

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DA PARAÍBA – CAMPUS JOÃO PESSOA**



DISSERTAÇÃO

**PROJETO DE ANTENAS BIOINSPIRADAS EM PLANTAS PARA
SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**

Aluno: Paulo Fernandes da Silva Júnior

Professor Orientador: Prof. Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr.

Professor Coorientador: Prof. Jefferson Costa e Silva, Dr.

João Pessoa – PB

Junho – 2015

**PROJETO DE ANTENAS BIOINSPIRADAS EM PLANTAS PARA
SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**

Paulo Fernandes da Silva Júnior

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr.
(Orientador)

Jefferson Costa e Silva, Dr.
(Coorientador)

João Pessoa – PB, Junho de 2015.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca do IFPB, *campus* João Pessoa

S586p

Silva Júnior, Paulo Fernandes.

Projeto de antenas bioinspiradas em plantas para sistemas de comunicação sem fio/ Paulo Fernandes da Silva Júnior. – 2015.

135 f. : il.

Dissertação (Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Campus João Pessoa.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique F. Silva.

Co-orientador: Prof. Dr. Jefferson Costa e Silva.

1. Comunicação sem fio. 2. Eletromagnetismo
3. Antenas bioinspiradas. I. Título.

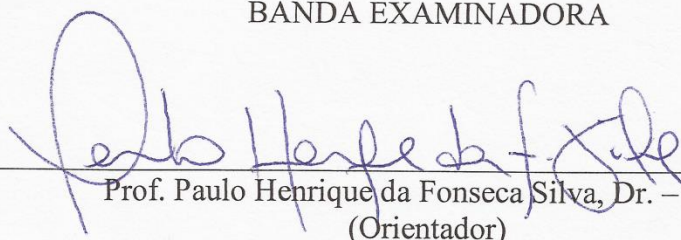
CDU 537.8

Paulo Fernandes da Silva Júnior

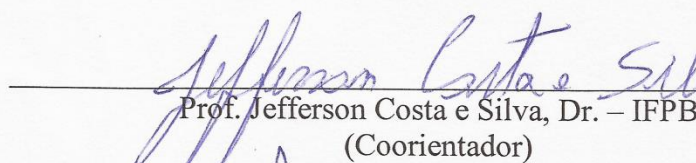
**PROJETO DE ANTENAS BIOINSPIRADAS EM PLANTAS PARA
SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

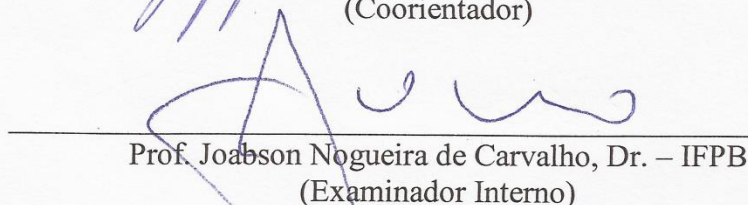
BANDA EXAMINADORA



Prof. Paulo Henrique da Fonseca Silva, Dr. – IFPB
(Orientador)

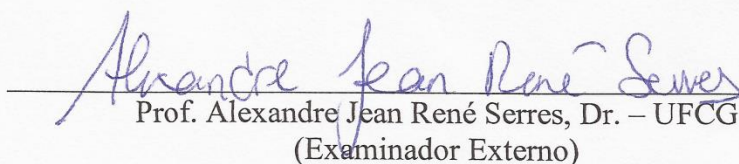


Prof. Jefferson Costa e Silva, Dr. – IFPB
(Coorientador)



Prof. Joabson Nogueira de Carvalho, Dr. – IFPB
(Examinador Interno)

Prof. Alfrêdo Gomes Neto, Dr. – IFPB
(Examinador Interno)



Prof. Alexandre Jean René Serres, Dr. – UFCG
(Examinador Externo)

João Pessoa – PB, Junho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus pela força, ânimo, cuidado diário e por colocar em minha vida pessoas que, a cada dia, impulsiona-me a melhorar como ser humano.

À minha esposa, Janaína Muniz e filhas, Jayne e Gabrielle, que com toda a paciência têm suportado e dividido o resumido tempo com os meus estudos; sem elas eu não teria chegado a lugar algum.

Ao professor Paulo Henrique, meu orientador, um exemplo de pessoa e profissional, que com alegria indicou o caminho da pesquisa deste trabalho, com muita paciência disponibilizou o seu precioso tempo neste projeto e ainda atuou como revisor do texto em sua forma e conteúdo; sem ele esta Dissertação não poderia ser realizada.

Ao professor Jefferson Costa, coorientador e coordenador da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do IFPB, que, com carinho e atenção, apoiou na revisão do texto e sempre esteve disposto a ajudar na conclusão desta Dissertação.

A todos os professores do IFPB, em especial aos professores Neilor César e Edgard Santos, que têm promovido um ambiente agradável e favorável à pesquisa acadêmica.

Aos meus colegas do Mestrado, em especial a Alexandre Santos, pelo apoio, divisão de experiência e multiplicação de forças, ao professor João Batista pelos conselhos e a disponibilidade em ajudar nos momentos necessários, a Evandson pela boa vontade e disposição em apoiar este trabalho, a Maria do Carmo Frazão, Nieremberg Ramos e todos que de forma direta e indireta contribuíram com esta Dissertação.

Aos meus pais, Paulo Fernandes e Odete Carneiro, pelo empenho na minha educação, fazendo tudo o que estava ao seu alcance para ofertar o melhor possível.

Ao IFPB, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta Dissertação.

RESUMO

As soluções biologicamente inspiradas têm despertado o interesse de pesquisadores para soluções de problemas em várias tecnologias. A partir da inspiração na natureza, observação do comportamento e funções realizadas pelos seres vivos (que usam os recursos naturais de forma sustentável e otimizada ao longo de milhões de anos de evolução), várias instituições de renome mundial têm financiado centros de pesquisa para o desenvolvimento da engenharia biologicamente inspirada. Nos últimos anos os conceitos bioinspirados também têm sido usados em projetos de dispositivos de micro-ondas inovadores. A proposta desta pesquisa é verificar o uso de geometrias bioinspiradas em plantas (folhas e flores) para o desenvolvimento de antenas tipo *patch* e monopolo impresso para aplicação em sistemas de comunicação de quarta geração e de banda ultralarga. As antenas são fabricadas com materiais de baixo custo: laminados de fibra de vidro e tecido *jeans*. As propriedades ressonantes e de irradiação das antenas bioinspiradas propostas são caracterizadas através de análises numéricas e experimentais. Os resultados obtidos são comparados com aqueles apresentados por antenas *patch* e monopolo impresso convencionais. Os *softwares* comerciais Ansoft DesignerTM e HFSS foram usados nas simulações das antenas. Os resultados experimentais foram obtidos através de medição dos protótipos fabricados nos laboratórios do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, utilizando um analisador de redes vetorial, modelo N5230A-*Agilent Technologies*. Para as antenas tipo monopolo impresso, o uso da geometria bioinspirada possibilitou um projeto mais compacto com a redução das dimensões das antenas.

ABSTRACT

Biologically inspired solutions have attracted the interest of researchers for solutions in various technologies. With inspiration from nature, behaviour observation and functions performed by living things (that use natural resources in a sustainable manner and optimized and optimally over millions of years of evolution), several world-renowned institutions have funded research centres for the development of biologically inspired engineering. At the last years, bio-inspired concepts also have been used to design innovative microwave devices. The purpose of this research is to verify the applications of bio-inspired geometries in plants (leaves and flowers) in the development of *patch* and printed monopole antennas for applications in fourth-generation and ultra-wideband communication systems. Built antennas are fabricated with low-cost materials: fiberglass laminates and *jeans* fabric. Resonant and radiation properties of proposed bio-inspired antennas are characterized by numerical and experimental analysis. The obtained results are compared with those presented by conventional *patch* and printed monopole antennas. Ansoft DesignerTM and HFSS commercial software were used for antenna simulations. The experimental results were obtained through measures of fabricated prototypes in laboratory of the Federal Institute of the Paraíba, with the use of a vector network analyser, model N5230A – Agilent Technologies. For printed monopole antennas the use of bio-inspired geometry promoted a compact design, with reduction of antennas dimensions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diferentes tecnologias e suas frequências de operação.....	26
Figura 2.2	Pulso gaussiano, monociclo e pulso duplo gaussiano.....	30
Figura 2.3	Pulso gaussiano, monociclo e pulso duplo gaussiano sobre a máscara espectral FCC.....	30
Figura 2.4	a) Pulso UWB transmitido no tempo; b) Espectro do pulso UWB transmitido e máscara espectral FCC.....	32
Figura 3.1	Antenas tipo monopolo impresso, [18].....	36
Figura 3.2	Geometria de uma antena monopolo impresso retangular.....	37
Figura 3.3	Antena do tipo <i>patch</i> retangular.....	39
Figura 3.4	Antenas bioinspiradas em plantas: a) <i>maple-leaf</i> [18]; b) <i>leaf-shaped bowtie</i> [52]; c) <i>leaf vintena</i> [62]; d) <i>four-leaf clover</i> [20]; e) <i>leaf-shaped bowtie</i> UWB [53]; f) <i>four leaf</i> [60]; g) <i>tulip antena</i> [57]; h) <i>leaf-shaped bowtie</i> [54], i) <i>rose leaf</i> [56]; j) <i>patch</i> Fibonacci [14]; k) árvore com transmissor [51]; l) <i>leaf</i> PMA [61].....	44
Figura 3.5	Antenas bioinspiradas em animais: a) <i>Buttlerfly</i> PMA [46]; b) <i>cockroach vintena</i> [67]; c) antena de inseto [55]; d) <i>vascular patch</i> [66]; e) monopolo <i>vintenavi</i> [65].....	45
Figura 3.6	Partes das folhas: a) margens; b) bases; c) ápice.....	47
Figura 3.7	Classificação das formas mais comuns de folhas.....	48
Figura 3.8	Partes de uma flor completa.....	48
Figura 3.9	Ilustrações de alguns tipos de corolas de flores.....	49
Figura 3.10	Formação do número de ouro: a) pelo pentágono e b) por retângulos	50
Figura 3.11	Exemplos do número de ouro na natureza [73-74]: a) no corpo humano; b) nos galhos, pétalas de uma rosa e na disposição das folhas de uma espirradeira	51
Figura 3.12	Exemplos de geometrias fractais: a) nos galhos das árvores [78]; b) na samambaia [79]; c) na flor de um girassol.....	53
Figura 3.13	Ilustrações de árvores fractais gerados pelo sistema-L: a) 4,8 e 32 iterações; b) 16, 32 e 64 iterações.....	54
Figura 3.14	Sistema de coordenadas polares.....	54

Figura 3.15	Gráficos em coordenadas polares para algumas funções: Gráficos em coordenadas polares para algumas funções: a) borboleta; b) borboleta com antenas; c) cardioide; d) rosácea de 4 pétalas; e) 2 asas de borboleta; f) libélula.....	55
Figura 3.16	Geometrias geradas pela superfórmula de Gielis: a) naturais [83]; b) geradas pela superfórmula [82].....	57
Figura 3.17	Exemplos de antenas camufladas: Aplicações em antenas: a) Palmeira [93]; b) Cactos [94]; c) <i>shark viintena</i> [87]; d) camuflada pela pintura [95]; e) <i>washable wearable antena</i> [89].....	59
Figura 4.1	Geometrias bioinspiradas propostas para tecnologia 4G: a) planta de cana-de-açúcar; b) geometria simulada da cana-de-açúcar; c) folha elíptica de oliveira; d) folha elíptica simulada; e) flor de tulipa; f) flor de tulipa simulada.....	62
Figura 4.2	Geometria bioinspirada propostas para tecnologia UWB: a) flor da tulipa; b) modelo simulado da tulipa; c) folha de oliveira; d) antena folha de oliveira simulada; e) flor de jasmim; f) flor de jasmim simulada; g) orquídea; h) antena pétala de orquídea simulada.....	62
Figura 4.3	Dimensões de projeto da PMA quadrada.....	65
Figura 4.4	Antena cana-de-açúcar de 4 folhas e PMA quadrada: a) dimensões da antena cana-de-açúcar 4 folhas simulada, b) antena com refletor, c) comparação das antenas cana-de-açúcar 4 folhas e PMA quadrada.....	67
Figura 4.5	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA quadrada com refletor.....	68
Figura 4.6	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da antena cana-de-açúcar de 4 folhas sem refletor	68
Figura 4.7	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido das antenas cana-de-açúcar de 4 folhas e PMA quadrada com refletor.....	69
Figura 4.8	Impedâncias sobre as cartas de Smith das PMA com refletor: a) cana-de-açúcar de 4 folhas; b) quadrada.....	70
Figura 4.9	Diagrama de irradiação da PMA quadrada com refletor em 700 MHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície	71

Figura 4.10	Diagrama de irradiação da antena cana-de-açúcar de 4 folhas com refletor em 700 MHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície	73
Figura 4.11	Dimensões da antena cana-de-açúcar de 3 folhas com refletor: b) antena cana-de-açúcar 3 folhas com refletor medida, c) comparação antena cana-de-açúcar 3 folhas e PMA quadrada medida.....	74
Figura 4.12	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da antena cana-de-açúcar de 3 folhas com refletor.....	75
Figura 4.13	Diagrama de irradiação da antena cana-de-açúcar de 3 folhas com refletor em 751 MHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície	77
Figura 4.14	Impedância sobre a carta de Smith da antena cana-de-açúcar de 3 folhas com refletor	77
Figura 4.15	Dimensões de projeto da antena folha elíptica para 2,5 GHz: a) dimensões da antena com abertura, b) dimensão da folha com aplicação do número de ouro, c) antena com refletor, d) comparação entre a estrutura da antena bioinspirada e PMA quadrada.....	81
Figura 4.16	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA quadrada com refletor.....	81
Figura 4.17	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da antena de folha elíptica com refletor.....	82
Figura 4.18	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido das antenas de folha elíptica e PMA quadrada com refletor.....	82
Figura 4.19	Impedâncias sobre as cartas de Smith das PMA com refletor: a) folha elíptica; b) quadrado.....	83
Figura 4.20	Diagrama de irradiação da PMA quadrada com refletor em 2,55 GHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície	84
Figura 4.21	Diagrama de irradiação da antena de folha elíptica com refletor em 2,40 GHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície	85
Figura 4.22	Antenas do tipo <i>patch</i> : a) medidas; b) dimensões da antena quadrada; c) dimensões da flor de tulipa.....	87

Figura 4.23	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da antena do tipo <i>patch</i> quadrada	87
Figura 4.24	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da antena <i>patch</i> flor de tulipa	88
Figura 4.25	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido das antenas do tipo <i>patch</i> flor de tulipa e quadrada	88
Figura 4.26	Impedâncias sobre as cartas de Smith das antenas do tipo <i>patch</i> : a) flor de tulipa; b) quadrada.....	89
Figura 4.27	Diagrama de irradiação 3-D da antena <i>patch</i> quadrada em 2,6 GHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H.....	90
Figura 4.28	Diagrama de irradiação 3-D da antena <i>patch</i> flor de tulipa em 2,56 GHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H.....	91
Figura 4.29	PMA: a) geometria circular e b) protótipo; c) geometria flor de jasmim (8 mm) e d) protótipo; e) geometria flor de jasmim (2 mm); f) protótipo.....	93
Figura 4.30	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA circular.....	94
Figura 4.31	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA flor de jasmim (8 mm)	94
Figura 4.32	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA flor de jasmim (2 mm)	95
Figura 4.33	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido da PMA circular, flor de jasmim (8 mm) e flor de jasmim (2 mm)	95
Figura 4.34	Comparação do parâmetro VSWR medido da PMA circular, flor de jasmim (8 mm) e flor de jasmim (2 mm)	96
Figura 4.35	Impedâncias sobre as cartas de Smith da PMA: a) circular; flor de jasmim (8 mm); c) flor de jasmim (2 mm)	96
Figura 4.36	Diagrama de irradiação da PMA circular em 7,13 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante; c) 2-D plano-E e plano-H.....	97
Figura 4.37	Diagrama de irradiação da PMA flor de jasmim (8 mm) em 7,60 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante; c) 2-D plano-E e plano-H.....	98
Figura 4.38	Diagrama de irradiação da PMA flor de jasmim (2 mm) em 9,25 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante; c) 2-D plano-E e plano-H.....	99
Figura 4.39	Geometria da PMA flor de tulipa: a) dimensões, b) protótipo.....	100
Figura 4.40	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA flor de tulipa...	101

Figura 4.41	Impedância sobre a carta de Smith da PMA flor de tulipa	102
Figura 4.42	Diagrama de irradiação 3-D da PMA flor de tulipa em 5,7 GHz: a) ganho; b) campo distante.....	102
Figura 4.43	Diagrama de irradiação 3-D da PMA flor de tulipa em 8,6 GHz: a) ganho; b) campo distante.....	103
Figura 4.44	Geometria da PMA folhas de oliveira: a) dimensões; b) protótipo.....	104
Figura 4.45	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA folhas de oliveira.....	104
Figura 4.46	Comparação do parâmetro VSWR medido e simulado da PMA folhas de oliveira.....	105
Figura 4.47	Impedância sobre a carta de Smith da PMA folhas de oliveira	106
Figura 4.48	Diagrama de irradiação 3-D da PMA folhas de oliveira em 5,19 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante.....	106
Figura 4.49	Diagrama de irradiação 3-D da PMA folhas de oliveira em 8,88 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante.....	106
Figura 4.50	Geometria da PMA pétala de orquídea: a) dimensões; b) protótipo.....	107
Figura 4.51	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA pétala de orquídea.....	108
Figura 4.52	Comparação do parâmetro VSWR medido e simulado da PMA pétala de orquídea.....	109
Figura 4.53	Carta de Smith da PMA pétala de orquídea.....	109
Figura 4.54	Diagrama de irradiação 3-D da antena pétala de orquídea em 3,45 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante.....	110
Figura 4.55	Diagrama de irradiação 3-D da antena pétala de orquídea em 9,21 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante.....	110
Figura 4.56	PMA têxtil ginkgo biloba: a) folha da planta ginkgo biloba; b) geometria proposta, protótipo c) vista superior e d) vista inferior.....	113
Figura 4.57	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da PMA têxtil ginkgo biloba.....	113
Figura 4.58	Impedância sobre a carta de Smith da PMA têxtil ginkgo biloba	114
Figura 4.59	Diagrama de irradiação da PMA têxtil ginkgo biloba em 2,12 GHz: a) ganho, 3-D; b) campo distante; c) 2-D, plano-E e plano-H.....	115

Figura 4.60	Antena do tipo <i>patch</i> têxtil árvore fractal: a) árvore fractal, sistema-L; b) geometria proposta; protótipo c) vista superior e d) vista inferior.....	116
Figura 4.61	Comparação do parâmetro $ S_{11} $ medido e simulado da antena do tipo <i>patch</i> têxtil árvore fractal	117
Figura 4.62	Impedância sobre a carta de Smith da antena do tipo <i>patch</i> têxtil árvore fractal	118
Figura 4.63	Diagrama de irradiação da antena do tipo <i>patch</i> têxtil árvore fractal em 7,62 GHz: a) ganho, 3-D; b) campo distante; c) 2-D, plano-E e plano-H.....	119

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Subfaixas da tecnologia 4G (2,5 GHz a 2,69 GHz)	24
TABELA 2.2	Parâmetros do sistema-LTE.....	25
TABELA 2.3	DEP de alguns sistemas sem fio.....	27
TABELA 2.4	Taxa de transmissão de <i>bits</i> de alguns padrões de comunicação.....	27
TABELA 3.1	Aplicações médicas e não médicas de antenas para uso junto ao corpo.....	59
TABELA 4.1	Dimensões (mm) da PMA quadrada para 700 MHz.....	65
TABELA 4.2	Dimensões (mm) da antena cana-de-açúcar de 4 folhas para 700 MHz.....	66
TABELA 4.3	Valores medidos de largura de banda e frequência de ressonância da antena cana-de-açúcar com refletor de 4 folhas e PMA quadrada com refletor.....	69
TABELA 4.4	Dimensões (mm) da antena cana-de-açúcar de 3 folhas para 700 MHz.....	74
TABELA 4.5	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da antena cana-de-açúcar de 3 folhas com refletor.....	75
TABELA 4.6	Dimensões (mm) da PMA quadrada para 2,5 GHz	78
TABELA 4.7	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da PMA quadrada com refletor.....	78
TABELA 4.8	Dimensões (mm) da antena folha elíptica para 2,5 GHz	80
TABELA 4.9	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da antena folha elíptica com refletor e PMA quadrada com refletor.....	82
TABELA 4.10	Dimensões (mm) da PMA circular.....	92
TABELA 4.11	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da PMA: circular, flor de jasmim (8 mm) e (2 mm)	95
TABELA 4.12	Dimensões (mm) da PMA flor de tulipa.....	100
TABELA 4.13	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da PMA flor de tulipa.....	101
TABELA 4.14	Dimensões (mm) da PMA folhas de oliveira.....	103

TABELA 4.15	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da PMA folhas de oliveira.....	105
TABELA 4.16	Dimensões (mm) da PMA pétala de orquídea	107
TABELA 4.17	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da PMA pétala de orquídea.....	108
TABELA 4.18	Dimensões (mm) da PMA têxtil ginkgo biloba	112
TABELA 4.19	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da PMA têxtil ginkgo biloba.....	114
TABELA 4.20	Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da antena do tipo <i>patch</i> têxtil árvore fractal.....	117

LISTA DE SIGLAS

2G	Sistema de comunicação móvel de segunda geração
3G	Sistema de comunicação móvel de terceira geração
3GP	<i>Third-Generation Partnership Project</i> (Projeto terceira geração)
4G	Sistema de comunicação móvel de quarta geração
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BAN	<i>Body Area Network</i> (Rede próxima ao corpo)
BW	<i>Bandwidth</i> – largura de banda
DEP	Densidade espectral de potência
EIRP	<i>Effective isotropically radiated Power</i> (Potência isotrópica efetivamente irradiada)
ERB	Estação rádio base
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> (Comissão federal de comunicação)
FR4	<i>Flame Resistant 4</i> (Resistente ao Fogo)
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> (Sistema de posicionamento global móvel)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão internacional de eletrotécnica)
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica)
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
ISSO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização internacional de padronização)
LTE	<i>Long Term Evolution</i> (Evolução de longo prazo)
MAC	<i>Media Access Control</i> (Mídia de acesso de controle)
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i> (Instituto de tecnologia de Massachusetts)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração nacional do espaço e da aeronáutica)
PMA	<i>Printed Monopole Antenna</i> (Antena monopolo impressa)
PPM	<i>Pulse Position Modulation</i> (Modulação por posição de pulso)
PHY	<i>Physical Layer</i> (Camada física)

RF	Radiofrequência
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i> (Identificação por radiofrequência)
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> (Frequência ultra alta)
UWB	<i>Ultra-wideband</i> (Banda ultralarga)
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i> (Tensão de onda estacionária)
WBAN	<i>Wireless Body Area Network</i> (Rede sem fio próxima ao corpo)
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> (Rede sem fio local)
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> (Rede sem fio pessoal)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Perdas
B_f	Largura de banda fracionária
C	Capacidade máxima de canal
E	Conjunto do espaço euclidiano
e	Distorção do pulso UWB
f_1	Frequência inferior
f_0	Frequência central
f_2	Frequência superior
f_r	Frequência de ressonância
$G(t)$	Função gaussiana
G_{Tx}	Ganho da antena transmissora
L	Comprimento do <i>patch</i>
L_{LT}	Comprimento da linha de transmissão
L_{PT}	Comprimento do plano de terra
L_s	Comprimento do <i>slit</i>
N	Número de iterações
O	Coordenada polar
p	Perímetro
P	Potência transmitida
\mathcal{P}	Ponto em coordenadas polares
P_{Tx}	Potência de saída do transmissor
r	Coordenadas polar (raio)
R	Raio do monopolo circular

S/N	Relação sinal/ruído
t	Tempo
W	Largura do <i>patch</i>
W_{LT}	Largura da linha de transmissão
W_{PT}	Largura do plano de terra
W_S	Largura do <i>slit</i>
$y_{g1}(t)$	Primeira derivada do pulso Gaussiano
$y_{g2}(t)$	Segunda derivada do pulso Gaussiano
$y_{g3}(t)$	Terceira derivada do pulso Gaussiano
$y_{g5}(t)$	Quinta derivada do pulso Gaussiano
y_{rec}	Sinal recebido no tempo
y_{trans}	Sinal transmitido no tempo
Y_{rec}	Sinal recebido em frequência
Y_{trans}	Sinal transmitido em frequência
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
ϵ_{ref}	Permissividade elétrica relativa efetiva
Φ	Número de ouro
σ^2	Variância
$ S_{11} $	Módulo do coeficiente de reflexão
$ S_{21} $	Módulo do coeficiente de transmissão
θ	Coordenadas polares (ângulo)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	TECNOLOGIAS SEM FIO UWB E 4G	23
2.1	Tecnologia 4G no Brasil	23
2.2	Tecnologia UWB	25
2.2.1	Pulsos e Espectro UWB	27
2.3	Requisitos de Projeto para Antenas UWB	32
2.4	Aplicações da Tecnologia UWB	33
2.4.1	Comunicações e Sensores	33
2.4.2	Localização e Rastreamento	34
3	ANTENAS BIOINSPIRADAS	35
3.1	Antenas Abordadas–Características e Síntese Aproximada	35
3.1.1	Antenas do Tipo Monopolo Impresso	35
3.1.2	Antenas do Tipo <i>Patch</i>	38
3.2	Antenas Bioinspiradas–Estado da Arte	40
3.3	Geometrias Bioinspiradas e Modelos Matemáticos	46
3.3.1	Formas e Geometria das Plantas (Classificação de Folhas e Flores)	46
3.3.2	A Sequência de Fibonacci e o Número de Ouro	49
3.3.3	Fractais–Sistema-L	52
3.3.4	Funções Polares–Superfórmula de Gielis	54
3.4	Aplicações de Antenas Bioinspiradas	57
4	ANTENAS BIOINSPIRADAS PARA SISTEMAS 4G E UWB	61
4.1	Geometrias Utilizadas	61
4.2	Antenas para Sistemas 4G	64

4.2.1	Antenas com Refletor para Faixa de 700 MHz.....	64
4.2.1.1	Antena Monopolo Impressa Bioinspirada na Planta de Cana-de- Açúcar de 4 Folhas	65
4.2.1.1	Antena Monopolo Impressa Bioinspirada na Planta de Cana-de- açúcar de 3 folhas	73
4.2.2	Antenas com Refletor para Faixa de 2,5 GHz	78
4.2.2.1	Antena de Folha Elíptica com Refletor para Faixa de 2,5 GHz.....	79
4.2.2.2	Antenas do Tipo <i>Patch</i> Quadrada e Flor de Tulipa para 2,5 GHz	86
4.3	Antenas para Sistemas UWB	92
4.3.1	Antena Bioinspirada em uma Flor de Jasmim	92
4.3.2	Antena Bioinspirada na Flor de Tulipa	100
4.3.3	Antena Bioinspirada nas Folhas de Oliveira	103
4.3.4	Antena Bioinspirada em uma Pétala de Orquídea	107
4.4	Antenas Têxteis Bioinspiradas.....	111
4.4.1	Antena Têxtil Bioinspirada na Folha do Gynkgo Biloba	112
4.4.2	Antena Têxtil do Tipo <i>Patch</i> Bioinspirada em uma Árvore Fractal	116
5	CONCLUSÕES	120
	APÊNDICE I	133

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as soluções biologicamente inspiradas (bioinspiradas) têm despertado o interesse de engenheiros e pesquisadores com aplicações em diversas áreas da ciência e tecnologia. Com inspiração na natureza, na observação do comportamento e funções realizadas pelos seres vivos (que usam os recursos naturais de forma sustentável e otimizada ao longo de milhões de anos de evolução), diversas instituições de renome mundial têm financiado centros de pesquisa para o desenvolvimento da engenharia bioinspirada.

Instituições como a NASA, o Colégio Imperial de Londres, o MIT, a USP de São Carlos, e o Instituto Wyss da Universidade de Harvard têm patrocinado e criado laboratórios com o objetivo de buscar compreender as formas, funções e comportamentos dos seres vivos, suas adaptações aos habitats de maneira sustentável em relação ao uso dos recursos naturais e ótima do ponto de vista energético. O objetivo é a aplicação dos modelos derivados da observação do mundo natural para a resolução de problemas de engenharia com o uso de tecnologias bioinspiradas.

A engenharia bioinspirada é um campo de pesquisa interdisciplinar, que inclui áreas específicas, tais como: biologia, engenharia, ciências físicas, biomimética, biomímica, biônica, entre outras. A **biomimética** abrange o estudo e imitação dos métodos, mecanismos e processos naturais [1]; a **biônica** usa protótipos biológicos para o projeto de sistemas sintéticos criados pelo homem, principalmente para aplicações biomédicas [2]; a **biomímica** se inspira nos modelos observados na natureza para resolver problemas humanos de forma sustentável [3].

A adequação de modelos bioinspirados para a solução de problemas de engenharia é feita por meio de *hardware* e/ou *software*. Algumas áreas de aplicação da engenharia bioinspirada incluem [4]: inteligência computacional, mecanismos biologicamente inspirados, estruturas e ferramentas biologicamente inspiradas, materiais biológicos, biossensores, etc. Recentemente, os conceitos da engenharia bioinspirada também têm sido aplicados para a solução de problemas encontrados na área de eletromagnetismo aplicado.

Para que os modelos biológicos sejam utilizados na área de engenharia, faz-se necessário um processo de adequação. Neste caso, três passos são necessários [5]: **identificação de analogia** (estruturas e métodos que parecem ser semelhantes); **entendimento** (detalhamento realista e modelagem do comportamento biológico);

engenharia (modelagem simplificada e ajuste para aplicação técnica).

A proposta desta pesquisa é verificar as aplicações da engenharia bioinspirada na área de eletromagnetismo aplicado, em particular, para o desenvolvimento de antenas para sistemas de comunicação sem fio.

Os aparelhos de comunicação modernos são cada vez menores e dispõem de diversas aplicações sem fio, operando em faixas de frequência diferentes. Na maioria dos aparelhos portáteis, as antenas estão embutidas e as restrições quanto ao seu tamanho, localização e desempenho impõem desafios aos engenheiros projetistas. Nestes aparelhos, diversos tipos de redes sem fio são utilizados, das quais se destacam o Wi-Fi, o WiMAX, e as tecnologias de redes domésticas sem fio (WPAN), tais como o *Bluetooth*, *Z-Wave*, *ZigBee*, *Ultra-Wideband* (UWB) para operação entre dispositivos próximos [6-7], bem como a de redes próximas ao corpo (WBAN), com aplicações médicas e não médicas [8-9].

As antenas para os dispositivos de comunicação modernos tendem a ser mais compactas, com características multibanda, ou de banda larga, exigindo soluções de baixo custo, mais eficientes e que se adaptem às necessidades de um dado aparelho ou sistema de comunicação sem fio. Estas soluções devem ser otimizadas, adaptáveis aos diversos sistemas utilizados na transmissão e/ou recepção de vários tipos de sistemas, desde a detecção de fenômenos naturais, como abalos sísmicos e mudanças climáticas, comunicação terrestre, via satélite, subaquática, controle de robôs, chegando até as aplicações médicas [10-11].

Por sua vez, a série de Fibonacci, que é a sequência da soma sucessiva dos números naturais com seus antecessores [12], pode ser encontrada em diversas plantas, como a rosa, o lírio e a açucena. A partir da sequência de Fibonacci é possível encontrar o número de ouro ou razão áurea, que vale aproximadamente 1,618. Este número é observado em partes do corpo humano, plantas, construções, obras de arte, sempre como uma indicação de harmonia e perfeição [13]. Em [14] foi desenvolvido um arranjo de antenas tipo *patch* para faixa de frequência de 2,45 GHz bioinspirado na sequência de Fibonacci observada nas folhas de uma árvore, apresentando ganho de 15,8 dBi.

Nas aplicações em antenas, as geometrias encontradas nas plantas oferecem uma fonte de pesquisa promissora, pois utilizam a faixa de frequência da luz visível para transformar a energia luminosa em energia química a partir do cloroplasto presente em suas folhas e caules, atuando assim como uma antena receptora de ondas eletromagnéticas, com comprimentos entre 400 – 700nm [15-16]. Os organismos

fitossintéticos apresentam uma variedade de formas de captura e de conversão de energia luminosa em energia química, dividindo-se duas partes básicas: o complexo de captação de luz, ou seja, as antenas; e os centros de reação [17]. Além disto, as estruturas geométricas das plantas são otimizadas por milhares de gerações para realizar a máxima captação de energia luminosa, com a menor dimensão possível. Elas são análogas aos refletores parabólicos em cujo foco são coletadas as ondas eletromagnética. A geometria das folhas tem sido utilizada para o desenvolvimento de dispositivos eletromagnéticos como conversor de energia solar [17], antenas [18], entre outros.

Nesta Dissertação, procura-se analisar as geometrias bioinspiradas em plantas com aplicações voltadas para os sistemas de comunicação 4G e UWB, apresentando métodos de aproximação de valores de projeto de antenas tipo monopolo impresso (*Printed Monopole Antenna* – PMA), simulação das PMA nos *softwares* comerciais Ansoft DesingerTM e HFSS e uma nova técnica de fabricação de antenas têxteis em *jeans* com uso de cobre laminado para cabo flexível. No Capítulo 2, são apresentados os principais aspectos e conceitos relacionados às tecnologias UWB e 4G utilizadas no Brasil. No Capítulo 3 são abordadas as antenas monopolo impressas e as bioinspiradas bem como algumas aplicações de antenas. A partir de uma revisão na literatura especializada, procura-se descrever o estado da arte sobre os tipos e aplicações destas antenas. No Capítulo 4, os projetos das antenas propostas são descritos e apresentados os resultados numéricos e experimentais. No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais.

2. TECNOLOGIAS UWB E 4G

As tecnologias sem fio têm se popularizado com o uso de dispositivos de comunicação, equipamentos biomédicos, de rastreamento e localização, entre outros. Dentre elas, o sistema UWB é o principal candidato para ser utilizado em controle de periféricos, posicionamento, localização e radar [8]. Por sua vez o sistema de comunicações 4G tem atraído a atenção da indústria de telecomunicações pela possibilidade de transmissão de diversas mídias e maior velocidade conexão.

Neste capítulo são apresentados os conceitos da comunicação de quarta geração (4G) conforme as Resoluções da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [21-22], bem como as principais características da tecnologia UWB e suas aplicações.

2.1 Tecnologia 4G no Brasil

O padrão de sistema de comunicação móvel de quarta geração (4G), licitado para ser utilizado no Brasil é o *Long Term Evolution* (LTE) *Release* 10, que também é utilizado em países como Japão e Estados Unidos e opera em duas faixas de frequências:

A faixa de 700 MHz, que compreende as frequências de 698 ~ 806 MHz, com 108 MHz de largura de banda dividida em duas bandas de 45 MHz. Cada canal utiliza um par de frequências: uma para a transmissão do móvel para a estação base (frequência da banda mais baixa) e outra para a transmissão da estação base para o móvel (frequência da banda mais alta). O sistema dispõe de uma faixa central de 10 MHz separando as duas bandas anteriores e duas bandas de guarda, uma de 5 MHz no início da banda inferior e outra de 3 MHz no final da banda superior [21];

A faixa de 2,5 GHz, que compreende as frequências de 2,5 a 2,69 GHz, com 169 MHz de largura de banda [22]. A Tabela 2.1 apresenta as subfaixas da faixa de 2,5 GHz.

Tabela 2.1 – Subfaixas da tecnologia 4G (2,5 ~ 2,69 GHz)

<i>Subfaixas</i>	<i>Largura de banda (MHz)</i>	<i>Estação Móvel (GHz)</i>	<i>ERB (GHz)</i>
P	10 + 10 = 20	2,5 a 2,51	2,62 a 2,63
W	20 + 20 = 40	2,51 a 2,53	2,63 a 2,65
V	20 + 20 = 40	2,53 a 2,55	2,65 a 2,67
X	20 + 20 = 40	2,55 a 2,7	2,67 a 2,69
T	15	2,7 a 2,585	
U	35	2,62 a 2,85	

O padrão LTE foi desenvolvido pelo 3GP (*Third-Generation Partnership Project*), que é a empresa que abrange o padrão de comunicações móveis do *Global System for Mobile Communications* (GSM), conhecida como o sistema de comunicação móvel de segunda geração (2G) e dos sistemas de terceira geração (3G) [23-24]. Os parâmetros do sistema-LTE são apresentados na Tabela 2.2 [24-26].

Até o presente momento, as faixas indicadas pela Resolução 625 são utilizadas para transmissão do sinal de TV aberta (canais de 51 a 69). A própria Resolução, baseada no art. 10 do Decreto nº 5.820, de 29 de junho de 2006, prevê o fim do uso desta faixa para 2016. Até lá as operadoras e fabricantes de TVs devem se adaptar às novas regras. Em setembro de 2014 foi realizado o primeiro leilão para os três primeiros lotes nacionais de Internet 4G na faixa de 700 MHz, com arrecadação de 5,821 bilhões de reais. Ainda serão realizados outros leilões para mais três lotes em datas ainda a serem organizadas pela Agência Nacional de Telecomunicações. Por isso, torna-se necessário o desenvolvimento de equipamentos e antenas que venham trabalhar de maneira ótima, com dimensões reduzidas e baixo custo.

O uso da faixa de frequências de 700 MHz proporciona vantagem e pelo menos uma limitação. Como vantagens têm-se: uma maior penetração que a faixa utilizada para 2,5 GHz, faixas de frequências mais baixas conseguem melhor alcance em ambientes fechados, com uma melhor propagação do sinal e a redução do número de estações rádio base (ERB); o ingresso no Brasil de muitos dispositivos fabricados para esta faixa de frequências, tais como *smartphones* e *tablets*, sem a necessidade de um modelo específico para ser comercializado no país.

Tabela 2.2 – Parâmetros do sistema-LTE

Requisitos do LTE	
<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>
Taxa de <i>downlink</i>	100 Mbps
Taxa de <i>uplink</i>	50 Mbps
Largura de banda	1.4 MHz a 20 MHz.
Protocolos de operação	FDD, TDD e IP
Protocolo de voz	VOIP
Frequências	700 MHz, 2,5 GHz
Modulação adaptativa	QPSK, 16 QAM e 64 QAM
Múltiplas antenas	SIMO e MIMO 2x2 e 4x4
Eficiência espectral	2 ~ 4 vezes maior que a tecnologia precedente.
Latência	< 10ms
Mobilidade	até 350 Km/h

Talvez a limitação mais significativa do uso da faixa de frequências de 700 MHz é a redução do número de usuários na rede, não sendo indicada para locais com alta concentração de pessoas, podendo ser utilizada nas cidades de menor porte.

2.2 Tecnologia UWB

A tecnologia UWB foi estabelecida por Sommerfeld há mais de um século (1901), quando ele observou a difração de um pulso no domínio do tempo por um condutor perfeito [27]. As primeiras pesquisas e patentes registradas para sistemas UWB surgiram na década de 1940. Todavia, um impulso significativo nas suas aplicações foi dado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América [28].

Em relação às tecnologias de comunicação de banda estreita, os sistemas UWB apresentam as seguintes vantagens [29]:

- Maior capacidade do canal e, por conseguinte, maior taxa de transmissão de dados. Este fato pode ser verificado diretamente aplicando-se o teorema de Hartley-Shannon, que é expresso em (2.1). A capacidade máxima de canal, C (bits/s), aumenta com o aumento da relação sinal-ruído (S/N). Com uma relação sinal-ruído pequena e uma banda ultralarga, há um aumento da capacidade máxima do canal, permitindo inclusive o uso de sinais com potência reduzida [30];

$$C = BW \cdot \log_2(1 + S/N) \quad (2.1)$$

– Baixa densidade espectral de potência (DEP), dada a largura de banda do sistema e a potência reduzida dos pulsos UWB. Conforme (2.2), define-se a densidade espectral de potência como a relação entre a potência transmitida (P) e a largura de banda (BW – *bandwidth*).

$$DEP = \frac{P}{BW} \text{ (W/MHz)} \quad (2.2)$$

– O compartilhamento do espectro de frequências com outros sistemas sem fio, dada à reduzida DEP dos sinais de um sistema UWB;

– A baixa interferência eletromagnética decorrente do uso da banda larga. Devido à pequena densidade espectral de potência, os sinais UWB causam pouca interferência em sistemas de rádio de banda estreita, o que permite o uso da tecnologia mesmo sobre faixas de frequências existentes. A Figura 2.1 apresenta diferentes tecnologias e suas frequências de operação. Como o espectro UWB possui uma DEP menor, as tecnologias podem compartilhar a mesma faixa de frequências sem que haja interferência [31-32].

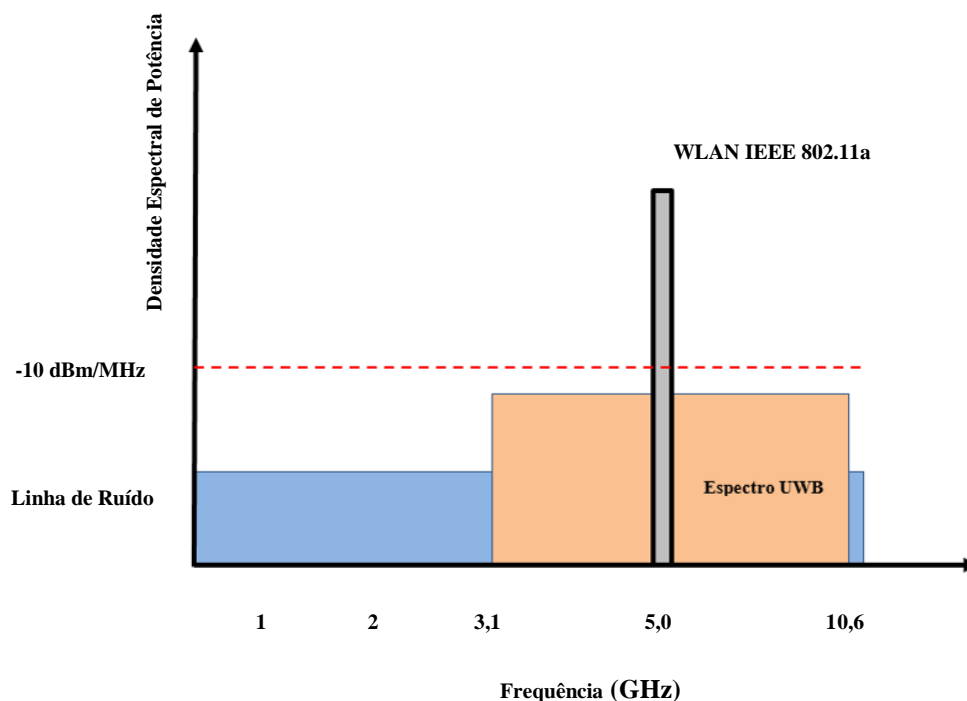


Figura 2.1 - Diferentes tecnologias e suas frequências de operação, [32].

Na Tabela 2.3 é listada a DEP de alguns sistemas sem fio, com a potência de

transmissão (P) e a largura de banda [29].

Tabela 2.3 – DEP de alguns sistemas sem fio.

<i>Sistema</i>	<i>P</i>	<i>BW</i>	DEP (W/MHz)
Rádio	50 kW	75 kHz	666,6000
Televisão	100 kW	6 MHz	16,7000
IEEE 802.11 ^a	1 W	20 MHz	0,0500
UWB	1 mW	7,5 GHz	0,0013

- A máxima EIRP (*Effective Isotropically Radiated Power*) de -41,3 dBm;
- A robustez contra detecção e interceptação do sinal, pela banda larga e pequena DEP, o que permite a detecção dos sinais mesmo em ambientes com elevada interferência eletromagnética;
- O alto desempenho em canais multi-percurso;
- Penetração em diferentes tipos de materiais, como portas e paredes;
- O uso de transceptores simples, de baixo custo e baixo consumo de energia;
- A taxa de transmissão de até 1024 Mbit/s. A Tabela 2.4 apresenta as taxas de *bits* de alguns padrões de comunicação cabeados e sem fio [29];
- Baixa complexidade e custo de equipamentos na execução do projeto [33].

Tabela 2.4 – Taxa de *bits* de alguns padrões de comunicação.

<i>Padrões</i>	<i>Taxa (Mbits/s)</i>
UWB, USB 2.0	480
<i>Fast Ethernet</i>	90
IEEE 802.11 ^a	54
IEEE 802.11g	20
IEEE 802.11b	11
<i>Ethernet</i>	10
<i>Bluetooth</i>	1

2.2.1 O Pulso e Espectro UWB

No sistema UWB, pulsos retangulares são gerados por chaveamento e apresentam duração da ordem de nanosegundos ou picosegundos. As antenas

transmissora e receptora utilizadas no sistema funcionam como filtros, que alteram a forma do pulso, fazendo com que o pulso recebido tenha a forma aproximada de uma função gaussiana dada por (2.3), com média nula e variância σ^2 . Um pulso gaussiano pode ser expresso por (2.4), [30].

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

$$y_{g_1}(t) = K_1 e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (2.4)$$

em que, $-\infty < t < \infty$, τ e K_1 são constantes relacionadas à variância. Outras formas de onda podem ser geradas com a passagem do pulso gaussiano por um filtro passa alta. Por exemplo, o pulso chamado de monociclo é gerado pela primeira derivada do pulso gaussiano (2.5).

$$y_{g_2}(t) = K_2 \frac{-2t}{\tau^2} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (2.5)$$

O monociclo tem apenas um único cruzamento por zero. A aplicação de outras derivadas pode produzir cruzamentos por zero adicionais, com um zero adicional para cada derivada. Se o valor de τ for fixo, com uma derivada adicional, a largura de banda fracionária diminui, enquanto a frequência central aumenta. A aplicação da segunda derivada em (2.4) é conhecido como pulso duplo gaussiano, como definido em (2.6).

$$y_{g_3}(t) = K_3 \frac{-2t}{\tau^2} \left(1 - \frac{2t^2}{\tau^2}\right) e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (2.6)$$

Algumas instituições têm proposto padrões para o uso da tecnologia UWB, entre elas pode-se citar: O *Institute of Electric and Electronic Engineers* (IEEE), que propôs dois protocolos para transmissão de dados, o IEEE 802.15.3a, para altas taxas de transmissão de dados, e o IEEE 802.15.4a, para baixas taxas de dados [29]. O *International Organization for Standardization* (ISO) e o *International Electrotechnical Commission* (IEC) lançaram o ISO/IEC 26908:2009, que normaliza o uso da *Physical Layer* (PHY) e da camada *Media Access Control* (MAC), que são as camadas de transceptores sem fio para altas taxas da tecnologia UWB [35].

Na região, que compreendem a China, o Japão, a Coreia e Singapura, a

instituição responsável pela regulação e coordenação do uso do espectro eletromagnético na faixa de UWB é o *Asia-Pacific Telecommunity* que designa o espectro UWB desta região em duas bandas: a banda baixa (3,4 ~ 4,8 GHz); e a banda alta (7,25 ~ 10,25 GHz), utilizada apenas para dispositivos *indoor*. O limite de EIRP é de -41,3 dBm, com largura de banda mínima de 450 MHz e banda fracionária de 20% [36].

Um padrão bastante referenciado pela comunidade acadêmica para a tecnologia UWB é o FCC (*Federal Communications Commission*) [16], [29], [33-34]. Em 2002, o FCC apresentou seu último relatório com os parâmetros requeridos para a tecnologia UWB. Dentre estes parâmetros, destacam-se: largura de banda de 7,5 GHz, com máscara espectral entre 3,1 ~ 10,6 GHz; largura de banda fracionária (B_f) superior a 20% da frequência central (f_0) [31]; EIRP de -41,3 dBm. Como uma faixa ampla do espectro eletromagnético alocada aos sistemas UWB, este pode interferir no funcionamento de outros sistemas sem fio. A fim de minimizar a interferência entre sistemas sem fio, uma máscara espectral é especificada, limitando-se a potência transmitida em frequências específicas.

A largura de banda (BW) de uma antena é calculada pela diferença entre as frequências superior (f_2) e inferior (f_1), através de (2.7). Por outro lado, o cálculo da largura de banda fracionária (B_f) é feito através de (2.8), [37].

$$BW = f_2 - f_1 \quad (2.7)$$

$$B_f = \frac{BW}{f_0} \cdot 100 = \left[\frac{f_2 - f_1}{(f_1 + f_2)/2} \right] \cdot 100 \quad (2.8)$$

O parâmetro EIRP, potência efetivamente radiada por uma antena isotrópica, serve como referência para o estabelecimento de limites em diversas aplicações. A EIRP pode ser encontrada por (2.9).

$$EIRP = P_{Tx} - A + G_{Tx} \quad (2.9)$$

em que: P_{Tx} é a potência de saída do transmissor; A é a perda decorrente dos cabos, conectores, e outros componentes do sistema de transmissão; G_{Tx} é o ganho da antena

transmissora.

A Figura 2.2 apresenta as formas de onda do pulso gaussiano, do monociclo e do pulso duplo gaussiano, $y_{g1}(t)$, $y_{g2}(t)$ e $y_{g3}(t)$, respectivamente. Os espectros destes pulsos ($Y_{g1}(f)$, $Y_{g2}(f)$ e $Y_{g3}(f)$) são apresentados sobre a máscara espectral FCC na Figura 2.3. Verifica-se que o pulso duplo gaussiano é o que mais se aproxima da máscara espectral FCC, porém é necessário um tratamento do sinal para que satisfaça os parâmetros requeridos [31].

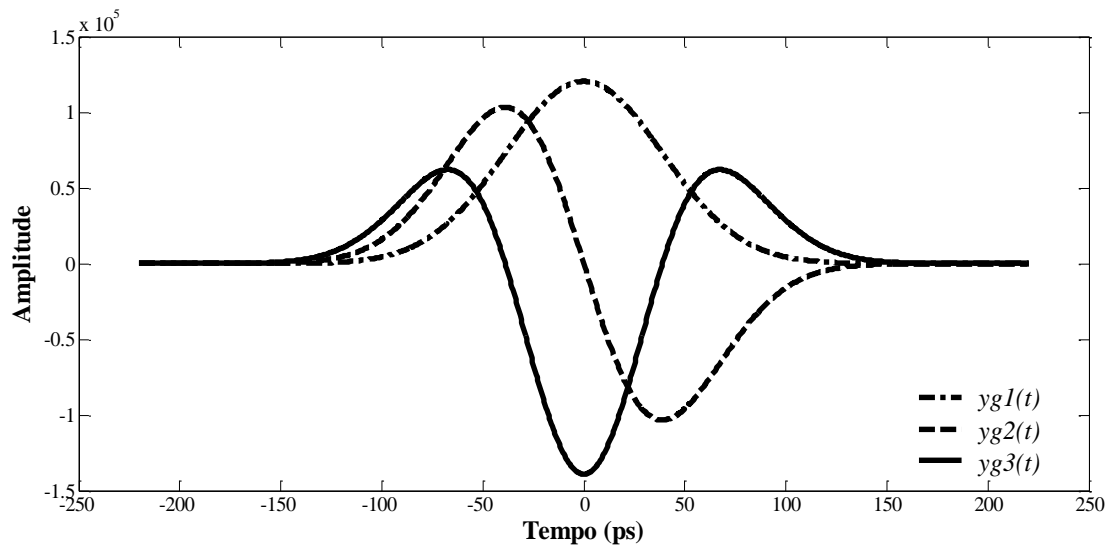


Figura 2.2 – Pulso gaussiano, monociclo e pulso duplo gaussiano.

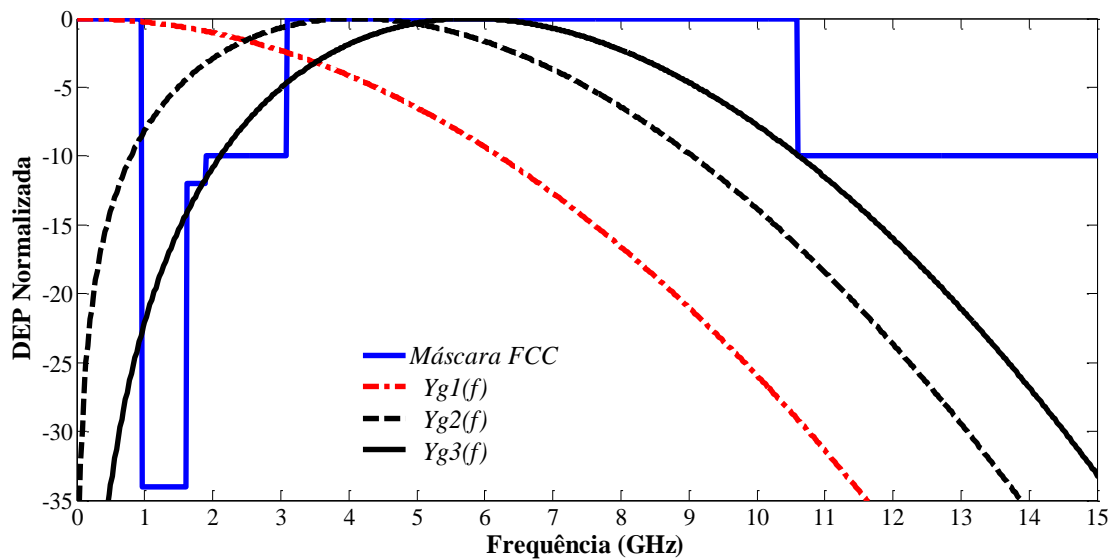


Figura 2.3 – Pulso Gaussiano, monociclo e pulso duplo gaussiano sobre a máscara espectral FCC.

Uma proposta para taxas de transmissão do pulso UWB a uma distância de até

10 m, que satisfaz a máscara espectral do FCC é apresentada em [38], que utiliza a quinta derivada do pulso gaussiano (2.10).

$$y_{g_5}(t) = \frac{d^5 G}{dx^5} \quad (2.10)$$

Na Figura 2.4(a) é apresentada a forma de um pulso UWB correspondente à quinta derivada do pulso gaussiano. Na Figura 2.4(b) é possível observar que o espectro deste pulso satisfaz os requisitos da máscara espectral do FCC [38].

A distorção do pulso UWB pode ser obtida mediante a multiplicação do espectro do pulso transmitido pelo coeficiente de transmissão total medido, que leva em conta as antenas e o meio de propagação, (2.11).

$$Y_{rec}(f) = Y_{trans}(f) \cdot S_{21}(f) \quad (2.11)$$

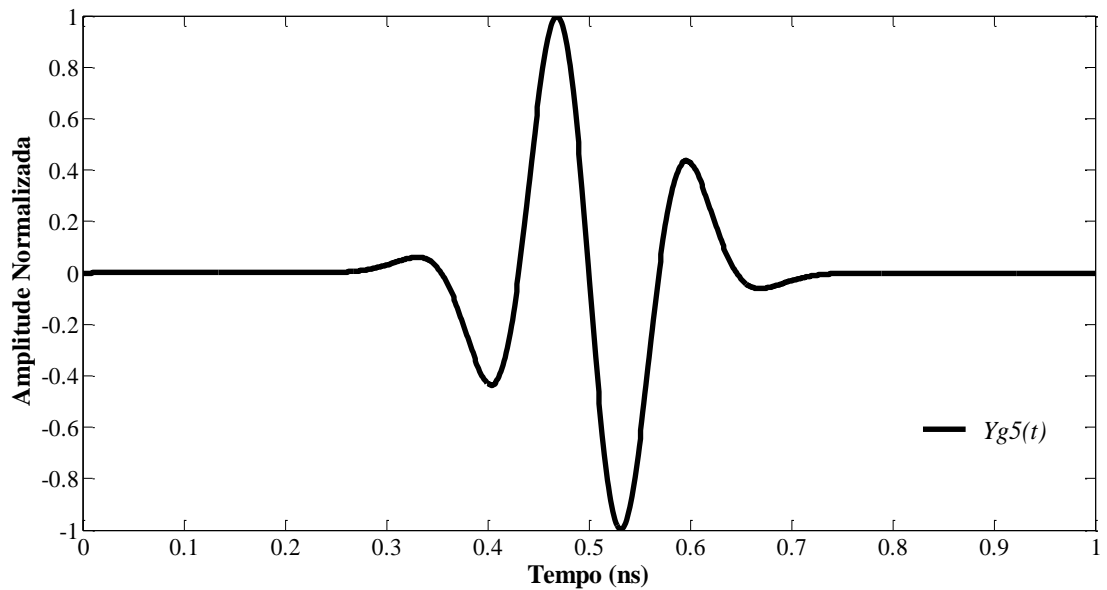
Para representação do pulso no tempo em (2.8) é obtida pela aplicação da transformada discreta inversa de Fourier (DFT Inversa), (2.12).

$$y_{rec}(t) = DFT^{-1}\{Y_{rec}(f)\} \quad (2.12)$$

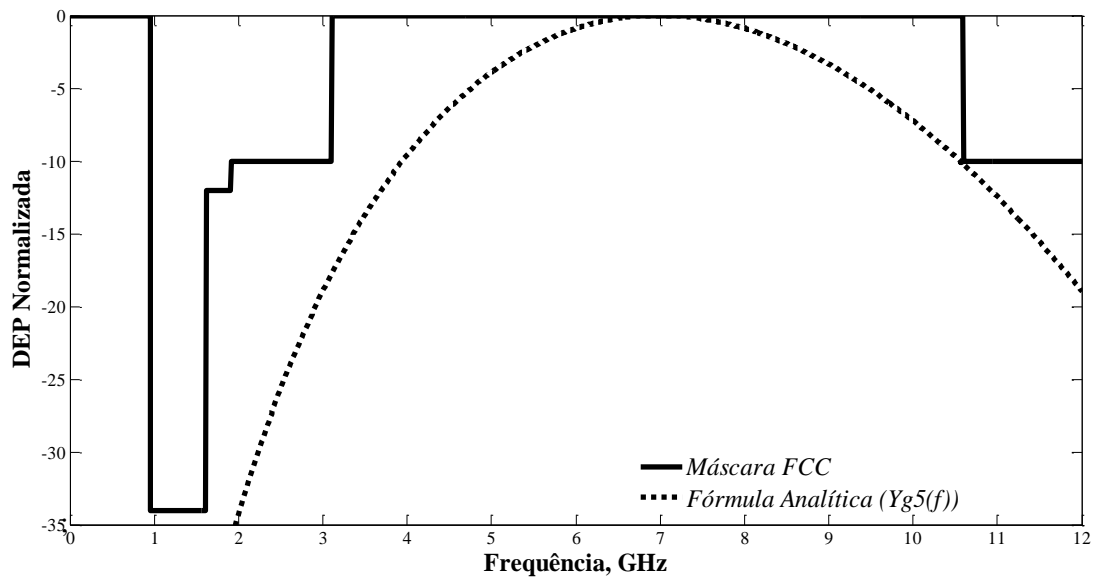
A diferença entre os pulsos transmitido e recebido no tempo indica a distorção do pulso UWB que é dada em (2.13).

$$e(t) = y_{trans}(t) - y_{rec}(t) \quad (2.13)$$

Na seção 4.3.3.1 é descrito o estudo experimental realizado e os resultados obtidos sobre a medição da distorção do pulso UWB utilizando duas antenas projetadas.



(a)



(b)

Figura 2.4 – a) Pulso UWB transmitido no tempo; b) Espectro do pulso UWB transmitido e máscara espectral FCC.

2.3 Requisitos de Projeto para Antenas UWB

Os parâmetros fundamentais de uma antena como largura de banda, diagrama de irradiação, diretividade, eficiência, polarização e ganho também são válidos para as antenas UWB. Entretanto estes parâmetros não são suficientes para aplicações na tecnologia UWB, sendo necessárias características complementares. Assim, as antenas

projetadas para sistemas de comunicação UWB devem apresentar as seguintes características [39-40]:

- **Largura de banda 7,5 GHz**, com frequências de operação de 3,1 GHz a 10,6 GHz;

- **Eficiência de radiação alta**, maior que 70% com $S_{11} < -10$ dB em toda banda de operação;

- **Fase linear entre faixa de frequências e atraso de grupo constante**. O atraso de grupo pode ser entendido como o atraso de tempo que um sinal é submetido ao trafegar pelo sistema, que indica a natureza de dispersão do sistema, como um atraso do tempo em função da frequência do sinal que resulta em pulsos distorcidos [41];

- **Diagrama de irradiação quase omnidirecional**, implica em maximizar a largura de feixe de meia potência e minimizar a diretividade e consequentemente o ganho da antena;

- **Largura de feixe grande $> 60^\circ$** ;

- **Materiais com baixas perdas dielétricas e de conexões**, como a DEP é muito baixa, perdas causadas pelos conectores, condutores e dielétricos devem ser minimizadas a fim de maximizar a eficiência da radiação;

- **Antena compacta**, de preferência plana com espessura muito menor que o comprimento de onda (λ), pois as antenas UWB são geralmente utilizadas em dispositivos com pequenas dimensões.

2.4 Aplicações da Tecnologia UWB

As pesquisas em sistemas UWB tem se expandido para diversos campos. A baixa densidade espectral de potência e extensa largura de banda torna a tecnologia UWB como primeira candidata para diversas aplicações [8]. As principais categorias de aplicações para UWB são apresentadas a seguir.

2.4.1 Comunicações e Sensores

O sistema de comunicação e sensores da tecnologia UWB são geralmente utilizados em três aplicações:

- **Aplicações com baixa taxa de dados** – A baixa densidade espectral de potência da tecnologia UWB, possibilita a conexão sem fio de diversos periféricos

simultaneamente num mesmo ambiente. Esta tecnologia suporta uma variedade de aplicações em WBAN (*Wireless Body Area Network*), promovendo o uso de sensores biomédicos, como eletrocardiógrafos, sensores para controle de oxigênio, eletromiógrafos e outros [8-9], [42].

Aplicações com altas taxas de dados – os serviços de transferência, ou compartilhamento multimídia sem fio para dispositivos próximos podem se beneficiar com a tecnologia UWB. A baixa DEP está relacionada diretamente com o baixo consumo de energia, tornando-se uma excelente candidata para ser usada em dispositivos móveis como PDA e *smartphones*. Transferência de vídeo e áudio de alta resolução de um *smartphone* para uma *smart TV* sem fio é um exemplo de aplicação da tecnologia UWB, tanto para uso doméstico como médico [43].

Aplicações de redes domésticas – a conectividade de equipamentos domésticos sem fio é importante na remoção de cabos e fio, o que pode evitar curtos e descargas elétricas não intencionais. O IEEE 1394 é uma tentativa de integrar entretenimento, dispositivos eletrônicos de consumo e de computação num ambiente familiar o que pode ser utilizado sobre a rede UWB de comunicação [8].

2.4.2 Localização e Rastreamento

O uso de identificação por radiofrequência (*Radio-Frequency Identification* - RFID) na localização e posicionamento de pessoas e objetos é largamente utilizado em hospitais, na localização de pacientes, supermercados, lojas, no posicionamento de mercadorias, ou em um *shopping center* no rastreamento de veículos [44]. A tecnologia UWB utiliza milhões de pulsos por segundo, possuindo a capacidade de penetração elevada numa ampla gama de materiais, tais como paredes, plásticos e madeira. Isto possibilita seu uso em radares, com uma maior precisão na medição e resolução do alcance, reconhecimentos de destino, aumento na probabilidade de detecção de alvos, estejam eles, parados ou em movimento lento, sendo candidata ao uso nas aplicações em micro veículos aéreo [8].

Este capítulo abordou os conceitos das tecnologias 4G e UWB com algumas de suas aplicações. O capítulo seguinte apresenta conceitos, fórmulas de projeto e aplicações de antenas tipo monopolo impresso e *patch* utilizadas neste trabalho, algumas geometrias bioinspiradas e o estado da arte das antenas bioinspiradas.

3 ANTENAS BIOINSPIRADAS

As antenas impressas são estruturas que empregam radiadores em lamina, com espessura muito inferior ao comprimento de onda de operação. As antenas planas ou de superfície curva e suas variações, com pelo menos uma alimentação, são denominadas antenas planares [45]. Nas aplicações para sistemas de comunicação sem fio, entre as antenas planares mais usadas, destaca-se: as antenas do tipo *patch* (impressas em microfita); as antenas de fenda; as antenas com elementos suspensos; L invertido e F invertido; os monopolos e os dipolos. Estas antenas têm como características: estrutura simples, baixo custo, dimensões reduzidas, relativa facilidade de fabricação e banda larga ou estreita dependendo do tipo de antena [11], [45].

3.1 Antenas Abordadas – Características e Síntese Aproximada

Inicialmente, neste capítulo, descrevem-se as principais características das antenas do tipo monopolo impressas e do tipo *patch*. São detalhados os modelos e fórmulas empíricas aproximadas, que foram usadas para a síntese inicial destas antenas. Uma abordagem sobre as geometrias bioinspiradas, o estado da arte de antenas bioinspiradas em plantas e animais e algumas aplicações de antenas bioinspiradas.

3.1.1 Antenas do Tipo Monopolo Impresso

As antenas do tipo monopolo impressas (Figura 3.1) são fabricadas em laminados cobreados, apresentam uma estrutura simples com um elemento radiante e um plano de terra truncado. Algumas características destas antenas são apropriadas para aplicações em sistemas UWB, tais como: banda larga, tamanho reduzido e diagrama de irradiação omnidirecional [18]. Destaca-se a introdução de fendas no plano de terra truncada que altera a impedância de entrada da antena, possibilitando o casamento de impedâncias entre a antena e a linha de alimentação.

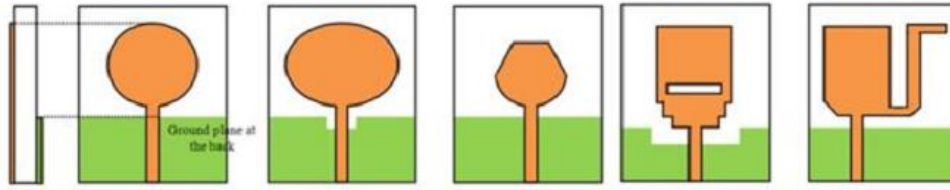


Figura 3.1 – Antena do tipo monopolo impresso, [18].

Como indicado por [18], a distribuição de corrente é mais concentrada nas extremidades do que no centro de um monopolo impresso. Com o aumento do perímetro da antena, p (mm), a corrente de superfície é distribuída ao longo de um percurso maior. Como consequência do aumento do comprimento equivalente de um monopolo, há uma redução de sua frequência de ressonância, f_r , cujo valor aproximado é obtido a partir de (3.1).

$$f_r \text{ (GHz)} = \frac{300}{p\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (3.1)$$

De acordo com [11], a permissividade relativa efetiva do dielétrico (ϵ_{ref}) para linha de transmissão e antenas do tipo *patch*, numa relação de que $W/h < 1$ pode ser calculada conforme (3.2).

$$\epsilon_{ref} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.2)$$

Para uma relação em que $W/h > 1$, tem-se (3.3):

$$\epsilon_{ref} = \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \left[\left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2} + 0,041 \cdot \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right] \quad (3.3)$$

Para os monopolo impressos a equação usada é reduzida para (3.4) [18], [46]:

$$\epsilon_{ref} \approx \frac{(\epsilon_r + 1)}{2} \quad (3.4)$$

Na Figura 3.2 é apresentada o monopolo impresso retangular com suas partes. As dimensões aproximadas para um projeto inicial são indicadas em termos do

comprimento de onda (λ) para primeira ressonância [18]. Em que: W é a largura do *patch*; L é o comprimento do *patch*; W_{PT} é a largura da antena; L_{PT} é o comprimento do plano de terra; W_{LT} é a largura da linha de microfita; g é a distância entre o *patch* e o plano de terra; h é a espessura do dielétrico.

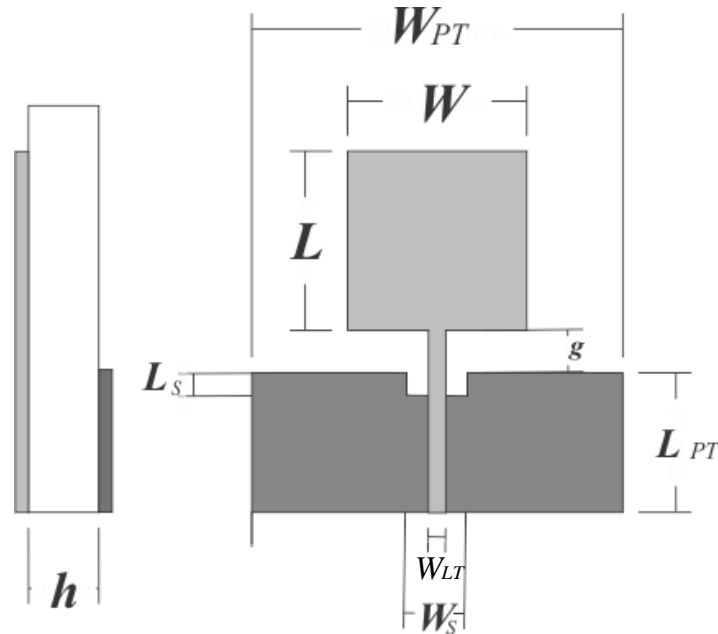


Figura 3.2 – Geometria de uma antena monopolo impresso retangular.

O casamento de impedâncias de um monopolo impresso pode ser realizado por diversas técnicas. A técnica apresentada em [47] propõe uma abertura retangular no plano de terra (*slit*), com comprimento (L_S) e largura (W_S).

Para a geometria circular, uma primeira aproximação para o raio da antena é $\lambda/8$ [18]. Uma melhor aproximação pode ser encontrada em [48-49], cujo raio do círculo é obtido por (3.5), em que o comprimento do monopolo radiante (mm) é função da frequência de ressonância central (f_r) (GHz) e da permissividade relativa do dielétrico (ϵ_r).

$$R = \frac{87,94}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.5)$$

3.1.2 Antenas do Tipo *Patch*

As antenas em microfita consistem em uma fina camada metálica (*patch*) de espessura, muito menor que o comprimento de onda, λ , separada do plano de terra por um dielétrico, com espessura, h , correspondente a uma pequena fração do comprimento de onda (usualmente $0,003\lambda \leq h \leq 0,005\lambda$) [11].

Este tipo de antena apresenta vantagens e limitações para seu uso. Como vantagens podem ser citadas: o baixo custo, a dimensão e peso reduzidos, o alto desempenho, a facilidade de instalação, a facilidade de fabricação, a facilidade de assumir diversas geometrias, a polarização linear ou circular, versáteis em relação à frequência de ressonância, entre outros. Além das características mencionadas, as antenas tipo *patch* apresentam as seguintes limitações: baixa eficiência de irradiação se construídas em substratos com constantes dielétricas elevadas; possibilidade de excitação por ondas de superfície; irradiação em apenas um hemisfério e ganho de aproximadamente 6 dB.

As vantagens tornam este tipo de antenas uma boa candidata para aplicações comerciais e governamentais em: comunicação via satélite; aeronaves; navios; veículos terrestres; radares; antenas inteligentes; aplicações biomédicas, dentre outros.

Os materiais utilizados como substratos geralmente são dielétricos isotrópicos, anisotrópicos e ferrimagnéticos, com permissividade na faixa de $2 \leq \epsilon_r \leq 10$. Projetos com finas espessuras e valores elevados de permissividade dielétrica proporcionam dimensões menores das antenas, no entanto apresentam maiores perdas, pois as linhas de campo se concentram mais no dielétrico que no ar [50].

A forma de alimentação de antenas *patch* pode ser efetuada por: linha de transmissão, cabo coaxial, acoplamento eletromagnético ou acoplamento de fenda. Em todos os casos deve haver o casamento das impedâncias entre as formas de alimentação e a antena.

Na Figura 3.3 está ilustrada uma antena do tipo *patch* retangular com casamento de impedâncias pelo método do transformador de um quarto de onda, com suas dimensões indicadas, em que: W é a largura do *patch*; L é o comprimento do *patch* da antena; W_q é a largura da linha do transformador de $\frac{1}{4}$ de onda; L_q é o comprimento do transformador de $\frac{1}{4}$ de onda; W_{50} é a largura da linha para 50Ω do transformador de $\frac{1}{4}$ de onda; L_{50} é o comprimento da linha para 50Ω do transformador de $\frac{1}{4}$ de onda; h é a espessura do dielétrico e ϵ_r é a permissividade relativa do dielétrico.

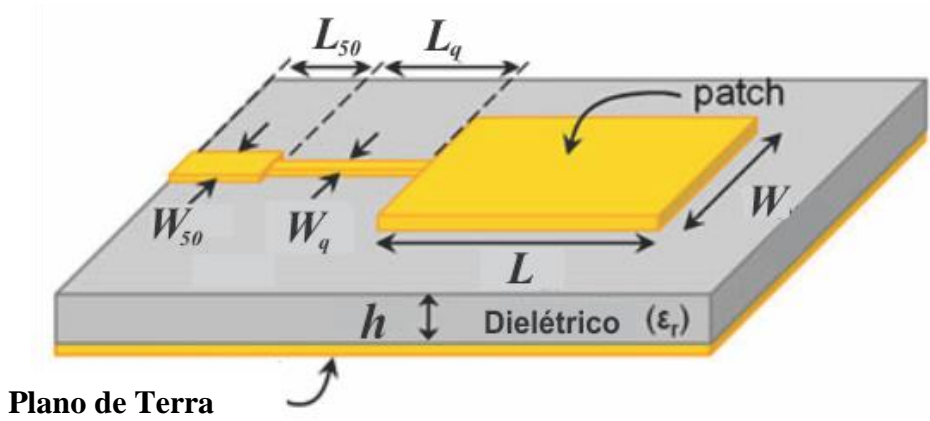


Figura 3.3– Antena do tipo *patch* retangular.

O comprimento L para o *patch* retangular no modo fundamental (TM_{010}) é menor que comprimento de onda no dielétrico, λ_g , apresentado em (3.6):

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (3.6)$$

Em que ϵ_{ref} é a constante dielétrica relativa efetiva, apresentada em (3.2), para uma relação de $W/h > 1$. Ao se aumentar a largura W ou a espessura h , o ϵ_r diminui, ocasionando um maior acoplamento de energia por ondas de superfície [11].

A alimentação via linha transmissão utilizada neste trabalho utiliza um transformador de um $\frac{1}{4}$ de onda para o casamento das impedâncias. Neste para os comprimentos L_q e L_{50} da linha de transmissão têm valores iniciais de $\lambda/4$, sendo modificados com a necessidade do casamento das impedâncias do projeto.

A largura W da linha de transmissão pode ser obtida por (3.7).

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (3.7)$$

O comprimento L pode ser obtido por (3.8)

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{ref}}} - 2\Delta L \quad (3.8)$$

Em que ΔL é dado por (3.9).

$$\Delta L = h \left[\frac{(\epsilon_{ref} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,262 \right)}{(\epsilon_{ref} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \right] \quad (3.9)$$

Para o caso do elemento quadrado os cálculos devem ser realizados substituindo o valor de L pelo de W logo após a primeira iteração, e repetir até que os valores se igualem.

A seguir são apresentados alguns conceitos e geometrias bioinspiradas bem como suas aplicações em antenas.

3.2 Antenas Bioinspiradas – Estado da Arte

As antenas bioinspiradas já encontram aplicações em diversas faixas de frequências. As plantas são organismos fotossintéticos que utilizam sistemas de antenas nos centros de captação da luz, transferindo a energia captada para os centros de reação, local onde ocorre o processo fotoquímico. Esta função é análoga às antenas com refletores parabólicos, em cujo foco são captadas as ondas eletromagnéticas. As geometrias das plantas são estruturas eficientes, otimizadas por milhares de gerações para absorver a maior quantidade energia luminosa em seu ambiente e assim perpetuar sua espécie [17].

Nesta seção faz-se uma descrição do estado da arte das aplicações das antenas bioinspiradas encontradas na literatura especializada, nas quais são usadas várias formas geométricas encontradas em animais e plantas.

Um modelo que utiliza uma árvore como antena foi patenteado na Inglaterra em 1919, em que se propõe o uso de um circuito transmissor ligado diretamente no caule de uma árvore, neste caso a árvore seria utilizada como uma antena [51].

As antenas *bowtie* têm sido utilizadas com geometrias de plantas para a faixa de UWB. Em [52] é proposto um arranjo com duas antenas em forma de folhas e um elemento refletor em alumínio. A antena apresentou ganhos de 10,3 a 13,3 dBi, com faixas de operação de 4,0 ~ 11,0 GHz. Outro arranjo de antenas com duas folhas e um refletor foi proposto em [53]. A estrutura apresenta as folhas no monopolo radiante e no plano de terra com faixa de operação de 22 ~ 29 GHz. Em [54] é proposto uma antena

com geometria de folhas e um refletor EBG (*Electromagnetic Band Gap*) para faixa de UWB com característica unidirecional com frequência de operação de 3,5 a 10,8 GHz. Em [55] é descrita uma antena tipo *slot* com duas folhas, resposta em frequência de 7 ~ 10 GHz e $BW > 4$ GHz.

Em [56] foi projetada uma antena de microfita que utiliza a geometria de uma flor de quatro pétalas, sua estrutura tem alimentação por cabo coaxial, com 10 cm de afastamento entre o elemento radiante e o plano de terra. Seu projeto se propõe a atuação na faixa de UWB, tendo resultados entre 4,3 ~ 8,12 GHz.

Em [19], uma PMA inspirada na folha do acero canadense (*maple-leaf*) foi proposta para a faixa de 3 a 14 GHz. A partir desta estrutura, os autores projetaram outra antena para faixa de WLAN (5 ~ 6 GHz). Eles realizaram cortes na estrutura da antena para separação das folhas, o que promoveu a alteração da resposta em frequência da antena, operando apenas na faixa de WLAN.

A flor de tulipa tem sido utilizada como inspiração para o desenvolvimento de antenas UWB. Em [57], um monopolo impresso com largura de banda superior a 5 GHz foi proposta; em [58], uma antena do tipo CPW foi projetada para a banda-X, com 44% de banda fracionária e frequências de operação de 6,0 ~ 14,5 GHz; em [59] é apresentada uma antena CPW com refletor para a banda-X com 86% de banda fracionária e faixa de operação de 6,5 ~ 14,5 GHz.

Em [60] é proposto uma antena com quatro folhas dobradas e alimentação separada para cada folha. A alimentação de cada uma das folhas promove a reconfiguração do diagrama de irradiação em até quatro feixes, a antena foi avaliada na faixa de frequência de 3,5 ~ 6,0 GHz.

Outro trabalho é o de [61], que propõe uma antena com geometria de folha apresentando área de 16 cm² e largura de banda de 10,25 GHz. Em [14] foi utilizado a sequência de Fibonacci encontrada em uma árvore para desenvolver um arranjo de antenas do tipo *patch* com alimentação via cabo coaxial para faixa de frequências de 2,45 GHz com ganho de 15,8 dBi.

O Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) têm promovido o desenvolvimento de pesquisas de antenas bioinspiradas em plantas com antenas tipo monopolo impressos, podendo ser citados os seguintes: o trabalho de [20] que utilizou a geometria de trevo de quatro folhas para o desenvolvimento de um monopolo impresso fabricada em microfita, cuja largura de banda (2,18~14,5 GHz) excede a definida para a faixa UWB; o projeto realizado por [62] que a partir da geometria bioinspirada na planta

de cana-de-açúcar, desenvolveu-se um monopolo impresso para a faixa de frequências específica do sistema 4G em 700 MHz.

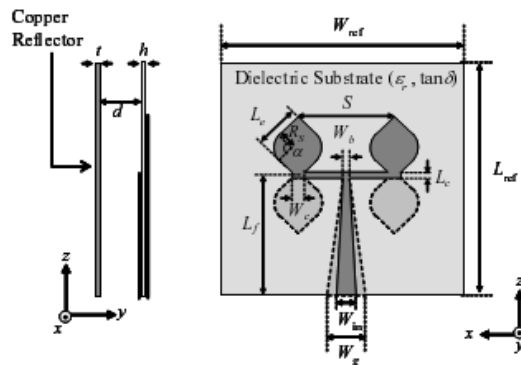
As antenas bioinspiradas em plantas reportadas na literatura são antenas de banda ultralarga com $BW > 2$ GHz, sendo resumido o número de antenas para aplicações em banda estreita ou multibanda.

No mercado já é possível encontrar antenas comerciais com geometrias bioinspiradas em plantas com aplicações em WLAN e TV [63-64], indicando que no futuro as geometrias bioinspiradas em plantas podem ser aplicadas em diversas tecnologias.

A Figura 3.4 apresenta algumas antenas bioinspiradas em plantas para diversas faixas de frequências.



(a)



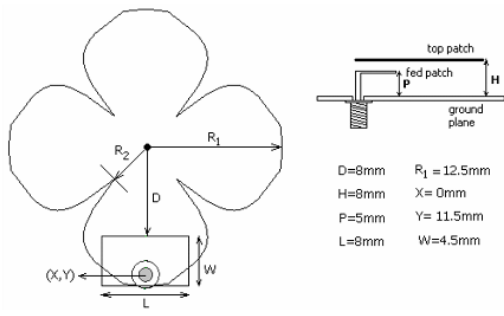
(b)



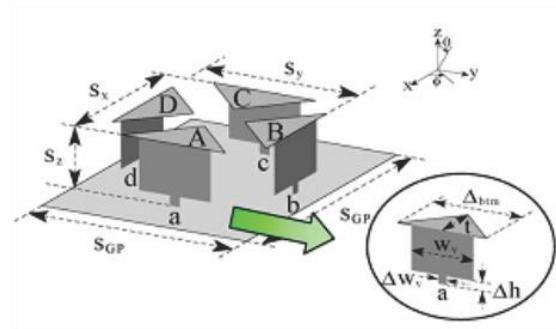
(c)



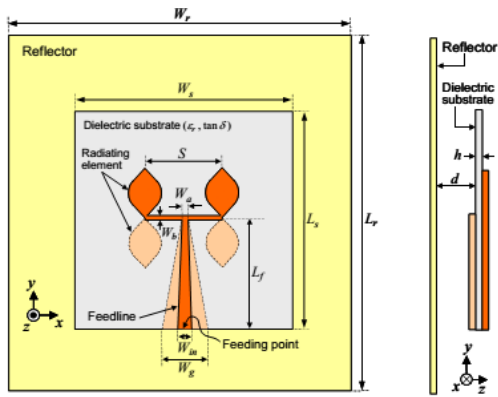
(d)



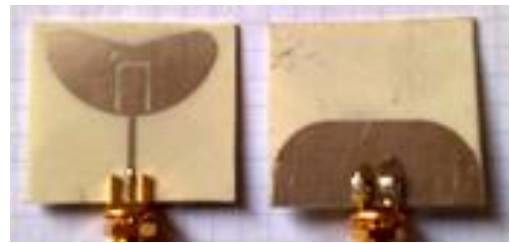
(e)



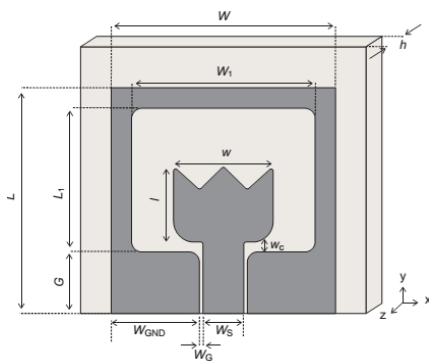
(f)



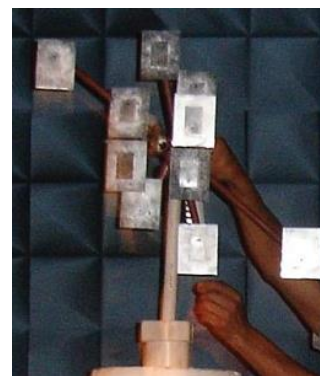
(g)



(h)



(i)



(j)

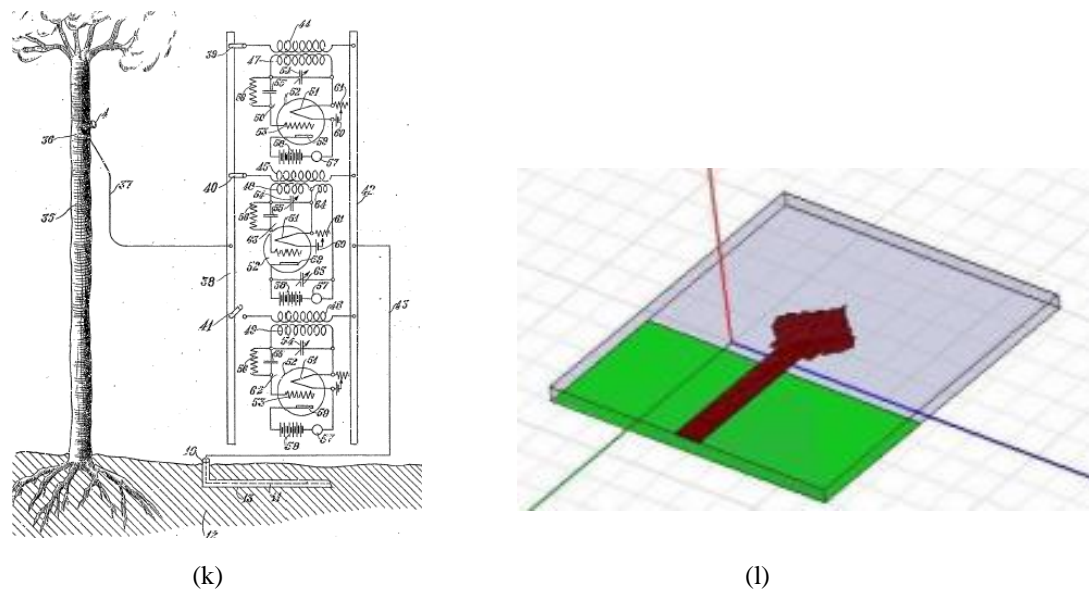


Figura 3.4 – Antenas bioinspiradas em plantas: a) *maple-leaf* [18]; b) *leaf-shaped bowtie* [52]; c) antena de folha [62]; d) *four-leaf clover* [20]; e) *leaf-shaped bowtie UWB* [53]; f) *four leaf* [60]; g) *tulip antenna* [57]; h) *leaf-shaped bowtie* [54], i) *rose leaf* [56]; j) *patch* [14]; k) árvore com transmissor [51]; l) *leaf PMA* [61].

As geometrias bioinspiradas em animais também têm servido como motivos para o desenvolvimento de antenas para sistemas de comunicação sem fio. Algumas aplicações para as geometrias bioinspiradas em animais podem ser citados os trabalhos a seguir.

Em [65] é proposto um monopolo com plano de terra e geometria bioinspirada em uma orelha de morcego. A antena apresentou características tribanda, operando nas faixas de 2,6 GHz, 5,8 GHz e 7,8 GHz e ganho máximo de 14,5 dBi.

Em [46] foi utilizada a geometria de uma borboleta para desenvolver um monopolo impresso em microfita para a faixa de 3,0 a 10,8 GHz. A partir desta antena foram projetadas aberturas circulares nas asas da borboleta, o que promoveu a alteração da faixa de operação para WLAN.

Uma antena tipo *patch* retangular, com alimentação via cabo coaxial, reconfigurável bioinspirada no sistema de fluido vascular e transporte de dispersão coloidal humano é descrito por [66]. A antena apresenta três linhas de transmissão em duas bordas, quando uma destas linhas é energizada a antena varia sua resposta em frequência, com faixa de operação entre as faixas de frequências de 2.6 a 3 GHz.

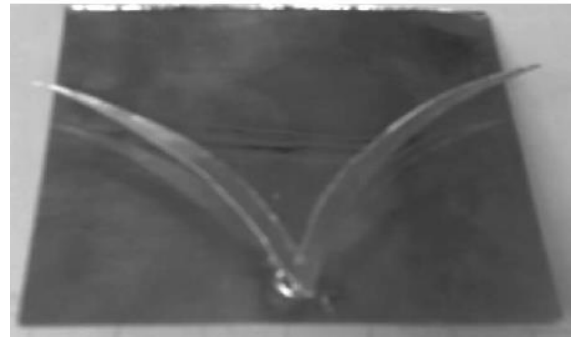
Em [67] é descrita uma antena tipo *patch* bioinspirada nas antenas de uma barata, com alimentação por cabo coaxial. Com a alteração da altura do elemento radiante da antena foram obtidas variações na largura de banda fracionária, que apresentou

resultados de 38,2% a 118%.

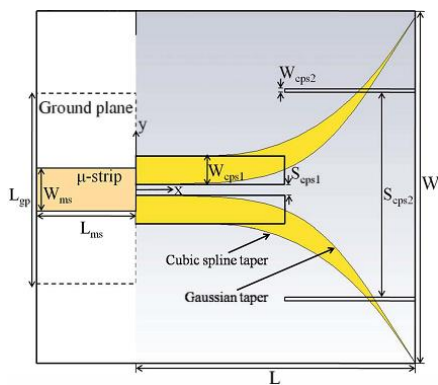
Em [68] é proposta uma antena bioinspirada em de antenas de insetos como borboletas e abelhas para desenvolvimento de uma antena tipo CPW com frequência de operação de 2,4 GHz, e largura de banda de 220 MHz. A Figura 3.5 apresenta antenas bioinspiradas em animais para diversas faixas.



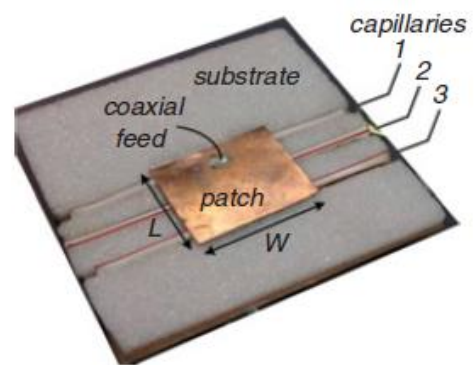
(a)



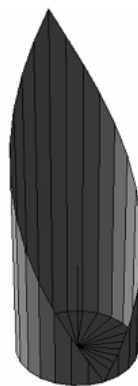
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.5 – Antenas bioinspiradas em animais: a) *butterfly* PMA [46]; b) *cockroach antenna* [67]; c) *inset antenna* [55]; d) *vascular patch* [66]; e) *monopolo bat ear* [65].

Conforme observado as geometrias bioinspiradas podem ser utilizadas das formas mais diversas e as respostas têm demonstrado resultados promissores, com faixas de frequências variadas e aplicações diversificadas.

3.3 Geometrias Bioinspiradas e Modelos Matemáticos

As geometrias bioinspiradas são baseadas em formas e padrões encontrados na natureza. Os sistemas naturais possuem harmonia e regularidade em suas partes e configurações, cuja organização pode ser transformada em linguagem matemática. O homem ao longo dos séculos observa a natureza e dela obtém soluções para os seus problemas cotidianos e aplicações práticas. Entre as tentativas realizadas na busca de modelar as geometrias encontradas na natureza destacam-se: o número de ouro, a série de Fibonacci, os fractais, a superfórmula de Gielis, entre outras, como as geometrias geradas pelo sistema de Lindenmayer, as diversas curvas geradas pelas equações polares, etc.

As folhas como parte integrante da natureza, têm sua geometria otimizada através de um processo evolutivo por milhares de gerações. Uma de suas funções é a captação da luz do Sol, no espectro visível, para a produção de energia química através do processo de fotossíntese. Elas apresentam também harmonia e funcionalidade em suas diversas formas, promovendo a eficiência de um sistema que sempre procura estar em equilíbrio. Por este motivo, o estudo das geometrias das folhas no desenvolvimento de antenas pode originar uma base de pesquisa que venha unir a funcionalidade e eficiência de uma planta em diversas aplicações práticas.

Em seguida serão descritos alguns aspectos principais de algumas geometrias encontradas na natureza e a sua tentativa da tradução em linguagem matemática destes entes.

3.3.1 Formas e Geometria das Plantas (Classificação de Folhas e Flores)

As plantas são seres encontrados em quase todos os lugares da terra, podendo ser aquáticas, terrestres ou aéreas. Elas se adaptam ao seu habitat, como qualquer ser vivo, com o propósito de perpetuar a existência de sua espécie. Neste processo de adaptação elas otimizam sua estrutura. Assim, numa região onde há escassez de água, as

plantas desenvolvem meios de sobreviver com o mínimo de água, tornando seu uso mais eficiente, por exemplo, produzindo seções internas de armazenamento. De forma semelhante, numa região com pouca luminosidade, as plantas podem modificar a geometria de suas folhas, flores e caule para melhor captação da energia luminosa disponível.

A botânica é a ciência que estuda a fisiologia e morfologia das plantas, dos fungos e das algas, aborda, entre as suas diversas áreas, a morfologia e fisiologia vegetal, as quais estudam as geometrias das diversas partes das plantas [69].

Nesta Dissertação são utilizadas duas partes da estrutura das plantas como fonte de inspiração para o projeto de antenas: as folhas e as flores.

As folhas, cuja estrutura pode ser dividida em três partes: o ápice, que é a parte superior e a margem (ou bordas) e a base, que possui ligação direta com o caule [69-70]. A Figura 3.6 apresenta as partes das folhas encontradas na natureza. A organização do ápice, margem e base, Figura 3.6, proporciona a criação das diversas formas das folhas. Alguns exemplos de folhas são ilustrados na Figura 3.7 com a classificação das formas mais comuns de folhas.

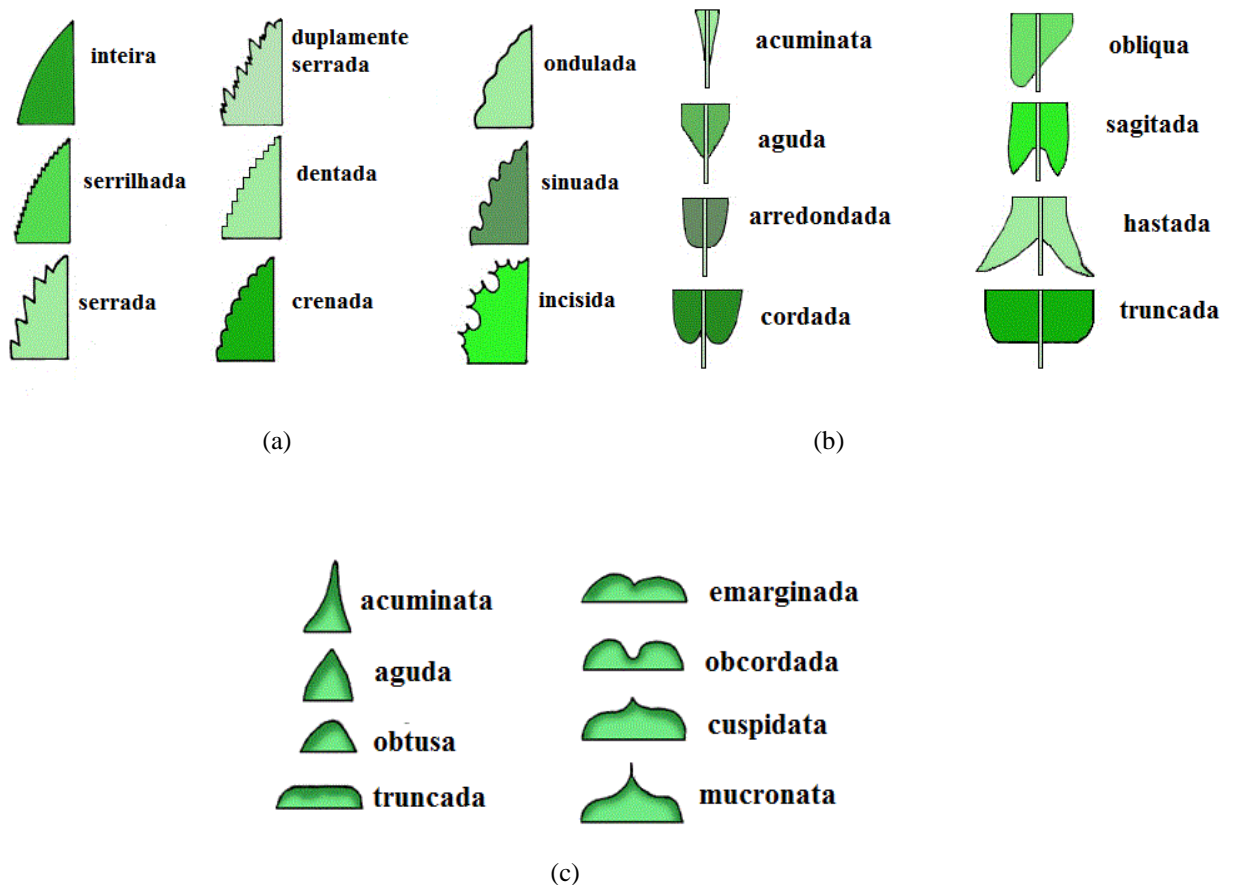


Figura 3.6 – Partes das folhas: a) margens; b) bases; c) ápice.

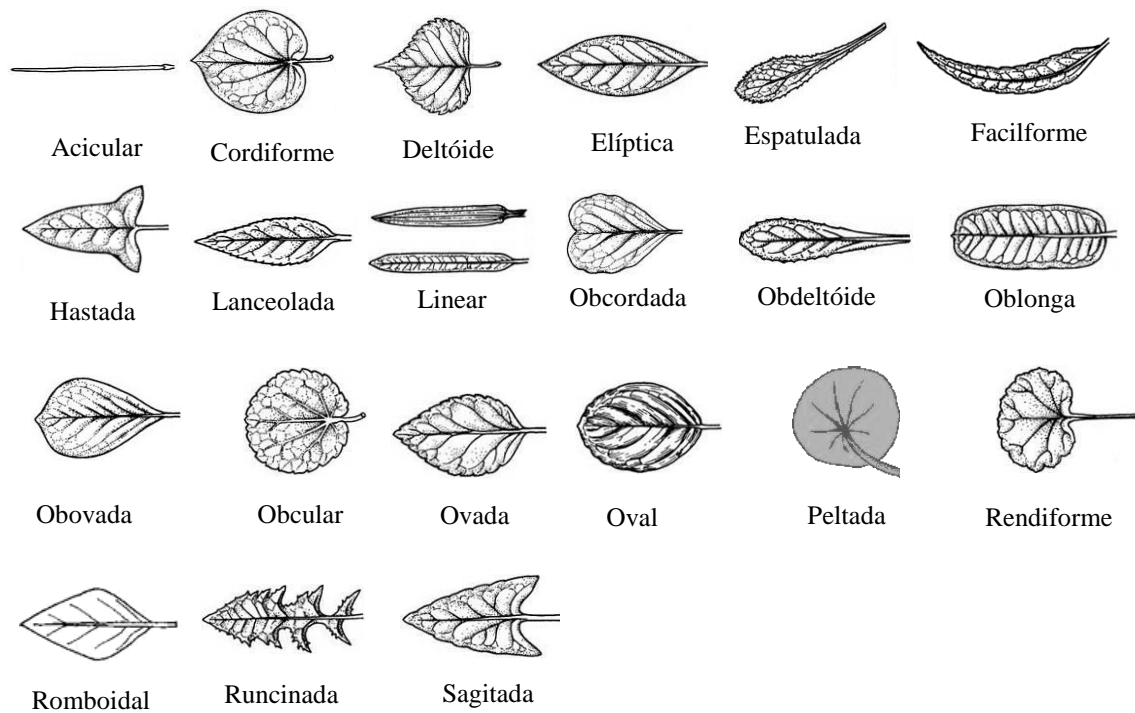


Figura 3.7 – Classificação das formas mais comuns de folhas.

As flores são produzidas por plantas denominadas antófitas. Elas são essencialmente um ramo folioso com entrenós curtos, desprovida de gomos auxiliares e com crescimento limitado. Uma característica marcante das plantas com flores é que suas folhas têm experimentado transformações e diferenciações sucessivas [69].

Numa flor completa podem ser identificadas duas partes no mesmo receptáculo, o pistilo, com o cálice, a sépala e no seu interior o tubo polínico, o óvulo e o ovário, na parte superior tem-se as pétalas formadoras da corola, o estigma e o estilete e o estame, com o filete. A Figura 3.8 apresenta as partes de uma flor completa.

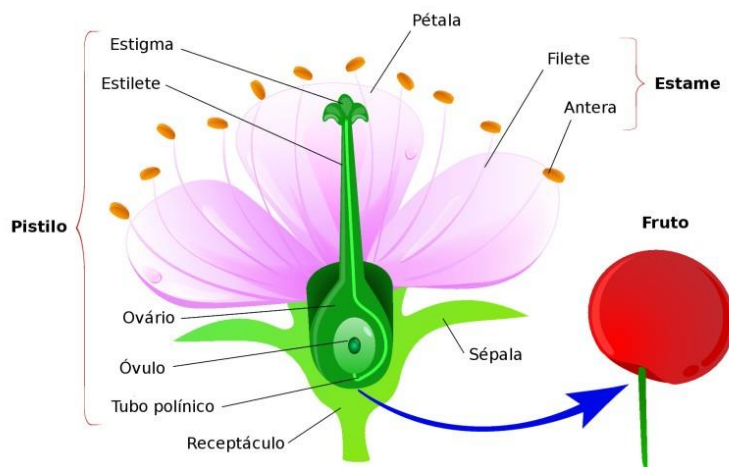


Figura 3.8 – Partes de uma flor completa.

Devido à grande diversidade, as flores são classificadas de várias maneiras: conforme suas partes constituintes, sua simetria, quanto ao aspecto do cálice e da corola, pelo número de sépalas e pétalas e pelo número de estames e carpelos. Alguns tipos de corola de flores são ilustrados na Figura 3.9.

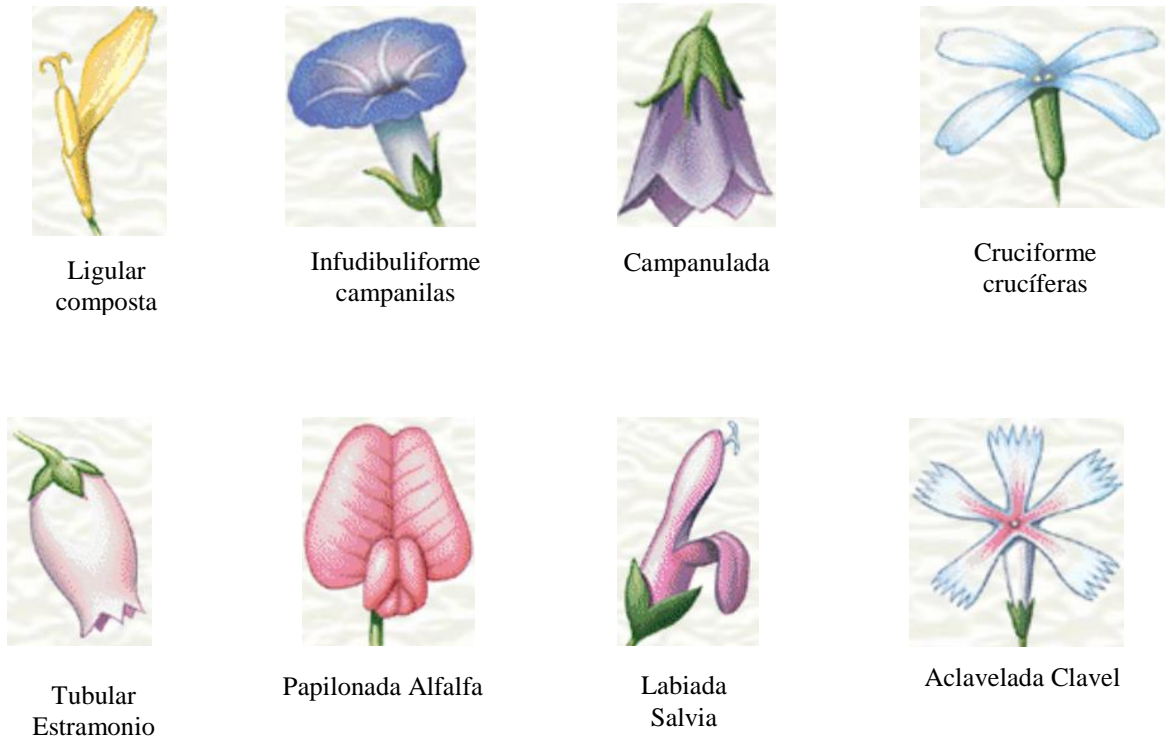


Figura 3.9 – Ilustrações de alguns tipos de corola de flores.

As geometrias das plantas, com suas devidas adequações podem torna-se uma fonte interessante de pesquisa para uso em antenas pela sua forma decorativa, de baixo impacto visual.

3.3.2 A Sequência de Fibonacci e o Número de Ouro

O matemático Leonardo Fibonacci (1175 – 1250) identificou o número de ouro numa sequência chamada de Sequência de Fibonacci, verificada nas linhas que interligam os vértices internos de um pentágono e na manipulação de retângulos (Figura 3.10) [12].

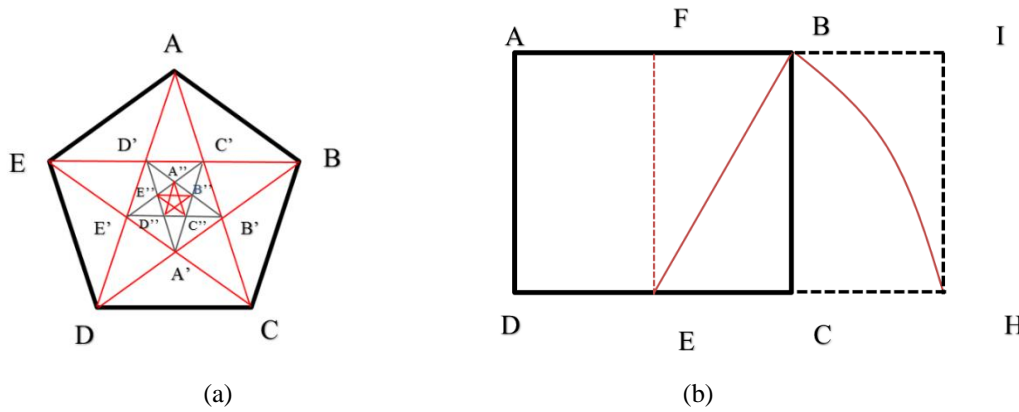


Figura 3.10 – Formação do número de ouro: a) pelo pentágono e b) por retângulos.

Tomando como ponto de partida um casal de coelhos que se reproduziam com novos casais todo mês, com a suposição de que não existia morte de animais no processo, Fibonacci desenvolveu uma sequência que demonstra o crescimento destes seres, representada por [12]: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13,... podendo ser expressa por (3.11):

$$F_{n+1} = F_{n-1} + F_n \tag{3.11}$$

O número de ouro (Φ) pode ser obtido a partir da sequência de Fibonacci. Esta sequência possui um fator interessante, se forem utilizados os divisores de cada termo pelo seu antecessor, obtemos outra sequência numérica cujo termo geral é dado por (3.12):

$$U(n) = \frac{F(n+1)}{F(n)} \tag{3.12}$$

Podendo ser obtida a sequência: $1 \div 1 = 1$; $2 \div 1 = 2$; $3 \div 2 = 1,5$; $5 \div 3 = 1,66\dots$; $8 \div 5 = 1,6$; $13 \div 8 = 1,625$; $21 \div 13 = 1,615$; $34 \div 21 = 1,619\dots$. Desta forma as razões vão se aproximando do número de ouro quando n tende a infinito, onde o limite é exatamente Φ [71], [75].

Outra forma de apresentação do número de ouro é pela divisão sucessiva de um retângulo com lado de 2 cm. A Figura 3.10 apresenta o pentágono com os vértices conectados e o retângulo da formação do número de ouro. O próprio corpo humano apresenta a razão de ouro como forma de harmonia e complemento entre as partes. A Figura 3.11 ilustra o exemplo do número de ouro na natureza.

Para o caso das plantas, pode-se observar na Figura 3.11(b), o número de ouro na disposição das pétalas e das folhas. As pétalas estão organizadas de forma compacta

e possibilitam a maximização na captação da energia luminosa. Os exemplos a seguir apresentam as flores que possuem pétalas com a sequência de Fibonacci, ou com variações próximas:

- 3 pétalas: lírio, açucena, íris, trandescância;
- 5 pétalas: botão de ouro, rosa selvagem, *columbine*, esporas, capuchinha;
- 8 pétalas: *delphiniums*, anêmona;
- 13 pétalas: malmequer, cineraria, *ragwort*;
- 21 pétalas: áster, olhado preto, susana, chicória;
- 34 pétalas: tanchagem, píretro, dália;
- 55 e 89 pétalas: margaridas (várias), a família *Asteraceae*.

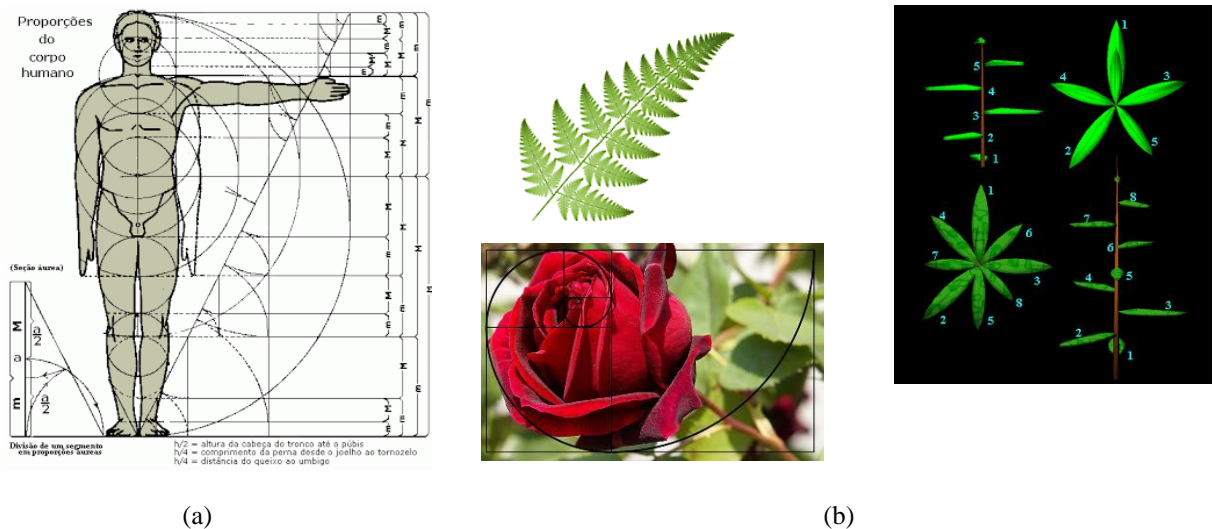


Figura 3.11 – Exemplos do número de ouro na natureza [73-74]: a) no corpo humano; b) nos galhos, pétalas de uma rosa e na disposição das folhas de uma espirradeira.

Os arranjos das folhas de algumas plantas em torno do caule também representam números de Fibonacci. A partir deste arranjo, todas as folhas conseguem captar a energia dos raios solares de igual forma. Com esta apresentação geométrica o escoamento da água torna-se também mais fácil, fazendo com que a planta não seja danificada mesmo com uma grande precipitação.

Hípaso de Metaponto (470 – 400 a.C.) verificou que ao unir os pontos de um pentágono regular em seus vértices é gerada uma estrela e no seu interior pode ser observado outro pentágono de dimensão inferior ao inicial, Figura 3.3. A partir da manipulação das médias dos segmentos de reta é possível encontrar a razão, $\frac{1+\sqrt{5}}{2} = 1,61880339$, que ficou conhecida por razão áurea, sendo encontrada em diversas

formas na natureza e nas construções antigas.

3.3.3 Os Fractais – Sistema-L

Outra geometria encontrada com frequência na natureza são os fractais, estruturas que apresentam invariância mesmo quando alterado sua escala de medida, mantendo assim sua estrutura idêntica à original [76].

Várias tentativas matemáticas têm sido feitas para definir precisamente um fractal, mas todas as definições foram insatisfatórias ou incompletas. Considera-se que um conjunto E do espaço Euclidiano é fractal se apresentar a maioria das seguintes características [77]:

- Tem uma estrutura fina, com detalhes irregulares em escalas arbitrariamente pequenas. Consiste em um detalhamento infinito. Sucessivas ampliações de um fractal levam a mais e mais detalhes;

- Não é descrito de maneira simples por função analítica ou em linguagem geométrica tradicional, pois são construídas através de processos iterativos;

- É muito irregular para ser descrito pelo cálculo ou pela geometria tradicional, de forma local ou global;

- Em geral, tem algum caráter de autossimilaridade ou auto-afinidade, talvez num sentido estatístico ou aproximado;

- A ‘dimensão fractal’ (dimensão de Hausdorff) de E é estritamente maior que sua dimensão topológica;

- Em muitos casos de interesse, E tem uma definição muito simples, talvez recursiva;

- Em geral, E tem uma aparência ‘natural’;

A geometria fractal é o estudo de conjuntos que apresentam estas propriedades.

Na geometria das plantas podem ser encontrados elementos fractais na formação dos galhos, folhas e flores. A Figura 3.12 ilustra alguns exemplos de geometrias fractais. Essas geometrias não ocorrem por acaso. Cada planta apresenta sua própria geometria para seu melhor desenvolvimento, capacidade de adaptação e sobrevivência. O que significa que cada espécie tem sua própria forma de sobreviver, podendo haver variações de acordo com os locais de sua adaptação.

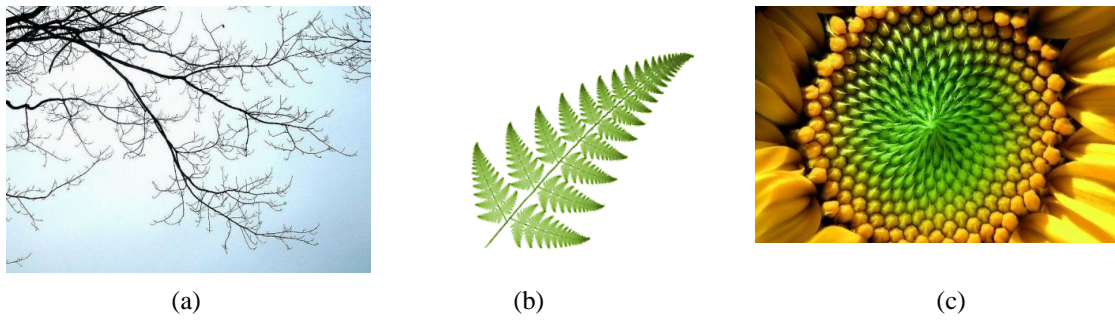


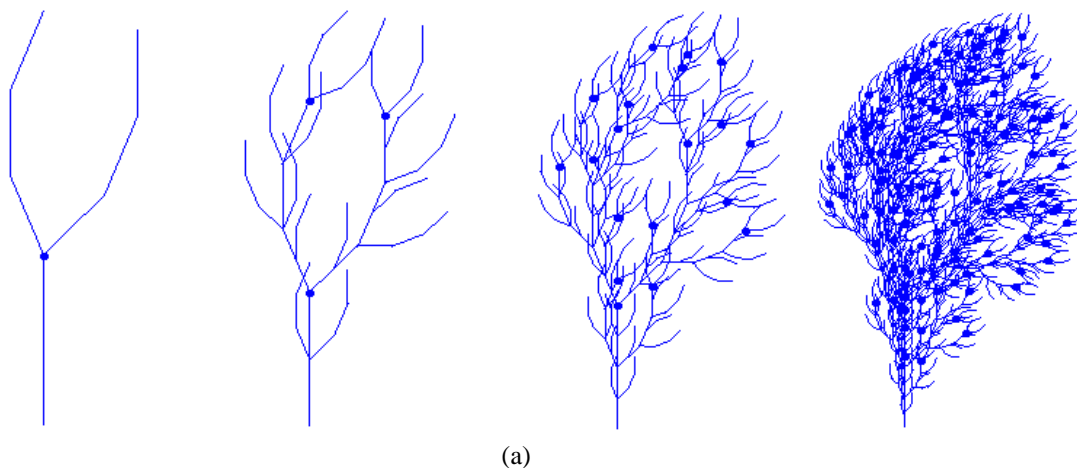
Figura 3.12 – Exemplos de geometrias fractais: a) nos galhos das árvores [78]; b) na samambaia [79]; c) na flor de um girassol.

Como representação dos fractais tem-se os sistemas L, que foram introduzidos originalmente para modelar o crescimento de organismos filamentosos, porém seu uso foi ampliado sendo utilizado para representação de estruturas de ramificações mais complexas, e até para geração de composições musicais [80]. O sistema-L procura emular o desenvolvimento de um autômato celular, ou seja, um ser que cresce por si mesmo obedecendo a um conjunto de regras pré-determinadas [50].

Um autômato celular é composto por três elementos: uma matriz, formado por um conjunto simples de células; um conjunto de regras formativas; um limite de evolução.

Pelo sistema-L é possível representar árvores axiais, cujas arestas são etiquetas que se iniciam na base (raiz, ou vértice inicial), com sentido definido. Assim a árvore é formada por uma sequência de segmentos

A Figura 3.13 apresenta sistema-L ramificado pela formação de árvores fractais. Os gráficos foram gerados no ambiente MuPAD do Matlab®.



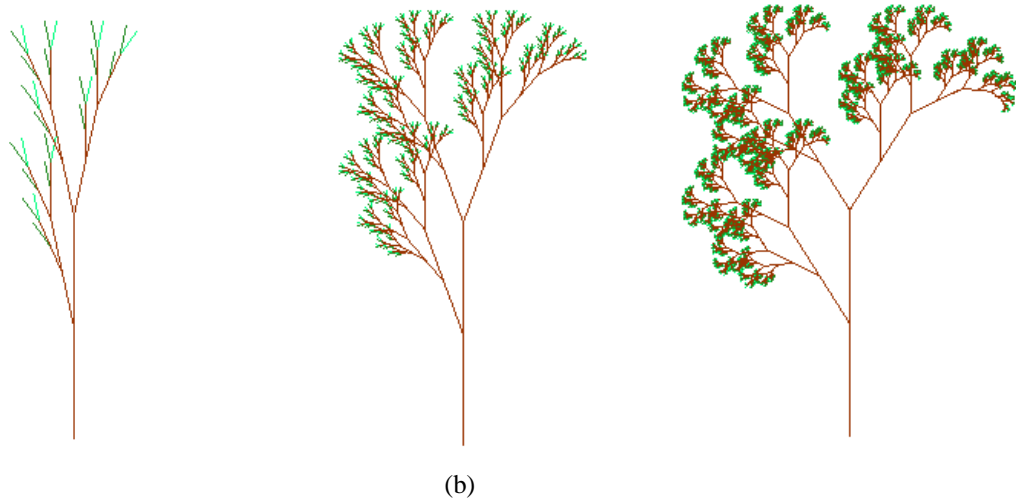


Figura 3.13 – Ilustrações de árvores fractais gerados pelo sistema-L: a) 4, 8, 16 e 32 iterações; b) 16, 32 e 64 iterações.

3.3.4 Funções Polares – Superfórmula de Gielis

O sistema de coordenadas polares, embora publicada primeiramente por Jakob Bernoulli, foi mais uma das invenções de Isaac Newton, o qual procurava representar o movimento dos planetas [81].

O sistema de coordenadas polares utiliza um par coordenado (r, θ) , para identificar a posição de objeto em relação ao seu ponto de origem, chamado de polo (O). A identificação de um objeto neste sistema de coordenadas dá-se da seguinte forma: Partindo do polo (O), traça-se um raio inicial (eixo polar) horizontal e apontado para direita. Supondo que um determinado ponto (\mathcal{P}) esteja a uma distância (r) do eixo polar (O) pode-se determinar sua posição com o ângulo (θ) orientado do raio inicial ao eixo $\overline{O\mathcal{P}}$. A Figura 3.14 ilustra o sistema de coordenadas polares.

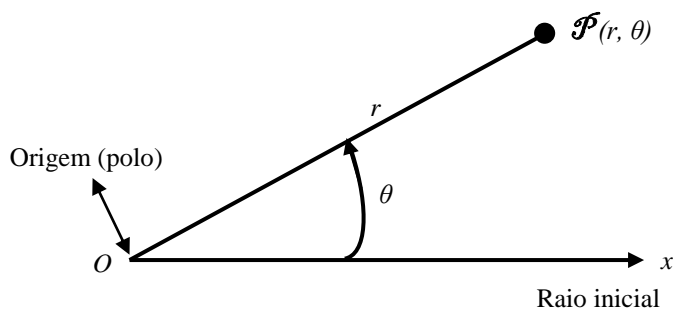


Figura 3.14 – Sistema de coordenadas polares.

O uso de diversas funções no sistema de coordenadas polares possibilita a geração de estruturas em formas variadas e que se assemelham a geometrias de folhas, flores e animais. A Figura 3.15 apresenta gráficos em coordenadas polares de algumas funções implementadas no software Matlab®. Os gráficos foram gerados a partir da variação de funções senos e cossenos, com “ θ ” variando de “0” a “ 2π ” com passos de “ $\pi/100$ ”.

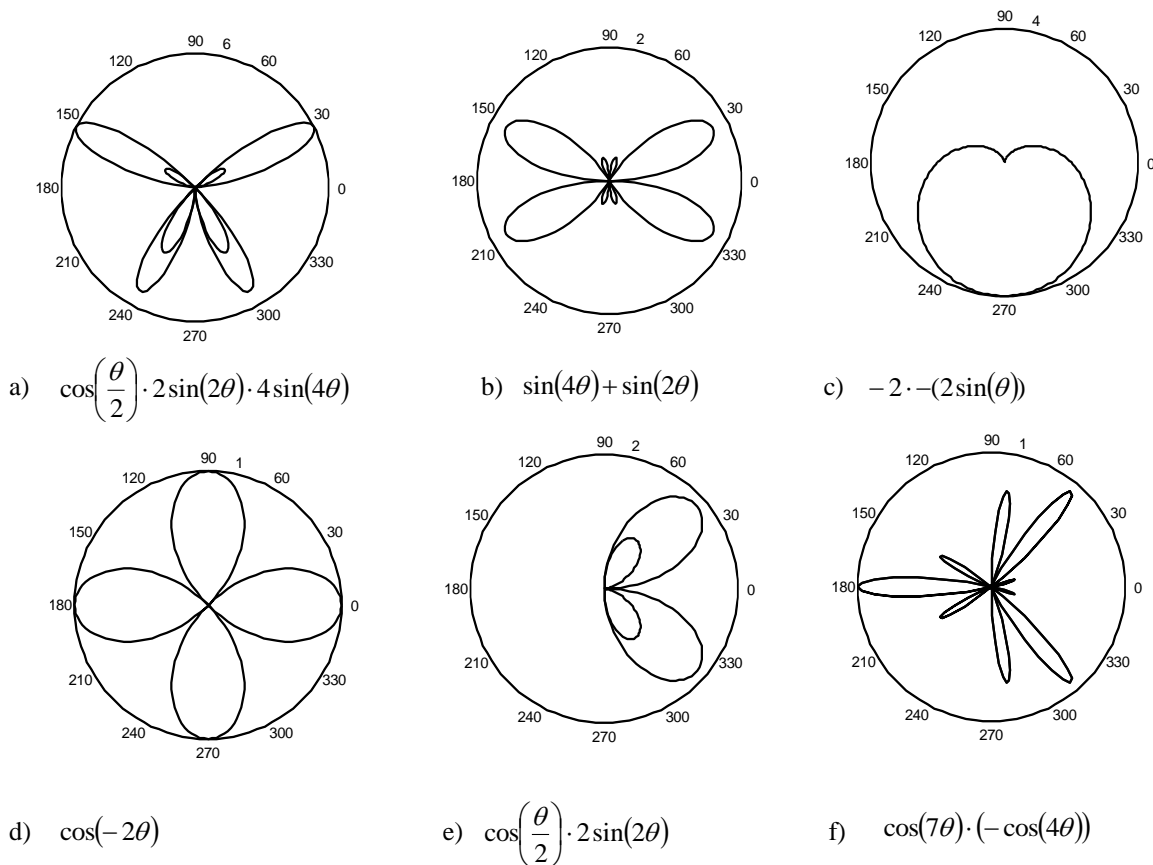


Figura 3.15 – Gráficos em coordenadas polares para algumas funções: a) borboleta; b) borboleta com antenas; c) cardioide; d) rosácea de 4 pétalas; e) 2 asas de borboleta; f) libélula.

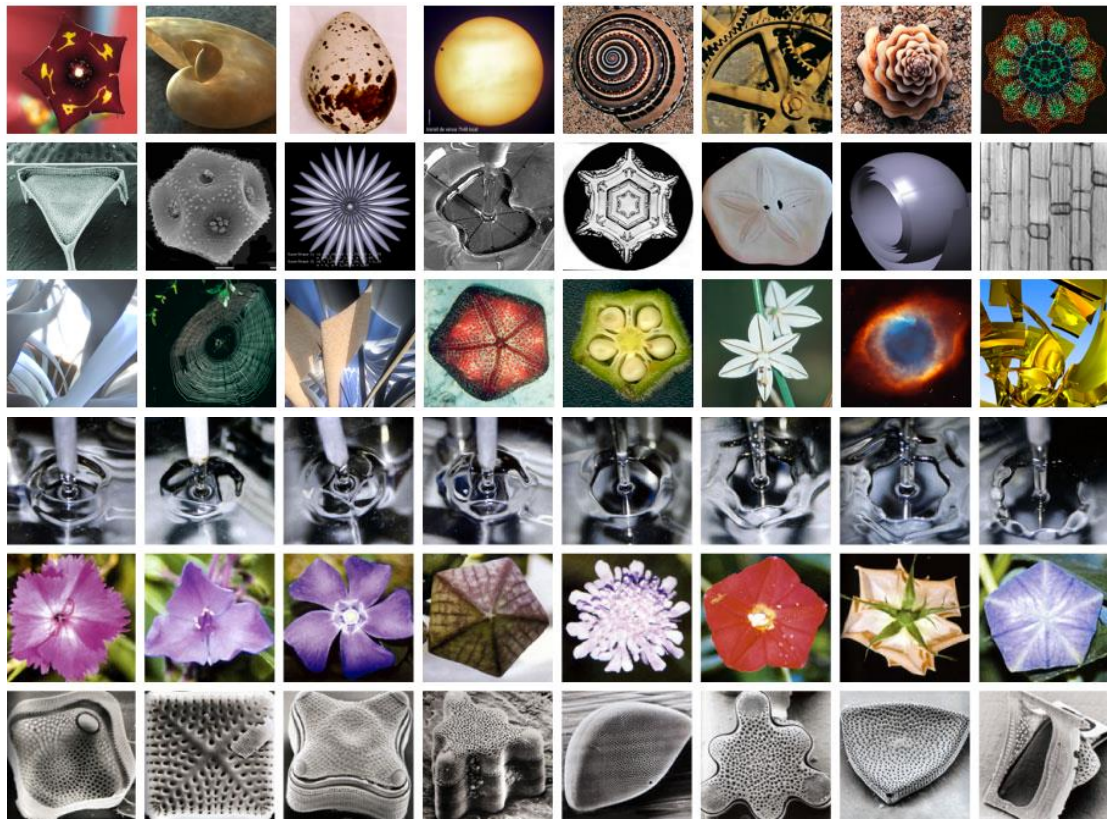
Gielis, em 2003, numa tentativa de representar matematicamente a formação de geometrias euclidianas e não euclidianas de formas de plantas e de outros seres encontrados na natureza, desenvolveu uma singular e simples equação geométrica denominada de superfórmula (3.13) [82].

$$r(\theta) = \left[\left| \frac{1}{a} \cos\left(\frac{m}{4} \theta\right) \right|^{n_2} + \left| \frac{1}{b} \sin\left(\frac{m}{4} \theta\right) \right|^{n_3} \right]^{-1/n_1} \quad (3.13)$$























































Segundo [82] as formas circulares, quadrados, elipses e retângulos são membros

do grupo de superelipses as quais tem como desvantagem a simetria limitada. O uso da coordenada polar $r = f(\theta)$, pela substituição de $x = r \cos(\theta)$ e $y = r \sin(\theta)$, e a inserção do argumento $m/4$ do ângulo θ introduz uma simetria rotacional específica. Os argumentos n_i e m ao conjunto dos números reais e a e b são números reais diferentes de zero.

A superfórmula pode ser utilizada pela multiplicação por uma função $f(\theta)$, formando uma equação genérica geradora de uma larga classe de super e subformas, incluindo o super e o subcírculo como caso especial. A Figura 3.16 apresenta exemplos de geometrias geradas pela superfórmula de Gielis.



(a)

Simetria Rotacional n°	$m = n_2 = n_3 = 1$	$n_1 = 1000$ $n_2 = n_3$	$n_1 = n_2 = n_3 = 1/2$	$n_1 = 30$ $n_2 = n_3 = 15$	$n_1 = 80$ $n_2 \neq n_3$	n_i como coluna 3 $a=2$	
0			2				
1			500				
2			500				
3			1980				
4			1000				
5			620				
6			390				
7			320				
8			250				

(b)

Figura 3.16 – Geometrias geradas pela superfórmula de Gielis: a) naturais [83]; b) geradas pela superfórmula [82].

Apesar de recente, alguns trabalhos apresentam aplicações com geometrias bioinspiradas, desenvolvendo antenas para diversas faixas de frequência. A seguir são apresentadas algumas aplicações com antenas bioinspiradas.

3.4 Aplicações de Antenas Bioinspiradas

Antenas camufladas – são utilizadas diversas técnicas para camuflar antenas de grande e pequeno porte. As estações rádio base de comunicação celular, por exemplo, são camufladas como uma árvore, como palmeiras, pinheiros ou cactos, se misturando assim com a flora local, sendo praticamente imperceptível para os usuários. Nos casos de rádio amador a antena é utilizada como haste para bandeiras, outras são escondidas em torres cata-ventos, torres de igrejas, chaminés residenciais, torres de relógios em praças [84-86]. No uso veicular, pode-se destacar, a *blade* ou *Shark-fin Antenna*, que é a antena camuflada como barbatana de tubarão [87]. Outra técnica é a pintura da parábola ou invólucro da antena com as cores do local onde está posicionada, que faz parte dos serviços de customização de antenas criados para tentar harmonizar a aparência dos dispositivos com o ambiente [88]. A Figura 3.17 apresenta exemplos de antenas

camufladas.

As *wearables antennas* (antenas que se vestem) – a tecnologia WBAN é uma rede de sensores para fins especiais, concebidos para funcionar de forma autônoma para conectar vários sensores e dispositivos médicos, localizados no interior e no exterior de um corpo humano [90]. Uma aplicação comercial interessante são as antenas têxteis, estas possuem requisitos específicos que são as estruturas planares e a flexibilidade dos materiais utilizados na construção [91-92]. A Tabela 3.1 apresenta as aplicações médicas e não médicas de antenas para uso junto ao corpo [9], [90]. A empresa Patria Oyj, uma das mais renomadas em antenas têxteis apresentou em 2011 uma antena têxtil de alta durabilidade, que pode ser lavada, torcida e esmagada e continuar funcionando normalmente [89].



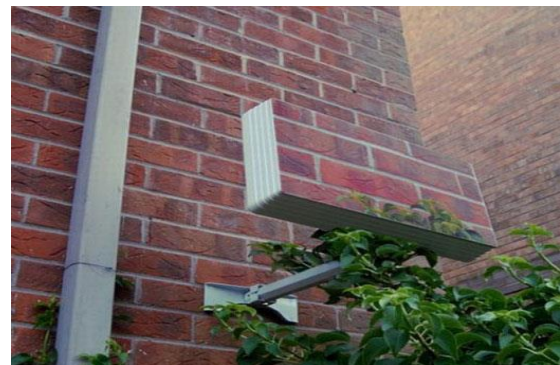
(a)



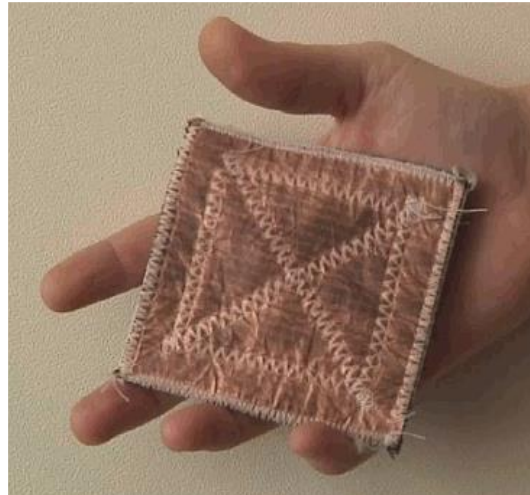
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.17 – Exemplo de antenas camufladas: a) Palmeira [93]; b) Cactus [94]; c) *shark antenna* [87]; d) camuflada pela pintura [88]; e) *washable wearable antenna* [89].

TABELA 3.1 – Aplicações médicas e não médicas de antenas para uso junto ao corpo.

Aplicação Médica	Roupas (WBAN)	Militar e defesa – Assessoramento no controle da fadiga de soldados e gestão em batalhas. Treinamento esportivo amador e profissional Tratamento do sono Tratamento da asma Roupa para Monitoramento da saúde
	Implantes (WBAN)	Controle de diabetes Detecção cardiovascular Detecção de câncer
	Controle remoto de dispositivos médicos	Ambiente de vida assistida Monitoramento de pacientes Sistemas de telemedicina
	Não-Médica	Transmissão em tempo real Aplicação para diversão Emergência não-médica Detecção de emoções Autenticação de segurança Compartilhamento de informações pessoais

As *supershaped antennas* (**superantenas**) – são antenas construídas com geometrias bioinspiradas que utilizam a superfórmula de Gielis [82].

A empresa holandesa *Antenna Company* desenvolveu antenas utilizando a superfórmula de Gielis, ela promete antenas com desempenho, de seis a oito vezes,

maiores que as antenas utilizadas em *smartphones* ou roteador sem fio, com a vantagem da possibilidade de maior alcance, melhor uso da largura de banda disponível, aumento da velocidade e maior eficiência no consumo de energia [83], [96].

As pesquisas em antenas com geometrias bioinspiradas, apesar de recentes, têm apresentado trabalhos com aplicações em diversos sistemas. Este capítulo apresentou alguns conceitos dos tipos de antenas utilizadas nesta Dissertação, uma introdução às geometrias bioinspiradas, trabalhos de antenas utilizando geometrias bioinspiradas em plantas e animais, e algumas aplicações em antenas. No capítulo seguinte são apresentados o projeto e os resultados simulados e medidos das antenas com geometria bioinspirada desta Dissertação.

4. ANTENAS BIOINSPIRADAS PARA SISTEMAS 4G E UWB

4.1. Geometrias Utilizadas

Nesta Dissertação são utilizadas geometrias bioinspiradas em folhas e flores, aplicadas em monopolo impressos e do tipo *patch*, construídas em microfita e tecido, para uso em sistemas 4G e UWB. Estes tipos de antenas têm como características a facilidade de fabricação, o baixo custo e a possibilidade de adequação a diferentes tipos de geometrias. Uma diferença entre estes tipos de antenas está na largura de banda, pois as antenas tipo monopolo impresso apresenta banda larga enquanto as antenas do tipo *patch*, geralmente, banda estreita.

As geometrias bioinspiradas e as antenas simuladas para faixa de 4G são visualizadas na Figura 4.1, com as geometrias bioinspiradas para tecnologia 4G, com a planta de cana-de-açúcar 4.1(a), numa folha elíptica (oliveira) 4.1(c) e numa flor de tulipa 4.1(e).



(a)



(b)

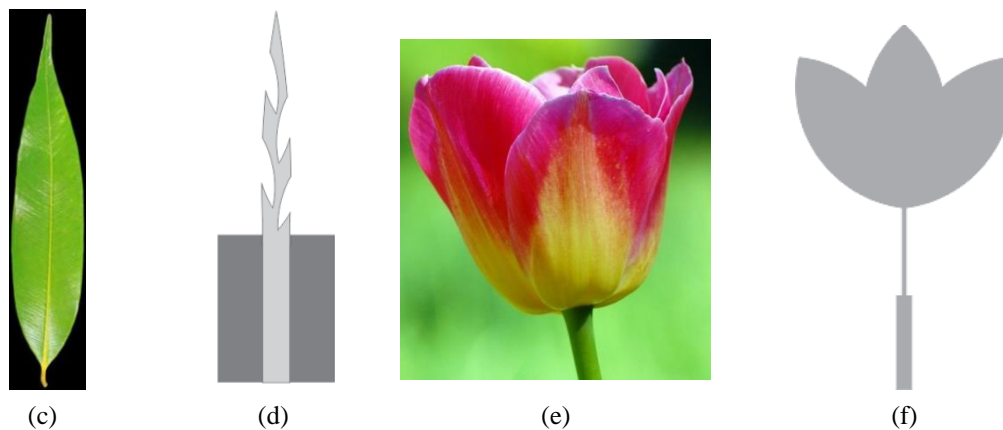


Figura 4.1 – Geometria bioinspirada para tecnologia 4G: a) planta de cana-de-açúcar; b) geometria simulada da cana-de-açúcar; c) folha elíptica de oliveira; d) folha elíptica simulada; e) flor de tulipa; f) flor de tulipa simulada.

Para sistemas UWB foram projetadas, simuladas e medidas antenas com geometrias bioinspiradas, a Figura 4.2 apresenta as geometrias bioinspiradas para UWB, com a flor de tulipa Figura 4.2(a), nas folhas de oliveira 4.2(c), em uma flor de jasmim 4.2(e), em uma pétala de orquídea 4.2(g).

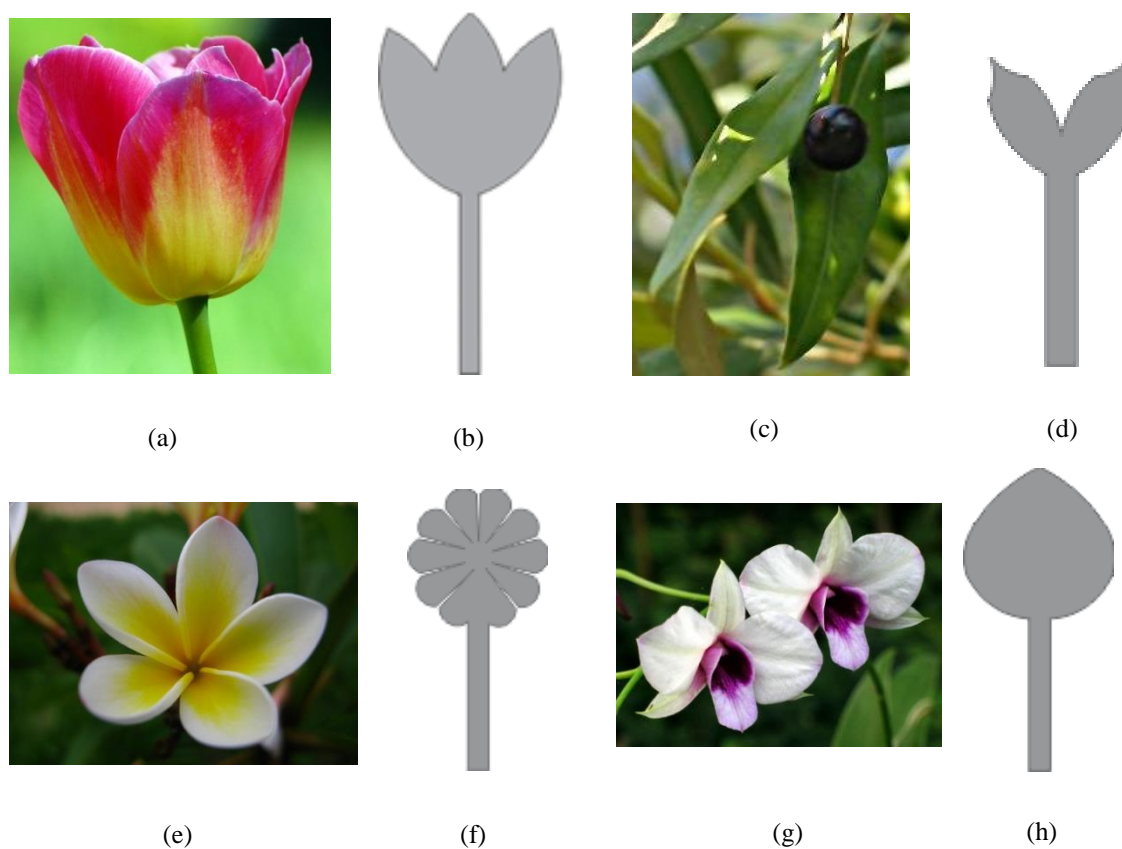


Figura 4.2 – Geometria bioinspirada propostas para tecnologia UWB: a) flor da tulipa; b) modelo simulado da tulipa; c) folha de oliveira; d) antena folha de oliveira simulada; e) flor de jasmim; f) flor de jasmim simulada; g) orquídea; h) antena pétala de orquídea simulada.

As primeiras dimensões de projeto das antenas foram realizadas de acordo com a seção 3.1. Como as dimensões de projeto não são exatas, mas uma aproximação inicial, são necessários ajustes nas dimensões das antenas. Esses ajustes são adequações das dimensões da antena para que operem nas faixas de frequências desejadas. Os ajustes das dimensões da antena para a frequência e largura de banda desejadas foram realizadas no *software* comercial Ansoft DesignerTM. Em pesquisa em bibliografia especializada não foi encontrado registro de trabalhos que utilizaram o *software* Ansoft DesignerTM na simulação de antenas do tipo monopolo impresso, por este motivo em algumas antenas os resultados obtidos com o *software* Ansoft DesignerTM foram comparados com as simulações realizadas no *software* HFSS, com o objetivo de validação dos dados obtidos.

Nas simulações realizadas, procurou-se adequar o perímetro com o comprimento (L) e a largura (W) nas geometrias utilizadas em cada antena da antena. As dimensões finais das antenas, dos refletores e da distância entre as antenas e os refletores foram obtidas de forma empírica, pelo método de tentativa e erro.

As etapas de fabricação e medição dos protótipos das antenas abordadas neste trabalho foram realizadas no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do IFPB, Campus João Pessoa. Foi utilizado um analisador de redes vetorial (modelo N5230 da *Agilent Technologies*) para medição na faixa de frequências de 300 KHz – 13,5 GHz. No projeto das antenas para 4G e UWB, o substrato dielétrico utilizado foi de FR4, com permissividade relativa, $\epsilon_r = 4,4$, e espessura, $h = 1,5$ mm

Na análise das propriedades ressonantes das antenas do tipo monopolo impresso e *patch*, a frequência de ressonância e a largura de banda foram avaliadas através dos parâmetros perda de retorno ($-|S_{11}|$, em dB), VSWR e a impedância sobre a carta de Smith. Os resultados obtidos para estes parâmetros, simulados e medidos, foram comparados para os protótipos construídos, a fim de se verificar a metodologia bioinspirada desenvolvida nesta Dissertação. Por outro lado, o ganho numérico das antenas e outras propriedades de radiação como largura de feixe e ganho foram avaliados a partir do diagrama de irradiação 2-D e 3-D.

As antenas tipo monopolo impressas apresentadas nesta Dissertação utilizaram largura da linha de transmissão (W_{LT}) de 2,87 mm [97] e a distância entre a antena e o plano de terra (g) de 1,5 mm [50], com exceção da antena têxtil ginkgo biloba.

4.2 Antenas para Sistemas 4G

Para os sistemas 4G foram simulados e medidos monopolo impressos e do tipo *patch*, com geometria bioinspirada para operação nas faixas de 700 MHz e 2,5 GHz e seus resultados foram comparados a antenas com geometrias quadradas.

Nos sistemas de comunicação 4G a largura de banda exigida é superior a 100 MHz (tanto para faixa de 700 MHz quanto para faixa de 2,5 GHz). Este requisito de fato é uma limitação para o uso de antenas de banda estreita do tipo *patch*. O arranjo de antenas do tipo *patch* é uma solução possível para o aumento da largura de banda, porém o arranjo de antenas requer maior espaço.

Uma solução para maiores larguras de banda é o uso das antenas tipo monopolo impressos. Estas antenas apresentam características de banda larga com aplicações para a tecnologia UWB. A tecnologia 4G, como qualquer outra, exige que a antena apresente largura de banda dentro de limites preestabelecidos, com faixas delimitadas por frequências inferiores e superiores. Uma proposta de redução da largura de banda de monopolo impressos é a aplicação de geometrias que proporcionem o controle da largura de banda da antena dentro da faixa de frequência necessária.

Nesta fase, optou-se por utilizar as geometrias bioinspiradas no projeto de antenas, com o objetivo, por exemplo, de alterar suas propriedades ressonantes (largura de banda e frequência de funcionamento) para aplicações nas faixas de frequências de sistemas 4G.

4.2.1 Antenas com Refletor para Faixa de 700 MHz

Para as faixas de 700 MHz foram projetadas, simuladas e medidas antenas com geometrias quadradas e bioinspiradas com o uso de refletor. Os dados a seguir foram calculados de acordo com a seção 3.1.1 para geometria quadrada. A Tabela 4.1 apresenta as dimensões, em mm, da PMA quadrada para 700 MHz. O comprimento da linha transmissão (W_{LT}) calculada foi de 96,5mm. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm e o comprimento do corte (L_S) foi de 5 mm.

A partir dos dados do projeto, a antena monopolo impresso quadrada para 700 MHz foi simulada (Figura 4.3). As informações da antena monopolo quadrado foram utilizadas como base para o projeto da antena bioinspirada na planta de cana-de-açúcar apresentada na próxima seção. As dimensões do refletor utilizado foram de:

comprimento, $L_R = 280$ mm; largura, $W_R = 260$ mm, com espessura, $h = 1,5$ mm, separado por uma distância de 50 mm, com volume total de $3749,2$ cm³.

Tabela 4.1 – Dimensões (mm) da PMA quadrado para 700 MHz

<i>Antena</i>	<i>L</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W</i>	<i>Ajuste</i>	<i>L_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>
Quadrado 700 MHz	108,9	108	108,9	108	112,2	112	141,2	140

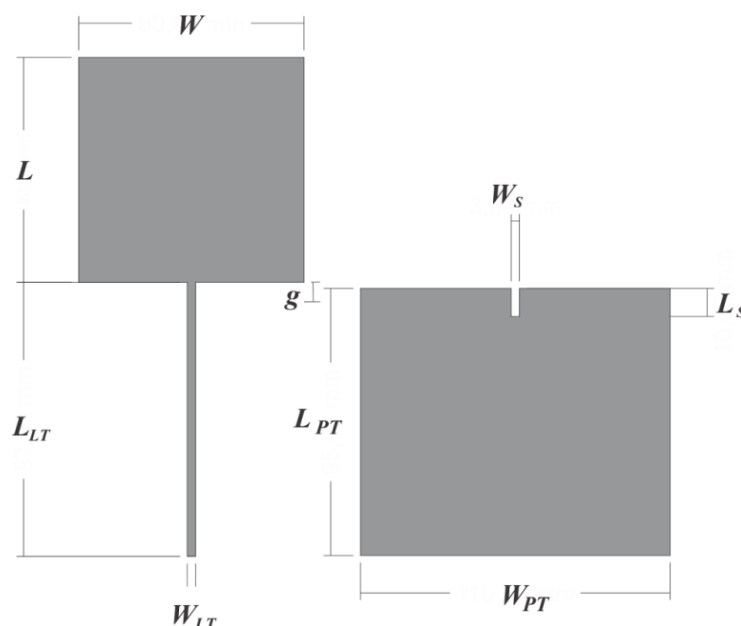


Figura 4.3 – Dimensões de projeto da PMA quadrada.

4.2.1.1 Antena Monopolo Impressa Bioinspirada na Planta de Cana-de-Açúcar de 4 Folhas

Nesta seção são comentados os resultados medidos e simulados da PMA bioinspirada em uma planta de cana-de-açúcar para a faixa de frequências de 700 MHz com uso de refletor. Seu resultado é comparado à PMA quadrada com uso de refletor e verificado sua compatibilidade com a largura de banda para sistemas 4G.

A Tabela 4.2 apresenta as dimensões, em mm, da antena cana-de-açúcar 3 folhas para 700 MHz. O comprimento da linha de transmissão (W_{LT}) calculada foi de 31,65 mm. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, o comprimento do corte no plano de terra (L_S) foi de 6,35mm. A dimensão do refletor utilizado foi de: comprimento, $L_R = 180$ mm; largura, $W_R = 110$ mm; espessura, $h = 1,5$ mm, separado por uma distância de 8 mm; e volume total de $188,1$ cm³, apresentando

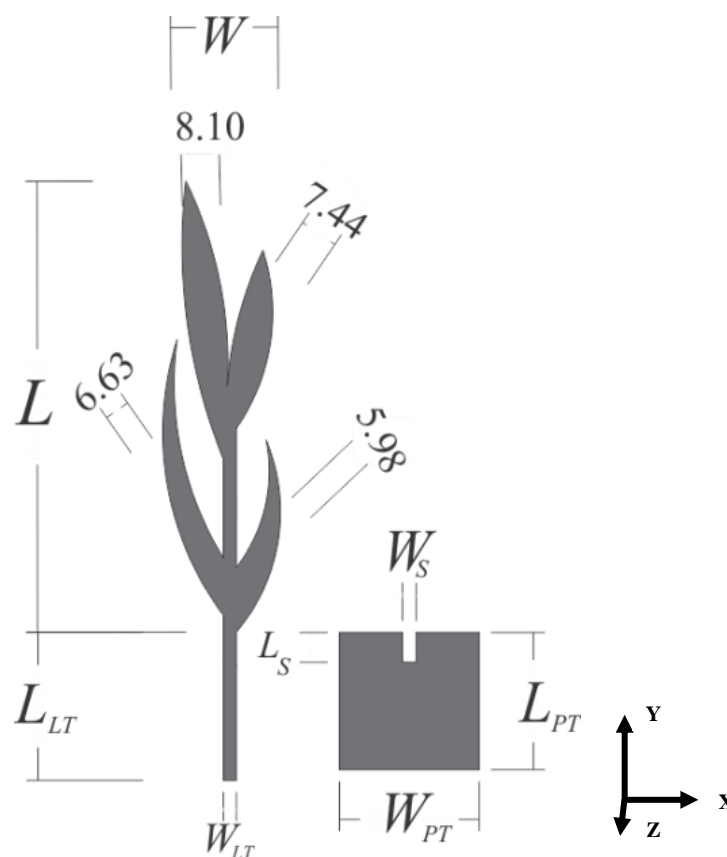
uma redução do volume total de 95% quando comparado ao monopolo quadrado para mesma faixa de frequências.

Na Figura 4.4 é apresentada a PMA cana-de-açúcar 4 folhas e PMA quadrada com refletor e a comparação entre a antena bioinspirada e a PMA quadrada para 700 MHz, Figura 4(c).

Tabela 4.2 – Dimensões (mm) da PMA cana-de-açúcar 4 folhas para 700 MHz

<i>Antena</i>	<i>L</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W</i>	<i>Ajuste</i>	<i>L_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>
Cana-de-açúcar 4 folhas	95,35	96,42	31,78	28,87	31,78	31,9	31,78	30

Pode-se observar que a antena com geometria bioinspirada na planta de cana-de-açúcar 4 folhas obteve um comprimento $L = 96,42 \text{ mm}$, com uma redução na sua dimensão na ordem de 10,7% quando comparada a PMA quadrada com $L = 108 \text{ mm}$. Apresentando também um $W = 28,87 \text{ mm}$ com redução em sua dimensão na ordem de 78,7% quando comparada com a PMA quadrada que obteve $W = 108 \text{ mm}$.



(a)

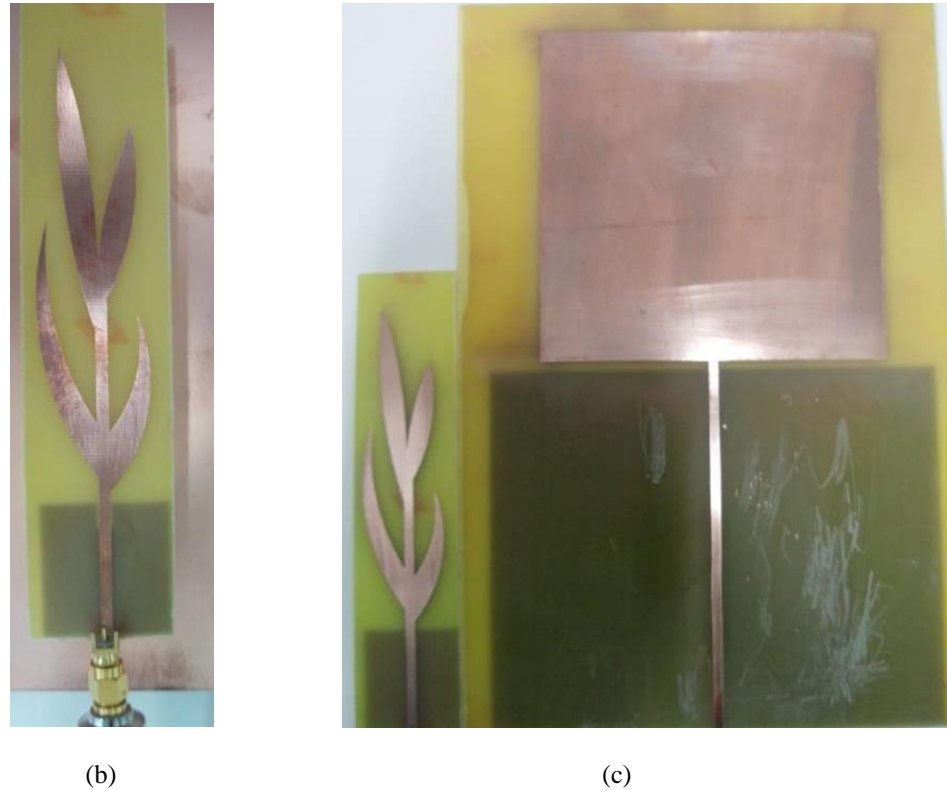


Figura 4.4 – Antena cana-de-açúcar 4 folhas e PMA quadrada: a) dimensões da antena cana-de-açúcar 4 folhas simulada; b) antena com refletor; c) comparação das antenas cana-de-açúcar 4 folhas e PMA quadrada.

Como a PMA não possui plano de terra em toda sua dimensão os elementos externos podem influenciar seus resultados. Neste caso há o acoplamento da antena com os materiais próximos, o que pode promover a alteração da resposta em frequência, ou da largura de banda.

Neste projeto, para que a estrutura não sofra esta interferência, foi inserido um refletor metálico abaixo do plano de terra da antena, sendo avaliada, de forma empírica, uma distância ótima entre a antena e o refletor. Para a antena bioinspirada na planta de cana-de-açúcar, a distância entre o plano de terra e o refletor que apresentou melhor resultado foi de 8 mm. Para a PMA quadrada a distância de melhor resultado foi de 50 mm.

A Figura 4.5 apresenta a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA quadrada com refletor. A antena simulada obteve sua maior ressonância na frequência de 664 MHz com largura de banda de 348 MHz, porém a antena medida apresentou ressonância principal na frequência de 718 MHz com largura de banda de 306 MHz. A diferença na largura de banda entre as antenas medida e simulada foi de 11,21%.

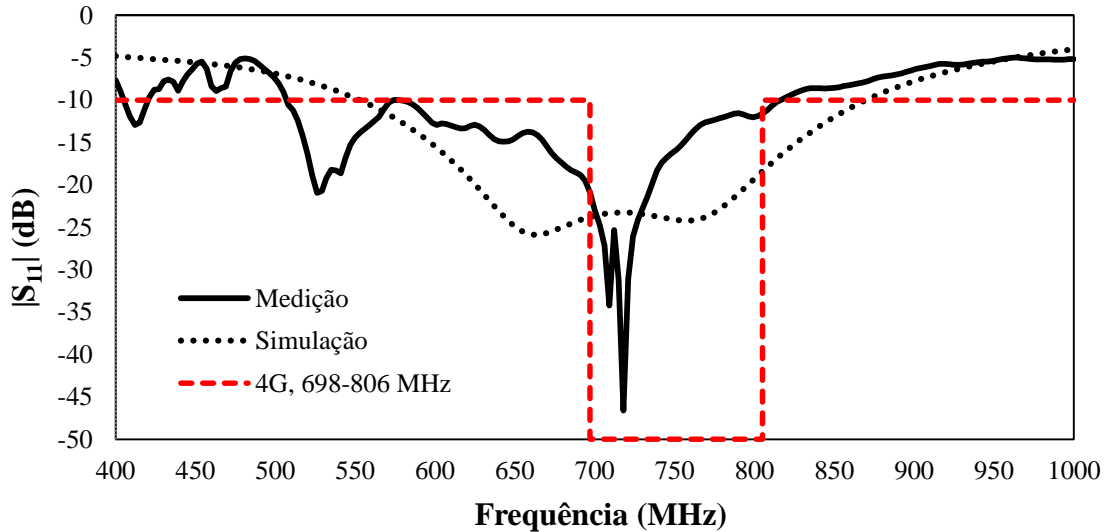


Figura 4.5 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA quadrada com refletor.

A Figura 4.6 apresenta a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antena cana-de-açúcar 4 folhas sem refletor nas frequências de 0.1 MHz a 13.5 GHz. Conforme a Figura 4.6 na frequência de 750 MHz é observada uma ressonância no resultado simulado.

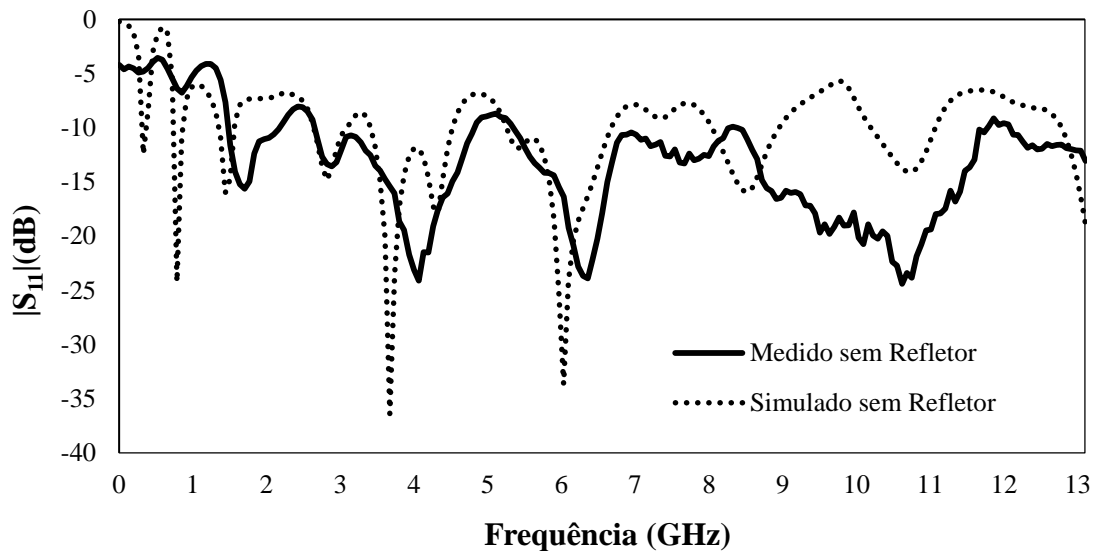


Figura 4.6 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antena cana-de-açúcar 4 folhas sem refletor.

Na Figura 4.7 é visualizada a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido da antena cana-de-açúcar 4 folhas e da antena monopolo impressa quadrada com refletor. As antenas apresentaram uma diferença de 33 MHz entre suas maiores ressonâncias. A antena

cana-de-açúcar 4 folhas medida apresentou frequência de ressonância em 751 MHz, e largura de banda de 159 MHz cobrindo a faixa de frequências indicada para a tecnologia 4G. Os valores medidos para a antena cana-de-açúcar com refletor e a antena monopolo impressa quadrada com refletor são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da antena de cana-de-açúcar com refletor e PMA quadrada com refletor

	<i>Antena</i>	<i>BW (MHz)</i>	<i>f₁ (MHz)</i>	<i>f₂ (MHz)</i>	<i>f₀ (MHz)</i>
1	Cana-de-açúcar 4 folhas medida	159	652	811	751
2	Cana-de-açúcar 4 folhas simulada	58	682	740	708
3	Quadrado medido	306	508	814	718
4	Quadrado simulado	348	535	883	664

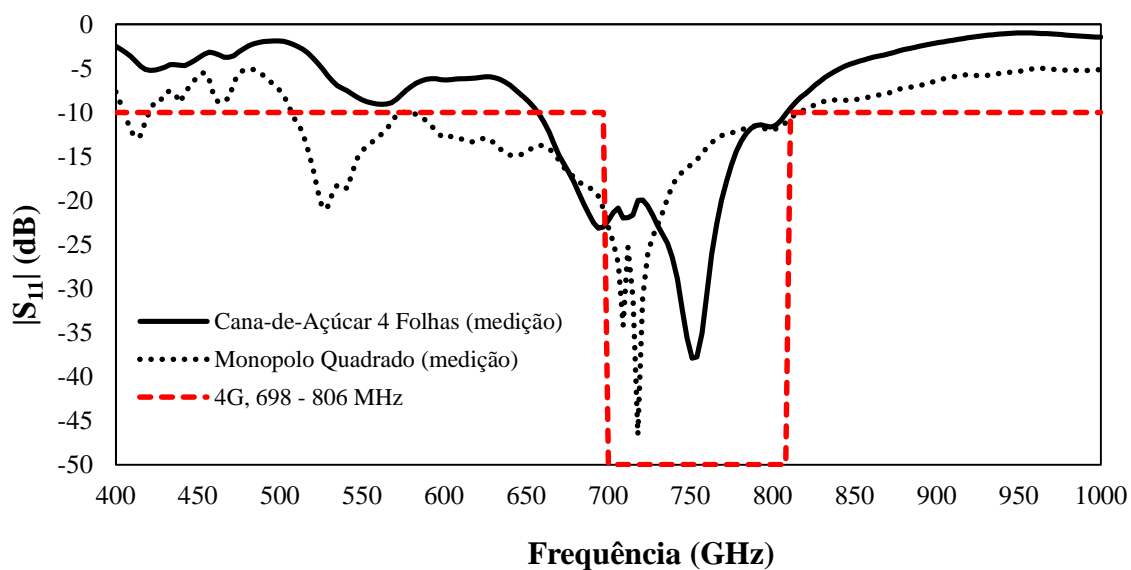


Figura 4.7 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido das antenas cana-de-açúcar 4 folhas e PMA quadrada com refletor.

As impedâncias sobre as cartas de Smith das antenas cana-de-açúcar 4 folhas e PMA quadrada simuladas com refletor na faixa de frequências de 400 MHz a 1 GHz é visualizada na Figura 4.8. Conforme observado apenas uma pequena parte da curva aproxima-se do valor normalizado, indicando a faixa de frequências em que o casamento de impedâncias em 50Ω . As curvas vermelhas internas indicam o VSWR menor que 2, ou seja, as frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

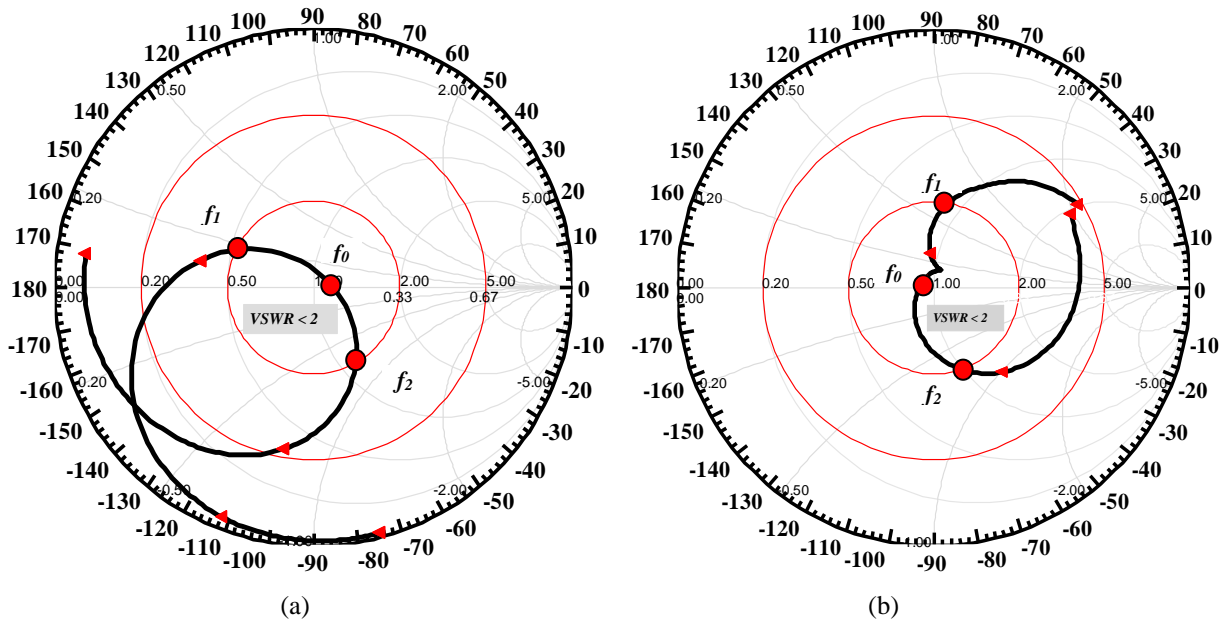
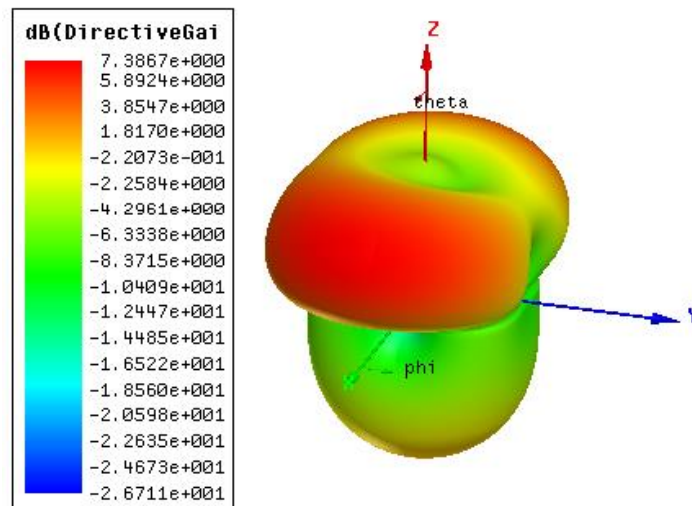
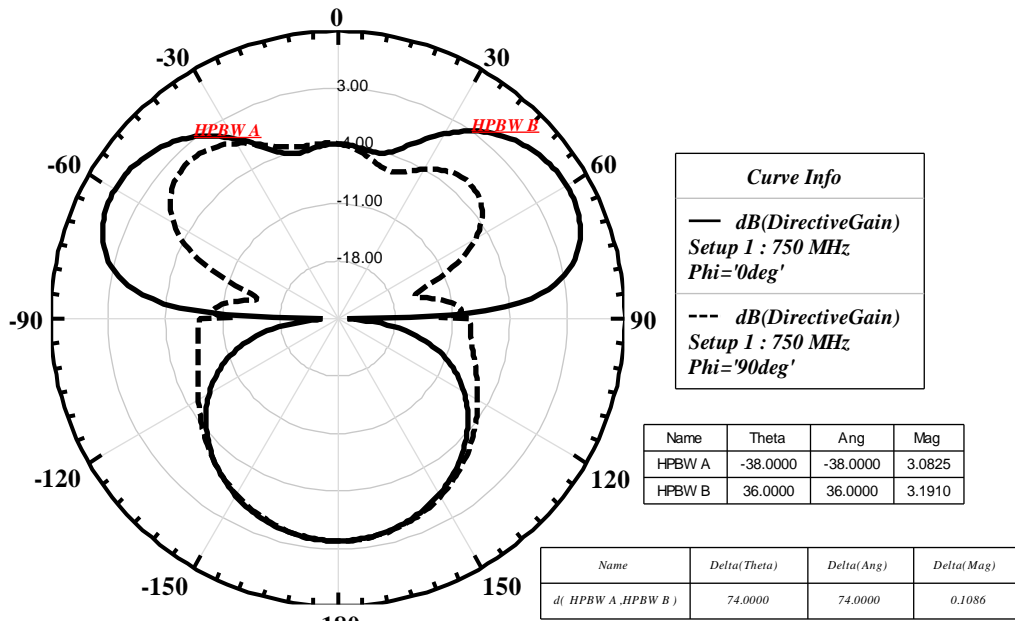


Figura 4.8 – Impedância sobre as cartas de Smith das PMA com refletor: a) cana-de-açúcar 4 folhas; b) quadrada.

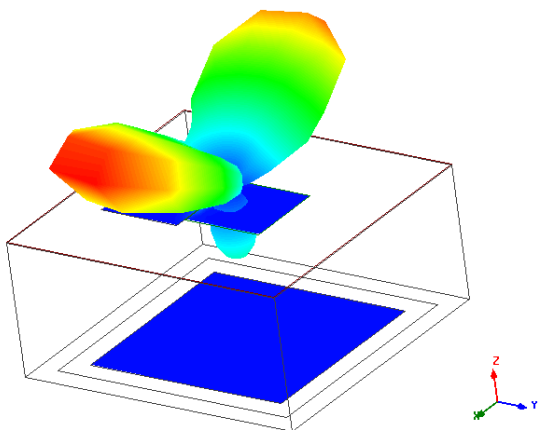
A Figura 4.9 apresenta o diagrama de irradiação da antena monopolo impresso quadrada com refletor, simulada na frequência de 750 MHz. A antena apresentou ganho máximo de 7,38 dB (a), na direção *broadside*, com ângulo de abertura, no plano-E (b), de aproximadamente 57°. A magnitude (A/m) da distribuição da densidade de corrente na antena, conforme indicado na seção 3.1, ocorre com mais intensidade nas bordas que no centro da antena (b).



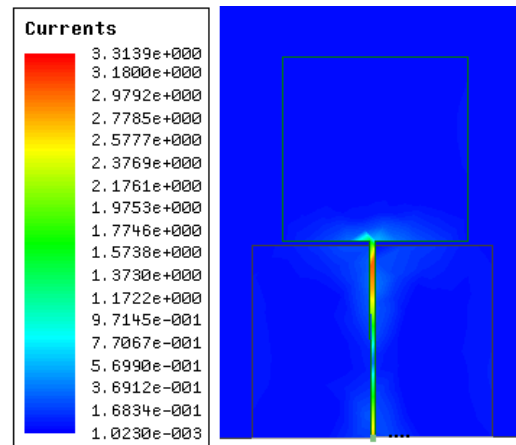
(a)



(b)



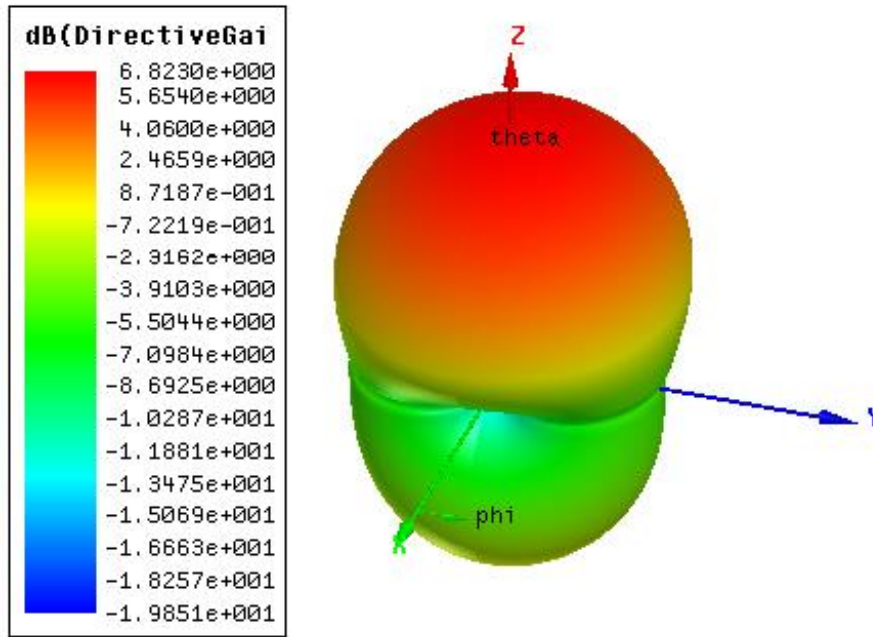
(c)



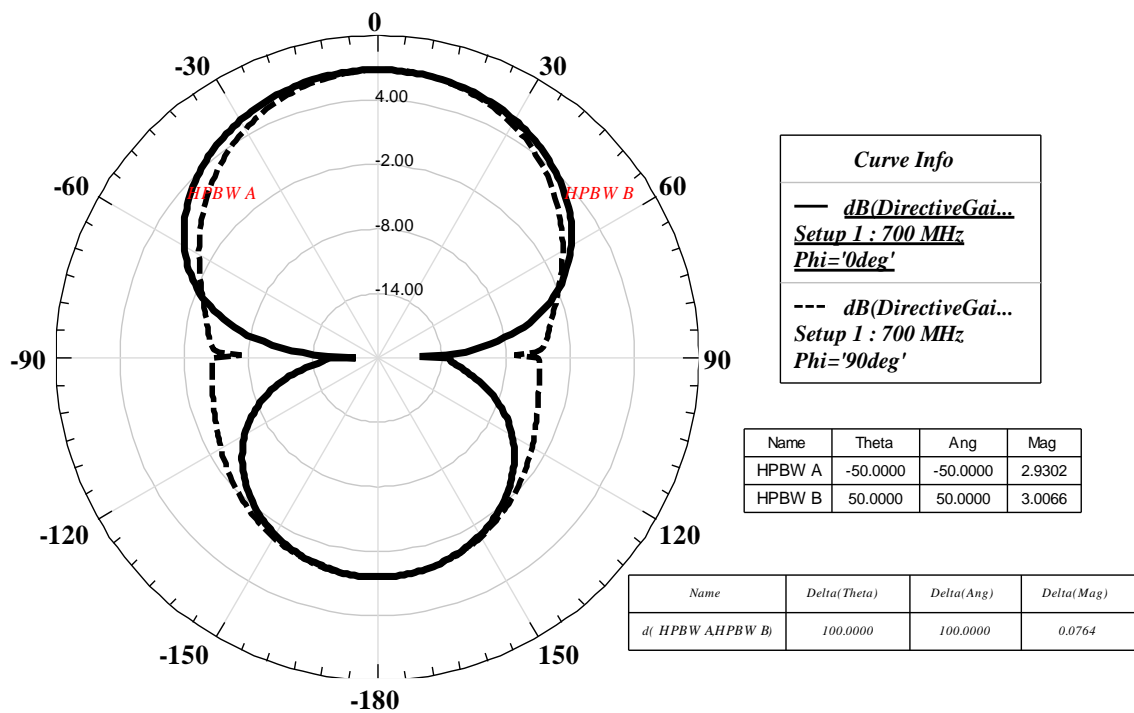
(d)

Figura 4.9 – Diagrama de irradiação da PMA quadrado com refletor em 750 MHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície.

A Figura 4.10 apresenta o diagrama de irradiação 3-D, 2-D da antena cana-de-açúcar 4 folhas com refletor simulada em 700 MHz. A antena apresentou ganho máximo de 6,82 dB na direção *broadside*, com ângulo de abertura no plano-E de meia potência de aproximadamente 100 graus. A densidade de corrente de superfície (b) apresenta maior magnitude (A/m) que a antena monopolo impresso quadrada.



(a)



(c)

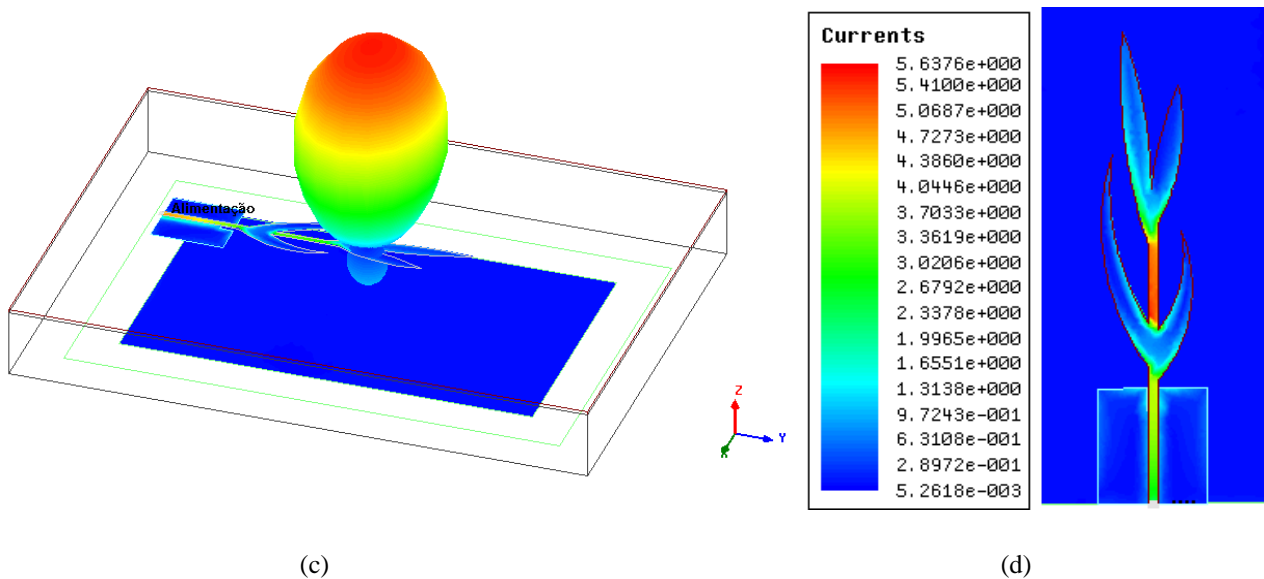


Figura 4.10 – Diagrama de irradiação da antena cana-de-açúcar 4 folhas com refletor em 700 MHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície.

A partir das Figuras 4.9 e 4.10(a) pode-se observar que a antena tipo monopolo impressa quadrada e a antena cana-de-açúcar 4 folhas simulada apresentaram ganhos praticamente iguais. Conforme os resultados apresentados, a antena cana-de-açúcar 4 folhas demonstrou compatibilidade entre as antenas simulada e medidas, com largura de banda de 150 MHz, cobrindo a faixa de 4G, redução nas dimensões de L e W e com diferença na frequência de ressonância entre a antena medida e a exigida para 4G (750 MHz) de 0,13%.

4.2.1.2 Antena Monopolo Impressa Bioinspirada na Planta de Cana-de-Açúcar de 3 Folhas

A partir dos resultados apresentados no projeto da antena cana-de-açúcar, foi simulado uma antena bioinspirada na planta de cana-de-açúcar com 3 folhas objetivando abarcar toda a largura de banda da faixa de 4G (108 MHz).

A Tabela 4.4 apresenta as dimensões, em mm, da antena cana-de-açúcar de 3 folhas para 700 MHz. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, e o comprimento do corte no plano de terra (L_S) de melhor resultado foi de 2,22 mm. As dimensões do refletor utilizado foram de: comprimento, $L_R = 180$ mm; largura, $W_R = 80$ mm, com espessura, $h = 1,5$ mm, separado por uma distância de 14,6 mm, e volume total de $231,84 \text{ cm}^3$, uma redução do volume total de 93,8%.

Tabela 4.4 – Dimensões (mm) da antena cana-de-açúcar de 3 folhas para 4G

Antena	L	Ajuste	W	Ajuste	L_{PT}	Ajuste	W_{PT}	Ajuste
Cana-de-açúcar 3 folhas	93,2	93,61	28,89	28,77	65,76	65,22	40,57	40

A antena cana-de-açúcar de 3 folhas com refletor, suas dimensões e a comparação com a antena com geometria quadrada com refletor pode ser observada na Figura 4.11. Assim como na seção anterior, o melhor resultado introduziu o refletor a uma distância de 14,6 mm.

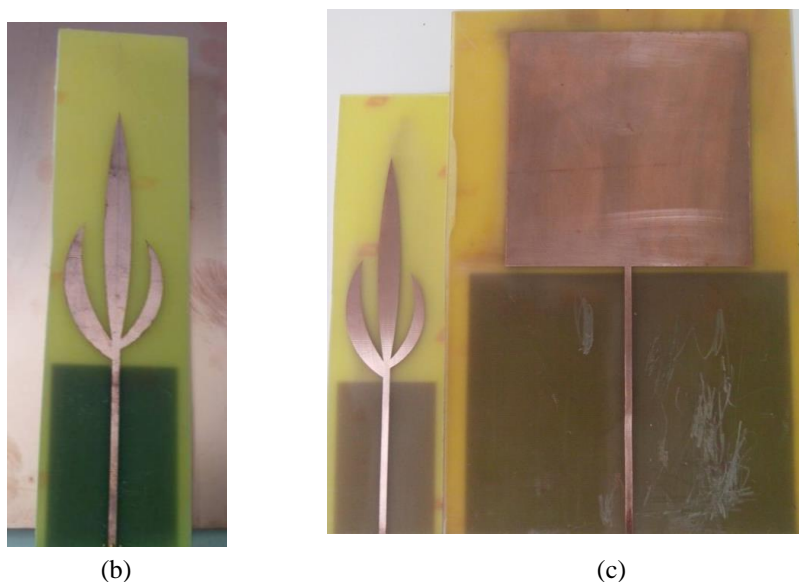
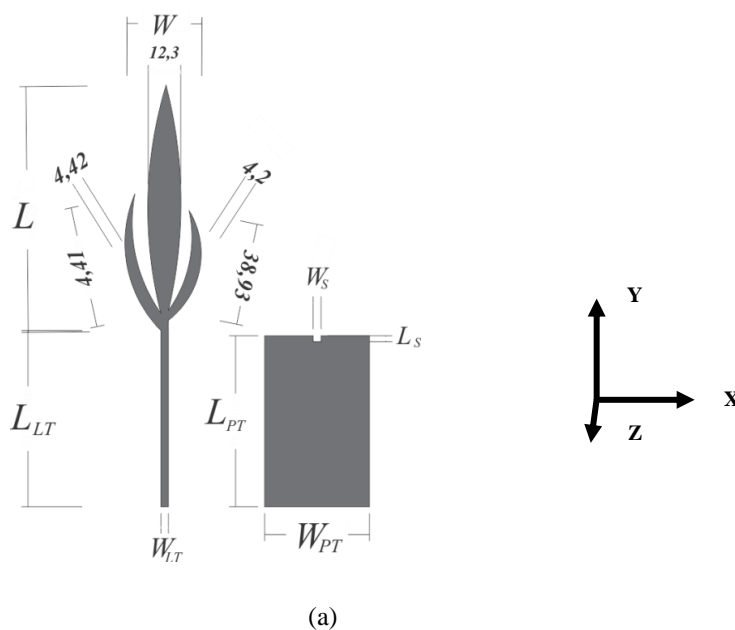


Figura 4.11 – Dimensão da antena cana-de-açúcar de 3 folhas com refletor: b) antena cana-de-açúcar 3 folhas com refletor medida, c) comparação antena cana-de-açúcar 3 folhas e PMA quadrada medida.

A Figura 4.12 apresenta a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da

antena cana-de-açúcar de 3 folhas com refletor. Na Tabela 4.2 têm-se os valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância da antenna cana-de-açúcar de 3 folhas para 700 MHz. Nelas nota-se que o desvio de frequência entre a antenna simulada e medida foi de 9 MHz, representando um erro de 1,19%. Neste projeto a antenna simulada e medida cobrem a faixa de 4G para 700 MHz. Pelos resultados da Tabela 4.5 é possível verificar que a antenna medida apresentou largura de banda 23,63% maior que a simulada.

Tabela 4.5 – Valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância da antenna de cana-de-açúcar 3 folhas com refletor

	<i>Antena</i>	<i>BW (MHz)</i>	<i>f₁ (MHz)</i>	<i>f₂ (MHz)</i>	<i>f₀ (MHz)</i>
1	Simulação	126	691	817	751
2	Medição	165	637	802	742

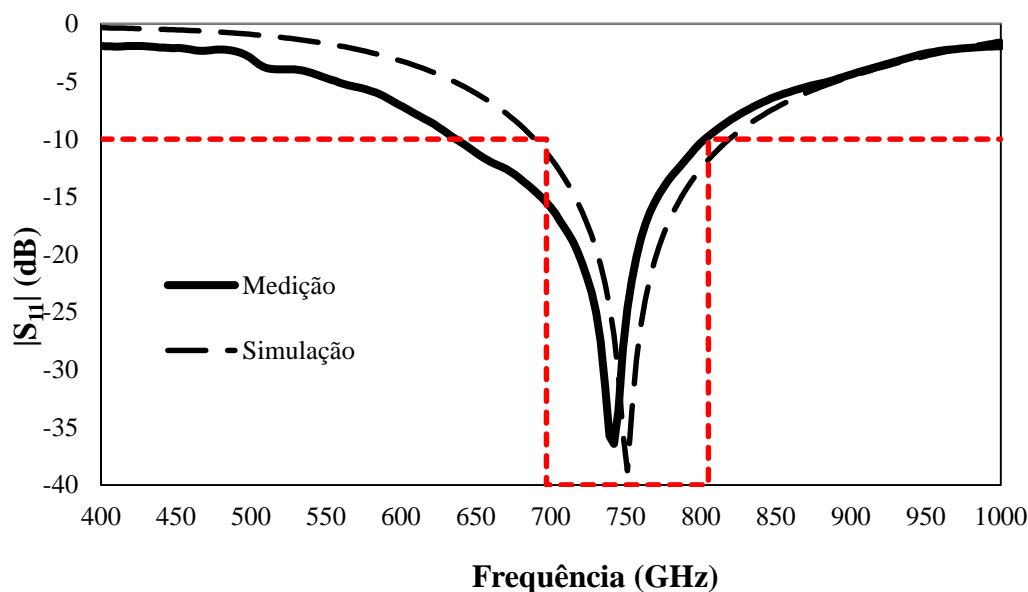
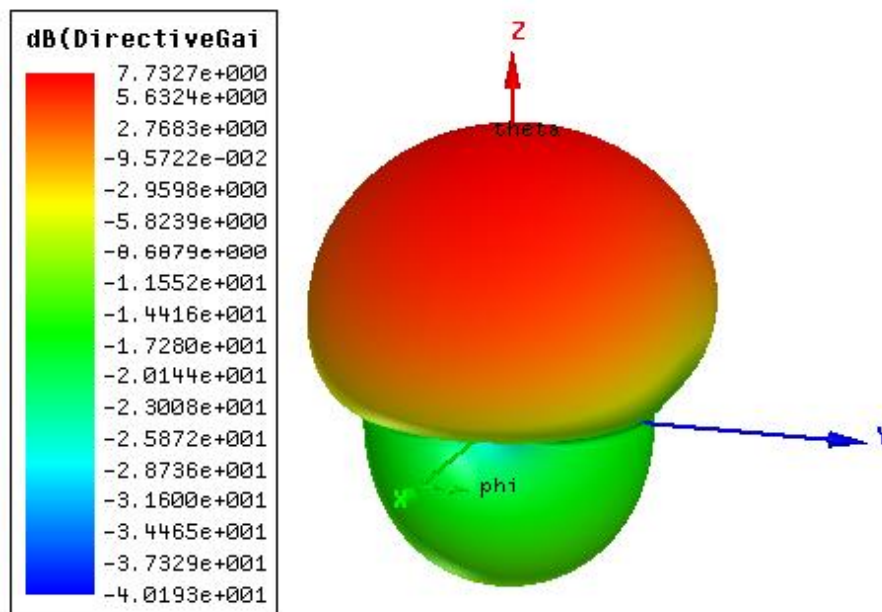
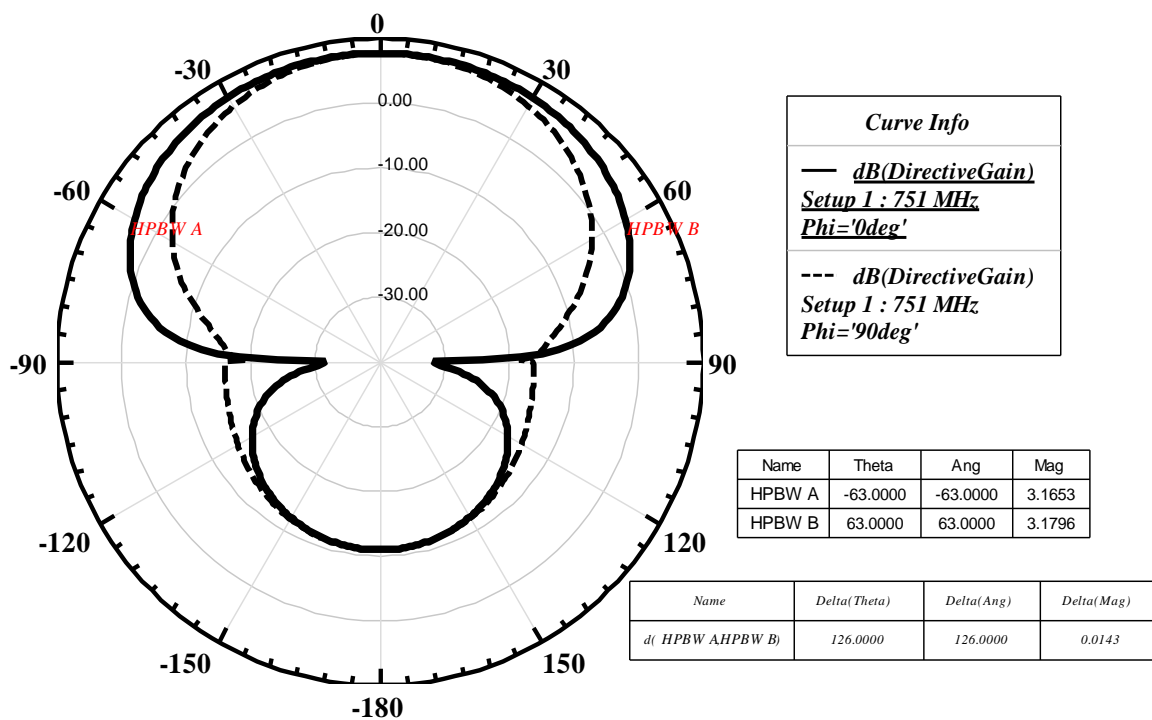


Figura 4.12 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antenna cana-de-açúcar 3 folhas com refletor.

Na Figura 4.13 são apresentados o diagrama de irradiação 2-D e 3-D da antenna cana-de-açúcar 3 folhas com refletor em 751 MHz. A antenna obteve 7,73 dB de ganho máximo na direção *broadside*, com largura de feixe de 126 graus no plano-E.



(a)



(b)

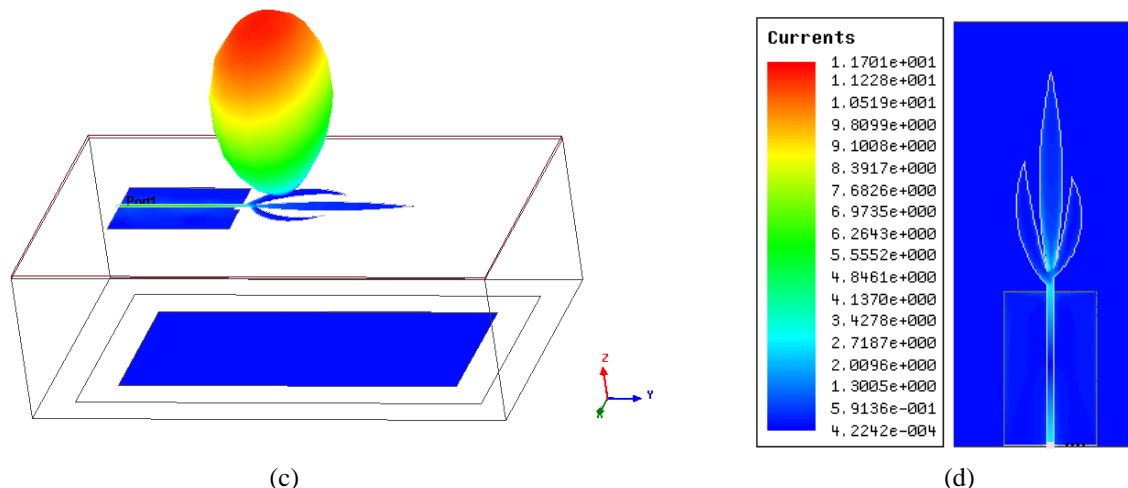


Figura 4.13 – Diagrama de irradiação da antena cana-de-açúcar 3 folhas com refletor em 751 MHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície.

Na Figura 4.14 é observada a impedância sobre a Carta de Smith da antena cana-de-açúcar 3 folhas com refletor simulada das frequências de 400 MHz a 1 GHz. A parte da curva que se aproxima do valor normalizado indicando as frequências onde há o casamento das impedâncias próximo de 50Ω . A curva vermelha interna indica o VSWR menor que 2, ou seja, as frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

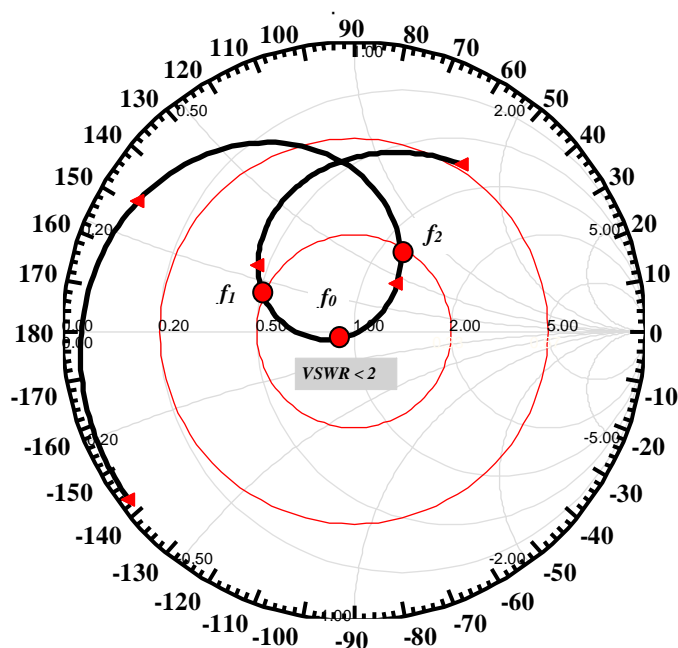


Figura 4.14 – Impedância sobre a carta de Smith da antena cana-de-açúcar 3 folhas com refletor.

Conforme observado a antena medida obteve resposta em frequência próxima da antena simulada, com largura de banda de 165 MHz cobrindo toda a frequência da faixa de 700 MHz definida pela Resolução 625 da ANATEL. A antena com geometria

bioinspirada apresentou uma redução na largura do *patch* (W) de 76,36% e no comprimento da antena (L) 13,32%, quando comparada a antena monopolo quadrada.

Na próxima seção serão abordados os resultados das antenas simuladas e medias para a faixa alta de 4G (2,5 GHz).

4.2.2 Antenas com Refletor para Faixa de 2,5 GHz

Para a faixa de 2,5 GHz foi projetado, simulado e medido antenas tipo monopolo impresso e antenas do tipo *patch* com geometrias quadradas e bioinspiradas. As antenas com geometrias quadradas tinham como o objetivo servir de comparação com a antena com geometrias bioinspiradas numa folha elíptica (PMA) com refletor e numa flor de tulipa (*patch*).

A Tabela 4.6 apresenta as dimensões, em mm, da antena monopolo impresso quadrada para 2,5 GHz. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, o comprimento do corte no plano de terra (L_S) de melhor resultado foi de 2 mm. A geometria da antena simulada e medida segue o modelo apresentado na Figura 4.3. Na Tabela 4.7 têm-se os valores medidos e simulados de largura de banda e frequências ressonância da antena tipo monopolo impresso quadrada para 2,5 GHz com refletor. As dimensões do refletor utilizado foram de: comprimento, $L_R = 130$ mm; largura, $W_R = 130$ mm, com espessura, $h = 1,5$ mm, separado por uma distância de 60 mm, e volume total de $1039,35$ cm³.

Tabela 4.6 – Dimensões (mm) da PMA quadrada para 2,5 GHz

<i>Antena</i>	<i>L</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W</i>	<i>Ajuste</i>	<i>L_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>
Quadrado 2,5 GHz	28,6	29	28,6	29	28,6	28	57,21	60

Tabela 4.7 – Valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância da PMA quadrada para 2,5 GHz com refletor

<i>Antena</i>	<i>BW (MHz)</i>	<i>f₁ (GHz)</i>	<i>f₂ (GHz)</i>	<i>f₀ (GHz)</i>
1 Simulação	1800	1,78	3,58	2,54
2 Medição	2240	1,80	4,04	2,46

Como observado as antenas medidas e simulada apresentaram resultados aproximados o que indica a consistência do projeto. A seguir são apresentados os

resultados da antena bioinspirada em uma folha elíptica com refletor para faixa de 2,5 GHz. Na estrutura são inseridas aberturas calculadas de acordo com o número de ouro. O objetivo dos cortes na estrutura é de reduzir a largura de banda. A resposta em frequência e a largura de banda da antena de folha elíptica são comparadas com os resultados da antena monopolo impresso quadrada com refletor.

4.2.2.1 Antena de Folha Elíptica com Refletor para Faixa de 2,5 GHz

Para o uso na tecnologia 4G, operando na faixa de frequências de 2,5 GHz, foi desenvolvida uma antena tipo monopolo impresso bioinspirada numa folha elíptica com refletor. Para adequação da largura de banda foram realizados cortes na estrutura da folha. Esses cortes foram calculados de acordo com o número de ouro aplicados a dimensão L e o W da antena.

Na dimensão L foram aplicadas as seguintes iterações:

$$L = 23 \text{ mm}$$

- 1º Iteração.

$$L_f = \frac{23}{1,618} = 14,2 \text{ mm}$$

- 2º Iteração – $14,2/1,618 = 8,8 \text{ mm}$;

$$L_f = \frac{14}{1,618} = 8,8 \text{ mm}$$

Ajustado para $L_f = 8,6 \text{ mm}$

Na dimensão W foi realizada apenas uma iteração.

$$W = 3 \text{ mm.}$$

- 1º Iteração.

$$W = \frac{3}{1,618} = 1,85 \text{ mm}$$

- Ajustado para $W_f = 1,6 \text{ mm}$.

Em que L_f é o comprimento do elemento e W_f é a largura do elemento.

Os resultados são comparados com a antena tipo monopolo impresso quadrada com refletor para mesma faixa de frequências. Ambas as antenas foram medidas e simuladas com o refletor separadas por uma distância de 60 mm.

A Tabela 4.8 apresenta as dimensões, em mm, da antena folha elíptica para 2,5

GHZ. A largura da linha transmissão (W_{LT}) calculada foi de 2,8mm. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, o comprimento do corte no plano de terra (L_S) foi de 1mm. As dimensões do refletor utilizado foram de: comprimento, $L_R = 44$ mm; largura, $W_R = 22$ mm, com espessura, $h = 1,5$ mm, separado por uma distância de 20 mm, e volume total de $20,81 \text{ cm}^3$, uma redução do volume total de 98%.

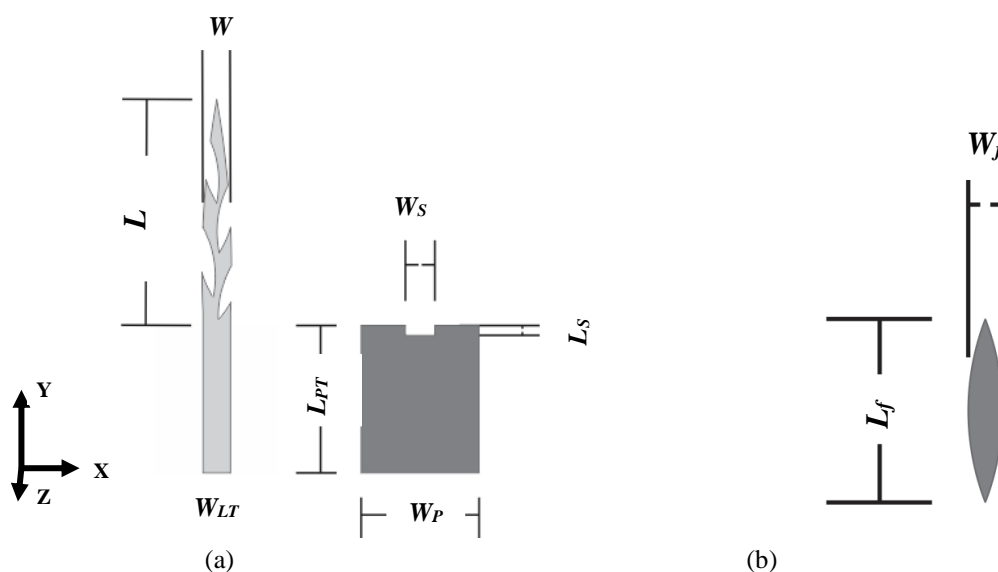
Tabela 4.8 – Dimensões (mm) da antena folha elíptica para 2,5 GHz

<i>Antena</i>	<i>L</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W</i>	<i>Ajuste</i>	<i>L_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>
Folha Elíptica	22,88	23	3,01	3	14,3	15	11,44	12

A antena com geometria bioinspirada numa folha elíptica com refletor, suas dimensões de projeto e a comparação com a antena monopolo impresso quadrada são visualizadas na Figura 4.15.

Na Figura 4.16 pode-se observar a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA quadrada. A antena medida e simulada apresentaram diferença entre os picos de ressonância foi de 154 MHz e de largura de banda de 440 MHz.

Na Figura 4.17 é observado a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medidos e simulados da antena de folha elíptica com refletor. A antena medida e simulada apresentaram uma diferença na frequência de ressonância de 2 MHz, inferior a 1%, com largura de banda de 300 MHz para a antena simulada e de 500 MHz para a antena medida.



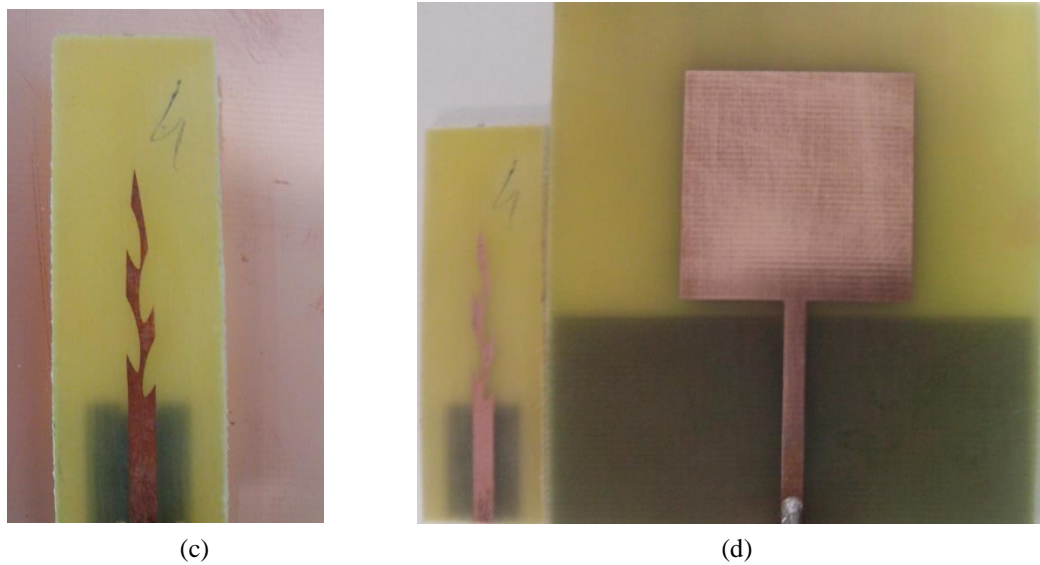


Figura 4.15 – Dimensões de projeto da antena folha elíptica para 2,5 GHz: a) dimensões da antena com abertura; b) dimensão da folha com aplicação do número de ouro; c) antena com refletor; d) comparação entre a estrutura da antena bioinspirada e PMA quadrada.

Na Figura 4.18 tem-se a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medidos entre as antenas folha elíptica medida com refletor e o monopolo impresso quadrada com refletor. A Tabela 4.9 apresenta os valores medidos de largura de banda e frequências de ressonância da antena monopolo impresso quadrada com refletor e folha elíptica com refletor.

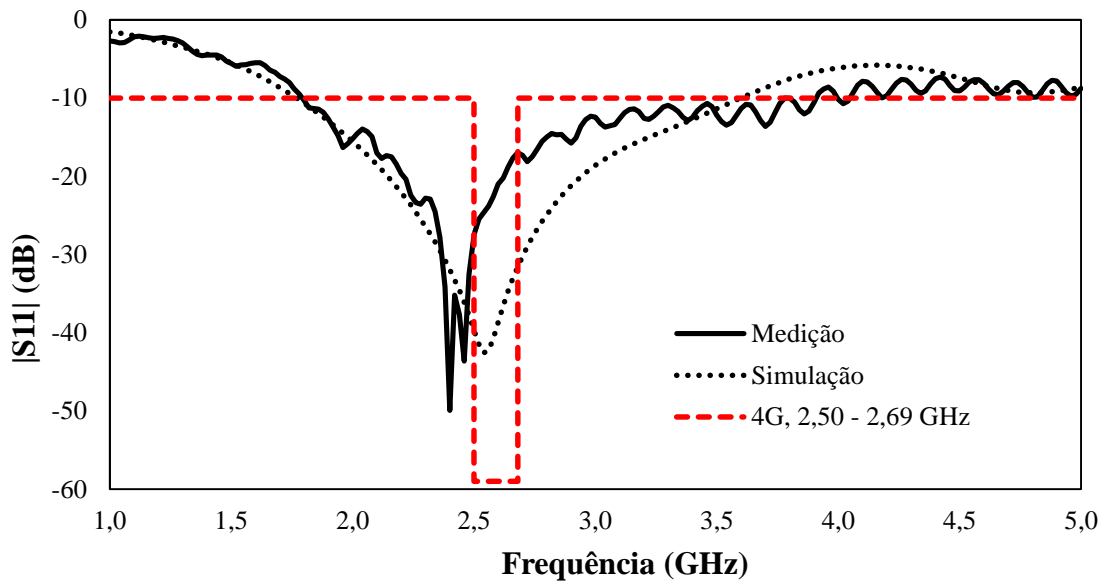


Figura 4.16 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA quadrada com refletor.

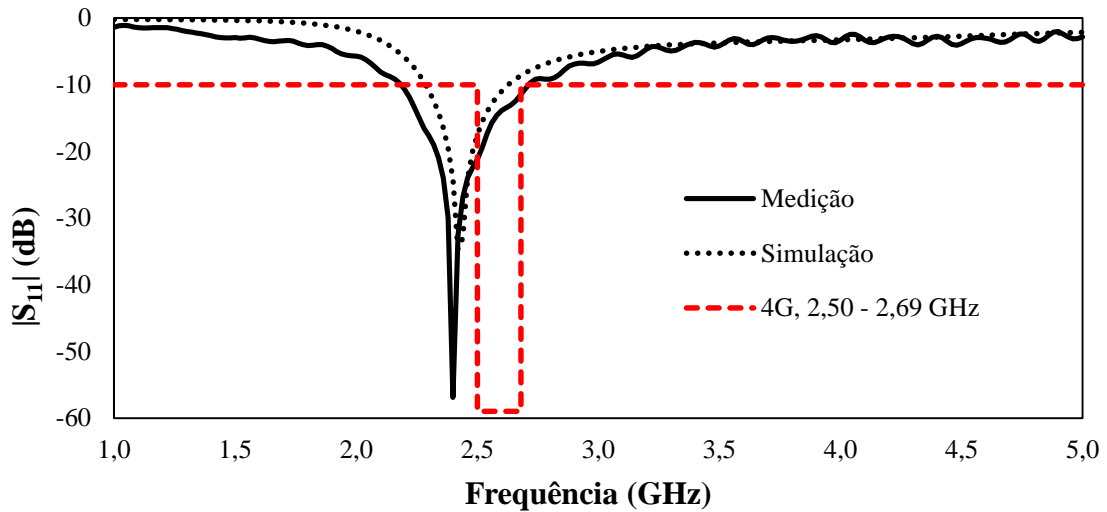


Figura 4.17 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antena folha elíptica com refletor.

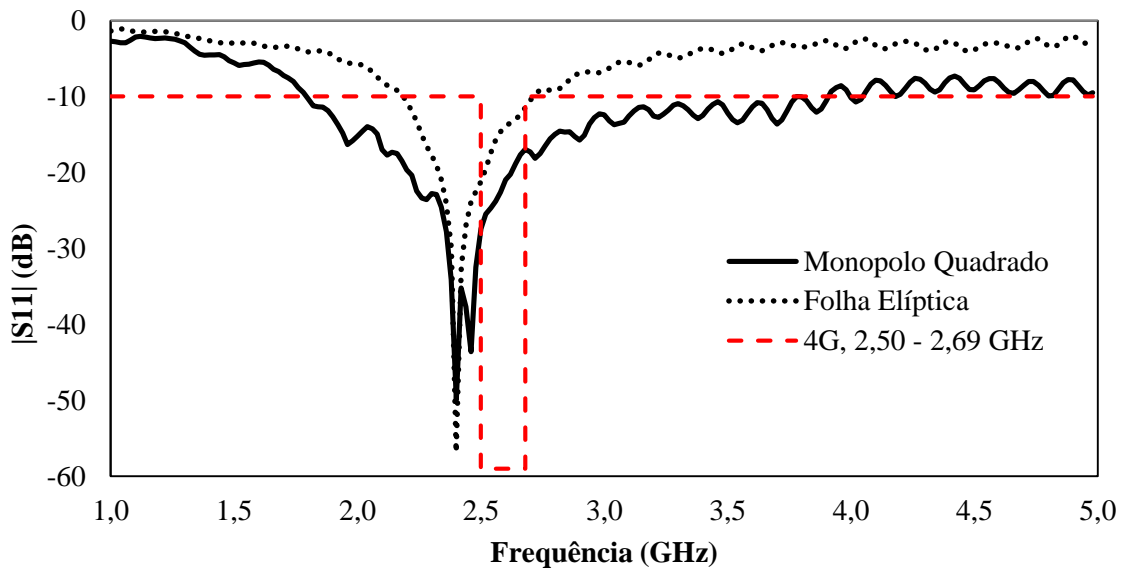


Figura 4.18 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido das antenas folha elíptica e PMA quadrada com refletor.

Tabela 4.9 – Valores medidos de largura de banda e frequências de ressonância da antena folha elíptica com refletor e PMA quadrada com refletor

	<i>Antena</i>	<i>BW (MHz)</i>	<i>f₁ (GHz)</i>	<i>f₂ (GHz)</i>	<i>f₀ (GHz)</i>
1	Folha elíptica	500	2,20	2,70	2,40
2	Quadrado	2240	1,80	4,04	2,46

Na Figura 4.19 é apresentado as impedâncias sobre as cartas de Smith simulada das

antenas folha elíptica com refletor e o monopolo impresso quadrada com refletor para frequências de 1 GHz a 5 GHz. As curvas vermelhas internas indicam o VSWR menor que 2, ou seja, as frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

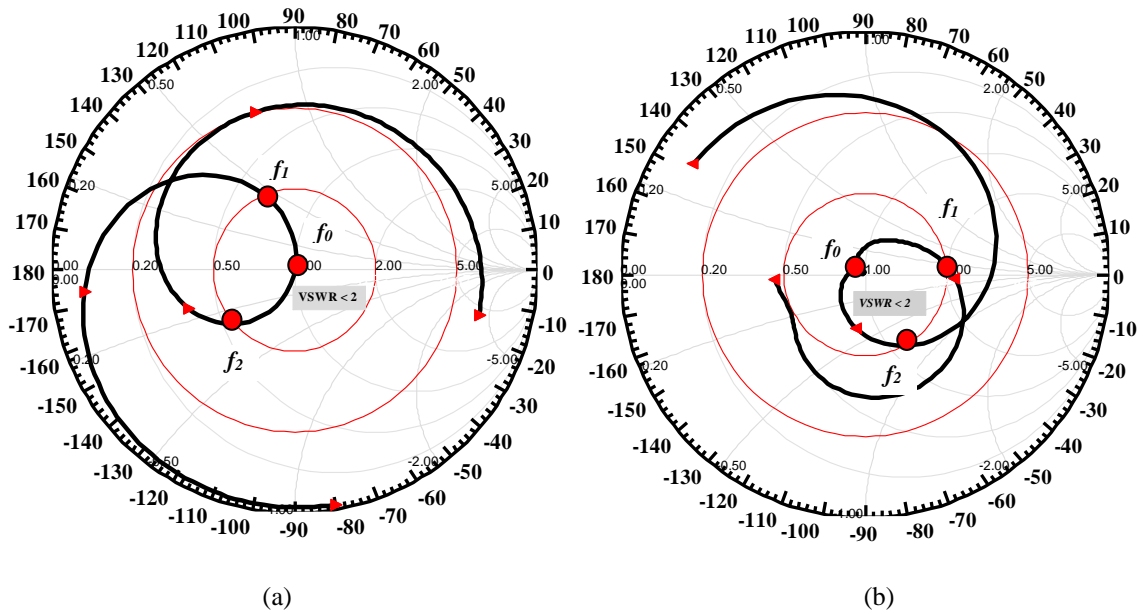
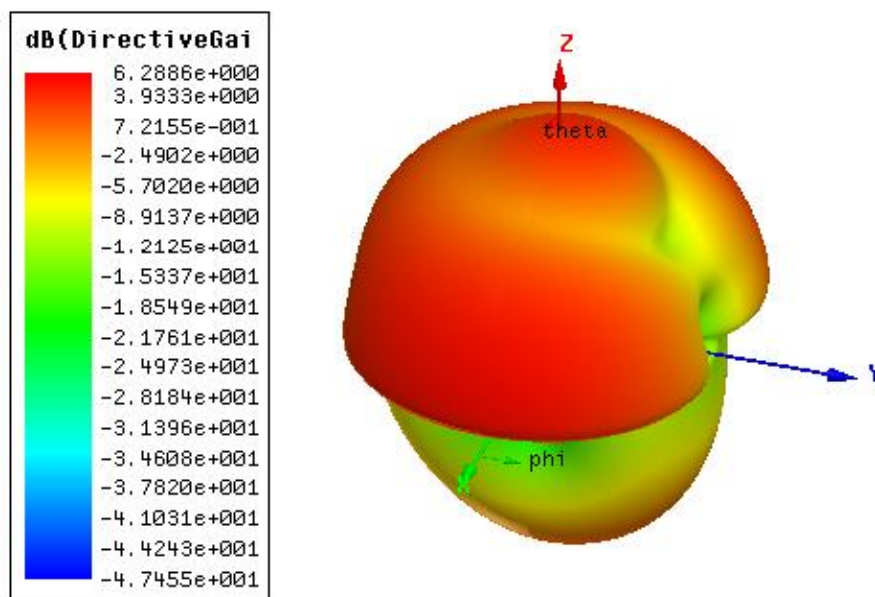
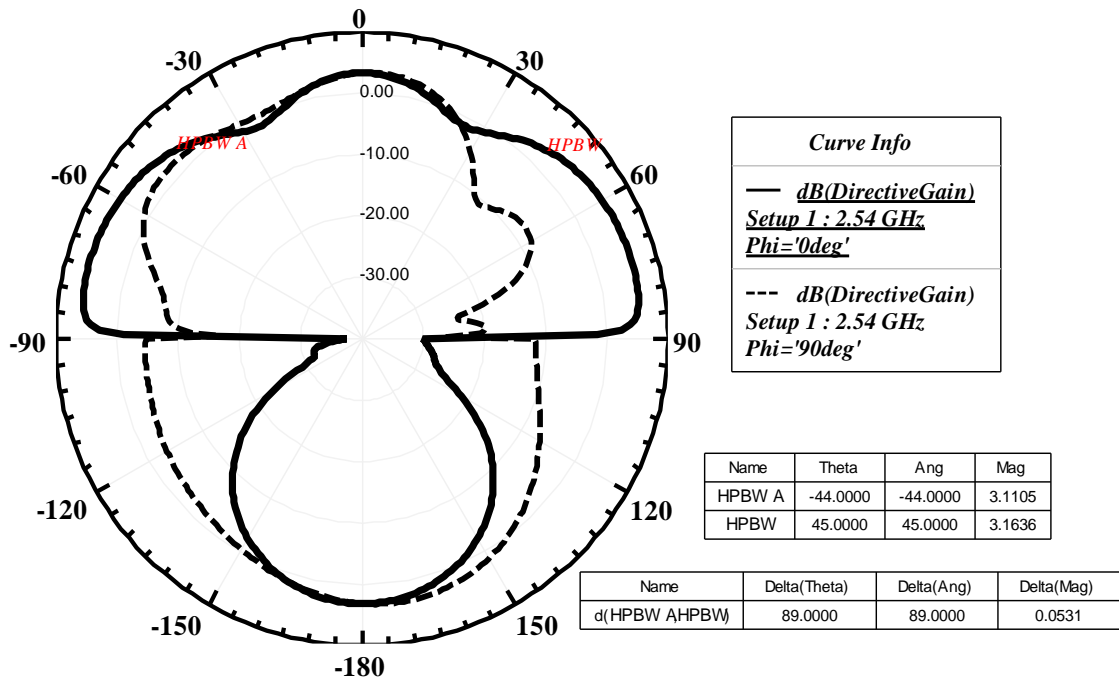


Figura 4.19 – Impedância sobre as cartas de Smith da PMA com refletor: (a) folha elíptica, (b) quadrada.

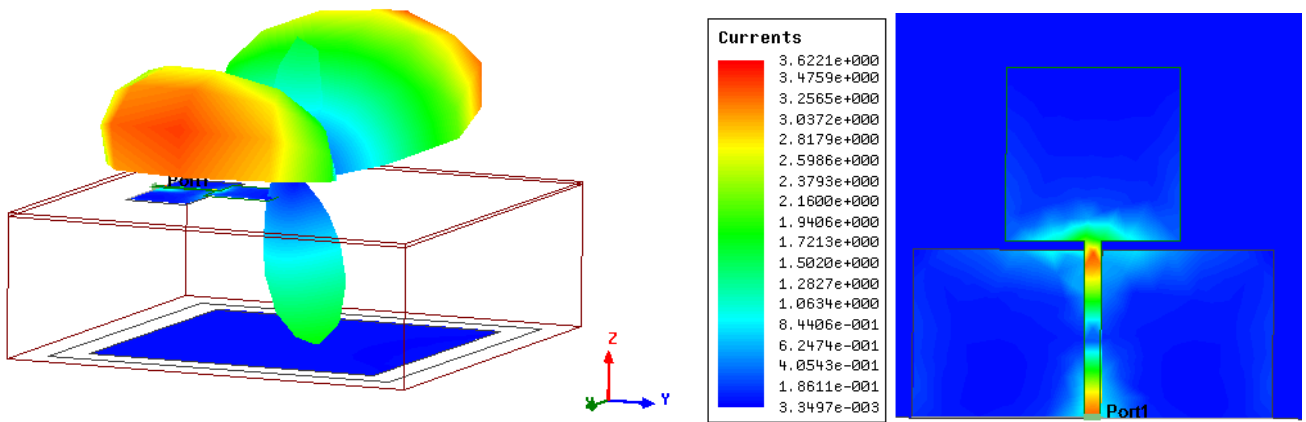
Na Figura 4.20 é observado o diagrama de irradiação da antena monopolo impresso quadrada com refletor simulado em 2,55 GHz. Observa-se que o ganho máximo de 6,28 dB, ocorre na direção *broadside*, com ângulo de abertura de aproximadamente 80 graus no plano-E.



(a)



(b)

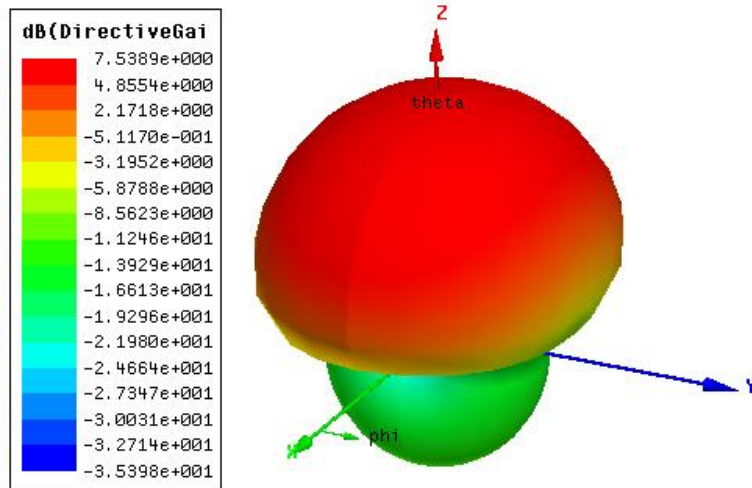


(c)

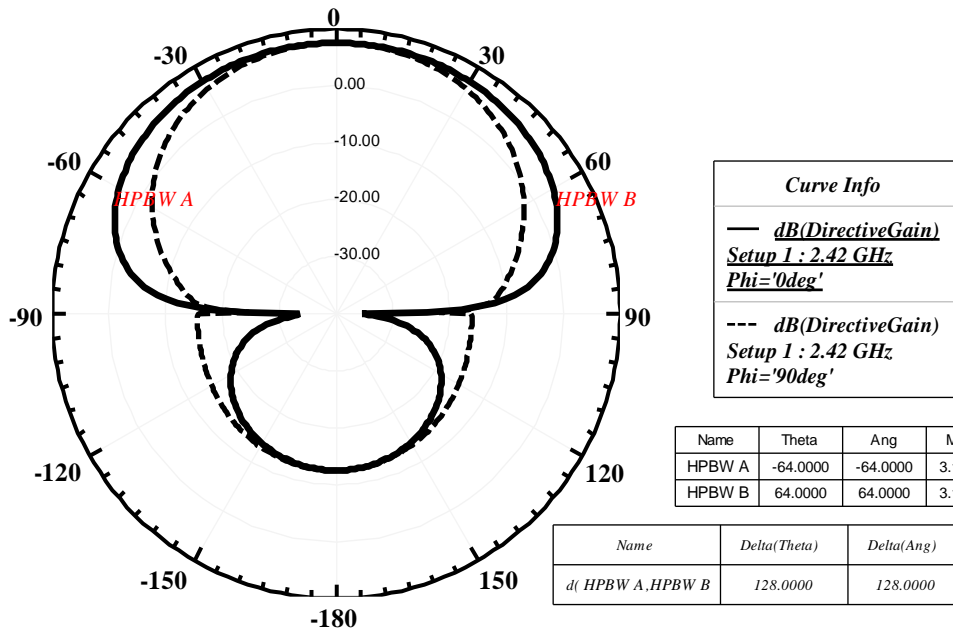
(d)

Figura 4.20 – Diagrama de irradiação da PMA quadrada com refletor em 2,55 GHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície.

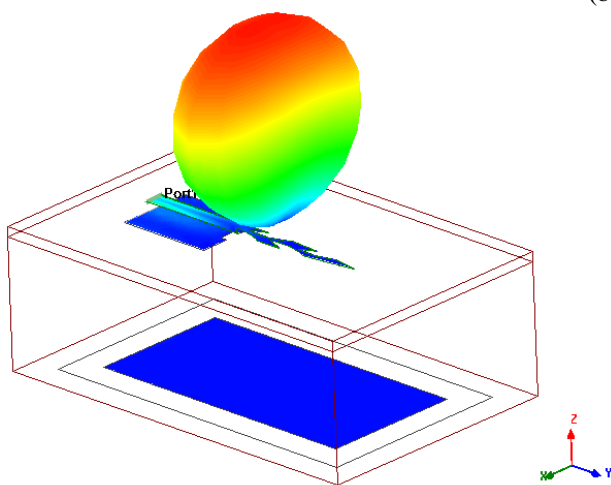
Na Figura 4.21 é apresentado o diagrama de irradiação da antena folha elíptica com refletor simulada em 2,4 GHz. A antena obteve ganho máximo de 7,53 dB na direção *broadside*, com ângulo de abertura de aproximadamente 128 graus no plano-E.



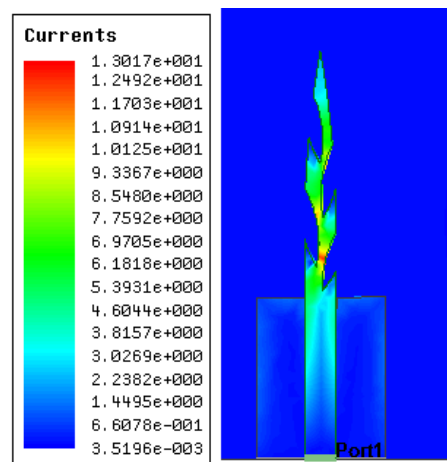
(a)



(b)



(c)



(d)

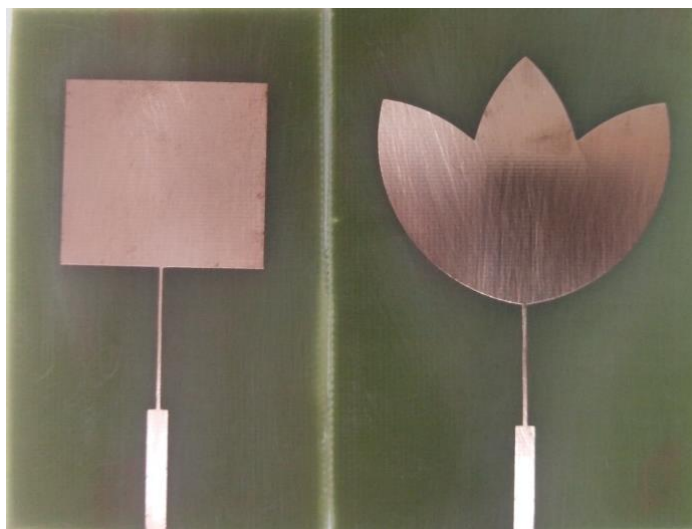
Figura 4.21 – Diagrama de irradiação da antena folha elíptica com refletor em 2,40 GHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H; c) campo distante; d) densidade de corrente de superfície.

Conforme a verificação dos resultados, a antena com geometria bioinspirada em uma folha elíptica apresentou uma redução da largura de banda de 77,68% quando comparada com a antena monopolo impresso quadrada. O uso da geometria bioinspirada possibilitou uma redução de 20,68% no comprimento da antena, e de 89,65% na largura da antena.

O uso da geometria bioinspirada possibilitou o aumento do perímetro das antenas, o que pode ter possibilitado uma melhor distribuição da densidade de corrente de superfície e com isto um projeto mais compacto quando comparado a geometria quadrada. Na próxima seção serão apresentados os resultados das antenas do tipo *patch* para faixa de 2,5 GHz.

4.2.2.2 Antenas do Tipo *Patch* Quadrada e Flor de Tulipa para 2,5 GHz

Para operação na faixa de frequências de 2,5 GHz (4G), foi desenvolvida uma antena do tipo *patch*, bioinspirada numa flor de tulipa. Seus resultados são comparados com um *patch* quadrado para mesma faixa de frequências. Os valores do projeto para a antena *patch* quadrada foram realizados pelas aproximações apresentadas na seção 3.1.2. A partir do perímetro da antena *patch* quadrada foi desenvolvida uma antena tipo *patch* com a geometria de uma flor de tulipa. Os ajustes da frequência de ressonância forma realizados no *software* Ansoft DesingerTM. Na Figura 4.22 são ilustradas as dimensões das antenas do tipo *patch*.



(a)

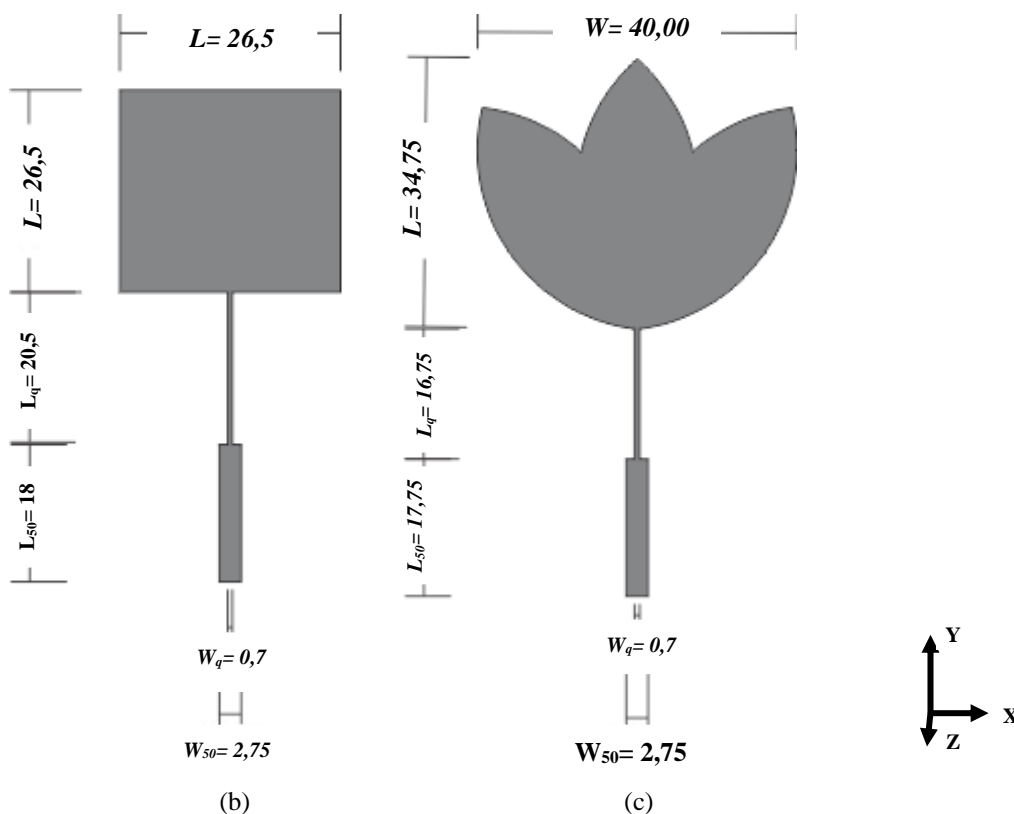


Figura 4.22 – Antenas do tipo patch: a) medidas; b) dimensões da antena quadrada; c) dimensões da flor de tulipa.

Na Figura 4.23 é apresentada a comparação da perda de retorno, parâmetro $|S_{11}|$ da antena quadrado patch para 2,5 GHz. A antena obteve largura de banda de 60 MHz ($f_1=2,56$ e $f_2=2,62$) com frequência ressonância (f_0) em 2,60 GHz.

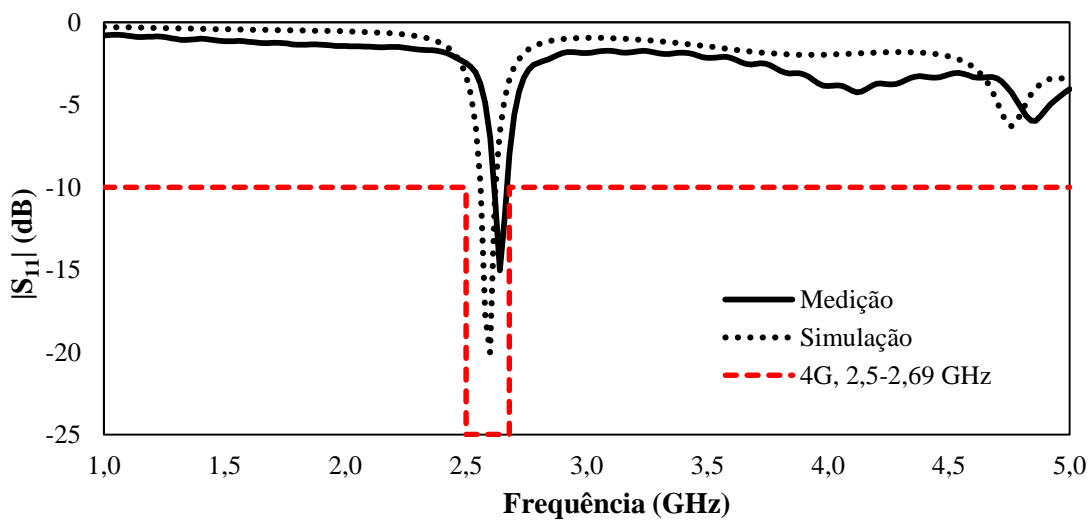


Figura 4.23 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antena do tipo patch quadrada.

O resultado da antena patch flor de tulipa medida e simulada pode ser observado

na Figura 4.24. As antenas medida apresentou largura de banda de 70 MHz ($f_1=2,55$ e $f_2=2,62$) com frequência de ressonância (f_0) em 2,54 GHz, e a simulada apresentou largura de banda de 57 MHz ($f_1=2,50$ e $f_2=2,57$) com frequência de ressonância (f_0) em 2,59 GHz, uma diferença de 50 MHz, ou seja, 1,9%. O resultado mostra uma relação significativa entre a simulação e a medição das antenas.

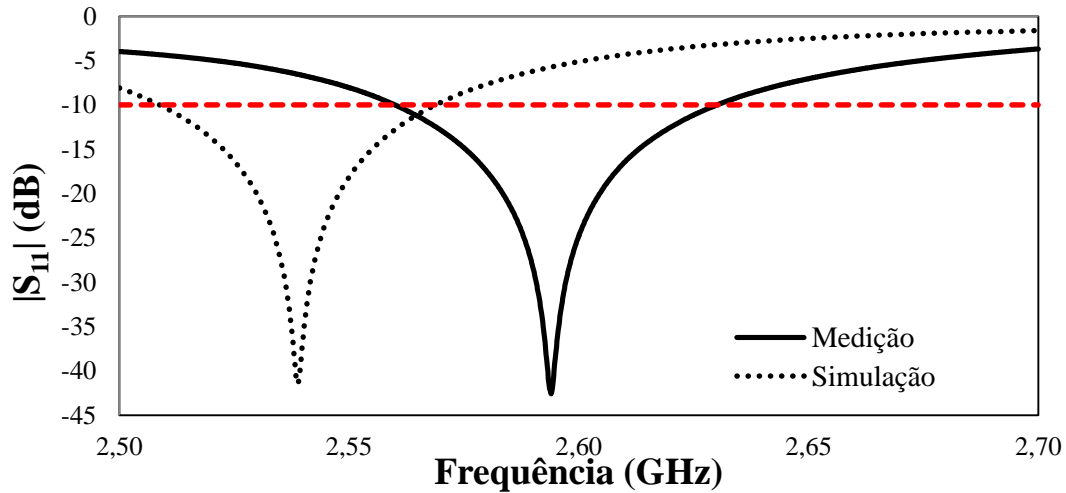


Figura 4.24 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antena *patch* flor de tulipa.

A comparação entre os resultados medidos das antenas *patch* quadrado e flor de tulipa são apresentados na Figura 4.25. Conforme os dados anteriores o *patch* quadrado medido apresentou maior largura de banda, com frequência de ressonância central próximas da faixa de 4G (2,5 GHz).

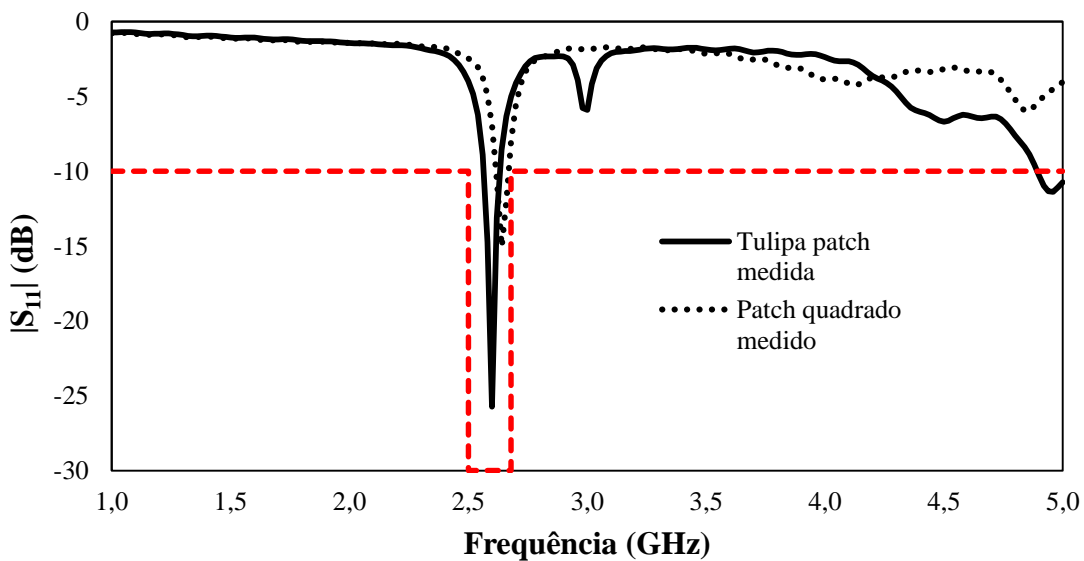


Figura 4.25 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado das antenas do tipo *patch* flor de tulipa e quadrada.

A Figura 4.26 apresenta as impedâncias sobre as cartas de Smith das antenas do tipo *patch* flor de tulipa e quadrada nas frequências de 2 GHz a 3 GHz. As antenas apresentam pequena parte da curva normalizada indicando que o casamento de impedâncias em 50Ω dá-se numa pequena faixa de frequências. A curva vermelha interna indica o VSWR menor que 2, ou seja, as frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

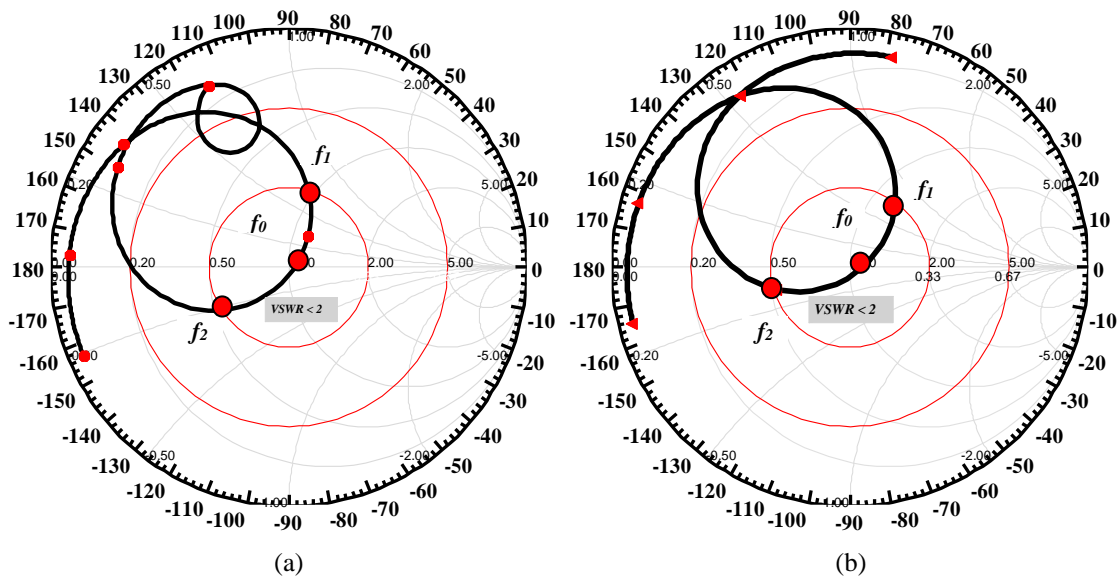
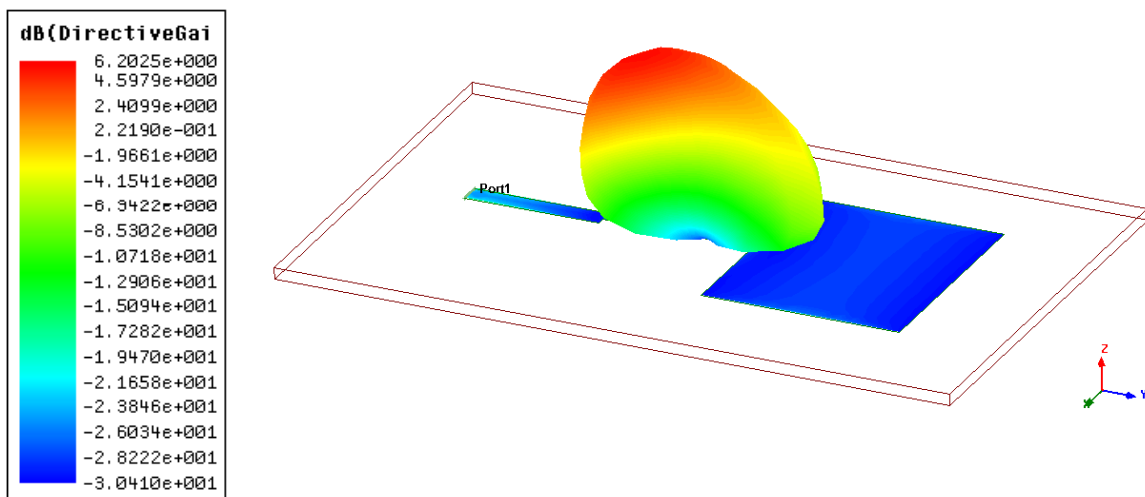
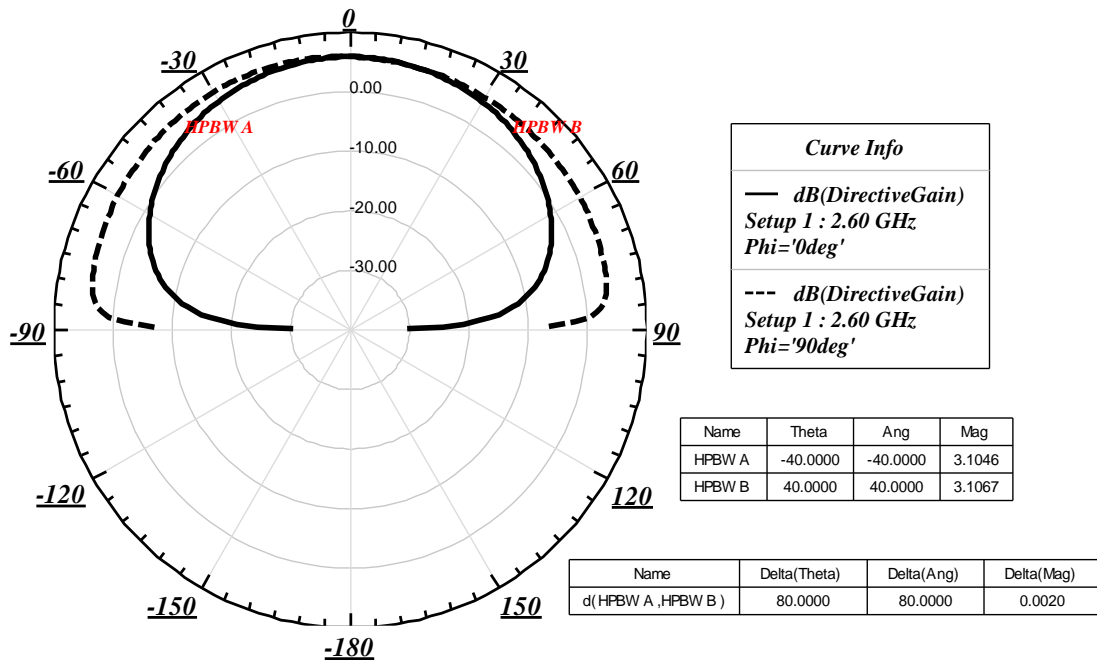


Figura 4.26 – Impedâncias sobre as cartas de Smith simuladas das antenas do tipo *patch*: a) flor de tulipa; b) quadrado.

A Figura 4.27 apresenta o diagrama de irradiação da antena *patch* quadrada em 2,6 GHz. O ganho máximo da antena, 6,20 dB, ocorre na direção *endfire*, o que é característico de antenas do tipo *patch*, com HPBW de 82°.



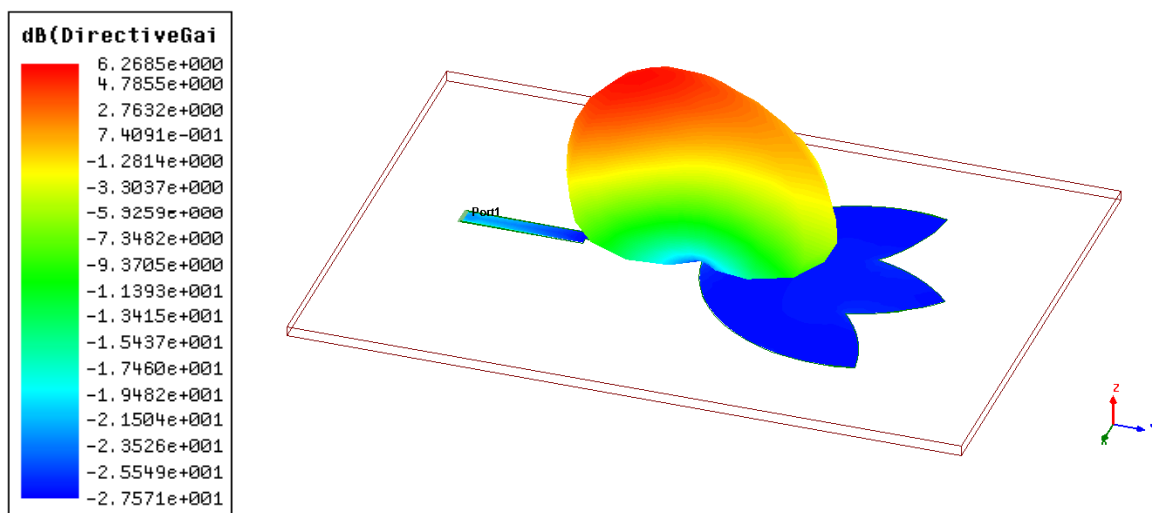
(a)



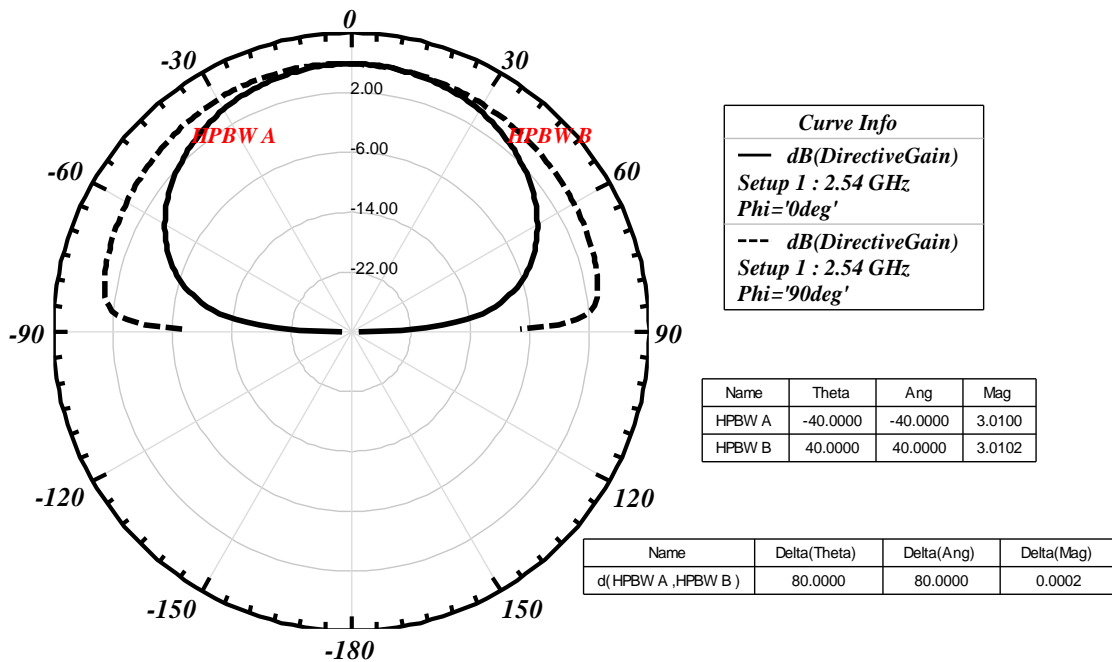
(b)

Figura 4.27 – Diagrama de irradiação 3-D da antena *patch* quadrada em 2,6 GHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H.

A Figura 4.28 apresenta o diagrama de irradiação da antena *patch* tulipa simulada em 2,56 GHz. O ganho máximo da antena, 6,26 dB, ocorre na direção *endfire* com HPBW de 82°.



(a)



(b)

Figura 4.28 – Diagrama de irradiação 3-D da antena *patch* flor de tulipa em 2,56 GHz: a) ganho, 3-D; b) 2-D plano-E e plano-H.

Pelos resultados é possível observar que a antena *patch* flor de tulipa apresentou uma dimensão, *W* e *L*, maior que o *patch* quadrado, com um pequeno ganho de 0,6 dB, comparação entre a Figura 4.27 e a 4.28.

Esta seção apresentou os resultados simulados e medidos das antenas tipo monopolo impresso e do tipo *patch* com geometrias bioinspiradas e quadradas para sistemas de 4G nas frequências de 700 MHz e 2,5 GHz. O uso da geometria bioinspirada nas antenas tipo monopolo impresso para faixa de 700 MHz apresentaram redução nas suas dimensões, bem como largura de banda mais próxima da faixa de 4G quando comparadas a antena monopolo impresso com geometria quadrada. Nas antenas do tipo *patch* a geometria bioinspirada apresentou um ganho superior ao da antena *patch* quadrada. Uma possível causa do maior ganho é a maior dimensão da antena *patch* flor de tulipa em relação à antena *patch* quadrada.

Na próxima seção são apresentados o projeto e os resultados das antenas tipo monopolo impresso para sistemas UWB.

4.3 Antena para Sistemas UWB

Para a tecnologia UWB foram projetadas, simuladas e medidas antenas com geometria bioinspirada em uma flor de tulipa, uma pétala de orquídea, folhas de oliveira e em uma flor de jasmim as quais preenchem os requisitos apresentados na seção 2.2.3 para as antenas UWB. O projeto de cada antena e seus resultados simulados e medidos são apresentados a seguir.

4.3.1 Antena Bioinspirada em uma Flor de Jasmim

Nesta seção é apresentado o projetado e os resultados simulados e medidos das antenas tipo monopolo planar com geometria bioinspirada em uma flor de jasmim e com geometria circular, para faixa de UWB. A partir da geometria circular foram realizadas iterações para definição das pétalas da flor, ou seja, foi alterado o raio do centro da corola da flor, no projeto as demais dimensões da antena não foram alteradas. Isto promoveu uma pequena redução da dimensão da antena monopolo impresso circular e a alteração da largura de banda da antena para cada iteração. As simulações dessa seção foram realizadas com o *software* Ansoft DesignerTM e seus resultados foram comparados com os obtidos no *software* HFSS. Quando comparados aos resultados medidos das antenas simuladas, em ambos os *softwares*, verificou-se um deslocamento para direita na primeira ressonância.

A Tabela 4.10 apresenta as dimensões, em mm, do monopolo circular. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, o comprimento do corte no plano de terra (L_S) de melhor resultado foi de 5mm.

Tabela 4.10 – Dimensões (mm) da PMA circular

<i>Antena</i>	<i>R</i>	<i>Ajuste</i>	<i>L_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>
Circular	10,64	10,6	17,74	17	39,91	40

Na Figura 4.29 são apresentadas as antenas com geometria circular, bioinspirada na flor de jasmim com 8 mm e 2 mm de corola. A aplicação da geometria bioinspirada promoveu uma redução no raio total do *patch* da antena. Para a antena flor de jasmim (8 mm) obteve-se uma redução de 14,19% e para a antena flor de jasmim (2mm) uma redução de 15,88%. Em pesquisa na bibliografia especializada foi verificado que esta é

a primeira tentativa de aplicação da geometria bioinspirada em flor a partir de um monopolo impresso com geometria circular.

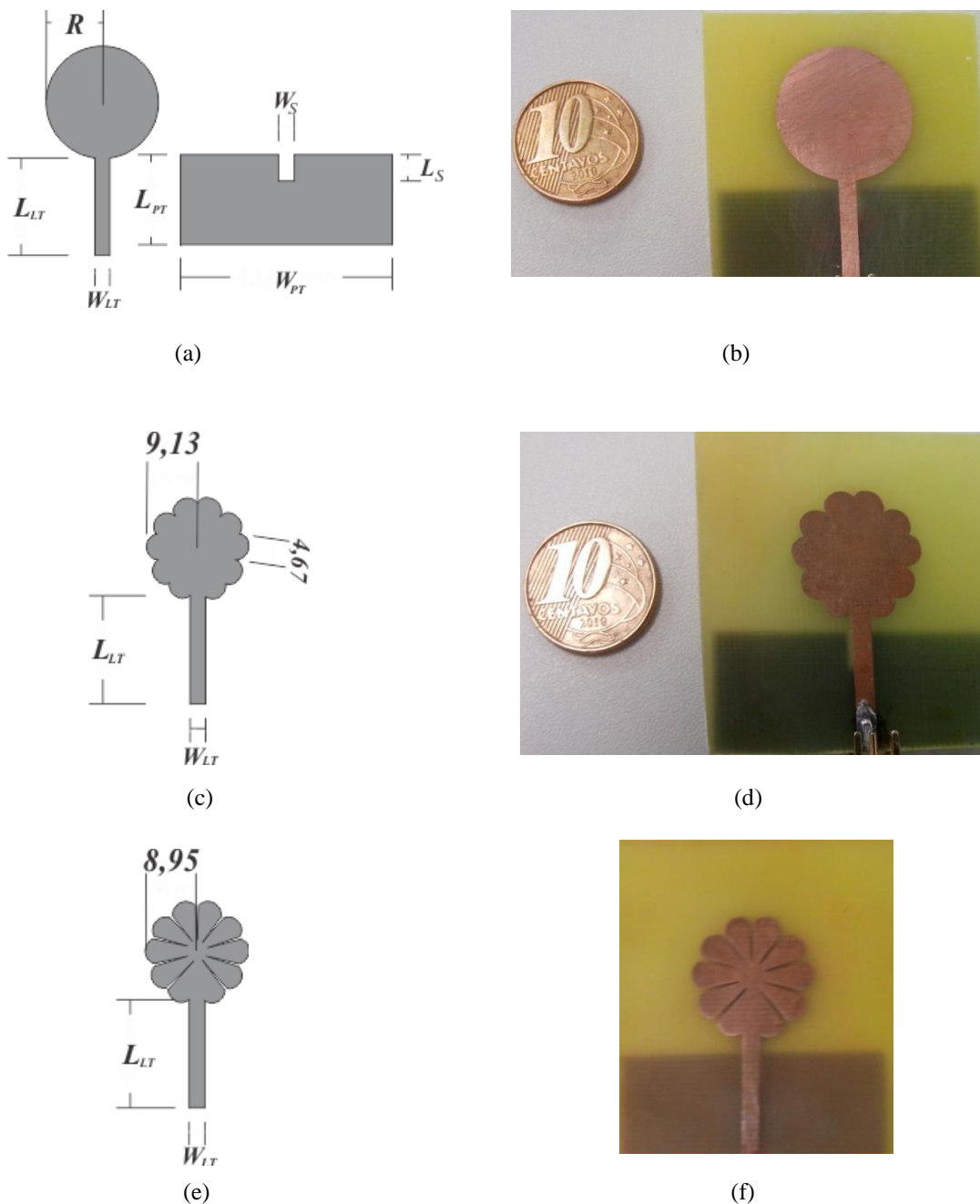


Figura 4.29 – PMA: a) geometria circular; b) protótipo; c) geometria flor de jasmim (8 mm); d) protótipo; e) geometria flor de jasmim (2 mm); f) protótipo.

A Figura 4.30 apresenta a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado no Ansoft Designer™ e no HFSS. Como observado em ambos os casos há um deslocamento da primeira ressonância em -10 dB. O resultado simulado apresentado pelo Ansoft Designer™ obteve mais próximo do resultado medido com diferença da primeira ressonância de 190 MHz.

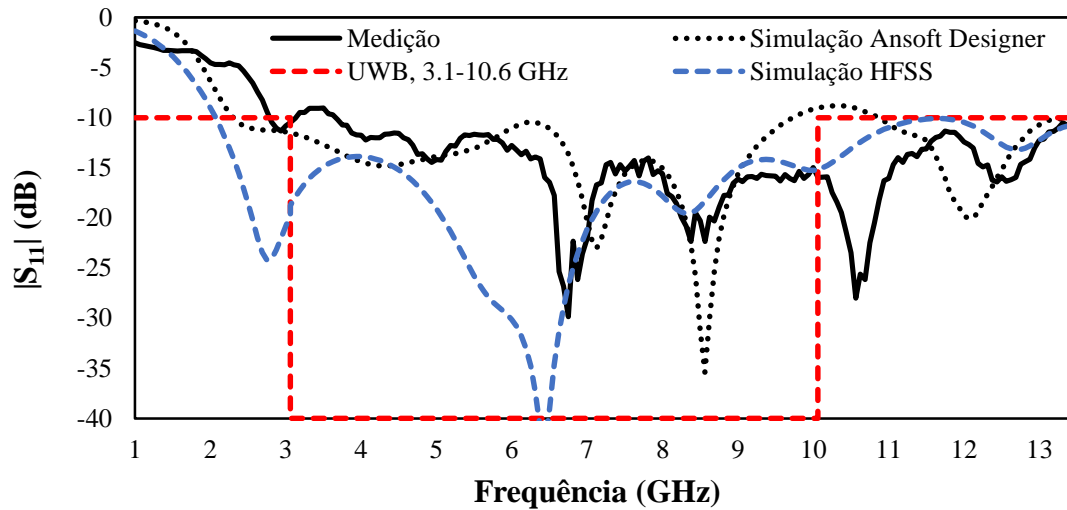


Figura 4.30 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA circular.

Na Figura 4.31 observa-se a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antena da flor de jasmim (8 mm). O uso da geometria bioinspirada proporcionou um aumento da largura de banda da antena simulada e medida.

A Figura 4.32 apresenta a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA flor de jasmim (2 mm). Pelo resultado pode-se observar que o uso da geometria bioinspirada proporcionou uma alteração da largura de banda e da primeira frequência de ressonância. A nova largura de banda se aproxima da banda X (8 – 12 GHz). Os valores medidos e simulados (Ansoft DesignerTM) de largura de banda e frequência de ressonância dos monopolos impressos: circular, flor de jasmim (8mm) e (2mm) são observados na Tabela 4.11.

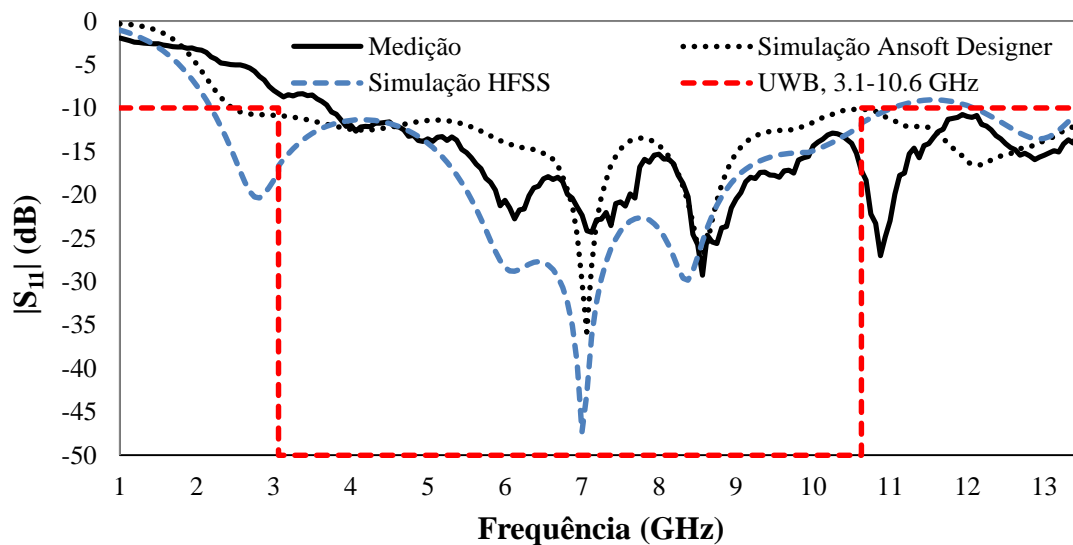


Figura 4.31 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA flor de jasmim (8 mm).

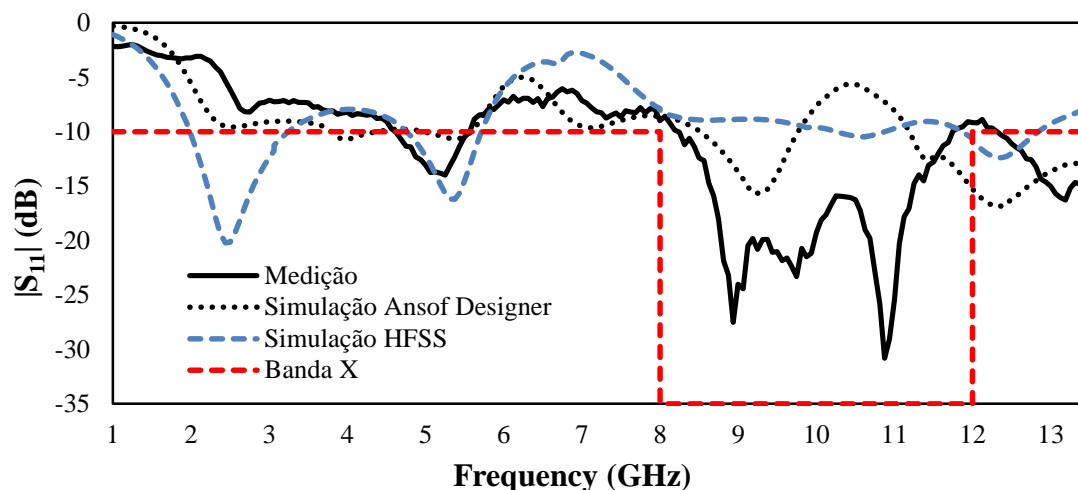


Figura 4.32– Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA flor de jasmim (2 mm).

Na Figura 4.33 tem-se a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido das antenas tipo monopolo impresso circular, a flor de jasmim (8 mm) e flor de jasmim (2 mm).

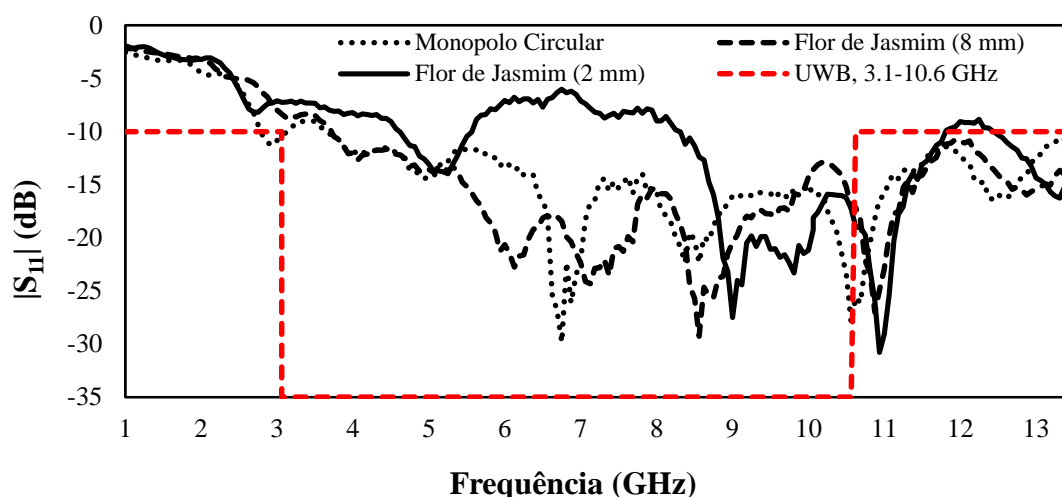


Figura 4.33 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido da PMA circular, flor de jasmim (8 mm) e flor de jasmim (2mm).

Tabela 4.11 – Valores medidos e simulados de larguras de bandas e frequências de ressonâncias da PMA: circular, flor de jasmim (8 mm) e (2 mm)

	Antena	BW (GHz)	f_1 (GHz)	f_2 (GHz)	f_0 (GHz)	B_f %
1	Circular simulação	7,38	2,31	9,69	7,13	123,00
2	Circular medição	10,69	2,81	13,50	6,75	131,09
3	Flor de jasmim 8 mm simulação	11,00	2,50	13,50	7,60	137,50
4	Flor de jasmim 8 mm medição	9,75	3,75	13,50	7,13	113,04
5	Flor de jasmim 2 de mm simulação	1,19	8,56	9,75	9,25	13,00
6	Flor de jasmim 2 mm medição	3,44	8,25	11,69	9,19	34,50

A Figura 4.34 apresenta a comparação do parâmetro VSWR medido das PMA circular, antenas flor de jasmim (8 mm) e flor de jasmim (2 mm).

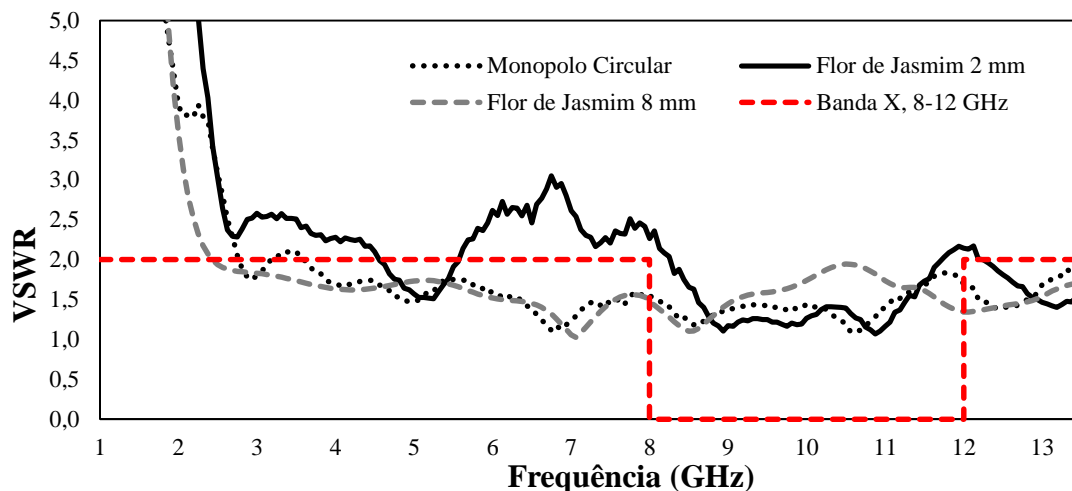


Figura 4.34– Comparação do parâmetro VSWR medido da PMA circular, flor de jasmim (2 mm) e flor de jasmim (8 mm).

Na Figura 4.35 são apresentadas as impedâncias sobre as cartas de Smith simuladas das PMA circular, flor de jasmim (8 mm) e flor de jasmim (2 mm) nas frequências de 1 GHz a 13,5 GHz. Na carta de Smith as curvas que se aproximam ao valor normalizado tem o casamento das impedâncias em 50Ω . As curvas vermelhas internas indicam o VSWR menor que 2, ou seja, as frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

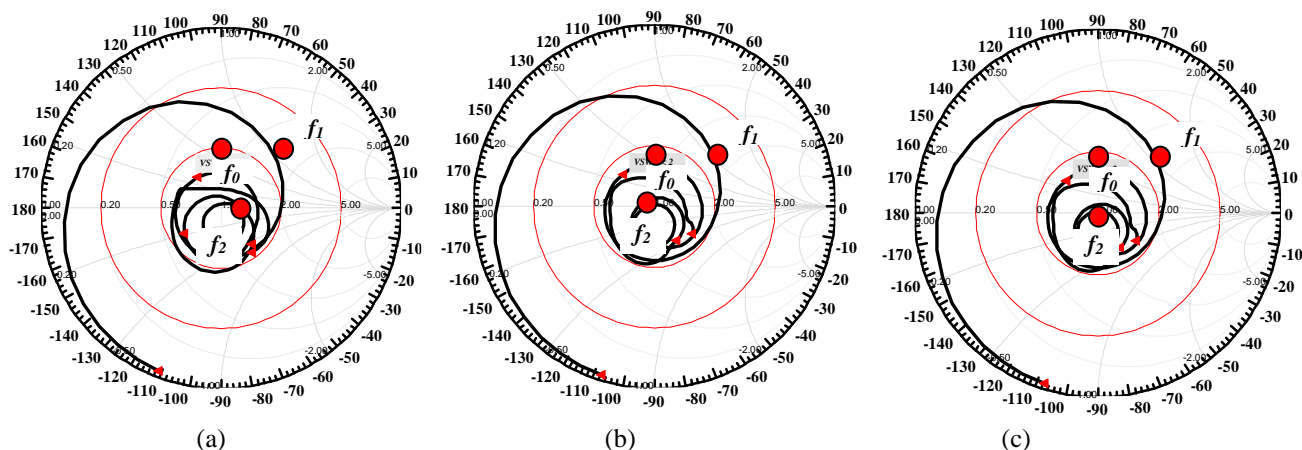


Figura 4.35 – Impedância sobre as cartas de Smith da PMA: a) circular; b) flor de jasmim (8 mm); c) flor de jasmim (2 mm).

Na Figura 4.36 é apresentado o diagrama de irradiação 3-D e 2-D da PMA circular em 7,13 GHz. A antena apresentou ganho máximo de 5,58 dB na direção *broadside* e HPBW de 90° .

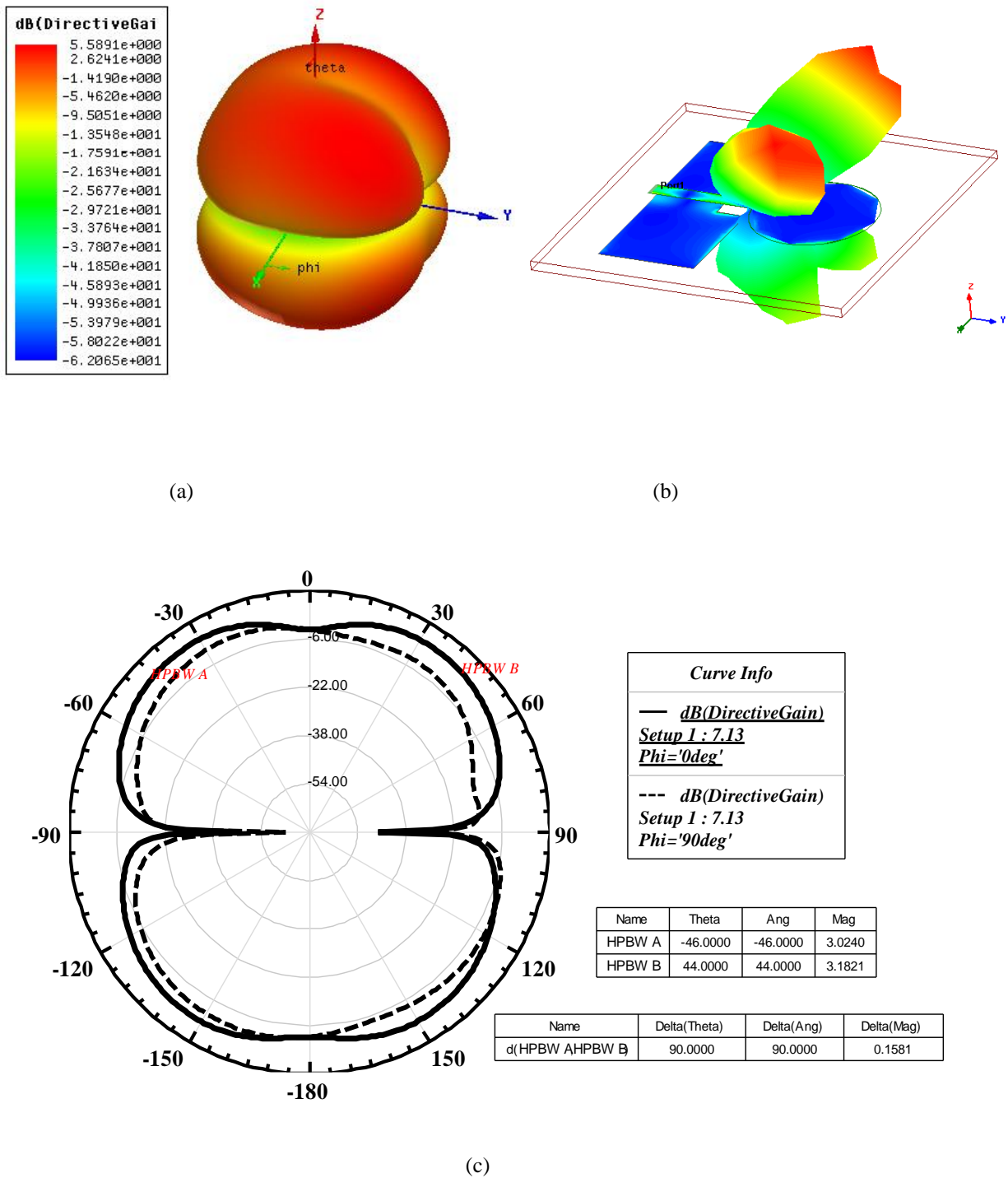
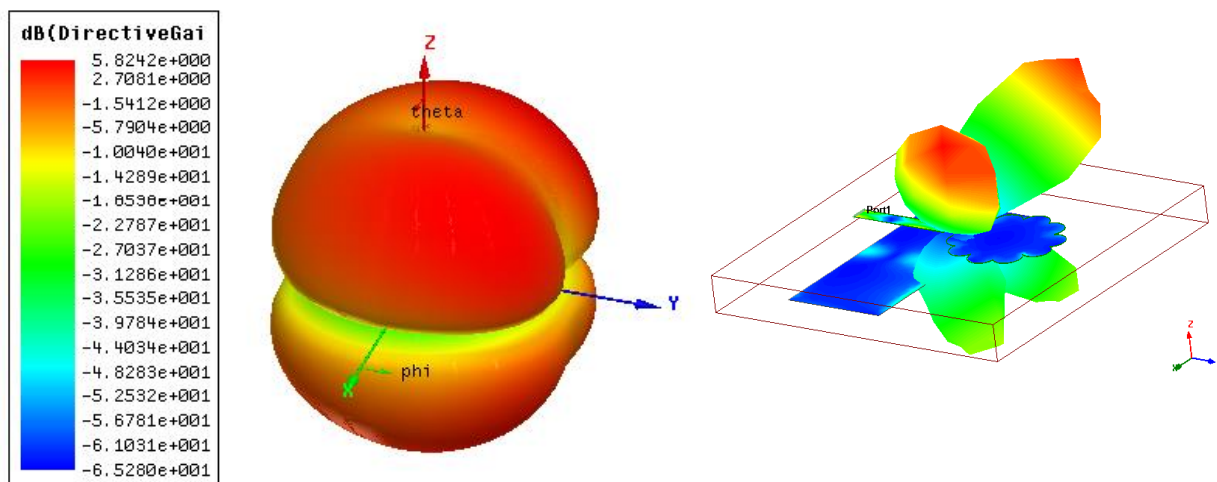


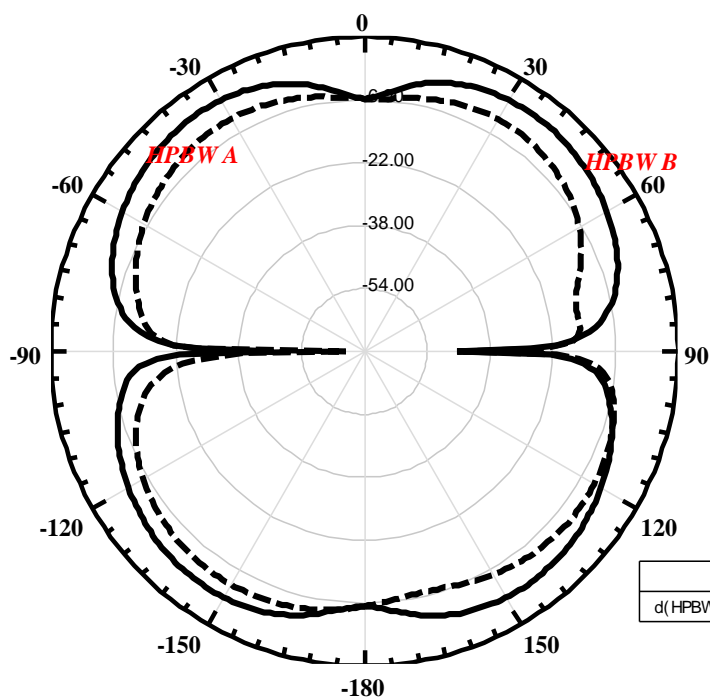
Figura 4.36 – Diagrama de irradiação da PMA circular em 7,13 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante; c) 2-D plano-E e plano-H.

Na Figura 4.37 é apresentado o diagrama de irradiação da antena flor de jasmim (8 mm) em 7,06 GHz, com ganho máximo de 5,78 dB na direção *broadside* e HPBW de 90°.



(a)

(b)



Curve Info	
—	<i>dB(DirectiveGain)</i> Setup 1 : 7.06 GHz Phi='0deg'
---	<i>dB(DirectiveGain)</i> Setup 1 : 7.06 GHz Phi='90deg'

Name	Theta	Ang	Mag
HPBW A	-49.0000	-49.0000	3.0711
HPBW B	51.0000	51.0000	3.0410

Name	Delta(Theta)	Delta(Ang)	Delta(Mag)
d(HPBW A ,HPBW B)	100.0000	100.0000	-0.0300

(c)

Figura 4.37 – Diagrama de irradiação da PMA flor de jasmim (8 mm) em 7,6 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante; c) 2-D plano-E e plano-H.

Na Figura 4.38 é apresentado o diagrama de irradiação da antena flor de jasmim (2 mm) em 9,25 GHz, com ganho máximo de 6,02 dB na direção *broadside* e HPBW de 95°.

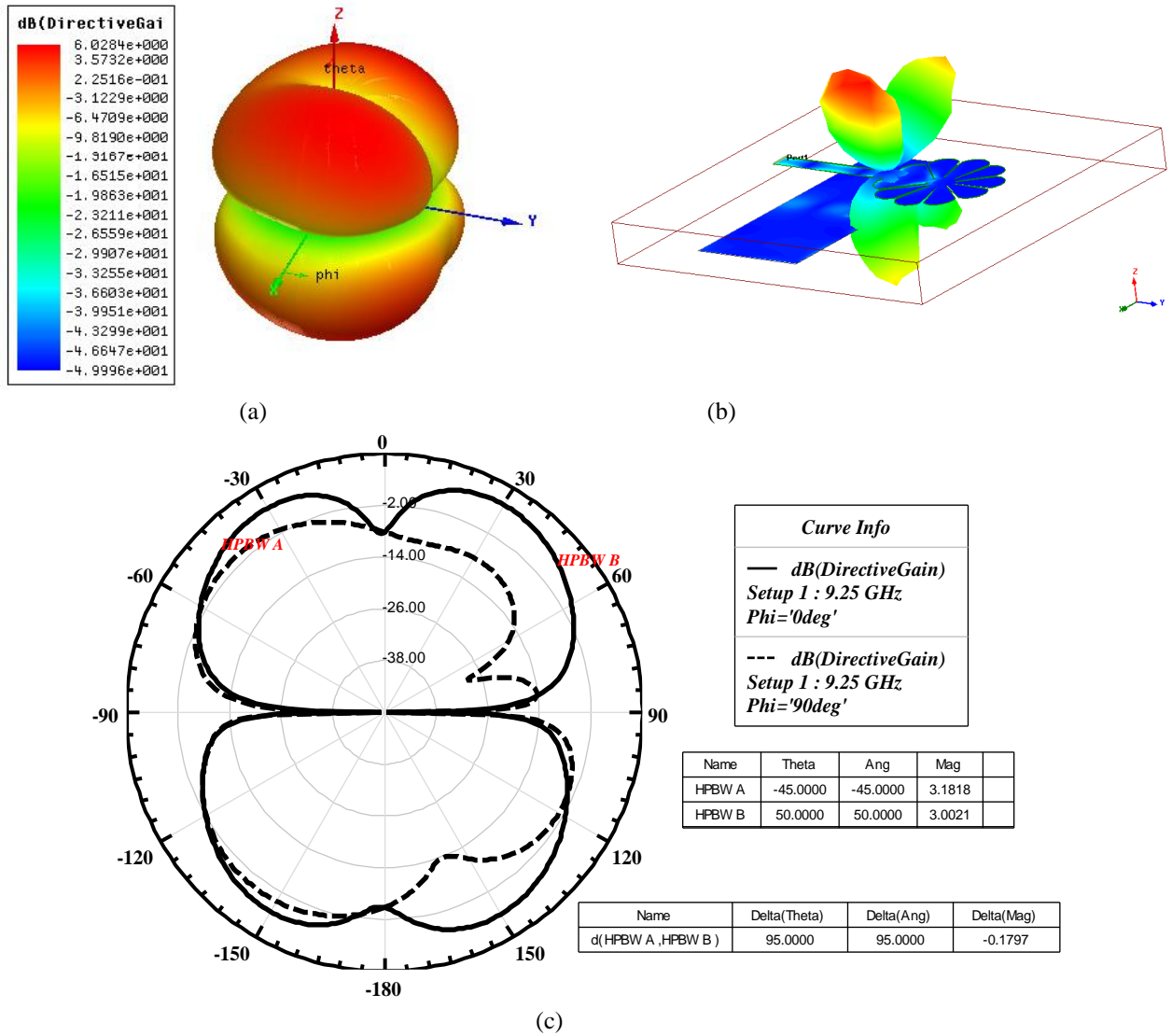


Figura 4.38 – Diagrama de irradiação da PMA flor de jasmim (2 mm) em 9,25 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante; c) 2-D plano-E e plano-H.

Nesta seção foram expostos o projeto e os resultados simulados e medidos para as antenas do tipo monopolo impresso circular, flor de jasmim (8 mm) e flor jasmim (2 mm). A partir de uma antena tipo monopolo impressa com geometria circular foi utilizada a geometria bioinspirada em uma flor com 10 pétalas. Foram aplicadas duas iterações na geometria bioinspirada com raios internos da corola da flor de jasmim (8mm) e (2 mm). A aplicação da geometria bioinspirada na flor de jasmim possibilitou a redução do raio do *patch* e da largura de banda das antenas, promovendo maior ganho nas frequências de ressonância das antenas. Os resultados simulados nos *softwares* Ansoft Designer™ e HFSS apresentaram um deslocamento para direita na primeira ressonância. Este fato é observado em maior ou menor grau em todas as antenas tipo monopolo planar simuladas, o que pode representar uma limitação no uso destes

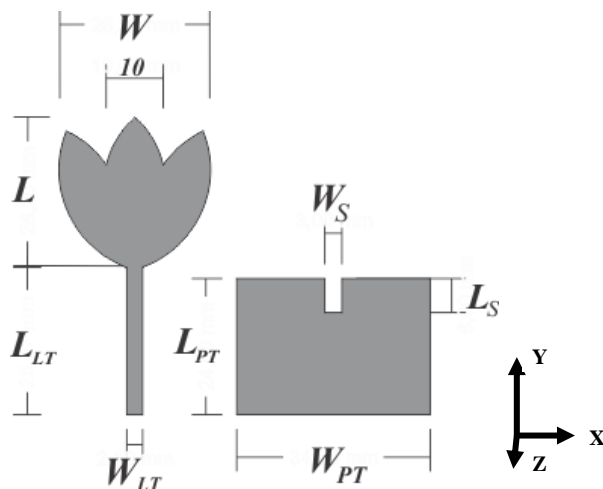
softwares para este tipo de antena. As demais simulações para este tipo de antena em microfita desta Dissertação foram realizadas no Ansoft Designer™. A antena monopolo impresso circular obteve largura de banda de 10,69 GHz, a antena flor de jasmim (8 mm) apresentou largura de banda de 9,75 GHz, uma redução de 8,79%, obtendo ganho de 5,82 dBi contra os 5,54 dBi da antena monopolo impresso circular e HPBW de 100°. A definição das pétalas na antena flor de jasmim (2mm) promoveu o aumento do perímetro da antena, modificando a largura de banda para 3,44 GHz, operando na faixa da Banda-X (8 GHz ~ 12 GHz), com ganho máximo de 6,02 dBi e HPBW de 95°. Após pesquisa em bibliografia especializada, verificou-se que está é a primeira tentativa de aplicação da geometria de uma flor sobre uma antena tipo monopolo planar circular.

4.3.2 Antena Bioinspirada na Flor de Tulipa

A Tabela 4.12 apresenta as dimensões, em mm, da antena monopolo impresso flor de tulipa. O comprimento da linha de transmissão (L_{LT}) foi de 25,97mm. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, o comprimento do corte no plano de terra (L_S) foi de 6mm. A Figura 4.39 apresenta a geometria da PMA flor de tulipa.

Tabela 4.12 – Dimensões (mm) da PMA flor de tulipa

Antena	L	Ajuste	W	Ajuste	L_{PT}	Ajuste	W_{PT}	Ajuste
Flor de Tulipa	26,07	26,2	24,21	24	24,21	24	35,67	35,7



(a)



(b)

Figura 4.39 – Geometria da PMA flor de tulipa: a) simulada; b) protótipo.

A Figura 4.40 é observada a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antena monopolo impresso flor de tulipa. Em diversas frequências as curvas se tocam, demonstrando que a antena simulada e medida podem ser consideradas convergentes.

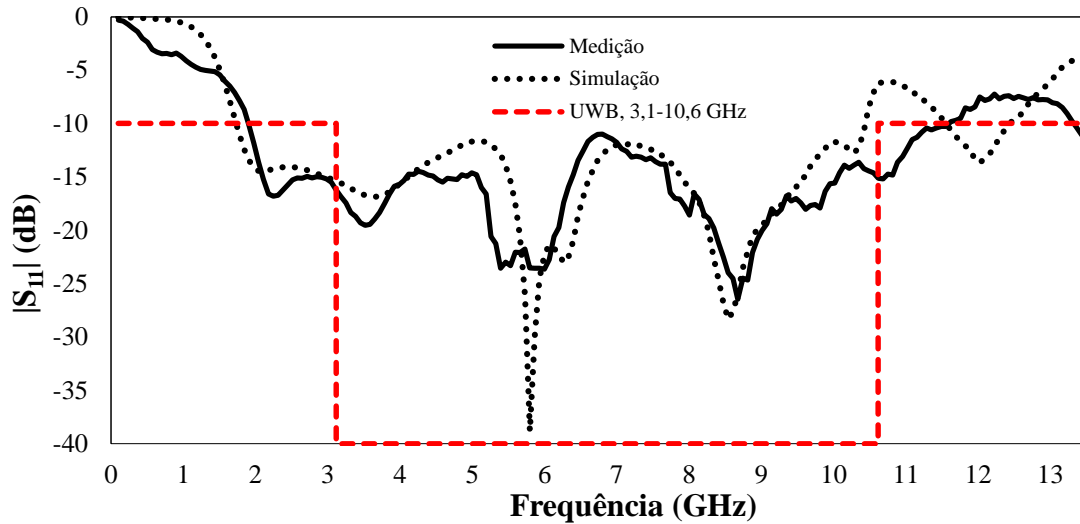


Figura 4.40 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado para PMA flor de tulipa.

Na Tabela 4.13 são indicados os valores medidos e simulados de largura de banda, frequência de ressonância e largura de banda fracionárias da antena flor de tulipa. Conforme observado os valores simulados e medidos se aproximam, possuindo variação menor que 1,5%. As larguras de bandas verificadas são superiores à largura de UWB em mais de 30%.

Tabela 4.13 – Valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância e largura de banda fracionária da PMA flor de tulipa

	<i>Antena</i>	<i>BW (GHz)</i>	<i>f₁ (GHz)</i>	<i>f₂ (GHz)</i>	<i>f_o (GHz)</i>	<i>B_f %</i>
1	Simulação	9,85	1,77	11,62	2,11	142,12
2	Medição	9,72	1,9	11,62	2,31	143,79

Na Figura 4.41 apresenta-se a impedância sobre a carta de Smith simulada da antena monopolo impresso flor de tulipa para as frequências de 1 GHz a 13,5 GHz. Nela pode-se observar que várias frequências se aproximam do valor normalizado indicando que a antena opera banda larga. A curva vermelha interna indica o VSWR menor que 2, ou seja, as frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

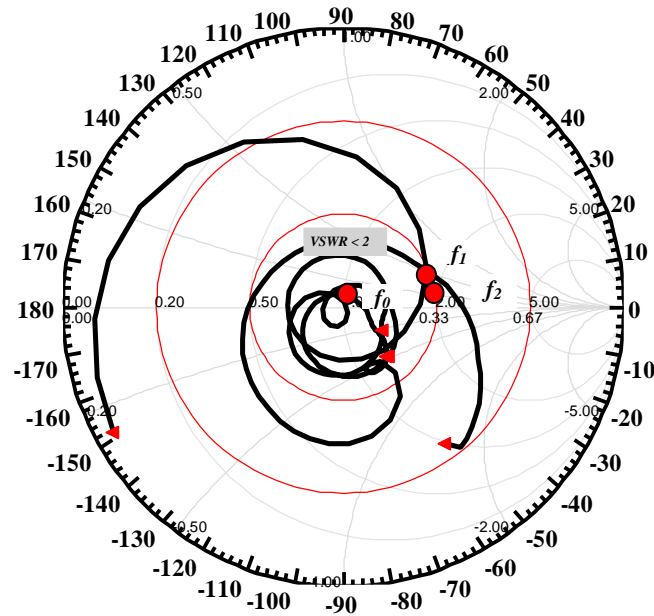


Figura 4.41 – Impedâncias sobre a carta de Smith da PMA flor de tulipa.

A Figura 4.42 apresenta o diagrama de irradiação 3-D da antena monopolo impresso flor de tulipa em 5,7 GHz. No resultado verifica-se que o máximo ganho da antena, 5,17 dB, dá-se na direção *broadside*.

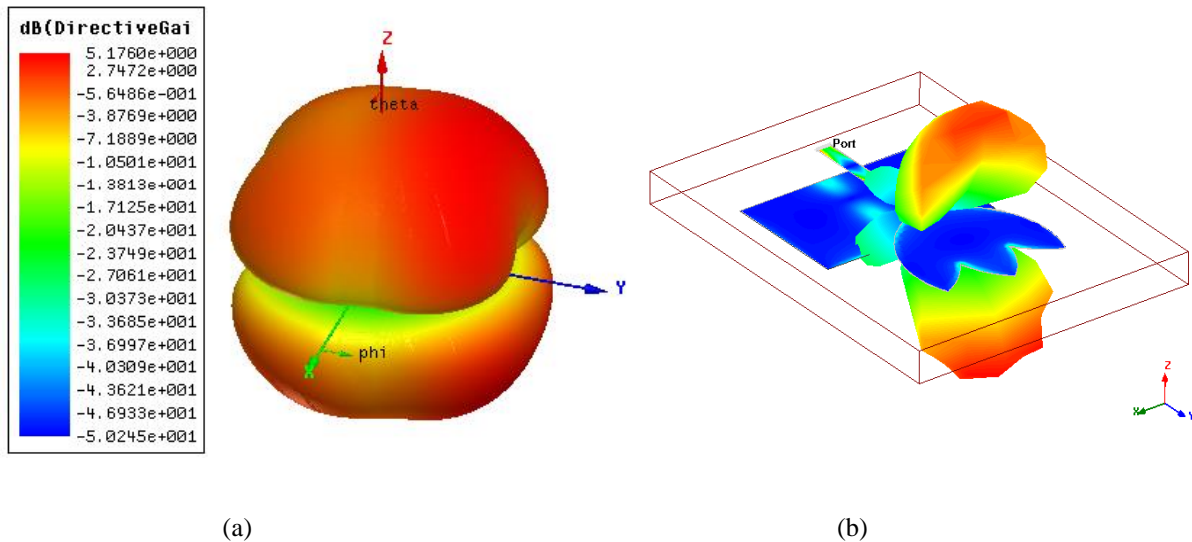


Figura 4.42 – Diagrama de irradiação 3-D da PMA flor de tulipa em 5,7 GHz: a) ganho; b) campo distante.

O diagrama de irradiação 3-D da PMA flor de tulipa em 8,6 GHz é observado na Figura 4.43. O máximo ganho da antena, 5,26 dB, ocorre na direção *broadside*.

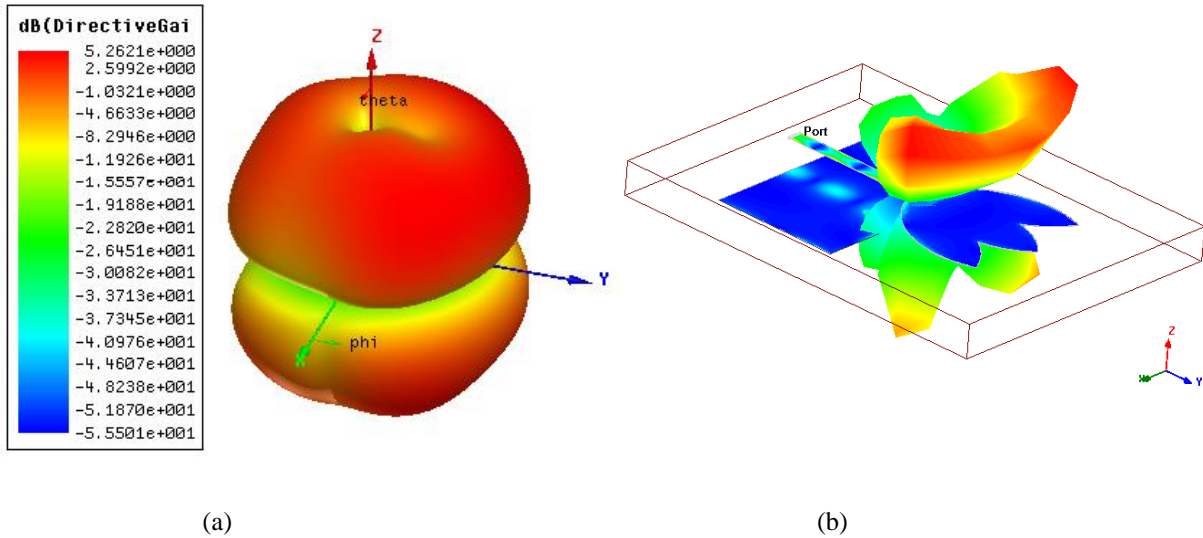


Figura 4.43– Diagrama de irradiação 3-D da PMA flor de tulipa em 8,6 GHz: a) ganho; b) campo distante.

A antena tipo monopolo impresso bioinspirada na flor de tulipa apresentou largura de banda medida de 9,72 GHz, ou seja, 29,6% superior à faixa de frequências de UWB, com banda fracionária de 143,79%, ganho, nas frequências de ressonância, superior a 5 dB e HPBW de 75°.

Na seção seguinte são abordados o projeto e os resultados medidos e simulados da antena bioinspirada nas folhas de oliveira.

4.3.3 Antena Bioinspirada nas Folhas de Oliveira

A Tabela 4.14 apresenta as dimensões, em mm, da antena folhas de oliveira. O comprimento da linha de transmissão (L_{LT}) foi de 17,00mm. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, o comprimento do corte no plano de terra (L_S) de melhor resultado foi de 5,13mm. A Figura 4.44 apresenta a geometria do monopolo impresso folhas de oliveira suas dimensões (mm) e protótipo.

Tabela 4.14 – Dimensões (mm) da PMA folhas de oliveira

Antena	L	Ajuste	W	Ajuste	L_{PT}	Ajuste	W_{PT}	Ajuste
Folhas de Oliveira	10,6	10,6	13,78	13,11	25,05	24	19,68	20

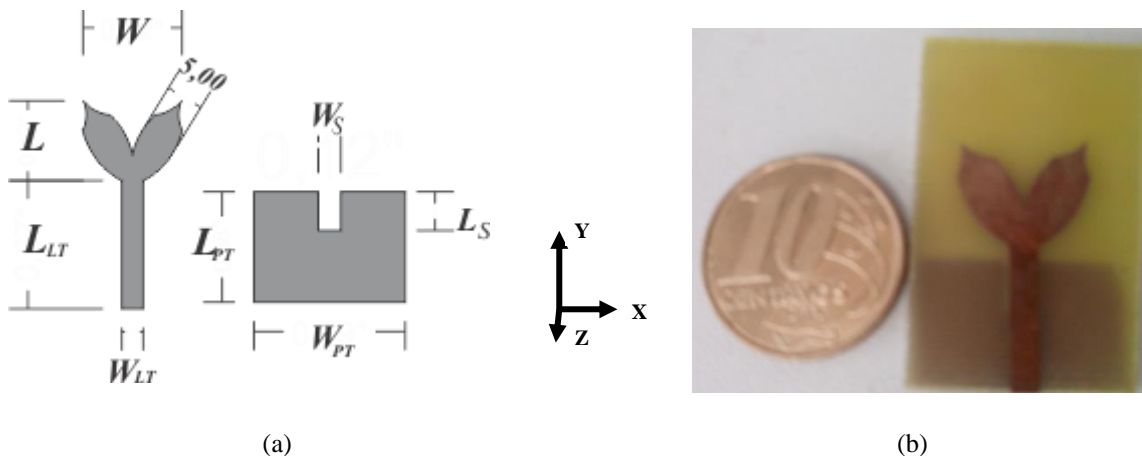


Figura 4.44 – Geometria da PMA folhas de oliveira: a) dimensões; b) protótipo.

Na Figura 4.45 pode-se observar o gráfico com a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado no *software* Ansoft DesignerTM da antena monopolo impresso folhas de oliveira. A antena medida e simulada apresenta similaridades nas curvas com diferenças na frequência de ressonância principal de 870 MHz. A antena simulada teve um pico acima da linha de -10 dB entre as frequências de 7 GHz a 7,76 GHz, fato este não observado na antena medida a qual apresentou largura de banda total de 9,81 GHz. A Figura 4.36 apresenta a comparação do parâmetro VSWR medido e simulado da PMA folhas de oliveira. A Tabela 4.15 os valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância da antena folhas de oliveira.

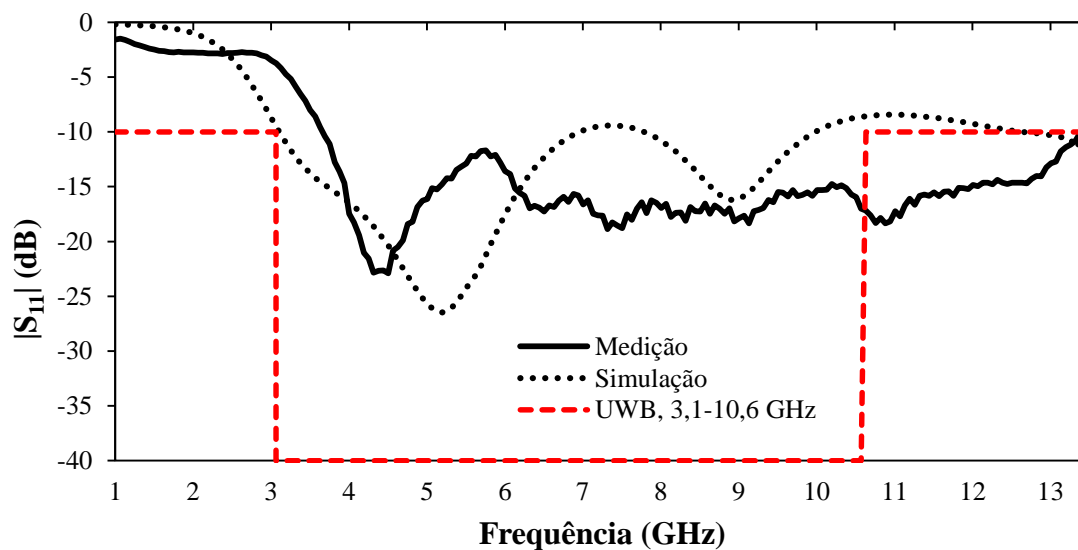


Figura 4.45 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA folhas de oliveira.

Tabela 4.15 – Valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância da PMA folhas de oliveira

	<i>Antena</i>	<i>BW (GHz)</i>	<i>f₁(GHz)</i>	<i>f₂(GHz)</i>	<i>f_o (GHz)</i>	<i>B_f %</i>
1	Simulação 1º faixa	3,86	3,13	6,99	5,19	76,28
2	Simulação 2º faixa	2,18	7,82	10,00	8,88	24,47
3	Medição	9,81	3,69	13,5	4,32	114,14

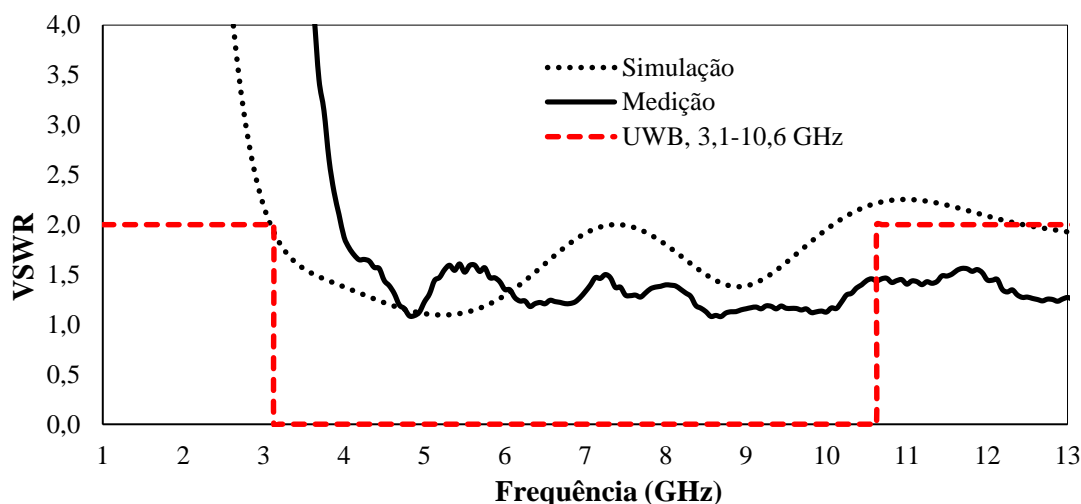


Figura 4.46 – Comparação do parâmetro VSWR medido e simulado da PMA folhas de oliveira.

A Figura 4.47 apresenta a carta de Smith do monopolo impresso folhas de oliveira simulada nas frequências de 1 GHz a 13,5 GHz, com início indicado pela seta. Pode-se observar que a curva se aproxima do valor normalizado indicando o casamento das impedâncias da antena em 50Ω para estas frequências. A curva vermelha interna indica o VSWR menor que 2, ou seja, a frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

A Figura 4.48 ilustra o diagrama de irradiação 3-D do monopolo impressas folhas de oliveira em 5,19 GHz. Nesta frequência de ressonância a antena apresentou ganho máximo de 4,40 dB na direção *broadside*.

A Figura 4.49 apresenta o diagrama de irradiação 3-D do monopolo impresso folhas de oliveira em 8,88 GHz, o qual apresenta ganho máximo de 5,74 dB na direção *broadside*.

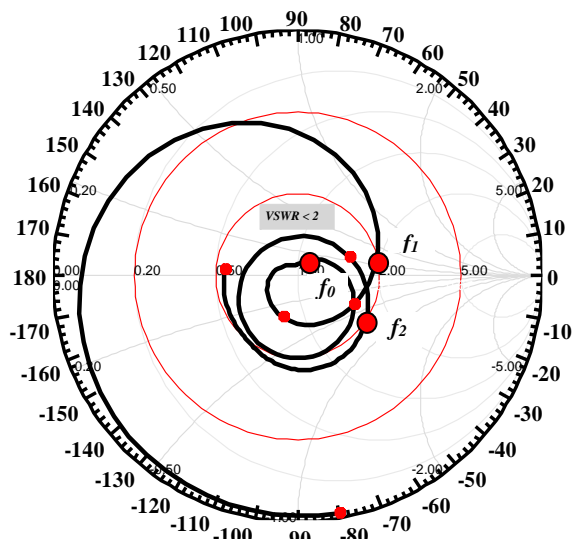


Figura 4.47 – Impedância sobre a carta de Smith da PMA folhas de oliveira.

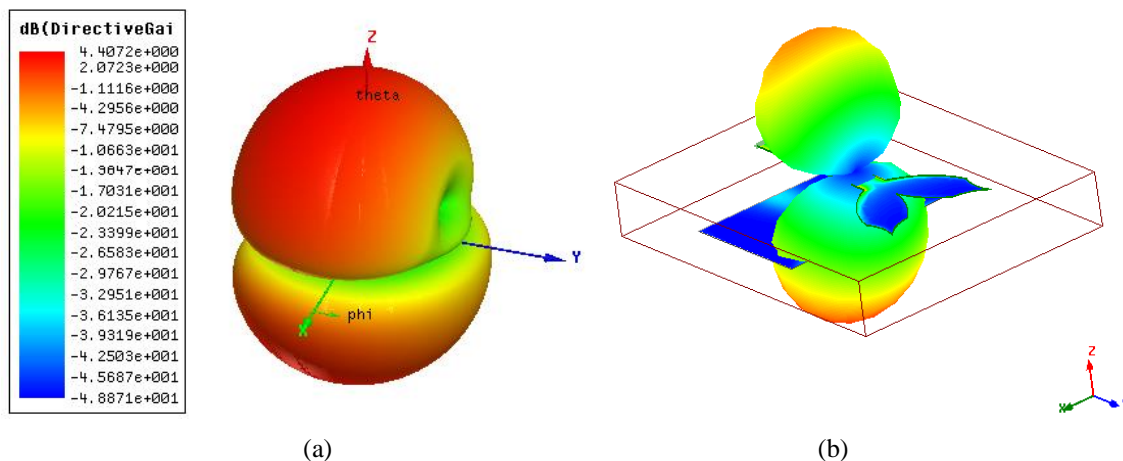


Figura 4.48 – Diagrama de irradiação 3-D da PMA folhas de oliveira em 5,19 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante.

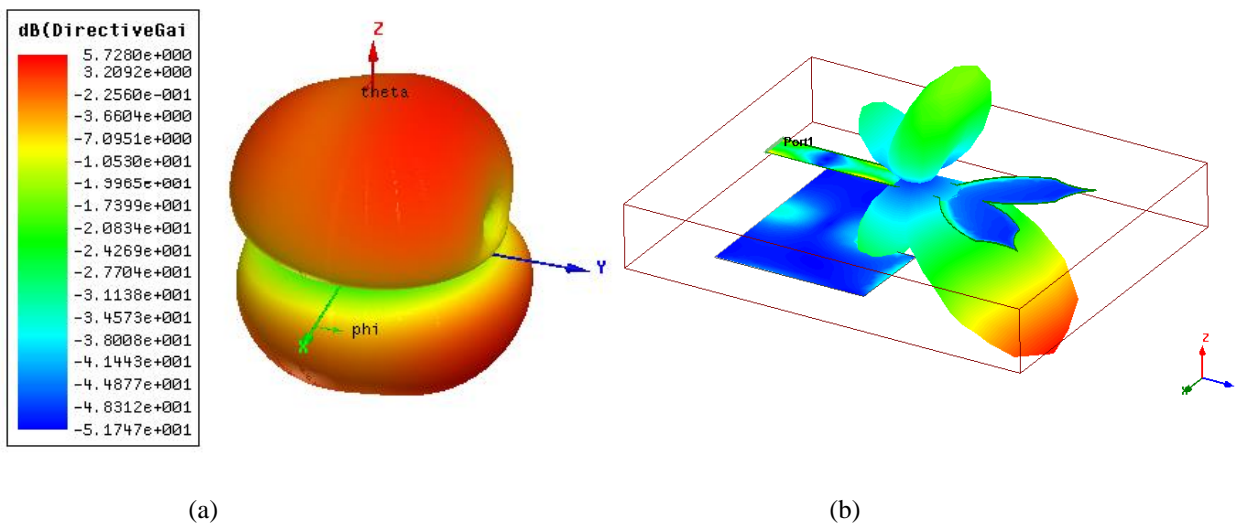


Figura 4.49 – Diagrama de irradiação 3-D da PMA folhas de oliveira em 8,88 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante.

A antena folhas de oliveira apresentou largura de banda medida de 9,81 GHz, 30,8% superior à faixa de frequências de UWB, com largura de banda fracionária de 114,14% e ganho, na frequência de ressonância, superior a 5,7 dB.

Na seção seguinte são abordados os resultados medidos e simulados da antena bioinspirada numa flor e sua comparação com uma antena tipo monopolo planar circular para faixa de UWB.

4.3.4 Antena Bioinspirada em uma Pétala de Orquídea

Nesta seção são apresentados o projeto e os resultados simulados e medidos da antena tipo monopolo impresso bioinspirada em uma pétala de orquídea.

A Tabela 4.16 apresenta as dimensões, em mm, da antena pétala de orquídea. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, o comprimento do corte no plano de terra (L_S) de melhor resultado foi de 5,5mm. A Figura 4.50 ilustra a geometria da antena com suas dimensões e protótipo.

Tabela 4.16 – Dimensões (mm) da PMA pétala de orquídea

<i>Antena</i>	<i>L</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W</i>	<i>Ajuste</i>	<i>L_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>
Pétala de Orquídea	21,03	20,00	21,03	21,15	21,03	21,82	35,05	34

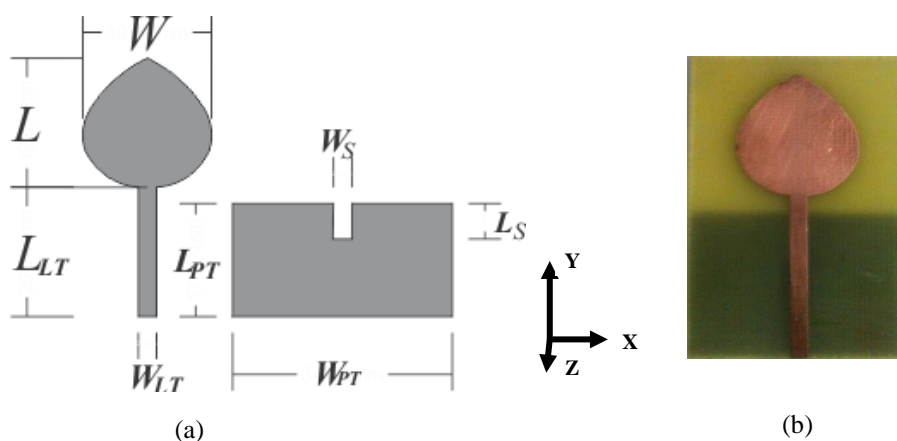


Figura 4.50 – Geometria da PMA pétala de orquídea: a) dimensões; b) protótipo.

A Figura 4.51 apresenta a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado do monopolo impresso pétala de orquídea. Nota-se que a antena medida e simulada apresenta curvas semelhantes indicando compatibilidade entre as antenas. A diferença

na primeira ressonância entre a antena medida e simulada foi de 200 MHz. A antena simulada apresentou largura de banda inferior à antena medida. A Tabela 4.17 apresenta os valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância do monopolo impresso pétala de orquídea.

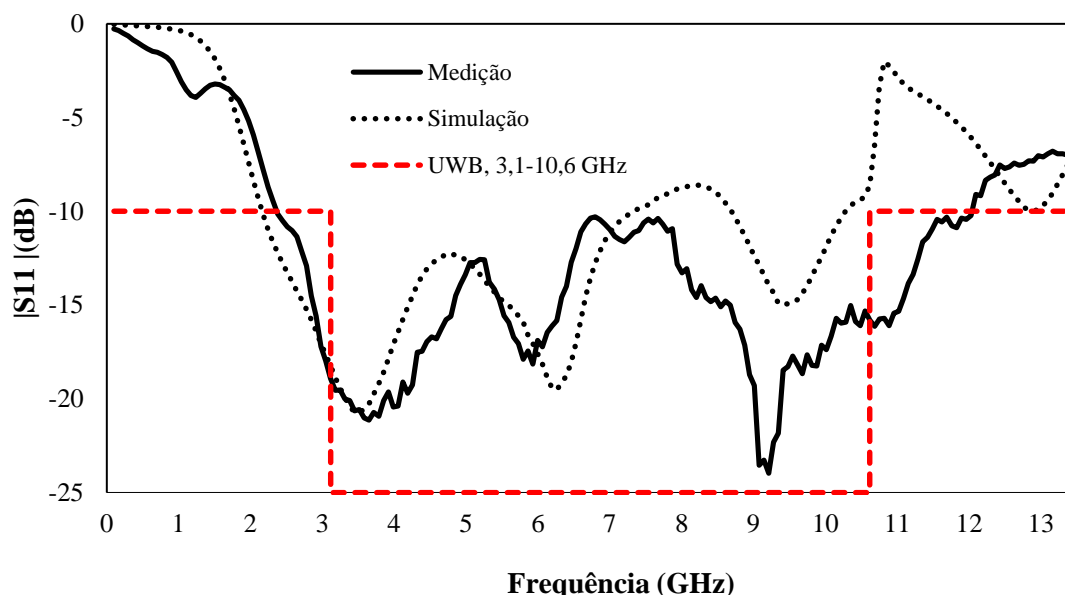


Figura 4.51 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA pétala de orquídea.

Tabela 4.17 – Valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância da PMA pétala de orquídea

	<i>Antena</i>	<i>BW (GHz)</i>	<i>f₁ (GHz)</i>	<i>f₂ (GHz)</i>	<i>f₀ (GHz)</i>	<i>B_f %</i>
1	Simulação banda – 1	5,09	2,18	7,27	3,45	107,72
2	Simulação banda – 2	1,48	8,74	10,22	9,48	15,61
3	Medição	9,65	2,38	12,03	3,65	133,93

Na Figura 4.52 observa-se a comparação do parâmetro VSWR medido e simulado do monopolo impresso pétala de orquídea, indicando as frequências abaixo de 2 como pontos de ressonância.

A Figura 4.53 apresenta a impedância sobre a carta de Smith do monopolo impresso pétala de orquídea em 1 GHz a 13,5 GHz, observa-se que diversas partes da curva passam próximo ao valor normalizado indicando o casamento de impedâncias em 50Ω para estas frequências. A curva vermelha interna indica o VSWR menor que 2, ou seja, a frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

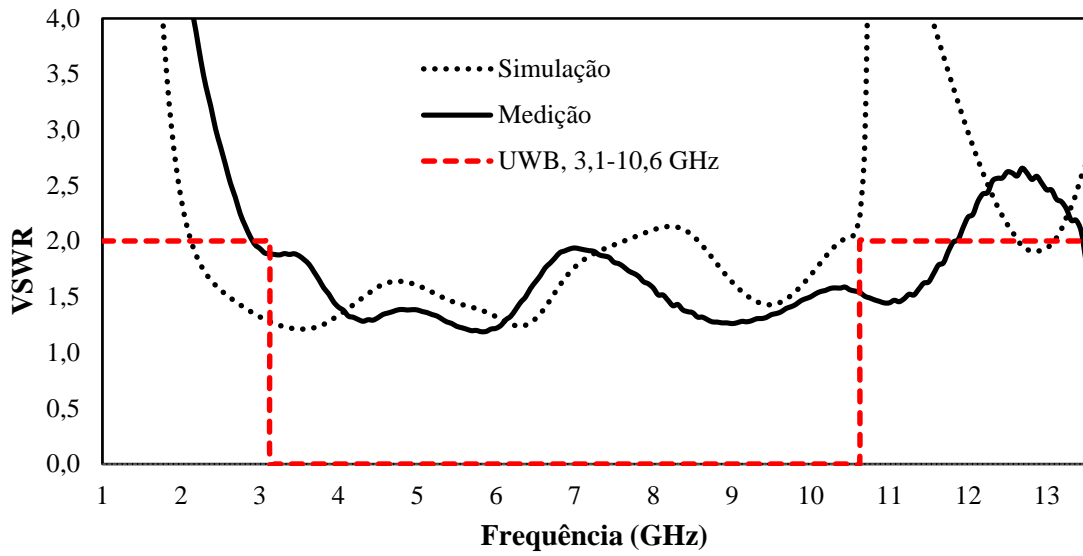


Figura 4.52 – Comparação do parâmetro VSWR medido e simulado da PMA péta-la de orquí-dea.

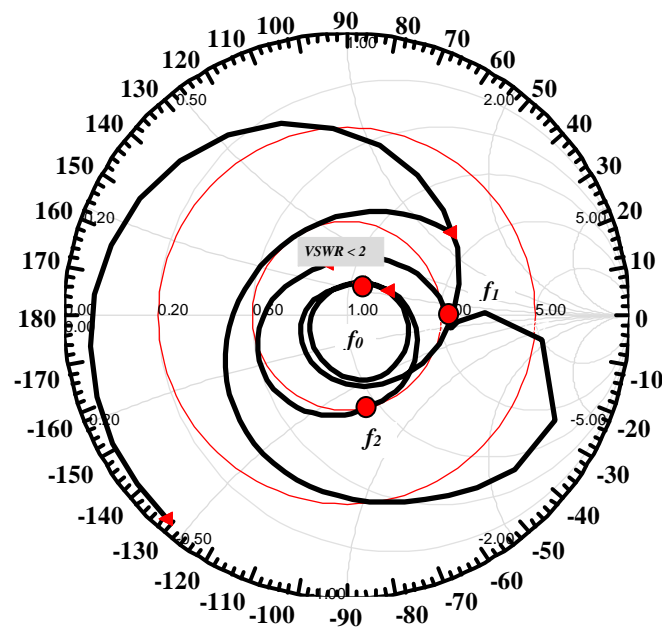


Figura 4.53 – Impedâncias sobre a carta de Smith da PMA péta-la de orquí-dea.

Na Figura 4.54 é apresentado o diagrama de irradiação 3-D do monopolo impresso péta-la de orquí-dea em 3,45 GHz, com ganho máximo de 4,02 dB na direção *broadside* com HPBW de 74°.

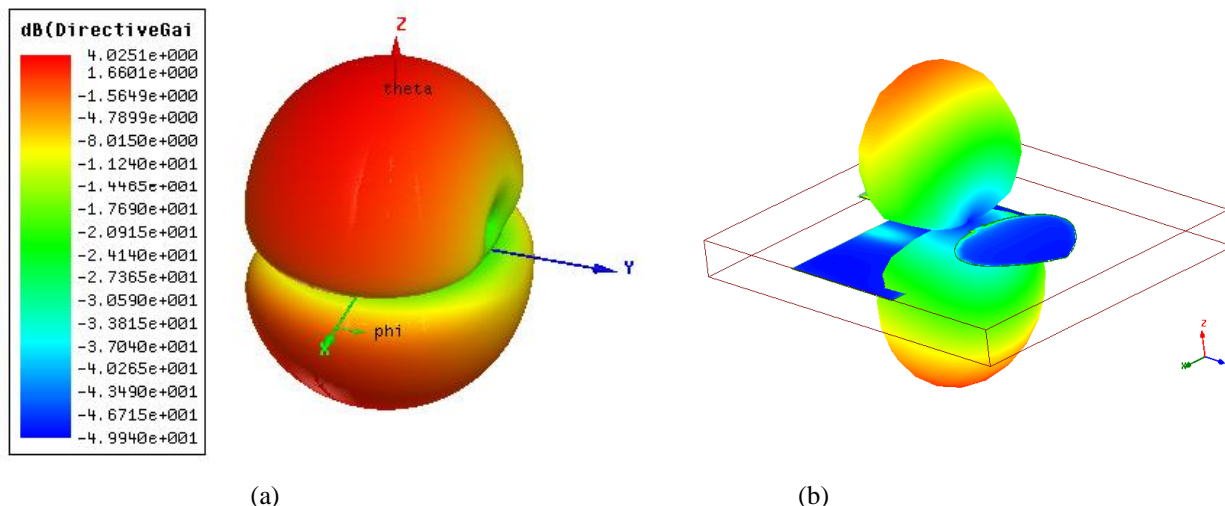


Figura 4.54 – Diagrama de irradiação 3-D da PMA pétala de orquídea em 3,45 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante.

A Figura 4.55 apresenta o diagrama de irradiação 3-D simulados do monopolo impresso pétala de orquídea em 9,21 GHz, com ganho máximo de 5,43 dB na direção *broadside* com HPBW de 102°.

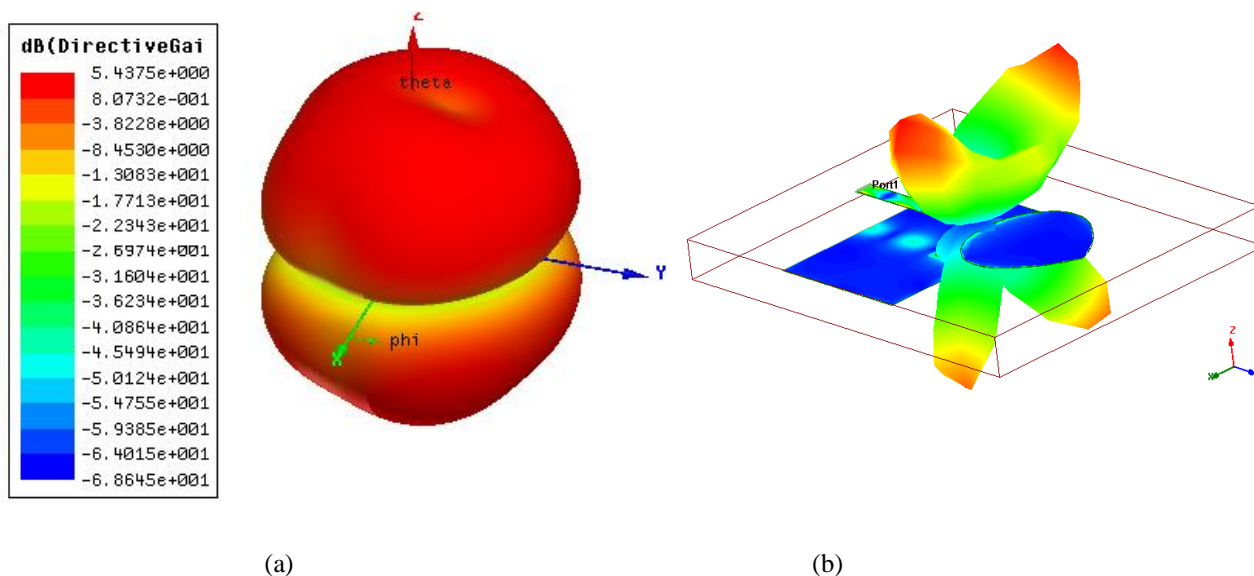


Figura 4.55 – Diagrama de irradiação 3-D da PMA pétala de orquídea em 9,21 GHz: a) 3-D com ganho; b) campo distante.

A antena bioinspirada em uma pétala de orquídea apresentou resultado similar entre a antena simulada e medida. A antena medida obteve largura de banda de 9,65 GHz, 22,22% maior do que a requerida pela FCC, com ganho de até 5,43 dBi e HPBW de 102°.

Esta seção apresentou o projeto e os resultados simulados e experimentais de

geometrias bioinspiradas em antenas tipo monopolo impresso para faixa de UWB. As antenas apresentaram resultados que satisfazem os requisitos de antenas UWB conforme seção 2.2.3. As larguras de banda apresentadas pelas antenas foram superiores ao requerido pelo FCC para antenas UWB. Os ganhos das antenas variaram de acordo com a frequência de ressonância, com ganho entre 4,02 ~ 6,02 dB. As antenas apresentaram HPBW entre 74° ~ 143° e banda fracionária de 114% ~ 143%, excetuando-se a antena flor de jasmim (2mm) que apresentou largura de banda fracionário de 34%.

No capítulo seguinte são apresentados o projeto e os resultados simulados e experimentais de antenas têxteis fabricadas em *jeans* utilizando-se geometrias bioinspiradas numa folha de ginkgo biloba e em uma árvore fractal desenvolvidas a partir do sistema-L.

4.4 ANTENAS TÊXTEIS BIOINSPIRADAS

As antenas têxteis estão diretamente relacionadas com as *wearables* antennas (antenas que se veste), que são dispositivos de uso próximo ao corpo com aplicação em solução ubíqua médicas e não médicas para: monitoramento de pessoas em saúde; desenvolvimento de atletas; proteção e segurança de pessoas [98]. Neste caso elas tornam-se o vínculo que integra roupas no sistema de comunicação como dispositivos menos intrusivos. Esta nova geração de vestuário será capaz de perceber alterações nos corpos dos usuários, comunicar dados, informações energéticas coletadas de forma não invasiva e transmitir para outro equipamento no corpo do indivíduo ou para receptores externos [91].

Os tecidos são materiais porosos com estruturas planares cujas propriedades são determinadas pelas fibras que as compõe, pela disposição dos fios, pela densidade, pelo volume e tamanho [99]. Como os tecidos utilizados em roupas, geralmente, apresentam estruturas planas muito finas e dielétricas, tornam-se boas candidatas a serem utilizadas como antenas impressas (*patch*, PMA). Na literatura especializada diversos trabalhos são encontrados com aplicações em UWB, WLAN e outras faixas de frequências [49], [91], [100-102].

Para o uso em antenas os materiais têxteis devem apresentar os requisitos: estrutura plana; materiais condutores flexíveis no *patch* e no plano de terra; substrato dielétrico flexível [91]. Além destes fatores, características como a permissividade e espessura do substrato dielétrico são cruciais para determinar a largura de banda e a

eficiência da antena [99].

Nesta Dissertação é utilizado o tecido *jeans* como dielétrico para as antenas têxteis. São utilizadas as caracterizações do dielétrico apresentados por [99], com espessura do dielétrico, $h = 1$ mm, permissividade do dielétrico, $\epsilon_r = 2,14$ e tangente de perda de 0,082. Utilizando cobre laminado para cabo flexível como material condutor, o que é uma técnica alternativa de construção de antenas têxteis e a colagem realizada com cola de contato.

Dois geometrias bioinspiradas são utilizadas neste trabalho, a folha de ginkgo biloba em uma antena tipo monopolo impresso e uma árvore fractal desenvolvida pelo sistema-L em uma antena do tipo *patch*.

4.4.1 Antena Têxtil Bioinspirada na Folha do Gynkgo Biloba

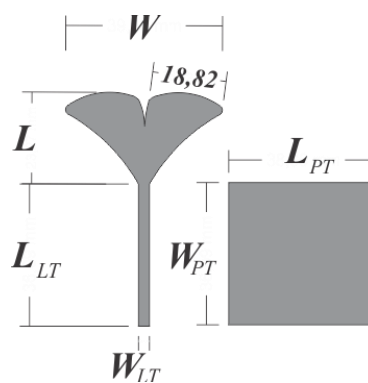
A Tabela 4.18 apresenta as dimensões (mm) do monopolo impresso têxtil ginkgo biloba. O comprimento da linha de transmissão (L_{LT}) foi de 36,09mm. A largura do corte no plano de terra (W_S) de melhor resultado foi de 3 mm, o comprimento do corte no plano de terra (L_S) de melhor resultado foi de 5,5mm. A Figura 4.56 apresenta a antena monopolo impresso têxtil ginkgo biloba, a geometria bioinspirada, a simulada com suas dimensões e o protótipo.

Tabela 4.18 – Dimensões (mm) da PMA têxtil ginkgo biloba

<i>Antena</i>	<i>L</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W</i>	<i>Ajuste</i>	<i>L_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>	<i>W_{PT}</i>	<i>Ajuste</i>
Gynkgo Biloba	23,3	23,27	39,44	39,7	36,62	36,09	37,98	38



(a)



(b)

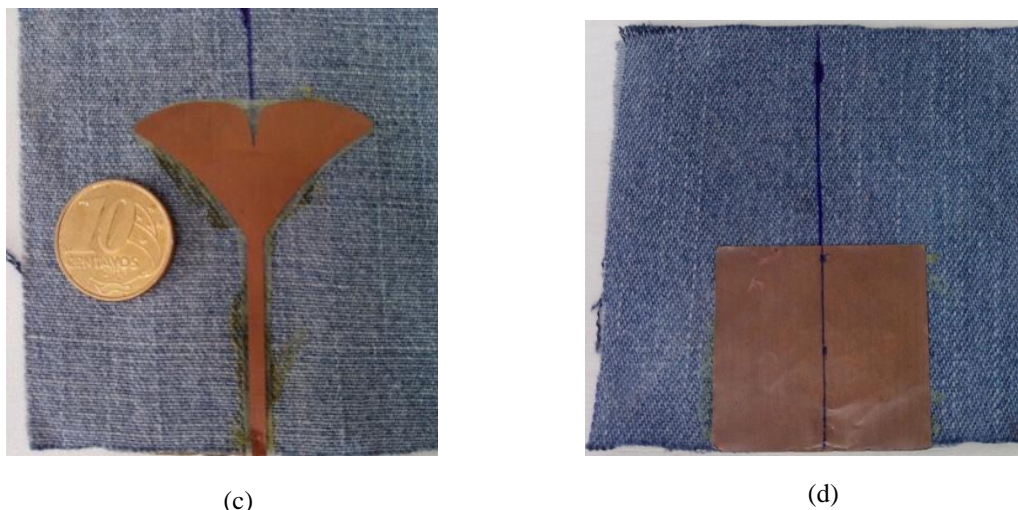


Figura 4.56 – PMA têxtil gynkgo biloba: a) folha da planta gynkgo biloba; b) geometria proposta, protótipo; c) vista superior; d) vista inferior.

A comparação dos valores do parâmetro $|S_{11}|$ medidos e simulados da antena monopolo impresso têxtil gynkgo biloba podem ser observados na Figura 4.62. Conforme a Figura 4.57 a simulação realizada no Ansoft DesingerTM, apresentou uma melhor aproximação da medição, os quais cobrem as faixas de 2G (1850 – 1900 MHz), 3G (1920 – 1975 MHz) e 4G. Na Tabela 4.19 encontram-se os valores medidos e simulados de frequências de ressonância e largura de banda da antena monopolo impresso têxtil gynkgo biloba.

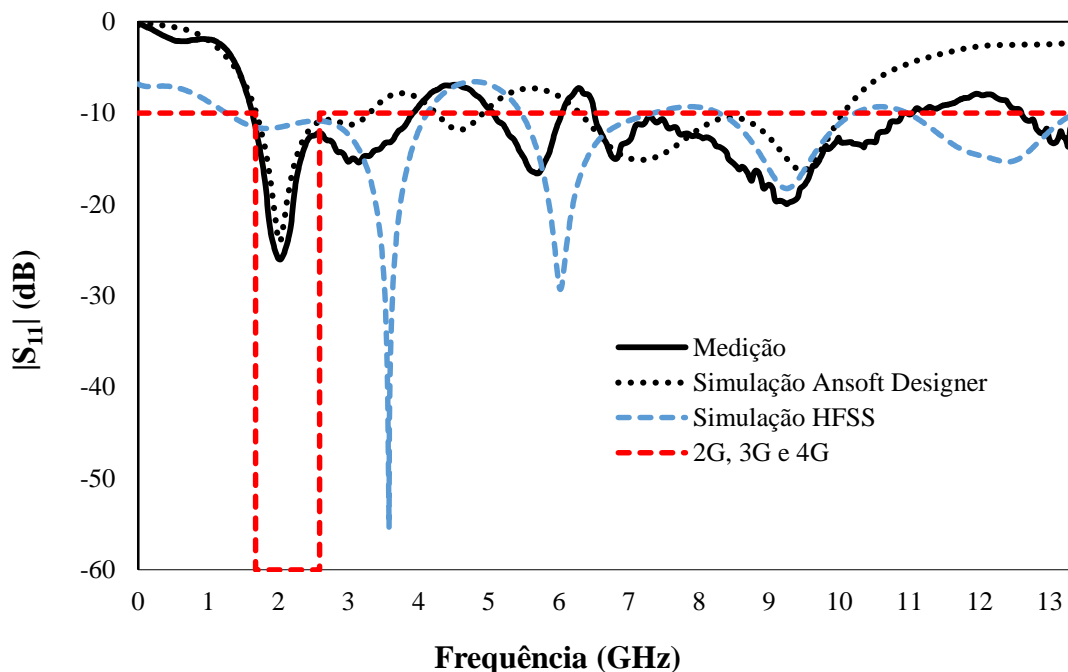


Figura 4.57 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da PMA têxtil gynkgo biloba.

Tabela 4.19 – Valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância da PMA têxtil ginkgo biloba

<i>Antena</i>	<i>BW (GHz)</i>	<i>f₁ (GHz)</i>	<i>f₂ (GHz)</i>	<i>f₀ (GHz)</i>
1 Simulação	1,61	1,79	3,4	2,12
3 Medição	2,29	1,73	4,02	2,12

Na Figura 4.58 é apresentada a carta de Smith da antena monopolo impresso têxtil ginkgo biloba simulada de 1 GHz a 13,5 GHz. De acordo com a Figura 4.64 a curva se aproxima do valor normalizado indicando as frequências que casadas em 50Ω . A curva vermelha interna indica o VSWR menor que 2, ou seja, a frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

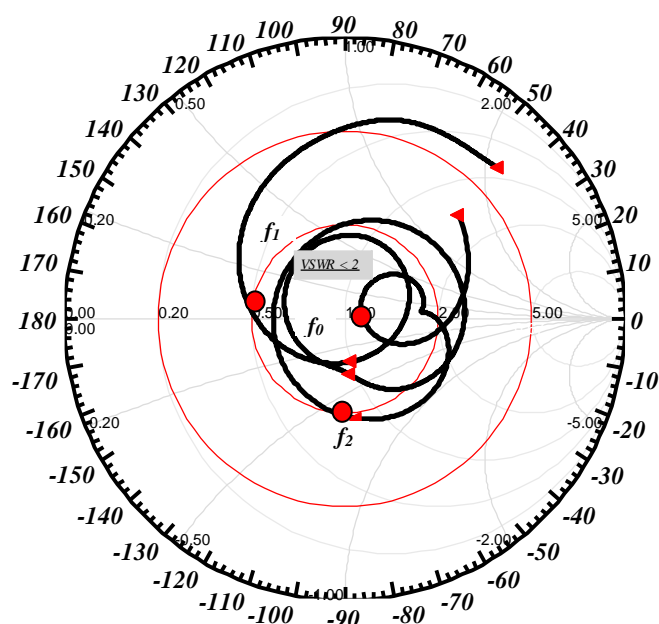


Figura 4.58 – Impedância sobre a carta de Smith da PMA têxtil ginkgo biloba.

O diagrama de irradiação da antena monopolo impresso têxtil ginkgo biloba em 2,12 GHz é apresentada na Figura 4.59. Pelos resultados observados nota-se que a antena apresenta ganho máximo de 3,32 dB na direção *broadside*, largura de feixe de meia potência, no plano-E, de aproximadamente de 14° .

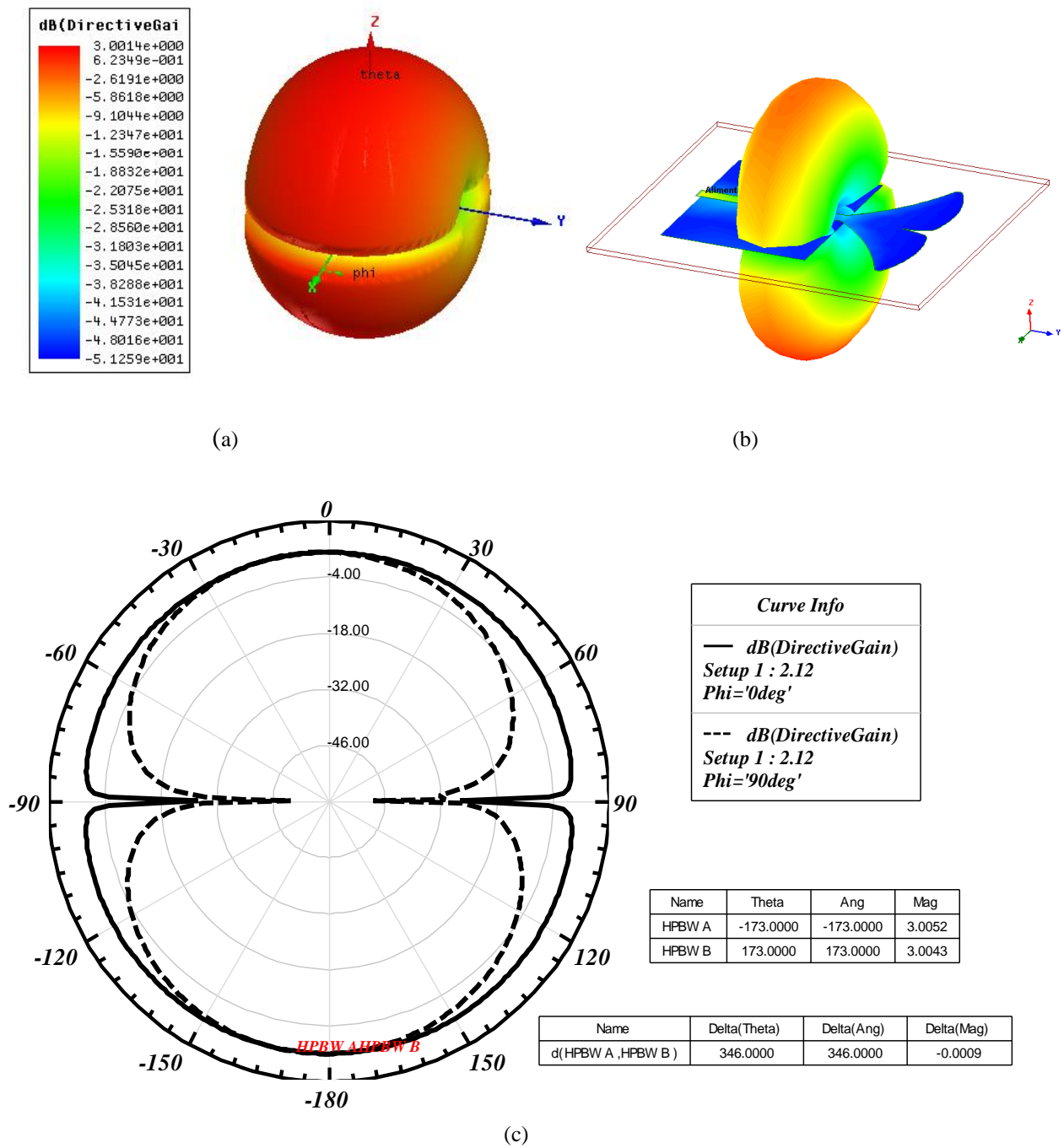


Figura 4.59 – Diagrama de irradiação da PMA têxtil ginkgo biloba em 2,12 GHz: a) ganho, 3-D; b) campo distante; c) 2-D plano-E e plano-H.

Pelo exposto nos resultados apresentados a antena monopolo impresso têxtil ginkgo biloba fabricada em *jeans* apresentou um resultado medido muito próximo do simulado com largura de banda de 2,29 GHz abrangendo as faixas de 2G, 3G e 4G, com ganho, frequência de ressonância, de 3 dBi e HPBW = 14°.

Na próxima seção são comentados o projeto e os resultados da antena do tipo *patch* bioinspirada numa árvore fractal desenvolvida pelo sistema-L.

4.4.2 Antena Têxtil do Tipo *Patch* Bioinspirada em uma Árvore Fractal

A Figura 4.60 apresenta a antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal gerada pelo sistema-L. $L = 48,43$ mm, ajustado para 30,40 mm; $W = 45,87$ mm; $L_{LT} = 15,7$ mm; $W_{LT} = 2,87$ mm.

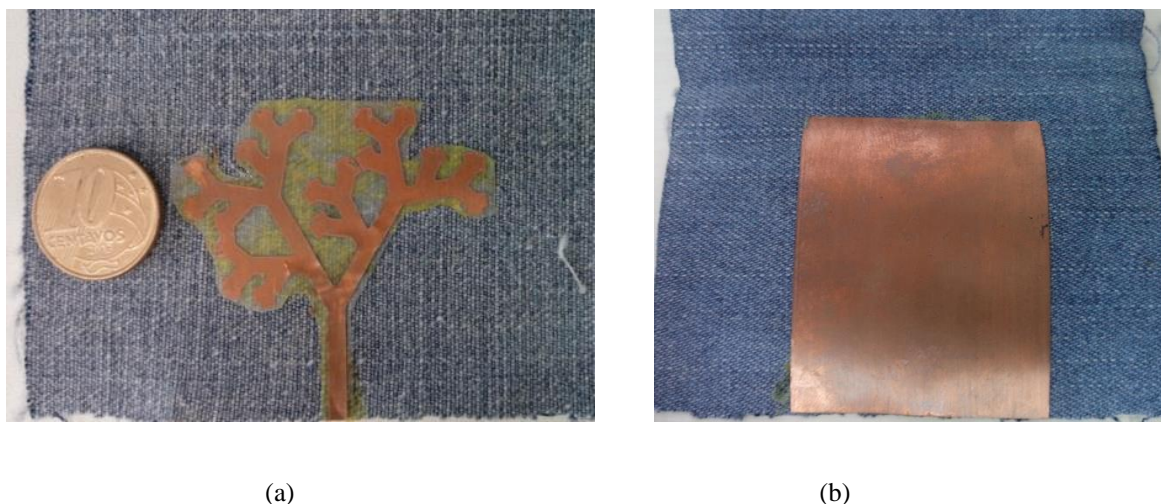
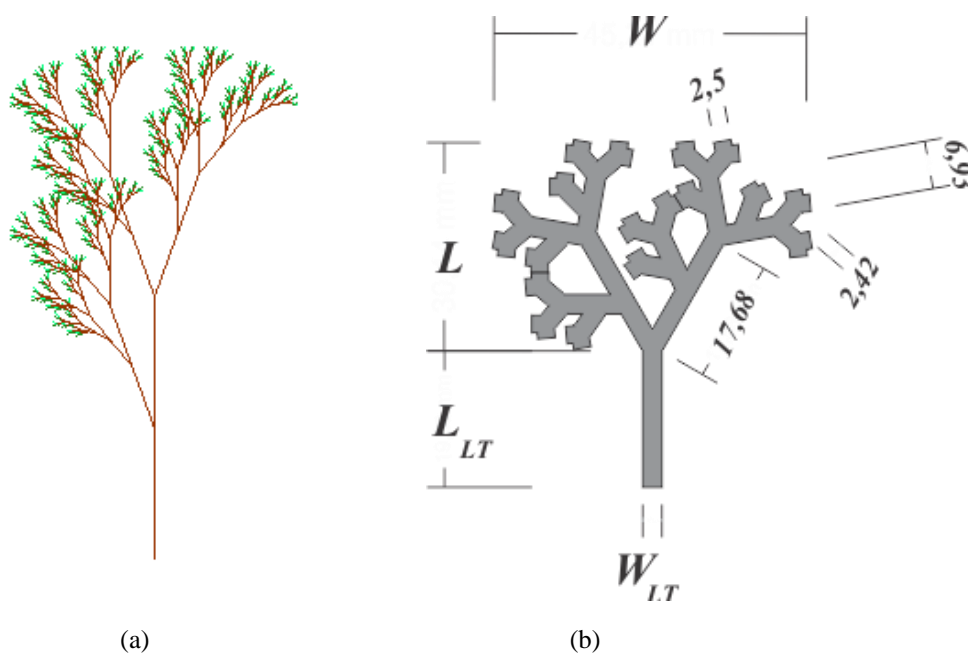


Figura 4.60 – Antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal: a) árvore fractal, sistema-L; b) geometria proposta; c) vista superior; d) vista inferior.

Na Figura 4.61 têm-se a comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado no Ansoft Designer™ da antena *patch* têxtil árvore fractal. Conforme observado esta antena tem um comportamento diferente de uma antena do tipo *patch* convencional,

pois apresenta banda larga de quase 6 GHz, abrangendo parte da Banda-C (4 ~ 8 GHz) e a Banda-X (8 ~ 12 GHz). A Tabela 4.20 apresenta os valores medidos e simulados de largura de banda e frequência de ressonância da antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal.

Tabela 4.20 – Valores medidos e simulados de largura de banda e frequências de ressonância da antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal

<i>Antena</i>	<i>BW (GHz)</i>	<i>f₁ (GHz)</i>	<i>f₂ (GHz)</i>	<i>f₀ (GHz)</i>
1 Simulação	4,49	5,4	9,89	7,62
2 Medição	5,95	5,9	11,85	7,42

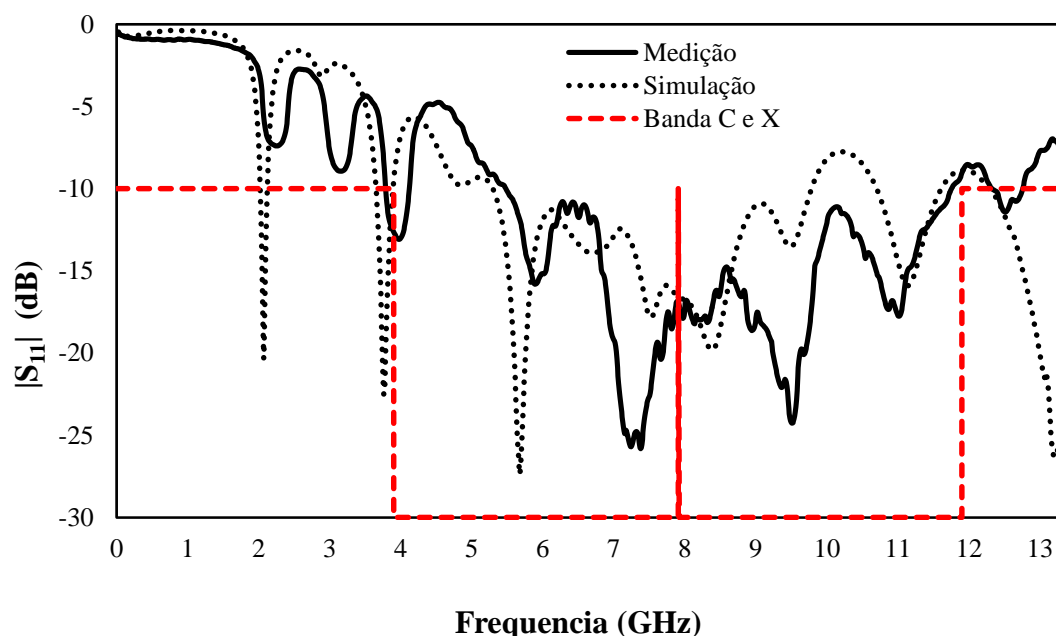


Figura 4.61 – Comparação do parâmetro $|S_{11}|$ medido e simulado da antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal.

Na Figura 4.62 é apresentada a carta de Smith da antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal simulada para as frequências de 1 GHz a 13,5 GHz. De acordo com a Figura 4.63 diversas curvas se aproximam do valor normalizado indicando as frequências que estão próximas de 50Ω . A curva vermelha interna indica o VSWR menor que 2, ou seja, a frequências com o parâmetro $|S_{11}|$ menor que -10 dB.

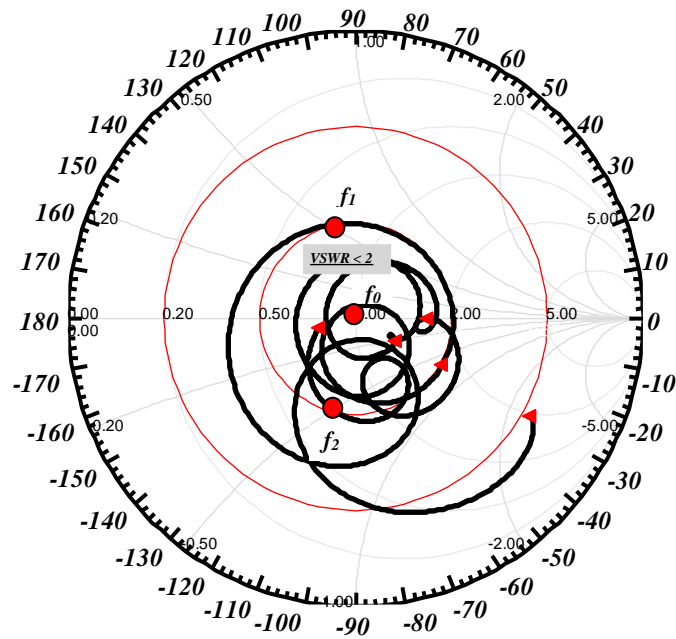
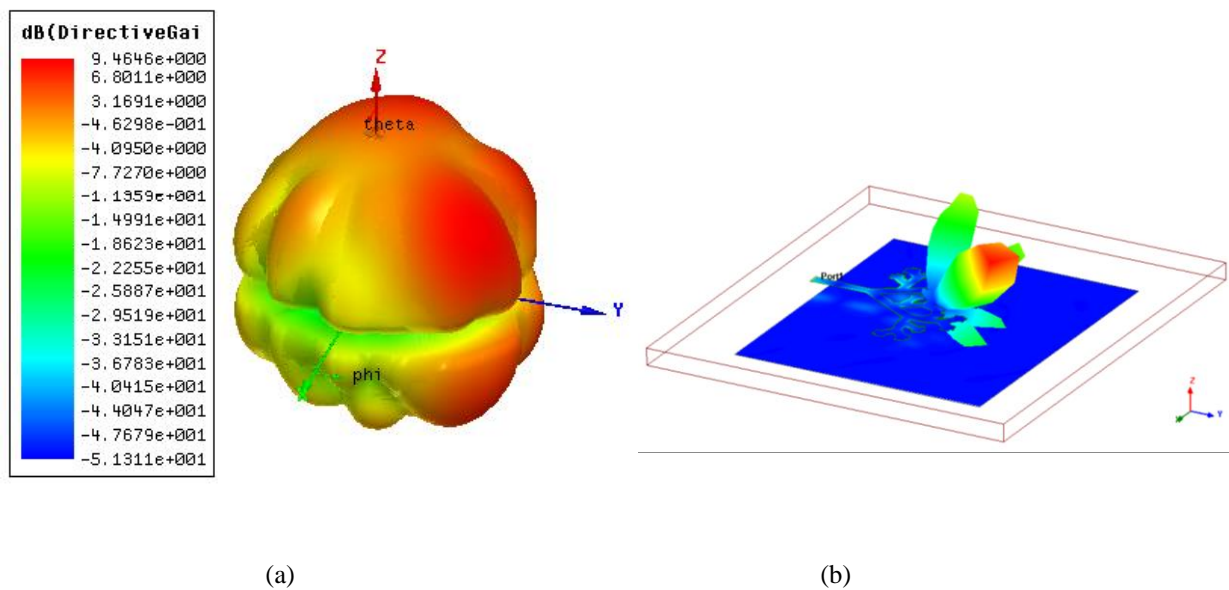


Figura 4.62 – Impedância sobre a carta de Smith da antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal.

O diagrama de irradiação 3D de ganho, de campo distante e 2-D da antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal em 7,62 GHz é observada na Figura 4.63. A antena apresentou ganho de 9,46 dB na direção de máximo, com HPBW de 45°.



(a)

(b)

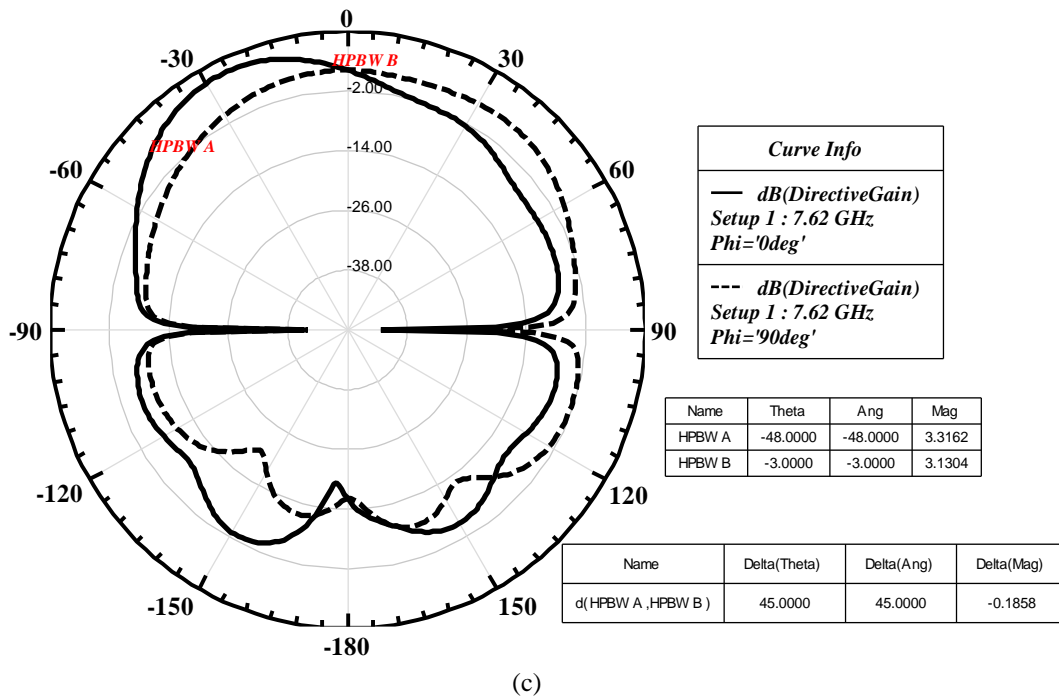


Figura 4.63 – Diagrama de irradiação da antena do tipo *patch* têxtil árvore fractal em 7,62 GHz: a) ganho, 3-D; b) campo distante; c) 2-D plano-E e plano-H.

Conforme observado a antena *patch* têxtil árvore fractal obteve frequência de ressonância próxima da projetada para 4 GHz, com largura de banda de 220 MHz. A antena obteve segunda ressonância com largura de banda de aproximadamente 6 GHz, abrangendo parte da Banda-C (4 ~ 8 GHz) e quase toda Banda-X (8 ~ 12 GHz). Um aspecto interessante é que as antenas do tipo *patch* geralmente apresentam-se de banda estreita, a presente antena apresenta-se de banda larga com ganho na frequência de ressonância (7,62 GHz) de 9,46 dBi e HPBW = 45°.

As antenas têxteis apresentadas neste trabalho são as primeiras tentativas da aplicação da geometria bioinspirada em plantas no desenvolvimento de antenas tipo monopolo impresso e *patch*, com uma nova técnica de fabricação com o uso do cobre laminado para cabo flexível. Os resultados medidos são compatíveis com os simulados com geometrias que podem ser consideradas decorativas e funcionais.

5. CONCLUSÕES

As plantas são organismos fotossintéticos, que utilizam sistemas de antenas nos centros de captação da luz, transferindo a energia captada para os centros de reação, local onde ocorre o processo fotoquímico. As plantas são estruturas eficientes cujas geometrias foram otimizadas por milhares de gerações para absorver a maior quantidade energia luminosa. Esta função é análoga às antenas com refletores parabólicos, em cujo foco são captadas as ondas eletromagnéticas. Este trabalho teve como objetivo projetar antenas dos tipos monopolo impresso e *patch* para os sistemas sem fio 4G e UWB, bioinspiradas em plantas (folhas e flores).

Para as antenas bioinspiradas do tipo monopolo impresso com refletor para faixa de 4G foram utilizadas geometrias inspiradas: na planta de cana-de-açúcar com 3 e 4 folhas para a faixa de 700 MHz e numa folha elíptica para faixa de 2,5 GHz. Os resultados dessas antenas foram comparados aos apresentados por antenas monopolo quadrado impresso com refletor nas mesmas faixas de frequências. O uso da geometria bioinspirada possibilitou a redução das dimensões das antenas. As antenas cana-de-açúcar 3 e 4 apresentaram redução de volume total de 93,8% e 95%, respectivamente, quando comparadas ao monopolo quadrado. No caso da antena folha elíptica houve uma redução de volume total de 98% em relação ao monopolo quadrado, com adequação da largura de banda para operação nas faixas requeridas de 4G e ganhos de até 6 dBi.

As antenas monopolo impresso flor de tulipa, folhas de oliveira, flor de jasmim e pétala de orquídea, projetadas para faixa de UWB apresentaram resultados que satisfazem os requisitos exigidos pelo FCC, tais como: com largura de banda superior a 7,5 GHz, HPBW > 60° e diagrama de irradiação quase omnidirecional. Dentre estes monopolos impressos, o que apresentou projeto mais compacto foi o bioinspirado na flor de jasmim. A transmissão do pulso UWB foi verificado para a antena bioinspirada na flor de jasmim. Os resultados obtidos são similares aos obtidos por uma antena monopolo circular convencional.

O projeto bioinspirado em plantas também foi usado para o desenvolvimento de antenas têxteis, com o tecido *jeans* como substrato dielétrico, com novo método de fabricação utilizando cobre laminado para cabo flexível. Para estas antenas foram utilizadas as geometrias bioinspiradas na folha do ginkgo biloba (monopolo impresso) e de uma árvore fractal gerada pelo sistema-L (*patch*). A antena têxtil ginkgo biloba medida apresentou largura de banda de

2,29 GHz abrangendo as faixas de 2G, 3G e 4G. Na frequência de ressonância de 2,12 GHz obteve-se um ganho de 3 dBi e HPBW = 14°. A antena *patch* têxtil árvore fractal apresentou comportamento banda larga abrangendo a faixa de 5,90 ~ 11,85 GHz, com ganho de 9,46 dBi em 7,62 GHz.

Para os projetos das antenas tipo monopolo impresso foi proposta uma fórmula aproximada (3.5) para o cálculo das dimensões do monopolo e do plano de terra parcial. A fórmula apresentou bons resultados nas geometrias quadrada, retangular, circular e folha elíptica.

Em comparação às geometrias euclidianas convencionais, o uso das geometrias bioinspiradas possibilitou o aumento do perímetro das antenas abordadas. Verificou-se uma melhor distribuição de corrente e um projeto mais compacto. As antenas com geometria bioinspirada possuem aparência estética, o que as caracteriza como geometrias de baixo impacto visual, podendo ser utilizadas, por exemplo, para camuflagem de antenas ou em antenas para uso em tecnologia junto ao corpo.

Como propostas para trabalhos futuros, podem ser indicados o desenvolvimento de arranjo de antenas com geometrias bioinspiradas para operação em tecnologias como WLAN, e antenas reconfiguráveis para operação em faixas de frequências variadas. Haja vista que as geometrias das plantas são em grande número, a pesquisa com as geometrias bioinspiradas em plantas podem ser utilizados no projeto de outros dispositivos de micro-ondas, como superfícies seletivas e em frequência e filtros, com aplicações médicas e não médicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COHEN, Y. B. **Biomimetics: using nature to inspire human innovation**. London: IOP Publishing, p. 1-12. Apr 2006.
- [2] WALLACE, G. G.; MOULTON, S. E.; KAPSA, R. M. I.; HIGGINS, M. J. **Organic Bionics**. Weinheim: Wiley, 2012. 238p.
- [3] BENYUS, J. M. **Biomimicry: innovation inspiration by nature**. New York: Happer Perennial, 1997. 307p.
- [4] COHEN, Y. B. **Biomimetics: biologically inspired technologies**. Pasadena: Taylor e Francis. 2006. 527p.
- [5] DRESSLER, F.; AKAN, O. B. **A Survey on Bio-Inspired Networking**. Elsevier. Computer Network. 2010. Disponível em: <<http://nwcl.ku.edu.tr/paper/J24.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2014.
- [6] PARK, C.; RAPAPORT, T. S. Short range communications for next-generation networks: UWB, 60 GHz, millimeter wave WPAN, and ZigBee. **IEEE Wireless Communications**, v. 14, p. 70-78, ago. 2007.
- [7] KIM, I.; KIM, H.; IHM, J. In: WPAN platform architecture and application design for handset. Las Vegas, **Proceedings...** Las Vegas: ICCE, 2008, p. 9-13.
- [8] ULLAH, S.; ALI, M.; HUSSAIN, A.; KWAK, K. S. In: Applications of UWB technology. IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI, **Proceedings...** Lixouri Kefalonia: 2010, p. 5-7.
- [9] ZHANG, J.; ORLIK, P. V.; SAHINOGLU, Z.; MOLISCH, A. F.; KINNEY, P. In: UWB systems for wireless sensor network. **Proceedings of the IEEE**, v. 97, n. 2, p. 313-331, Fev. 2009.
- [10] KISHK, A. **Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications**. London: InTech, 2013. 383p.

- [11] BALANIS, C. A. **Teoria das Antenas: Análise e Síntese**. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2009. 304p.
- [12] CARVALHO, M. C. C. E. S. **Padrões Numéricos e Sequências**. São Paulo: Moderna, v. 2, 1997. 77p
- [13] KELKER. **A Mitologia e a Verdade da Razão de Ouro**. Disponível em: <http://sophiaofnature.wordpress.com/2014/01/07/a-mitologia-e-a-verdade-da-razao-de-ouro/>. Acesso em: 15 nov. 2014.
- [14] DELGADO, J. A. V.; MERA, C. A. V. A Bio-inspired *patch* antenna array using Fibonacci sequences in trees. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**. v. 55. Nº 5, p.192-201, 2013.
- [15] MAJEROWICS, N. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan. 2004.
- [16] OKUNO, E.; VILELA, M. A. C. **Radiação Ultravioleta: Características e Efeitos**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física. 2005. 79p.
- [17] H. PAKRASI. **Natural Antennas: Structure & Efficiency**. PARC, St. Louis, MO, USA. Disponível em: <<http://parc.wustl.edu/research/themes/biohybrid>>. Acesso em: 12 nov. 2014.
- [18] HARAZ, O.; SEBAK, A. R. UWB antennas for wireless applications. Kishk, Ahmed. In: Advancement in microstrip antennas with recent applications. In: KISHK, A. **Advancement in microstrip antennas with recent applications**. InTech, 2013. Cap. 6, p. 125-152.
- [19] AHMED, O. M. H.; SEBAK A. R. A Novel maple-leaf shaped UWB antenna with a 5.0-6.0 GHz band-notch characteristic. **Progress In Electromagnetics Research C.**, v. 11, p. 39-49, 2009.
- [20] LEMOS, N. A.; SILVA, A. N.; PAIVA, H. F.; SILVA, P. H. F. Four-leaf clover UWB planar monopole antenna. In: MOMAG 2014: 16º, Curitiba, **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014. 1. CD. p. 909-915.
- [21] BRASIL. Resolução nº 625, de 11 Novembro de 2013. Aprova a Atribuição, a Destinação e o Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequência na faixa de 698 MHz a 806 MHz. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, ANATEL, Brasília, DF, 13 nov. 2013. Seção 1, p. 129.

- [22] BRASIL. Resolução nº 544, de 11 de Agosto de 2010. Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências nas Faixas de 2.170 MHz a 2.820 MHz e de 2.500 MHz a 2.690 MHz. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, ANATEL, Brasília, DF, 16 ago. 2010. Seção 1, p. 69.
- [23] HANZO, L.; AKHATMAN, Y. L. W.; JIAN, M. **MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX: coherent versus non-coherent cooperative turbo – transceivers**. Southampton: Wiley, 2011. 692p
- [24] CARRIEL, V. S. A evolução do LTE até o padrão 4G de 1Gbits/s. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, São Paulo, v. 3, p. 30-33, Out. 2013.
- [25] FERRAZ, L. G. C.; GARCIA, R. R. G.; NUNES, D. Estudo comparativo entre sistemas propostos para 4G: LTE e WiMAX móvel. In: INATEL – INCITEL, **Anais...** São Paulo: 2012, p. 73-78.
- [26] 3GP. Technical Specification Group Radio Access Network Requirements 3GP TR 25.913 V9.0.0. Release 9. **3GP**. 2009.
- [27] SHEN, X. *et al.* **Ultra-wideband wireless communications and networks**. London: Wiley. 2006. 322p.
- [28] BARRET, T.W. History of ultra wide-band (UWB) radar & communications: pioneers and innovations. Cambridge. **Progress In Electromagnetics Symposium (PIERS2000)**, pp. 1-42, Jul. 2000.
- [29] MARTINS, T. C. **Controle de banda e sintonia de antenas monopolo planar para sistemas UWB**. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica/Universidade Federal do Pará, Belém.
- [30] GHAVAMI, M.; MICHAEL, L. B.; KOHNO, R. **Ultra wideband signals and system in communication engineering**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2007. 304p.
- [31] FCC. Federal Communications Commission, First Report and Order, Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission System. **FCC**, 02-48, 2002.

- [32] YADAV, D.; TIWARI, V. UWB antenna designing: challenges and solutions. **Int'l Journal of Computing, Communications & Instrumentation Eng. (IJCCIE)**, v. 1, p. 39 – 42, 2014.
- [33] SOUZA, F. N. **Ultra-wideband sobre fibra ótica**. 2012. 39 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrônica e de Computadores) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [34] ZHU, F.; GAO, S.; HO, A. T. S.; BROWN, T. W. C.; LI, Z. Z. Low-Profile Directional Ultra-Wideband Antenna for See-Through-Wall imaging Application. **Progress in Electromagnetics Research**. v. 121, p. 121 – 139, 2011.
- [35] ISO/IEC 26908, I. S. **Information technology**, 2. ed. – Telecommunication and Information Exchange Between Systems – MAC and PHY interface for ISO/IEC 26907. ISO/IEC. 2009.
- [36] CHONG, C.; WATANABE, F.; INAMURA, H. Potential of UWB technology for the next generation wireless communications. In: IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, **Proceedings...** 2006, p. 422-429.
- [37] BALANIS, C. A. **Teoria das Antenas: Análise e Síntese**. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2009. 344p.
- [38] SHENG H.; ORLIK, P.; HAIMOVICH, A. M.; CIMINI, L. J.; ZHANG, J. On the Spectral and Power Requirements for Ultra-Wideband Transmission. In: IEEE International Conference on Communications, **Proceeding...** 2003, v. 1, p. 738-742.
- [39] MAALIK, S. **Antenna Design for UWB Radar Detection Application**. 2010. 32 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Comunicação) – Departamento de Sinais e Sistemas/Chalmers University of Technology, Gotenborg.
- [40] UMBARKAR, P; LABADE, R. P. Study of antenna parameters and design of an ultra-wideband antenna. **International Journal of Computer Networking, Wireless and Mobile Communications**, v. 3, pp. 75-82, Jun. 2013.

[41] JUNQUEIRA, C.; PEROTONI, M.; FILHO, B. S. A.; VICENTINI, R.; CANTO, M. A. Caracterização de Antena de Impulso Tipo Corneta no Domínio do Tempo. In: X Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa. São José dos Campos, **Anais...** São José dos Campos: 2008, p. 174 – 178.

[42] PAN, J. **Medical applications of Ultra-Wideband (UWB)**. Saint Louis: Washington University, Abr. 2008. Disponível em: <<http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-08/ftp/uwb.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2014.

[43] AYAR, E. **UWB Wireless Video Transmission Technology in Medical Applications**. San Jose: NDS Surgical Imaging, 17 ago. 2010.

[44] FONTANA, R. J. Recent system applications of short-pulse ultra wideband (UWB) technology. **IEEE Microwave Theory and Tech.**, v. 52, No. 9, Set. 2004.

[45] CHEN, Z. N.; CHIA, M. Y. W. **Broadband planar antennas: Design and Applications**. Chichester: Wiley, 2006. 258p.

[46] HARAZ, O.; SEBAK, A. R. Numerical and experimental investigation of a novel ultra-wideband butterfly shaped printed monopole antenna with bandstop function. **Progress In Electromagnetics Research C**. v. 18, pp. 111 – 121, 2011.

[47] BAO, L. X.; AMMANA, M. J. Investigation on UWB Printed Monopole Antenna with Rectangular Slitted Ground Plane. **Microwave Opt. Technol. Lett.**, v. 49, p. 1578-1585, Jul. 2007.

[48] OSMAN, M. A. R.; RAHIM, M. K. A.; AZFAR, M.; KAMARDIN, A. K.; ZUBIR, F.; SAMSURI, N. A. Design and analysis UWB wearable textile antenna. In: 5th European Conference on Antennas and Propagation, **Proceeding...** 2010, p. 530-533.

[49] GUPTA, N. P.; MAHESHWARI, R.; KUMAR, M. Advancement in ultra wideband antennas for wearable applications. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 4, p, 341-348, Ago. 2013.

[50] RIBEIRO DA SILVA, M. **Novas configurações de monopolos planares quase-fractais para sistemas de comunicações móveis. Dissertação.** 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia/Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

[51] SQUIER, G. O. **Tree as Antennas.** Scientific American. British Patent. p. 1-12, Jun. 1919. Disponível em: <http://w5jgv.com/tree_antenna/George%20%20Squire%20Tree%20Antenna%20Patent.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2014.

[52] AMYA, M.; ITO, Y.; YAMAMOTO, M.; NOJIMA, T. 2-Element UWB array antenna using leaf-shaped bowtie element. In: Antennas and Propagation Society International Symposium, **Proceeding...** 2007, p. 1961-1964.

[53] YAMAMOTO, M.; TOKUYAMA, D.; NOJIMA, T. Design of quase-millimeter wave leaf-shaped bowtie array antenna for UWB applications. In: IEEE Antennas and Propagation Soc Symposium. **Proceedings...** Toronto: 2010, p. 1-4.

[54] KOYANAGI, T.; YAMAMOTO, M.; NOJIMA, T. **A study of leaf-shaped bowtie antenna backed by an electromagnetic band gap structure.** 2010. Disponível em: <<http://ap-s.ei.tuat.ac.jp/isapx/2010/pdf/114.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2014.

[55] FUJITA, S.; YAMAMOTO, M.; NOJIMA, T. A study of a leaf-shaped bowtie slot antenna for UWB applications. In: ISAP. **Proceedings...** Nagoyas: 2012, p. 830-833.

[56] LEYESTANAK, A. A. L. Ultra wideband rose leaf microstrip *patch* antenna. **Progress In Eletromagnetics Research**, v. 86, p. 155-168, 2008.

[57] GHOLIPOUR, A.; ASKARPOUR, A. N.; FARAJI-DANA, R. A Band-notched tulip antenna for UWB applications. Amsterdam. In: EuMC. **Proceedings...** Amsterdam: 2008, p. 881-884.

[58] TANYER-TIGREK, F. M.; MATEOS, R. M.; LAGER, I. E. Design of an AMC plane for a unidirectional, low-profile tulip-loop antenna. In: EuCAP 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation. **Proceeding...** Berlin: Mar. 2009, p. 3139-3142.

- [59] TANYER-TIGREK, F. M.; TRAN, D. P.; LAGER, I. E.; LIGTHART, L. P. Wide-band Tulip-Loop Antenna. In: EuCAP 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation. **Proceeding...** Berlin: Mar. 2009, p. 1446-1449.
- [60] NAKANO, H.; OGINO, Y.; YAMAUCHI, J. Bent Four-Leaf Antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 10, p. 223-226. 2011.
- [61] SEETHARAMAN, R.; RAJ, E. G. Printed Leaf Shaped Monopole Antenna. **International Journal of Computer Applications**, v. 45, No. 5, Abr. 2012.
- [62] SILVA JÚNIOR, P. F.; COSTA E SILVA, J.; SILVA, P. H. F. Projeto de uma Antena de Folha para 700 MHz. In: MOMAG 2014: 16^o SBMO, Curitiba, **Anais...** Curitiba: 2014, p. 758-763, 1. CD.
- [63] **The leaf Indoor HDTV Antenna**. Disponível em: < <http://store.gomohu.com/the-leaf-indoor-hdtv-antenna-open-box.html> > . Acesso em: 10 out. 2014.
- [64] **2.4 GHz/5.8GHz 3dB Double Frequency 4&3 Blade Clover Leaf Antenna Directional**. <<http://www.rfsupplier.com/24ghz58ghz-blade-clover-leaf-antenna-p-2652.html>>. Acesso em: 15 out. 2014.
- [65] FLINT, J. A. A Biomimetic Antenna in the Shape of Bat's Ear. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. v. 5, pp. 145-147, Dez. 2006.
- [66] HUFF, G. H.; GOLDBERGER, S. A. Biologically-Inspired Vascular Antenna Reconfiguration Mechanism. **Electronics Letters**. v. 47. N^o 11. p. 637-638, Mai. 2011.
- [67] MAHMOUD, M. N.; ALKAMCHOUCI, H. A bioinspired microstrip antenna based on the idea of a cockroach antenna. **Microwave and Optical Technology Letters**. v. 53, N. 1, Jan. 2011.
- [68] EBNABBASI, K. A Bio-Inspired Printed-Antenna Transmission-Range Detection System. Boston: **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, Jun. 2013, v. 55, n. 3, p. 193-200.

[69] ROJAS, C. B. D.; CARDOSO L., A.; CHAVES, L. H.; LAPP, M.; RODRÍGUEZ, H.; RUIZ Z., T.; TORRECILLA, P. **Botánica** sistemática: fundamentos para su estudio. Maracay: Universidad Central de Venezuela, 2006. 242p.

[70] MACCULLOUGH, S.; RUPERT, K. C. **Botany Handbook For Florida**. Gainesville: IFAS, 1989. Disponível em:
<http://plants.ifas.ufl.edu/education/resources/botany_handbook.pdf>. Acesso em: 07 out. 2014.

[71] JESUS, M. S. S. **Os Números de Fibonacci**. São Paulo: UNICAMP, 2013, 15 p. (Apostila, R.A.: 147180). Disponível em:
<www.ime.unicamp.br/~ftorres/ENSINO/MONOGRAFIAS/M_M1_FM_2013.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2014.

[72] FERRER, J. V. **O Número de Ouro na Arte na Arquitetura e na Natureza: Beleza e Harmonia**. Porto Alegre: UFRGS, 2006. Disponível em:
<http://www.ufrgs.br/espmat/disciplinas/midias_digitaes_II/modulo_IV/numero_de_ouro.pdf>. Acesso em: 12 set. 2014.

[73] FREIRE, J. **Proporção Áurea**. Disponível em:
<<http://kdujao.blogspot.com.br/2015/02/proporcao-aurea.html>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

[74] RANGEL, G. **Divina Proporção-Proporção Áurea-Número de Ouro-Número de Deus**. <universodagil.blogspot.com.br/2011_08_01_archive.html>. Acesso em: 13 nov. 2014.

[75] BIEMBEGUT, M. S. **Número de Ouro e Secção Áurea**. São Paulo: Edifurb, 1998.

[76] ASSIS, T. A. d; MIRANDA, José Garcia Vivas; MOTA, Fernando de Brito. Geometria Fractal: Propriedades e Características de Fractais Ideais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, p. 2304, 2008.

[77] FALCONER, K. **Fractal geometry: mathematical foundations and application**. 2. ed. London: Wiley & Sons, 2003. 337p.

[78] LANGDON, M. C. **Árvore Fractal**. 2010. Disponível em:
<cienciahoje.uol.com.br/noticias/2010/10/imagens/arvore-fractal.jpg/view>. Acesso: 15 dez.

2014.

[79] **O que é um Fractal**. Disponível em: <www.cienciatube.com/2011/11/o-que-e-um-fractal.html>. Acesso em: 10 set. 2014.

[80] MARTINS, J. M. S. **Sistemas de Lindenmayer: modelagem de árvores com recursos do Maple**. 2008, 108 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Matemática) – Departamento de Matemática Pura/Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto.

[81] THOMAS, G. B. **Cálculo**. v. 2. São Paulo: Pearson, 2007. 1019p.

[82] GIELIS, J. A Generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstratic shapes. **American Journal of Botany**, p. 333-338, 2003.

[83] ANTHONY, S. **New nature-inspired antenna improves wireless performance by 6-8x, coming to routers and smartphone soon**. Extreme tech, 11 fev. 2014.

[84] **Mobi Antennas**. Disponível em: <www.mobi-antennas.com>. Acesso em: 10 out. 2014.

[85] ANJANRIA, V.; RAM, V. Antenna concealment solution for wireless industry: improve aesthetics of your network and cell sites with artistic look and utilize tower space for advertisement without compromising technical requirements space for advertisement without compromising technical requirements. **International Journal of Engineering Development and Research (IJEDR)**, p. 57-59. 17, 18 Jan. 2014.

[86] **Zerofive-Antennas**. <http://www.zerofive-antennas.com/>. Acesso em: 15 dez. 2014.

[87] PELL, B. D.; SULIC, E.; ROWE, W. S. T. Advancements in automotive antennas. In: CHIABERGE, Marcello. **New Trends and Developments in Automotive System Engineering**. Rijeka. INTECH, p. 513-538. 2011.

[88] BESCHIZZA, R. **Camo Satellite Dishes Kinda Sorta Blend into Environment**. Disponível em: <http://gadgets.boingboing.net/2008/06/23/camo-satellite-dishe.html>. Acesso em: 16 dez. 2014.

[89] **The Washable Wearable Antenna**. Disponível em: http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/The_washable_wearable_antenna. Acesso em: 15 nov. 2014.

- [90] KHAN, J. Y.; YUCE, M. R. Wireless Body Area Network (WBAN) for Medical Applications. In: CAMPOLO, D. **New Developments in Biomedical Engineering**. INTECH, p. 590 – 628. 01 Jan 2010.
- [91] SALVADO, R.; LOSS, C.; GONÇALVES, R.; PINHO, P. **Textile materials for the design of wearable antennas: a survey**. *Sensors*, p. 15841-15857. 12 Nov. 2012.
- [92] LIM, Gee; WANG, Zhao; WANG, Jing Chen; LEACH, Mark; ZHOU, Rong; LEI, Chi-Un; MAN, Ka Lok. Wearable textile substrate *patch* antennas. **Engineering Letters**, Mai. 2014.
- [93] JOSH, B. **Palm Tree Antennas**. Disponível em: <http://archive.coasttocoastam.com/gen/page2156.html?theme=light>. Acesso em: 20 nov. 2014.
- [94] MENSVOORT, V. **What is Next Nature? Arizona gets a Cactus Cellular Tower Too**. Disponível em: <<http://www.nextnature.net/2012/08/arizona-gets-a-cactus-cellular-tower-too/>>. Acesso em: 15 dez. 2014.
- [95] BESCHIZZA, R. **Camo Satellite Dishes Kinda Sorta Blend into Environment**. Disponível em: <<http://gadgets.boingboing.net/2008/06/23/camo-satellite-dishe.html>>. Acesso em: 15 Dez. 2014.
- [96] **The Antenna Company International**. Disponível em: www.antennacompany.com. Acesso em: 22 dez. 2014.
- [97] WENTWORTH, S. M. **Eletromagnetismo aplicado: abordagem antecipada das linhas de microfita**. São Paulo: Wiley, 2007.
- [98] BONFIGLIO, A.; DE ROSSI, D. **Wearable monitoring system**. New York: Springer, 2011, p. 296.
- [99] CAVALCANTE, G. A. **Desenvolvimento de circuitos planares sobre substratos têxteis**. 2014. 145 f, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia/Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- [100] SURVASE, S. C.; DESHMUKH, V. V. Design of wearable antenna for telemedicine application. **International Journal of Engineering Science and Innovative Technology**, v. 2,

p. 574-580, Mar. 2013.

[101] KANNAN, P. M.; PALANISAMY, V. Dual band rectangular *patch* wearable antenna on *jeans* material. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 3, p. 442- 446, 2012.

[102] DIERCK, A.; ROGIER, H. A wearable active antenna for global positioning system and satellite phone. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 61, n. 2, p. 532-538, Fev. 2013.

APÊNDICE I

Nas PMA circular e flor de jasmim (8 mm) foram medidos a distorção do pulso UWB, realizadas conforme apresentado na seção 2.2.2. O *setup* de medição das antenas para a transmissão do pulso UWB pode ser visualizado na Figura A.1.

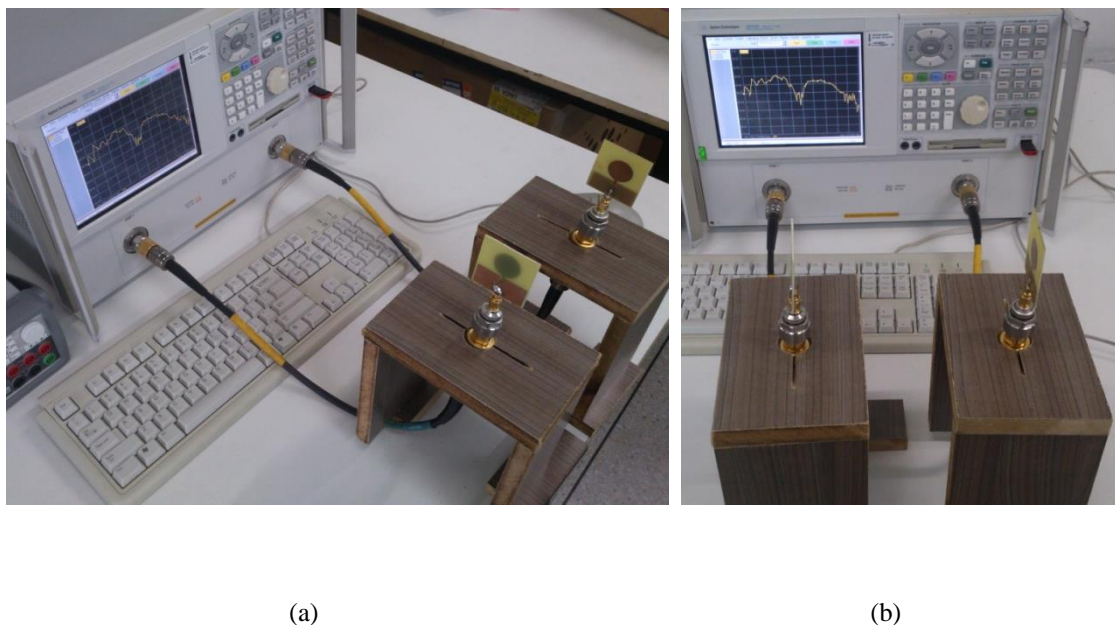


Figura A.1 – *Setup* de medição para transmissão do pulso UWB: a) PMA circular; b) PMA flor de jasmim (8 mm).

Na medição da distorção do sinal foi utilizado o parâmetro $|S_{21}|$ medido da antena tipo monopolo impresso circular cujo resultado foi multiplicado pela fórmula analítica (2.7) em frequência. Para representação do sinal no tempo foi aplicada a transformada discreta inversa de Fourier; o resultado encontrado foi comparado com o pulso original.

Para o monopolo impresso circular, a Figura A.2 apresenta a comparação do espectro do pulso UWB transmitido (calculado de forma analítica e numérica, via DFT), o parâmetro $|S_{21}|$ medido e a máscara espectral FCC com valores normalizados.

A Figura A.3 apresenta a comparação do pulso transmitido e recebido usando-se o monopolo impresso circular (valores normalizados).

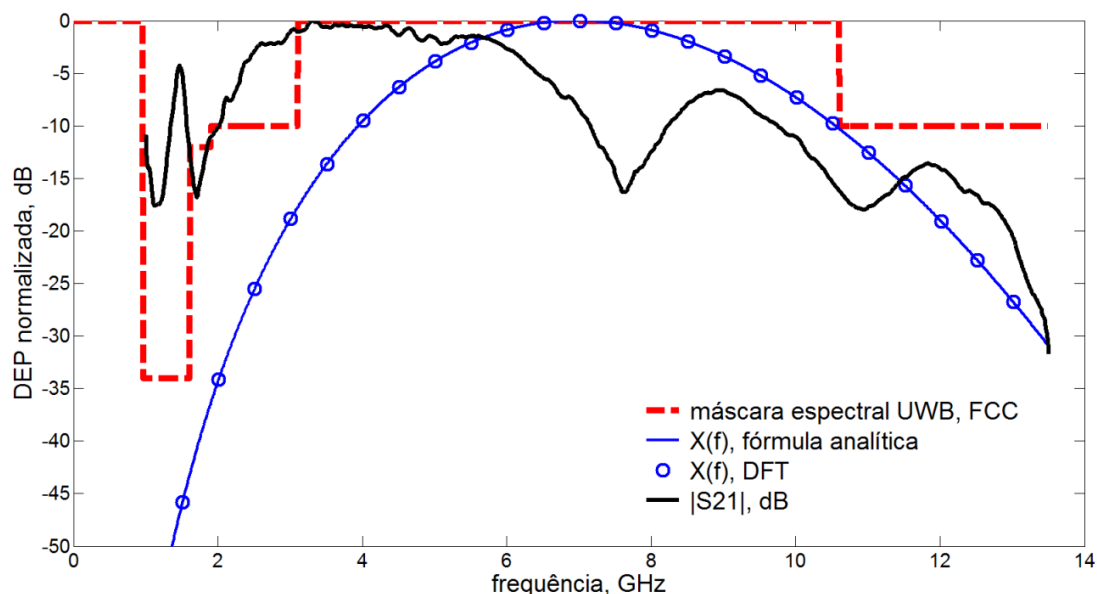


Figura A.2 – Resultados obtidos para medição de distorção do pulso UWB usando-se o monopolo impresso circular: espectro do pulso UWB, parâmetro $|S_{21}|$ medido e máscara espectral FCC (valores normalizados).

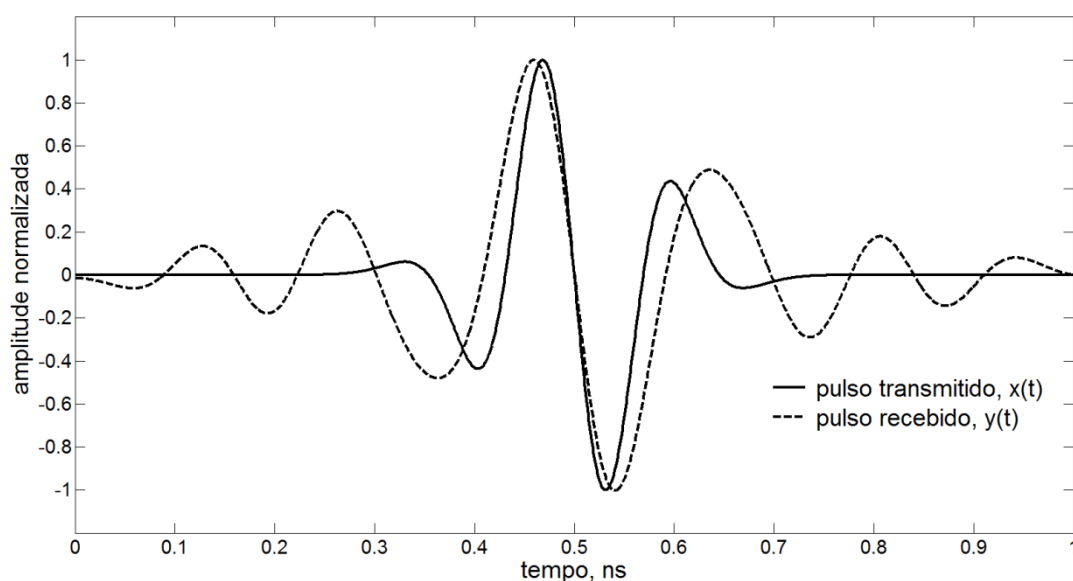


Figura A.3 – Comparação entre os pulsos transmitido e recebido usando-se o monopolo impresso circular (valores normalizados).

Conforme observado na Figura A.3, considerando-se o centro do pulso, o pulso recebido apresentou formato similar ao pulso transmitido, porém observa-se o surgimento de ondulações nas extremidades do pulso indicando a forma de distorção do pulso recebido em relação ao pulso transmitido.

Para o monopolo impresso flor de jasmim (8mm), a Figura A.4 apresenta a comparação do espectro do pulso UWB transmitido (calculado de forma analítica e numérica, via DFT), o parâmetro $|S_{21}|$ medido e a máscara espectral FCC com valores normalizados.

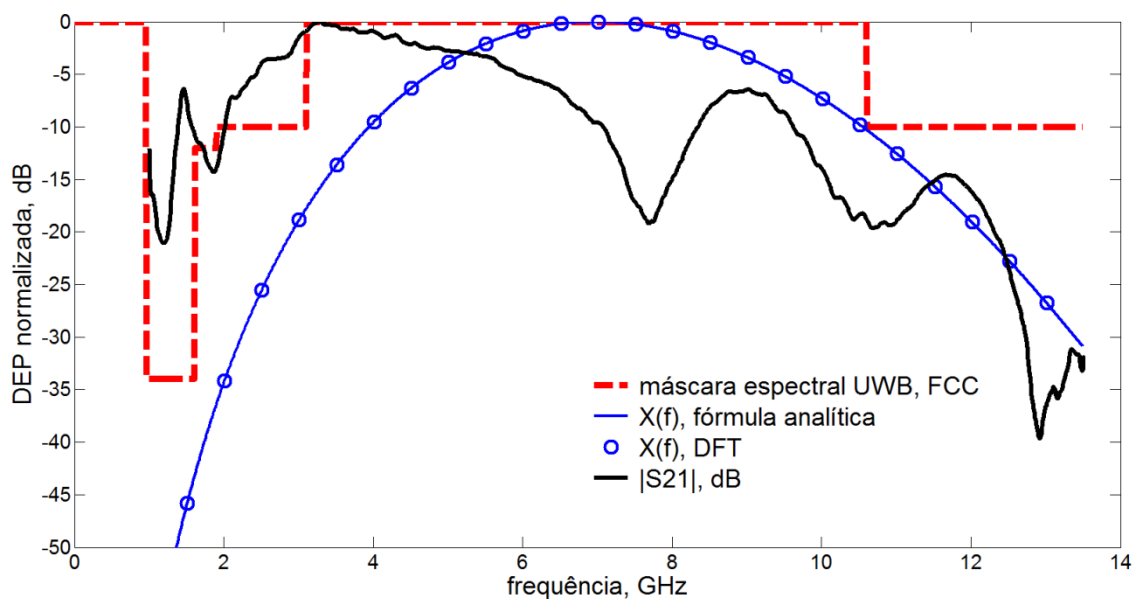


Figura A.4 – Resultados obtidos para medição de distorção do pulso UWB usando-se o monopolo impresso flor de jasmim (8 mm): espectro do pulso UWB, parâmetro $|S_{21}|$ medido e máscara espectral FCC (valores normalizados).

A Figura A.5 apresenta a comparação do pulso transmitido e recebido usando-se o monopolo impresso flor de jasmim (8mm), valores normalizados.

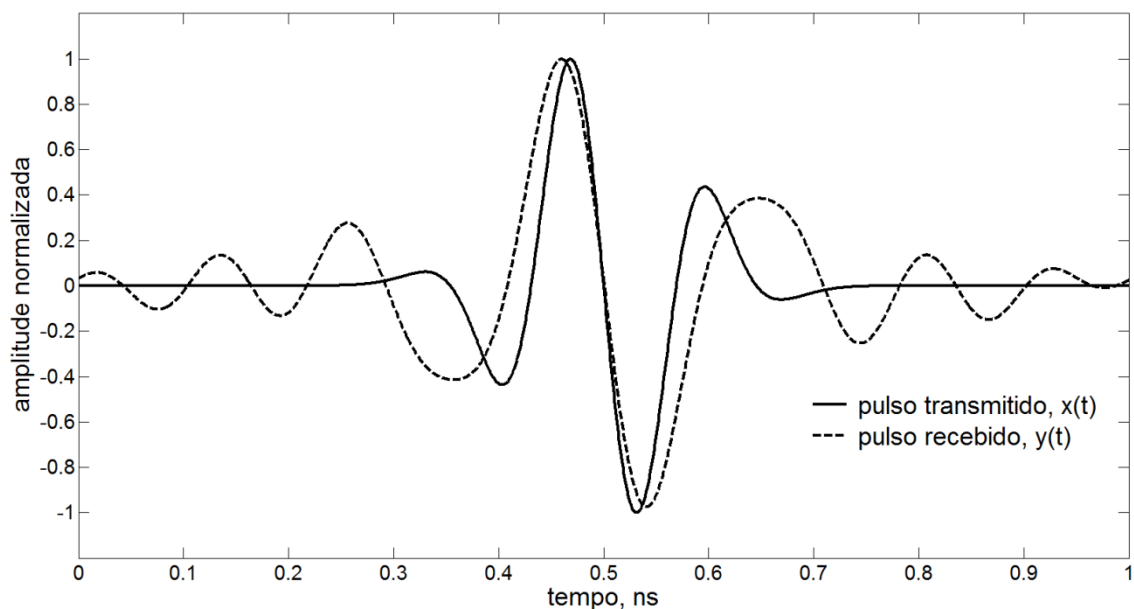


Figura A.5 – Comparação entre os pulsos transmitido e recebido usando-se o monopolo impresso flor de jasmim (8 mm), valores normalizados.

Conforme resultados apresentados as antenas apresentaram distorção de pulso similares com faixa de operação dentro da máscara espectral FCC.