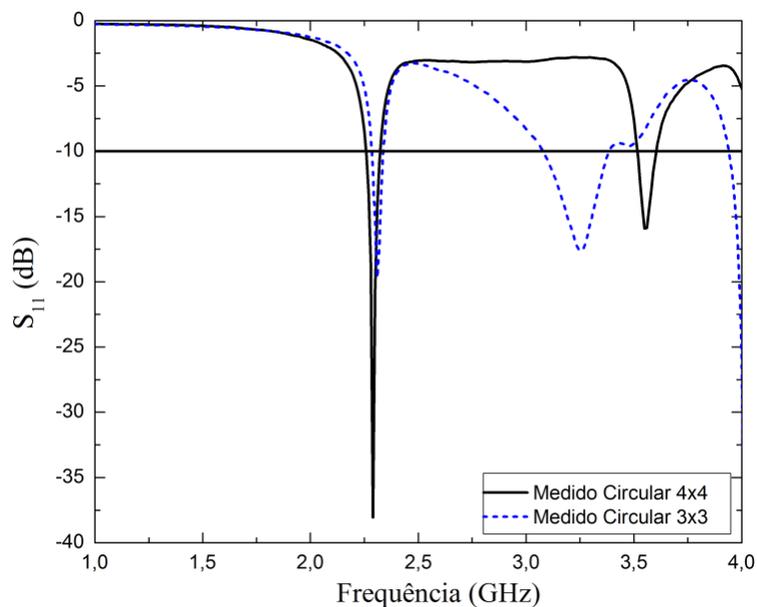


Figura 225: Antenas com arranjos circulares com 3x3 e 4x4 elementos.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 226 podem ser vistas as curvas do elemento  $S_{11}$  da matriz de espalhamento para as antenas com 3x3 elementos circular e retangular.

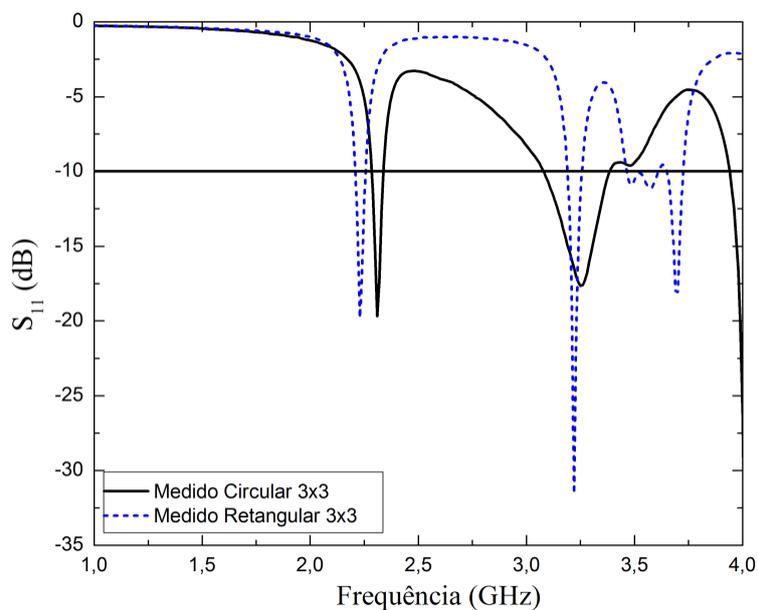


Figura 226: Antenas com arranjos 3x3 circular e retangular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 226 a curva do coeficiente de reflexão da antena com arranjo circular apresentou o primeiro modo na frequência de 2,31 GHz já a antena com arranjo retangular

apresentou o primeiro modo na frequência de 2,23 GHz, a largura de banda medida em ambas foi à mesma 40 MHz. O segundo modo apresentou valores menores largura de banda para a antena com células retangulares, já a antena com células circulares obteve 82 MHz de largura de banda para o mesmo valor de frequência.

Na Figura 227 podem ser observadas as curvas  $S_{11}$  para as antenas arranjos retangulares de 3x3 e 4x4 elementos.

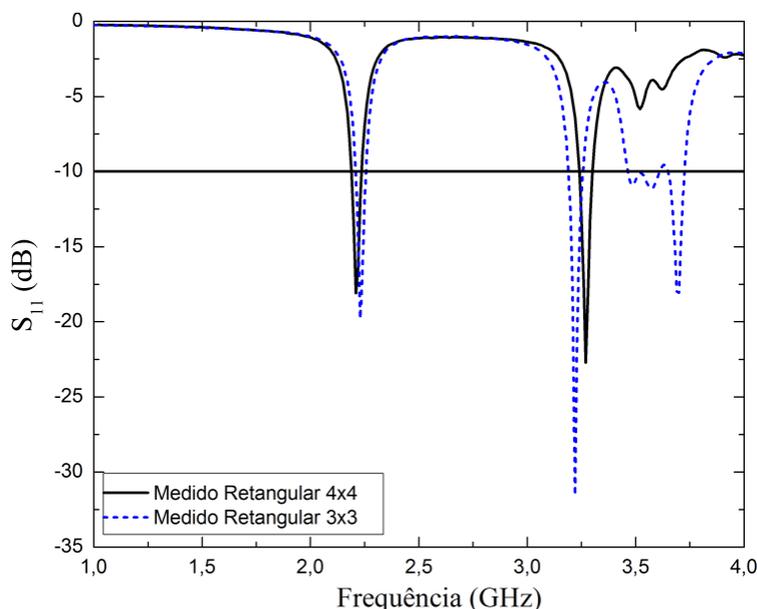


Figura 227: Antenas com arranjos 3x3 e 4x4 retangulares.

Fonte: Autoria própria, 2016.

Na Figura 227 o primeiro modo da antena apresentou menores valores de  $S_{11}$  quando foi inserido o arranjo com 4x4 elementos no plano de terra, a largura de banda se manteve para as duas antenas. No segundo modo a antena com 4x4 elementos obteve -22,72 dB de perda de retorno já a antena com 3x3 elementos ficou com -31,54 dB, a largura de banda nas duas antenas foi a mesma.

Na Figura 228 é apresentado o gráfico da perda de retorno para as antenas com arranjo 4x4 circular e retangular.

Na antena com arranjo 4x4 retangular ocorreu um deslocamento no sentido dos valores menores de frequência, quando comparado com a antena com arranjo 4x4 circular, esse comportamento pode ser observado na Figura 228. No primeiro modo o exemplar com células circulares apresentou a menor perda de retorno e maior largura de banda. O segundo modo à antena que apresentou maior largura de banda foi aquela com arranjo circular.

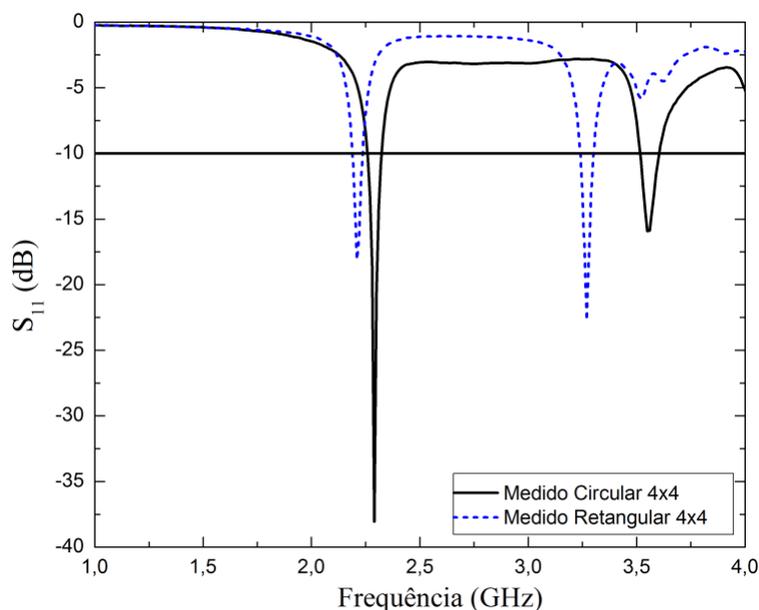


Figura 228: Antenas com 4x4 elementos retangular e circular.

Fonte: Autoria própria, 2016.

As divergências nas antenas podem ser atribuídas a diversos fatores como: 1) a tolerância de fabricação dos protótipos, (a célula de  $\lambda/20$  apresentava geometrias com medidas na ordem de 0,1 mm), 2) tolerância de alimentação, 3) incerteza nas medidas. Os valores de frequência de ressonância dos modos, a largura de banda e a intensidade do  $S_{11}$  são apresentados na Tabela 61 para as antenas fabricadas.

Tabela 61: Frequência de ressonância, perda de retorno e largura de banda para as antenas fabricadas.

Arranjo	Modos	Freq	Freq	$S_{11}$	$S_{11}$	BW	BW
		(GHz)	(GHz)	(dB)	(dB)	(MHz)	(MHz)
		S	M	S	M	S	M
3x3 circular	1º modo	2,32	2,31	-12,90	-19,68	30	40
	2º modo	3,55	3,25	-20,05	-17,63	90	82
4x4 circular	1º modo	2,31	2,29	-12,71	-38,05	20	60
	2º modo	3,58	3,56	-21,56	-15,87	80	80
3x3 retangular	1º modo	2,26	2,23	-13,42	-19,78	30	40
	2º modo	3,36	3,22	-23,56	-31,54	80	50
4x4 retangular	1º modo	2,21	2,21	-14,93	-18,09	30	40
	2º modo	3,36	3,27	-19,73	-22,72	70	50

Fonte: Autoria própria, 2016.

É possível observar nas Figuras 229 a 232 os gráficos de impedância de entrada para as antenas com Metassuperfície.

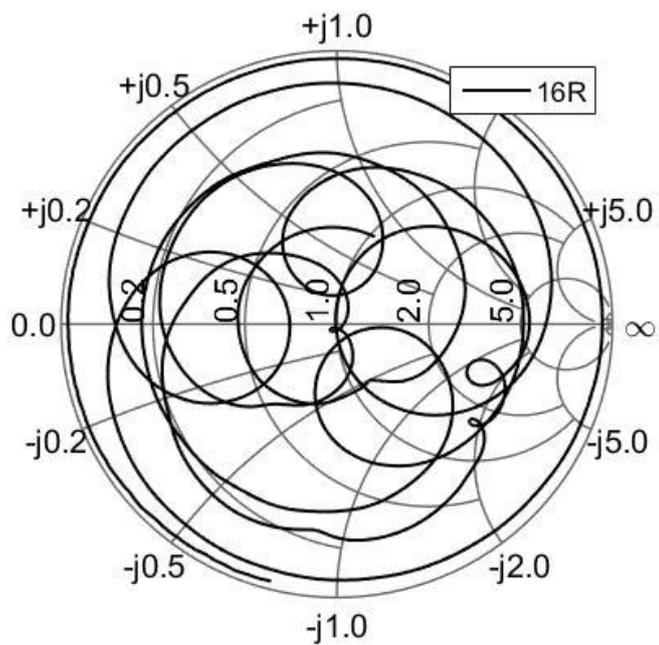


Figura 229: Carta de Smith para antena fabricada com arranjo 4x4 retangular.  
 Fonte: Aatoria própria, 2016.

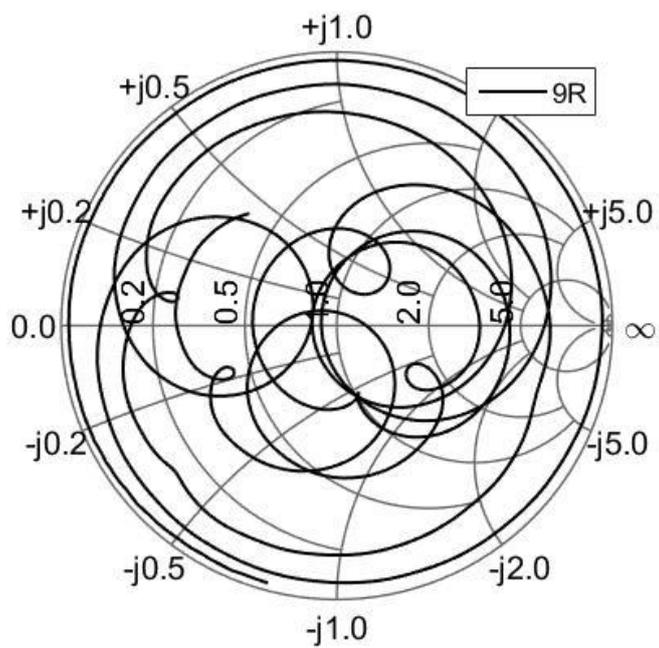


Figura 230: Carta de Smith para antena fabricada com arranjo 3x3 retangular.  
 Fonte: Aatoria própria, 2016.

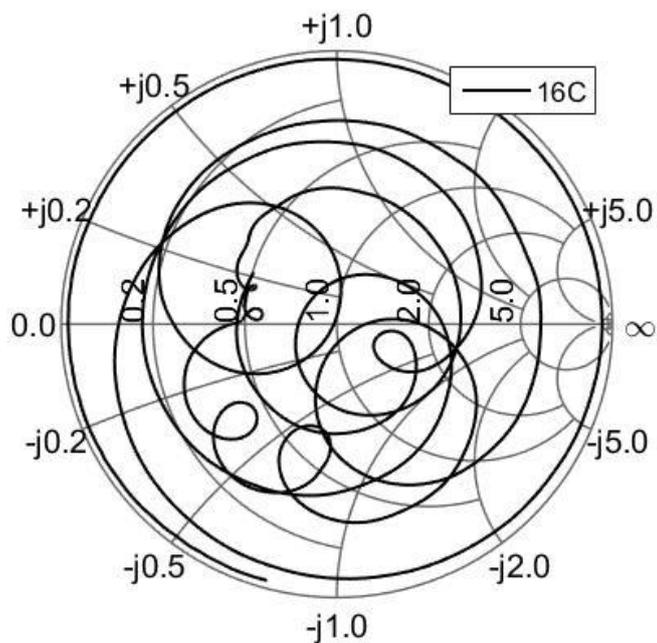


Figura 231: Carta de Smith para antena fabricada com arranjo 4x4 circular.  
 Fonte: Autoria própria, 2016.

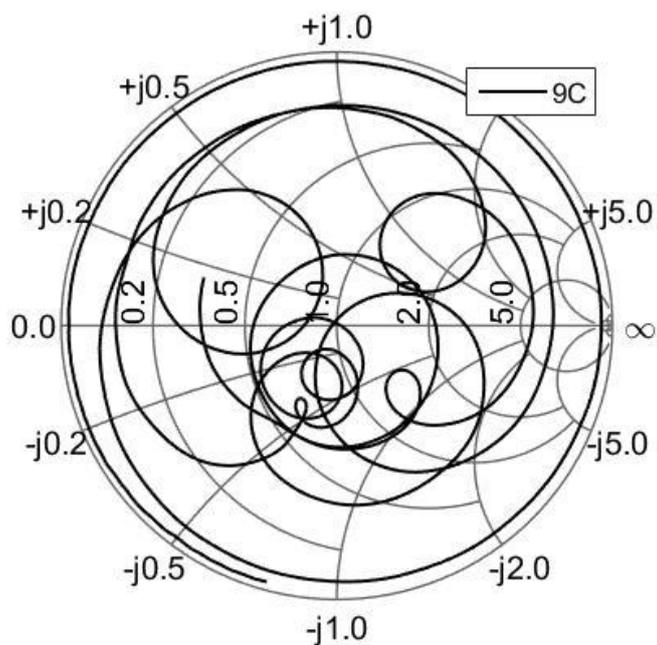


Figura 232: Carta de Smith para antena fabricada com arranjo 3x3 circular.  
 Fonte: Autoria própria, 2016.

Como forma de avaliação da qualidade da construção da antena é necessário avaliar o casamento de impedância, com um casamento eficaz o dispositivo funciona com máxima

transferência de potência da fonte para a antena e posteriormente para o espaço livre. A carta de Smith quantifica o casamento de impedância. Nestes gráficos são fornecidas as impedâncias de entrada dos dispositivos, na sua forma complexa, para a primeira banda de frequência ressonante. Todos os dados de impedância apresentados nas Figuras 225 a 228 estão compilados na Tabela 62.

Tabela 62: Impedâncias obtidas nas Cartas de Smith.

<b>Arranjo</b>	<b>Freq (GHz)</b>	<b>Z real (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Z imaginaria (<math>\Omega</math>)</b>
3x3 circular	2,31	43,425	j7,460
4x4 circular	2,29	50,646	j1,022
3x3 retangular	2,23	41,265	j3,727
4x4 retangular	2,21	37,949	j3,074

Fonte: Autoria própria, 2016.

A antena com casamento mais próximo do ideal ( $Z=50 \Omega$ ) foi a antena com arranjo de 16 elementos circulares, cuja impedância foi  $Z=50,646+ j1,022 \Omega$ .

## 8 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo do comportamento de antenas de microfita com *patch* retangular, mediante a inserção de SRR's modificados. O comportamento das antenas foi mensurado através da frequência de ressonância, largura de banda, perda de retorno e diagrama de irradiação, para três substratos diferentes RT5880, FR4 e RT6010. As antenas foram simuladas no software HFSS<sup>®</sup> e os resultados das mesmas foram analisados juntos aos obtidos em um analisador de redes vetoriais.

A inserção das células moveu a frequência do primeiro modo, quando comparados com as antenas sem Metassuperfície. Ainda foi possível observar que vários das antenas simuladas apresentaram comportamento multibanda possibilitando o uso das antenas em mais de uma faixa de frequência, bem como atuaram como filtros inibindo a propagação em algumas frequências.

Para os exemplares com células no *patch* ocorreu o deslocamento do primeiro modo para outros valores de frequência. As antenas com *patch* com periodicidade apresentaram comportamento semelhante deslocando o primeiro modo para valores diferentes de frequência e apresentando comportamento múltiplas bandas. No plano de terra as células provocaram aumento no lobo posterior da antena devido a remoção do cobre, esta perda foi mais perceptível nas antenas com valores maiores de comprimento de onda. A medida que o comprimento de onda  $\lambda$  diminuía as perdas no lobo posterior diminuía.

Os resultados das antenas construídas apresentaram concordância com os valores das antenas simuladas. As antenas com arranjo 3x3 circular e retangular quando medidas apresentaram no segundo modo deslocamento da perda de retorno para valores menores de frequência, a antena com arranjo 3x3 circular também mostrou aumento na largura de banda. As antenas com arranjo 4x4 circular e retangular apresentaram deslocamento do segundo modo para valores menores de frequência.

O casamento de impedância das antenas fabricadas manteve valores aceitáveis, de maneira que o valor que mais divergiu foi o da antena com 16 células retangulares com  $Z=37,949 + j3,074 \Omega$  e o melhor resultado foi da antena com 16 células circulares  $Z=50,646 + j1,022$ .

## 8.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das observações feitas no presente trabalho, ficam como recomendações para trabalhos futuros:

- Analisar o comportamento das antenas mediante a variação da periodicidade em valores diferentes de  $\lambda/20$ .
- Realizar estudo com outros métodos de análise.
- Analisar o comportamento das antenas na configuração anel fechado.
- Construir as antenas com outros materiais para os arranjos 9 e 16 elementos.
- Rotacionar as estruturas Metassuperfície no plano de terra e no *patch*.
- Utilizar as estruturas com células conectadas.
- Utilizar diodos tipo PIN na fabricação de estruturas.
- Utilização das Metassuperfície para reconfiguração de frequência e polarização.

## 9 REFERÊNCIAS

A. SANADA, C. CALOZ, AND T. ITOH. “**Characteristics of the composite right/left-handed transmission lines**”, IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., vol. 14, no. 2, pp. 68–70, February 2004.

Ansys. Disponível em: <<http://www.ansys.com/>>. Acesso em: 01 Nov, 2016.

C. A. BALANIS, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, New York, 2005.

C. CALOZ, T. ITOH, **Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications**. United States of America: John Wiley & Sons. p. 365, 2006.

C. HOLLOWAY, M. MOHAMED, E. F. KUESTER, and A. DIENSTFREY, “**Reection and transmission properties of a metamaterial: with an application to a controllable surface composed of resonant particles,**” *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 4, pp. 853865, November 2005.

C. L. HOLLOWAY, et al. **Use of Generalized Sheet Transition Conditions to Model Guided Waves on Metasurfaces/Metafilms**. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 60, NO. 11, NOVEMBER 2012. Doi: 10.1109/TAP.2012.2207668.

D. GONZÁLEZ-OVEJERO, “**Basic Properties of Checkerboard Metasurfaces**”. IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 14, 2015. Digital Object Identifier 10.1109/LAWP.2014.2365021.

D. L. ANDERSON, **S-Parameter Theory and Applications**. Hewlett-Packard Journal. 1967.

D. M. POZAR and D. H. SCHAUBERT, **Microstrip antennas – The analysis and design of microstrip antennas and arrays**, New York, USA: The IEEE, Inc., 1995.

D. R. SMITH and N. KROLL. “**Negative refractive index in left-handed materials**”. Phys. Rev. Lett., vol. 85, no. 14, pp. 2933–2936, Oct. 2000.

D. R. SMITH, WILLIE J. PADILLA, D. C. VIER, S. C. NEMAT-NASSER E S. SCHULTZ. “**Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity**”. Physical Rev. Lett., vol 84, no. 18, pp. 4184-4187, maio 2000.

D. SCHURIG, J. J. MOCK, B. J. JUSTICE, S. A. CUMMER, J. B. PENDRY, A. F. STARR, D. R. SMITH. “**Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies**”. Science Express Manuscript, 2006 In: [http://www.wfsj.org/course/docs/Cloack\\_Schurig-10-20-06.pdf](http://www.wfsj.org/course/docs/Cloack_Schurig-10-20-06.pdf)

E. S. PIRES et al. “**Metamaterial-Inspired Wire Antennas**”. Published in IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, NO. 5, MAY 2013. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2245640.

E. S. PIRES, “Desenvolvimento de Estruturas Irradiantes de Ordem Zero e Inspiradas em Metamateriais,”. 2012. 137f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2012.

E.F. KUESTER, M.A. MOHAMED, M. PIKET-MAY, C.L. HOLLOWAY, Averaged transition conditions for electromagnetic fields at a metafilm, IEEE Trans. Antennas Propag. 51 (2003) 2641–2651.

E. FORNARI, **O incrível padre Landell de Moura**. Porto Alegre: Globo, 1960. 216p.

G. DESCHAMPS, W. SICHAK, **Microstrip Microwave Antennas**. In: SYMPOSIUM ON THE USAF ANTENNA RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM, 3. out. 1953, Robert Allerton Park. Proceedings. Monticello: University of Illinois, 1953.

G. V. ELEFThERIADES, K. G. BALMAIN, **Negative-Refraction Metamaterials – Fundamental Principles and Applications**. John Wiley & Sons. Inc, ISBN 13: 978-0-471-60146-3, 2005.

R. GARG, et al. **Microstrip Antenna Design Handbook**. Massachusetts: Artech House, 2001.

H. GUTTON AND G. BAISSINOT, “**flat aerial for ultra-high frequencies**”, French Patent No. 703 113, 1955.

H. L. ZHU et al. “**Frequency-Reconfigurable Antenna Using Metasurface**”. Published in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 62. Jan 2014. Doi: 10.1109/TAP.2013.2288112.

H. L. ZHU et al. “**Linear-to-Circular Polarization Conversion Using Metasurface**”. Published in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61. Sep 2013. Doi: 10.1109/TAP.2013.2267712.

H. XU, “**Compact Circularly Polarized Antennas Combining Meta-Surfaces and Strong Space-Filling**”, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 61. NO. 7, JULY 2013. DOI: 10.1109/TAP.2013.2255855.

J. B. PENDRY, A. J. HOLDEN, W. J. STEWART, AND I. YOUNGS, “Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures,” Phys. Rev. Lett., vol. 76, pp. 4773-4776, Jun 1996. [Online]. Available: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.76.4773>

J. B. PENDRY, and D. R. SMITH, **The quest for the superlens**, Sci. Am., pp. 60-67, 2006.

J. B. PENDRY. et al. **Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena**, IEEE Trans. MTT, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, 1999.

J. H. C. DE MORAIS, “**Estudo de Antenas Patches de Microfita Miniaturizadas em Banda Larga para Aplicação em dispositivos móveis e portáteis**,”. 2011. 92f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), departamento de engenharia elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2011.

J. L. Da SILVA, “**Estudo do Comportamento de Antena de Microfita com Substrato Metamaterial**,”. 2015. 80f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação), Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2015.

J. P. S, WONG. “**Design of Huygens' Metasurfaces for Refraction and Focusing**”. Master Thesis of Applied Science, University of Toronto, 2015.

J. PENDRY, A. J. HOLDEN, D. J. ROBBINS, and W. J. STEWART, “**Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena**,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, pp. 2075 - 2084, 1999.

J. S. SEYBOLD. **INTRODUCTION TO RF PROPAGATION**. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2005.

J.B. PENDRY, A.J. HOLDEN, D.J. ROBBINS and W.J. STEWART. “**Low frequency plasmons in thin-wire structures**”, J. Phys.: Condens. Matter. 10 (1998), pp. 4785 – 4809, June 1998.

K. AYDIN, I. BULU, K. GUVEN, M. KAFESAKI, C. M. SOUKOULIS, and E. OZBAY, "Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs," *New Journal of Physics*, vol. 7, p.168, 2005.

L. M. ARAÚJO, "Análise teórica e experimental de superfícies seletoras de frequência e suas aplicações em antenas planares,". 2009. 85f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), departamento de engenharia elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2009.

L. M. CAETANO et al. "Effects of Variation of the Substrate thickness of Rectangular Slot Resonator with Multilayer", *Microwave and Optical Technology Letters* , v. 55, p. 2931-2938, 2013. DOI 10.1002/mop.27999

M. C. K. WILTSHIRE. **Bending of light in the wrong way.** *Science* 292: pp. 60-61, 2001.

M. N. O. SADIKU. *Elementos de eletromagnetismo*, 5ª Edição. BOOKMAN, 2012.

mimaki brasil. Disponível em: <Available: <http://brasil.mimaki.com/>>. Acesso em: 01 Nov, 2016.

N. YU. F. CAPASSO. "Flat optics with designer Metasuperfícies", *Nature materials* – Review article, vol 13, published online: 23 January 2014, Doi: 10.1038.

R. E. MUNSON, Conformal Microstrip Antennas and Microstrip Phased Arrays. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 22, n. 1, p. 74-78, jan. 1974.

R. MARQUÍ, J. MARTEL, F. MESA, and F. MEDINA, "Left-handed-media simulation and transmission of EM waves in subwavelength split-ring-resonator-loaded metallic waveguides," *Physical Review Letters*, vol. 89, p. 183901, 2002.

R. W. ZIOLKOWSKI. "Metamaterial-Based Antennas: Research and Developments". *IEICE TRANS. ELECTRON.*, pp. 1267-1274, vol.E89–C, NO.9 september 2006.

R.F. CARNEIRO, **Desenvolvimento de substrato cerâmico BiNbO4 para antenas de microfita de sistemas de comunicação sem fio**, Tese, 82f, Natal, 2010.

ROGERS. Disponível em: <https://www.rogerscorp.com/>. Acesso em: 01 Nov, 2016.

S. M. WENTWORTH, **Fundamentos de Eletromagnetismo com Aplicações em Engenharia**, LTC, 2006.

S. SUDHAKARAN. Negative refraction from electromagnetic periodic structures and its applications. Tese de Doutorado, University of London, 2006, p. 226.

Science Berakthroughof the year: The runners-up. *Science*, v. 314, no. 5807, pp. 1850-1855, 2006.

Special issue, proc. IEEE Trans. Antennas propagate., vol. 37, No. 5, May 1989.

T. A. MILLIGAN, **Modern antenna design 2nd ed.** Hoboken, New Jersey, USA: Inc., 2005.

T. CAI, “**Low-Profile Compact Circularly-Polarized Antenna Based on Fractal Metassuperfície and Fractal Resonator**”. IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 14, 2015. DOI: 0.1109/LAWP.2015.2394452.

V. A. A. FILHO, **Arranjo de Log-Periódicos Compactos em Microfita com Elementos Fractais de Koch**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN. Natal, 2010.

V. F. BARROS. **Estudo do Efeito de Substratos Metamateriais em Parâmetros de Antenas de Microfita**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, Brasil, fevereiro 2012.

W. F. RICHARDS. “Microstrip antenna.” Chapter 10 in *antennas handbook: Theory, applications and design* (Y. T. Lo and S. W. Lee. eds.), Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1988.

W. ROTMAN, **Plasma Simulation by Artificial Dielectrics and Parallel-Plate Media**. 82, Janeiro de 1962, IRE Trans. Antennas Propag., Vol. AP.10, pp. 82-95.

W. ROTMAN. “**Plasma Simulation by Artificial Dielectrics and Parallel-Plate Media**”. IRE Trans. Antennas Propag., vol. AP10, no. 82, pp. 82-95, janeiro 1962.

S. M. HOLANDA, ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ANTENAS DE MICROFITA UTILIZANDO TECIDO DE MALHA A BASE DE FIBRAS TÊXTEIS COMPOSTAS. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação, UFERSA. Mossoró, 2016.