



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Paulo Fernandes da Silva Júnior

**Arranjos de Antenas Bioinspiradas Desenvolvidos pela  
Expressão de Gielis**

Campina Grande – PB  
Dezembro - 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

## Arranjos de Antenas Bioinspiradas Desenvolvidos pela Expressão de Gielis

Paulo Fernandes da Silva Júnior

Tese para o Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire  
Orientador

Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres  
Orientador

Campina Grande – PB  
Dezembro - 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a Silva Júnior, Paulo Fernandes da.  
Arranjos de antenas bioinspiradas desenvolvidos pela expressão de Gielis / Paulo Fernandes da Silva Júnior. – Campina Grande, 2017.  
78 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.  
"Orientação: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Alexandre Jean René Serres".  
Referências.

1. Formas Bioinspiradas. 2. Antenas. 3. Arranjo de Antenas. 4. Expressão de Gielis. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Serres, Alexandre Jean René. III. Título.

CDU 621.396.67(043)

**"ARRANJOS DE ANTENAS BIOINSPIRADAS DESENVOLVIDOS PELA EXPRESSÃO DE  
GIELIS"**

**PAULO FERNANDES DA SILVA JÚNIOR**

**TESE APROVADA EM 15/12/2017**

*RAIMUNDO C. S. FREIRE*

**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG**  
Orientador(a)

*Alexandre Jean René Serres*

**ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, Dr., UFCG**  
Orientador(a)

*Adaildo Gomes d'Assunção*

**ADAILDO GOMES D'ASSUNÇÃO, Dr., UFRN**  
Examinador(a)

*Paulo Henrique da Fonseca Silva*

**PAULO HENRIQUE DA FONSECA SILVA, Dr, IFPB**  
Examinador(a)

*Francisco M. de Assis*

**FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG**  
Examinador(a)

*Benedito Antonio Luciano*

**BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

*Edmar Candeia Gurjao*

**EDMAR CANDEIA GURJAO, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

A Deus, para mim, criador e mantenedor de todas as coisas.

À minha família, meus pais, os quais muito se empenharam em darem o melhor possível na educação.

À minha querida esposa Janaína e às minhas filhas, Jayne e Gabrielle, pela grande paciência em dispensar horas e horas a fio para que este trabalho pudesse ser realizado.

# Agradecimentos

São muitos aqueles a quem devo agradecimentos, certamente seriam muitas linhas com centenas de nomes e biografias que me inspiraram e contribuíram na caminhada para o término desta Tese. Porém não poderia deixar de citar alguns destes personagens.

Agradeço aos meus pais, Paulo Fernandes e Odete Carneiro, pelo empenho na educação infantil.

Agradeço à minha querida esposa, Janaína, e às minhas amadas filhas, Jayne e Gabrielle, que me suportam todos os dias, me apoiando sempre nas decisões tomadas.

Agradeço aos meus orientador, prof. Raimundo Freire e Alexandre Serres, que como verdadeiros orientadores têm guiado a pesquisa para melhores resultados.

Agradeço ao grupo de pesquisa do Laboratório de Instrumentação e Medições e do Laboratório de Radiometria, pela receptividade e apoio no uso dos computadores para realização de simulações e medições.

Agradeço à Universidade Federal de Campina Grande, ao Centro de Engenharia Elétrica e Informática, ao Departamento de Engenharia Elétrica, e à Copele.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do IFPB, pela permissão de uso do laboratório de medições.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível pelo apoio financeiro sem o qual esta Tese não seria possível.

# Resumo

Nos últimos anos, as pesquisas que consideram soluções inspiradas na natureza têm atraído a atenção de muitas instituições no mundo. Sistemas naturais, para garantir sua perpetuidade, necessitam se adaptar ao meio ambiente. Assim, suas formas, conexões internas e externas podem ser usadas como soluções otimizadas para problemas que, em muitas situações, são análogos aos problemas encontrados na engenharia. Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de antenas e arranjo de antenas bioinspiradas nas formas das plantas, com substratos flexíveis (denim, poliamida e acetato de celulose – dielétrico transparente), rígidos (fibra de vidro e silício) e elementos irradiantes em cobre, alumínio e filme de óxido de tin índio (condutor transparente). A metodologia é baseada na investigação das formas bioinspiradas em plantas, com imagens geradas pela expressão de Gielis para simulação no programa *Designer* da plataforma *ANSYS*, comparando com os resultados experimentais dos protótipos. O uso das formas bioinspiradas possibilitaram o aumento do perímetro das antenas e conseqüentemente o aumento de seu comprimento elétrico, chegando a estruturas mais compactas que a forma circular e quadrada, característica semelhante à dos fractais, operando nas faixas de frequências de WLAN e ISM, implementadas em antenas planares, e métodos de fabricação diferentes.

**Palavras-chave** – Formas bioinspiradas, antenas, arranjo de antenas, expressão de Gielis.

# Abstract

In recent years research into solutions inspired by nature has attracted the attention of many institutions in the world. Natural systems to ensure their perpetuity, normally adapted their characteristics to the environment, thus their forms, internal and external connections can be used as optimized solutions to problems, which in many situations are analogous to the ones encountered in engineering. In this work is proposed the development of plant-shapes inspired antenna array, with flexible substrates (denim, polyamide and acetate of the cellulose – transparent substrate), rigid (fiberglass and silicon) substrates, and radiating elements in copper, aluminium and film of oxide Tin Indio (transparent conductor). The proposed methodology uses images generated according to the Gielis expression simulated in the ANSYS Designer software, whose results are compared with measurements in prototypes. The use of the bio-inspired shapes promoted increase in antenna perimeters and consequently increase their electrical length, allowing the more compact structures than the circular and square shapes, similar characteristic to the fractals, operating in the WLAN and ISM bands, in planar antennas, and different manufacturing methods.

**Key-words** – Bio-inspired shapes, antennas, antenna arrays, Gielis expression.

# Figuras

Figura 2.1 – Antena <i>patch</i> .....	18
Figura 2.2 – Monopolo planar.....	20
Figura 2.3 – Arranjo de antenas com 16 elementos (4x4) [30].....	22
Figura 2.4 – Estrutura básica de uma folha [48].....	27
Figura 2.5 – Estrutura das folhas: (a) margens; (b) bases; (c) ápice [50].....	27
Figura 2.6 –Imagens geradas pela expressão de Gielis com os parâmetros utilizados.....	29
Figura 2.7 – Diagrama do projeto de antenas bioinspiradas em plantas com uso de folhas elípticas.....	31
Figura 2. 8 – <i>Setup</i> de caracterização por sonda: (a) denim; (b) poliamida, (c) acetato.....	34
Figura 2.9 – Medição da permissividade elétrica e da tangente de perda do denim. ....	34
Figura 2.10 – Medição da fibra de vidro: (a) permissividade elétrica; (b) tangente de perdas. ....	35
Figura 2.11 – Medição do acetato: (a) permissividade elétrica; (b) tangente de perdas.....	36
Figura 2.12 – Medição da poliamida. ....	37
Figura 3.1 – Arranjo trifolioso da <i>bidens pilosa</i> [54]. ....	38
Figura 3.2 – Antenas Simuladas: (a) inclinação das folhas elípticas; (b) folha elíptica gerada; (c) antena circular com dimensões; (d) antena têxtil bioinspirada nas folhas da <i>bidens pilosa</i> com dimensões; (e) protótipo.....	40
Figura 3.3 – Resultados simulados do parâmetro $ S_{11} $ do <i>patch</i> circular e da antena bioinspirada nas folhas da <i>bidens pilosa</i> .....	40
Figura 3.4 – Simulação e medição do parâmetro $ S_{11} $ da antena têxtil bioinspirada nas folhas da <i>bidens pilosa</i> . ....	41
Figura 3.5 – Diagrama de irradiação 2D e 3D das antenas <i>patch</i> simuladas: (a) forma circular; (b) bioinspirada nas folhas da <i>bidens pilosa</i> .....	42
Figura 3.6 – Impedâncias sobre a carta de Smith da antena bioinspirada nas folhas da <i>bidens pilosa</i> : (a) simulação; (b) medição. ....	43
Figura 3.7 – Desenvolvimento do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de <i>ginkgo biloba</i> : (a) folha da planta de <i>ginkgo biloba</i> [56]; (b) antena simulada com dimensões; (c) elemento irradiante do protótipo e plano de terra do protótipo. ....	44

Figura 3.8 – Simulação e medição do parâmetro $ S_{11} $ do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de <i>ginkgo biloba</i> . .....	45
Figura 3.9 – Medição do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de <i>ginkgo biloba</i> : (a) foto da medição no bolso; (b) foto da medição na mão; (c) foto da medição na cabeça; (d) parâmetro $ S_{11} $ . .....	46
Figura 3.10 – Diagrama de irradiação do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de <i>ginkgo biloba</i> : (a) 3D; (b) 2D. ....	47
Figura 3.11 – Impedância sobre a carta de Smith do monopolo planar têxtil bioinspirada na planta de <i>ginkgo biloba</i> : (a) simulação; (b) medição. ....	47
Figura 3.12 – Desenvolvimento do projeto de monopolo planar bioinspirada na planta de palma: (a) planta de palma [57]; (b) monopolo planar quadrado com dimensões; (c) folhas unitárias com dimensões; (d) monopolo planar bioinspirado na planta de palma com dimensões. ....	49
Figura 3.13 – Simulação do parâmetro $ S_{11} $ do monopolo planar quadrado e bioinspirado na planta de palma. ....	49
Figura 3.14 – Monopolo planar bioinspirado na planta de palma medido: (a) <i>patch</i> ; (b) plano de terra; (c) monopolo planar com o conector SMA; (d) plano de terra com o conector SMA. ....	50
Figura 3.15 – Simulação e medição do parâmetro $ S_{11} $ do monopolo planar bioinspirado na planta de palma. ....	50
Figura 3.16 – Diagrama de irradiação 3D e 2D dos monopolos planares: (a) quadrado; (b) bioinspirado na planta de palma. ....	51
Figura 3.17 – Impedâncias sobre a carta de Smith do monopolo planar bioinspirado na planta de palma: (a) simulação; (b) medição. ....	52
Figura 3.18 – Desenvolvimento da antena <i>patch</i> transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó: (a) planta de Ingá-cipó [58]; (b) folha unitária gerada com a inclinação angular; (c) antena simulada com dimensões; (d) protótipo. ....	53
Figura 3.19 – Simulação e medição parâmetro $ S_{11} $ da antena <i>patch</i> transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó. ....	54
Figura 3.20 – Diagrama de irradiação da antena <i>patch</i> transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó:(a) 3D com indicação da densidade de corrente, ganho e relação frente/costas; (b) 2D com largura de feixe de meia potência. ....	55

Figura 3.21 – Impedâncias sobre a carta de Smith da antena <i>patch</i> transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó: (a) simulação; (b) medição. ....	55
Figura 3.22 – Desenvolvimento do arranjo de antenas <i>patch</i> bioinspirado em poliamida: (a) planta Ingá-da-restinga [60]; (b) antenas simuladas; (c) protótipos. ....	57
Figura 3.23 – Simulação e medição do parâmetro $ S_{11} $ das antenas <i>patch</i> flexíveis bioinspirados na planta Ingá-da-restinga com folhas para 5,4 GHz e 5,8 GHz: (a) simulação; (b) medição; (c) simulação e medição da folha 5,4 GHz; (d) simulação e medição da folha 5,8 GHz. ....	59
Figura 3.24 – Medição e simulação do parâmetro $ S_{11} $ dos arranjos <i>patch</i> flexíveis bioinspirados com duas e quatro folhas: (a) simulação; (b) medição; (c) simulação e medição arranjo 2 folhas; (d) simulação e medição arranjo 4 folhas. ....	61
Figura 3.25 – Diagrama de irradiação 2D e 3D simulado das antenas <i>patch</i> flexíveis bioinspiradas na planta de Ingá-da-restinga em poliamida: (a) antena para 5,4 GHz; (b) antena para 5,8 GHz; (c) arranjo com duas folhas; (d) arranjo com quatro folhas. ....	63
Figura 3.26 – Antenas de abertura <i>on-chip</i> : (a) circular; (b) bioinspirada na flor de jasmim. ....	64
Figura 3.27 – Antenas e arranjo de antenas <i>on-chip</i> com dimensões: (a) partes das antenas; (b) dimensões das antenas e do arranjo; (c) antenas e arranjo de antenas em um <i>chip</i> . ....	66
Figura 3.28 – Simulação do parâmetro $ S_{11} $ das antenas de abertura <i>on-chip</i> com forma circular, bioinspirada e do arranjo bioinspirado. ....	66
Figura 3.29 – Ganho das antenas de abertura <i>on-chip</i> . ....	68
Figura 3.30 – Diagrama de irradiação 3D e 2D das antenas de abertura <i>on-chip</i> : (a) circular; (b) bioinspirado; (c) arranjo bioinspirado. ....	69
Figura 3.31 – Impedâncias sobre a carta de Smith das antenas de abertura <i>on-chip</i> : (a) circular; (b) bioinspirado; (c) arranjo bioinspirado. ....	69

# Tabelas

Tabela 2.1 – Antenas bioinspiradas em animais.....	23
Tabela 2.2 – Antenas bioinspiradas em plantas.....	25
Tabela 2.3 – Parâmetros da expressão de Gielis para a formação da folha elíptica inicial.	32
Tabela 3.1 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha unitária da <i>bidens pilosa</i> .....	39
Tabela 3.2 – Resposta em frequência da simulação e da medição da antena têxtil bioinspirada nas folhas da <i>bidens pilosa</i> .....	41
Tabela 3.3 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha de <i>ginkgo biloba</i> ...44	
Tabela 3.4 – Resposta em frequência da simulação e das medições do monopolo planar têxtil bioinspirada na planta de <i>ginkgo biloba</i> .....	46
Tabela 3.5 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha unitária da planta de palma. ....	48
Tabela 3.6 – Resposta em frequência da simulação e da medição do monopolo planar bioinspirado na planta de palma. ....	51
Tabela 3.7 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha unitária da planta Ingá-cipó.....	53
Tabela 3.8 – Resposta em frequência da simulação e da medição da antena <i>patch</i> transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó simulada e medida. ....	54
Tabela 3.9 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha unitária da planta ingá-restinga. ....	56
Tabela 3.10 – Resposta em frequência da simulação e da medição das antenas <i>patch</i> flexíveis bioinspiradas na planta de Ingá-da-restinga construídas em poliamida. ....	59
Tabela 3.11– Resposta em frequência da simulação e da medição dos arranjos <i>patch</i> flexíveis bioinspirados na planta de Ingá-da-restinga construídos em poliamida. ....	61
Tabela 3.12 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da flor de jasmim. ....	65
Tabela 3.13 – Resposta em frequência da simulação das antenas de abertura.....	67

# Siglas e Símbolos

EBG – *Electromagnetic band gap* – Abertura de banda eletromagnética

BW – *Bandwidth* – Largura de banda

CPW – *Coplanar wave guide* – Guia de ondas coplanar

DSRC – *Dedicated short-range communications* – comunicação dedicada de curto alcance

FCC – *Federal Communications Commission* – Comissão federal de comunicação

F/B – *Front-to-back* – Relação frente costas

HPBW – *Half power beamwidth* – Largura de feixe de meia potência

ISM – *Industrial scientific and medical* – Médico, industrial e científico

ITO – *Indio tin oxide* – Óxido de tin índio

MIMO - *Multiple input/multiple output* – Múltiplas entradas e múltiplas saídas

MMIC – *Microwave monolithic integrated circuits* – Circuitos monolíticos integrados de micro-ondas

RL – *Return loss* – Perda de retorno

UWB – *Ultra wideband* – Banda ultra larga

VNA – *Vectorial network analyzer* – Analisador de rede vetorial

VSWR – *Voltage standing wave ratio* – Coeficiente de onda estacionária

WBAN – *Wireless body area network* – Redes sem fio próximas ao corpo

WLAN – *Wireless local area network* – Rede local sem fio

WiMAX – *Worldwide interoperability for microwave access* – Interoperabilidade mundial para acesso de micro-ondas

WPAN – *Wireless personal area network* – Rede sem fio pessoal

Wi-Fi – *Wireless fidelity*

$c$  – Velocidade da luz no vácuo

$f_0$  – Frequência de ressonância central

$f_1$  – Frequência de ressonância mais baixa

$f_2$  – Frequência de ressonância mais alta

$G$  – Ganho

$L$  – Comprimento do elemento irradiante de uma antena de microfita

$W$  – Largura do elemento irradiante de uma antena de microfita

$\Gamma$  – Coeficiente de reflexão

$\epsilon_r$  – Permissividade elétrica relativa

$\varepsilon_{ref}$  – Permissividade elétrica relativa efetiva

$\varepsilon_0$  – Permissividade elétrica do espaço livre

$\theta$  – Ângulo que proporciona simetria rotacional específica

$\lambda_g$  – Comprimento de onda guiado

$\lambda_0$  – Comprimento de onda

# Sumário

<b>Dedicatória .....</b>	<b>ii</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>iii</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>v</b>
<b>Figuras.....</b>	<b>vi</b>
<b>Tabelas .....</b>	<b>ix</b>
<b>Siglas e Símbolos .....</b>	<b>x</b>
<b>Sumário .....</b>	<b>xii</b>
1. Introdução.....	14
2. Estado da Arte .....	17
2.1. Antenas de Microfita .....	17
2.1.1. Antenas <i>patch</i> .....	17
2.1.2. Antenas monopolo planar.....	19
2.1.3. Antenas têxteis .....	20
2.1.4. Arranjos de Antenas .....	21
2.2. Antenas bioinspiradas .....	22
2.2.1. Antenas bioinspiradas em animais .....	22
2.2.2. Antenas bioinspiradas em plantas .....	24
2.3. Formulação de Gielis .....	26
2.3.1. Formas das plantas .....	26
2.3.2. Expressão de Gielis .....	28
2.4. Procedimentos metodológicos .....	30
2.4.1. Caracterização de materiais dielétricos.....	33
3. Antenas e arranjos de antenas bioinspiradas em plantas .....	38
3.1. Antena têxtil bioinspirada nas folhas <i>bidens pilosa</i> .....	38

---

3.2.	Monopolo planar têxtil bioinspirada na planta de <i>ginkgo biloba</i> .....	43
3.3.	Monopolo planar bioinspirado na planta de palma .....	48
3.4.	Antena <i>patch</i> transparente bioinspirada na planta de Ingá-cipó .....	52
3.5.	Arranjos de antenas <i>patch</i> flexíveis bioinspiradas .....	56
3.6.	Antenas e arranjo de antenas de abertura bioinspiradas na flor de jasmim para aplicações <i>on-chip</i> .....	64
4.	Conclusões.....	70
4.1.	Trabalhos Futuros .....	72
4.2.	Artigos publicados .....	73
4.3.	Capítulo de livro publicado .....	74

# 1. Introdução

Na sociedade atual, os sistemas de telecomunicações permitem o rápido acesso à informação e possibilitaram novas formas de relações pessoais e profissionais. O fim do século XX e início do século XXI foram marcados pela intensificação das comunicações sem fio, contribuindo para a comunicação em tempo real. Esse processo foi acelerado pelo avanço nas pesquisas de novas tecnologias, pela introdução de novos equipamentos, na otimização de programas computacionais e no desenvolvimento de protocolos e normas para o uso eficiente do espectro eletromagnético. Os frutos desses trabalhos podem ser observados nas transmissões de rádio e TV digital, no mercado crescente de aparelhos de comunicações móveis, como celulares e *tablets*, aplicações em internet das coisas, casas e cidades inteligentes e comunicações via satélite.

As tecnologias de comunicação sem fio abrangem diversas faixas de frequências com normas específicas para regular seu uso de forma eficiente e segura. As tecnologias mais difundidas são as de rede local sem fio (*Wireless local area network*– WLAN) e de telefonia móvel. As normas da tecnologia WLAN foram desenvolvidas no decênio 1980 pelo grupo do *IEEE* 802, nas faixas de frequências indicadas para as bandas ISM (*Industrial scientific and medical*), 900 MHz (902 – 928 MHz), 2,40 GHz (2,40 – 2,835 GHz), e 5,0 GHz, (5,15 – 5,35 GHz e 5725 – 5875 MHz) [1].

As redes de telefonia móvel operam em frequências diferentes dependendo do sistema utilizado, os sistemas de segunda geração (2G) operam nas faixas de 1850 – 1900 MHz, os sistemas de terceira geração (3G) nas faixas de 1920 – 1975 MHz e LTE (*Long time evolution*) de quarta geração (4G) nas faixas de 698 – 806 MHz e 2,5 – 2,69 GHz [2,3].

Com o uso intensivo do espectro eletromagnético foram desenvolvidos padrões para operação nas faixas das ondas milimétricas, o ISM em 60 GHz é um exemplo. Este padrão foi proposto pela FCC (*Federal Communications Commission*) para comunicação em acesso de dados de alta velocidade para dispositivos próximos, com largura de banda de 6 GHz (59 GHz – 64 GHz). Outras tecnologias que operam nestas frequências são WPAN, Wi-Fi (*Wireless fidelity*) e sistemas de comunicação de quinta geração (5G) [4,5].

Todo sistema de comunicação sem fio necessita de uma ou mais antenas para transmitir–receber sinais. As antenas possuem formas, tamanhos e materiais diferentes

dependendo de sua aplicação, faixa de frequência, local de uso e proximidade de sistemas elétricos ou mesmos de seres vivos. As antenas podem ser desenvolvidas com formas variadas, dentre elas podem ser destacadas: as Euclidianas, com o uso de geometrias quadriláteras, triangulares, circulares, elípticas, entre outras; as não-Euclidianas, cuja principal referência é a geometria fractal; e as bioinspiradas, que utilizam a forma de plantas e de animais.

Os seres vivos para garantir sua perpetuidade, necessitam se adaptar ao meio ambiente, assim, suas formas, conexões internas e externas podem ser usadas como soluções otimizadas para problemas que, em muitas situações, são análogos aos encontrados na engenharia [6]. Uma metodologia para o uso de soluções biologicamente inspiradas são divididas em três etapas [7]: **identificação de analogias**, com estruturas e métodos que sejam similares; **entendimento**, modelagem detalhada do comportamento biológico real; e **engenharia**, que é o processo de simplificação do modelo e ajustes para as aplicações técnicas. Diversas instituições de ensino têm financiados laboratórios e centros de pesquisas nas diversas áreas da engenharia biologicamente inspirada, como o Instituto de Tecnologia da Califórnia, *London College*, Universidade de Harvard, Universidade de St. Louis e a Universidade de Campinas, que têm dedicado recursos para pesquisa nos ramos da biônica, biomimética e a biomímica.

As pesquisas em antenas bioinspiradas utilizam as formas de plantas e animais, com aplicações em diversas faixas de frequências. Em [8] foi desenvolvida uma antena *patch* com alimentação via cabo coaxial e forma bioinspirada em uma flor de quatro pétalas, com largura de banda de 4,06 GHz (4,30 – 8,36 GHz). Em [9] foi simulada e medida um monopolo impresso, bioinspirada em folha do acero canadense, com alimentação via linha de microfita, para faixa de banda ultralarga (*Ultra wideband - UWB*), a estrutura apresentou largura de banda de 11 GHz (3,0 – 14,0 GHz). A resposta em frequência cobriu a faixa requerida para tecnologia UWB (3,1 – 10,6 GHz), sobre o elemento irradiante da antena foi inserido um filtro em forma de H e duas fendas no plano de terra para promover rejeição na banda WLAN em 5,0 GHz. Em [10] foi projetado e medido um monopolo com alimentação via linha de microfita com a forma de uma borboleta para aplicação na faixa UWB e rejeição na faixa WLAN em 5,0 GHz, com largura de banda de 11 GHz (3,0 – 13,0 GHz). No trabalho de [11] foram utilizadas as formas das antenas de baratas para desenvolver um monopolo e alimentação via cabo coaxial. As inclinações da antena em relação ao plano de terra, possibilitaram alterações na

largura de banda e cobrindo a faixa UWB. Em [12] foi utilizado um arranjo com quatro formas triangulares semelhantes a folhas, com largura de banda de 2,5 GHz (3,5 – 6 GHz), alterando a direção do diagrama de irradiação a partir da ativação de cada folha separadamente.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de antenas e arranjos de antenas bioinspiradas em plantas geradas pela expressão *Gielis*, com simulações realizadas no programa *Designer*, da plataforma ANSYS, construídos em materiais rígidos e flexíveis comparando com os resultados experimentais com os protótipos.

## 1.1 Organização do texto

Este documento, além desta introdução, está organizado da seguinte forma:

- No Capítulo 2 estão apresentadas a fundamentação teórica deste trabalho, a revisão bibliográfica e os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento de antenas bioinspiradas,
- No Capítulo 3 estão apresentados os resultados das simulações e medições das antenas e arranjo de antenas bioinspiradas em plantas;
- No Capítulo 4 estão abordadas as conclusões desta Tese, os artigos publicados e as propostas para trabalhos futuros.

## 2. Estado da Arte

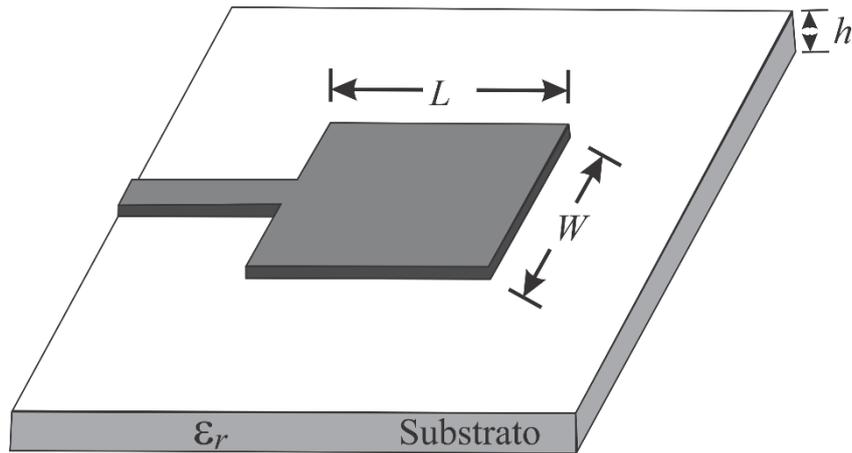
### 2.1. Antenas de Microfita

A conectividade em tempo real de pessoas e sistemas espalhados em quase todo mundo, têm incentivado as pesquisas para otimização dos sistemas de telecomunicações. As tecnologias de antenas como parte integrante deste sistema, têm recebido contribuições importantes quanto as possíveis formas, materiais, componentes, sistemas de controle, entre outros aspectos utilizados em seu desenvolvimento. Dentre os tipos de antenas utilizados as antenas de microfita possuem amplo uso em diversos sistemas incluindo, veículos terrestres, náuticos, aéreos, satélites, entre outros [13]. Antenas de microfita consistem de um elemento irradiante (*patch*) e um plano de terra metálico separados por um substrato dielétrico, em que tanto o elemento *patch*, quanto o plano de terra podem assumir formas diversificadas [14, 15].

As antenas de microfita são de fácil fabricação, moldáveis a superfícies planas ou curvas e de baixo custo, compatíveis com projetos de circuitos integrados monolíticos de micro-ondas (*Microwave monolithic integrated circuits – MMIC*), sendo versáteis quanto a frequência de ressonância, polarização, diagrama de irradiação e impedância, com aplicações em satélites, radar, biomedicina, mísseis, dispositivos móveis, roteadores e outros dispositivos.

#### 2.1.1. Antenas *patch*

As antenas *patch* são utilizadas em diversas aplicações e sistemas comerciais. Uma antena *patch* se caracteriza por apresentar um elemento irradiante e um plano de terra separados por um dielétrico. A antena pode ser projetada para que a potência irradiada seja normal ao *patch* (*broadside*) ou na direção axial ao elemento irradiante, dependendo do modo de excitação e da estrutura utilizada. Uma antena *patch* com suas respectivas componentes pode ser visualizada na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Antena *patch*.

O comprimento ( $L$ ) do *patch* retangular, para o modo fundamental de excitação  $TM_{10}$  é inferior a metade do comprimento de onda guiado ( $\lambda_g$ ), ou seja, o comprimento de onda no interior do dielétrico ( $\frac{\lambda_g}{2}$ ) com

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{r_{ef}}}}, \quad (2.1)$$

em que,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda no espaço livre, definido pela relação entre a velocidade da luz no vácuo e a frequência de ressonância da antena,  $\epsilon_{r_{ef}}$  é a permissividade elétrica relativa efetiva da linha de microfita de largura  $W$  e espessura  $h$ , dada por:

$$\epsilon_{r_{ef}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + \frac{10h}{W} \right)^{-0,5}. \quad (2.2)$$

O valor de  $\epsilon_{r_{ef}}$  é menor que a constante dielétrica relativa do substrato ( $\epsilon_r$ ), pois o campo espalhado também se propaga no ar, não estando confinado apenas no dielétrico. Assim, aumento da largura ( $W$ ) do *patch* ou da espessura ( $h$ ) do substrato, juntamente com redução do valor da permissividade elétrica relativa ( $\epsilon_r$ ), proporciona um maior acoplamento de energia pela onda de superfície [16].

As estruturas desenvolvidas em microfita apresentam vantagens e limitações. Entre as vantagens podem ser citadas: estrutura leve, dimensões reduzidas, facilidade de construção e instalação, possibilidade polarização linear e circular, variando de acordo

com a excitação (alimentação) e da estrutura utilizada, possibilidade de integração direta a equipamentos de comunicações. Como limitações podem ser citadas a baixa eficiência de irradiação se construídas em substratos com constantes dielétricas elevadas, possibilidade de excitação por ondas de superfícies e baixo ganho ( $\approx 6$  dB).

O elemento irradiante da estrutura em microfita é versátil podendo assumir diversas formas, como retângulos, triângulos, círculos, elipses, anel, com a possibilidade do uso de formas mais complexas como os fractais e as formas bioinspiradas em plantas e animais.

### 2.1.2. Antenas monopolo planar

A antena monopolo planar tem estrutura similar a antena *patch*, o diferencial está no plano de terra truncado, ou seja, o plano de terra, geralmente, cobre apenas a linha de transmissão e não o elemento irradiante. Essas antenas apresentam características de banda larga, dimensões reduzidas e diagrama de irradiação omnidirecional, características que as tornam uma boa candidata para aplicações na tecnologia UWB [17]. Algumas técnicas são utilizadas para o casamento de impedâncias entre a linha de transmissão e o elemento irradiante. Em [18] foi proposto uma abertura retangular no plano de terra, de largura igual ao da linha de transmissão e comprimento variável, outra proposta é um afastamento entre o plano de terra e o elemento irradiante ( $g$ ) até o ponto do melhor casamento [17].

Segundo [17] os valores de projeto de um monopolo planar podem ser aproximados em termos do comprimento de onda ( $\lambda_g$ ). Por exemplo, o raio ( $R$ ) de um monopolo planar circular, para a primeira frequência de ressonância ( $f_1$ ), pode ser aproximado por  $\frac{\lambda_g}{8}$ , e a largura do plano de terra por  $\frac{\lambda_g}{2}$ .

Outras formas utilizadas em monopolos planares podem ser aproximadas a partir do perímetro ( $p$ ) de antenas com formas circulares e quadradas. De acordo com [17], a distribuição de corrente é mais concentrada nas extremidades do que no centro do elemento irradiante, a distância percorrida pela corrente influencia diretamente a frequência de ressonância da antena, assim o aumento do perímetro da antena proporciona redução da primeira frequência de ressonância ( $f_1$ ), podendo ser obtido por:

$$f_1 = \frac{300}{p\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (2.3)$$

De acordo com [9] a permissividade relativa efetiva, para monopolos planares, pode ser aproximada pelo primeiro termo da expressão (2.2), ou seja, como a média entre a permissividade do dielétrico utilizado na antena e o ar. Na Figura 2.2 pode ser visualizada a estrutura de um monopolo planar.

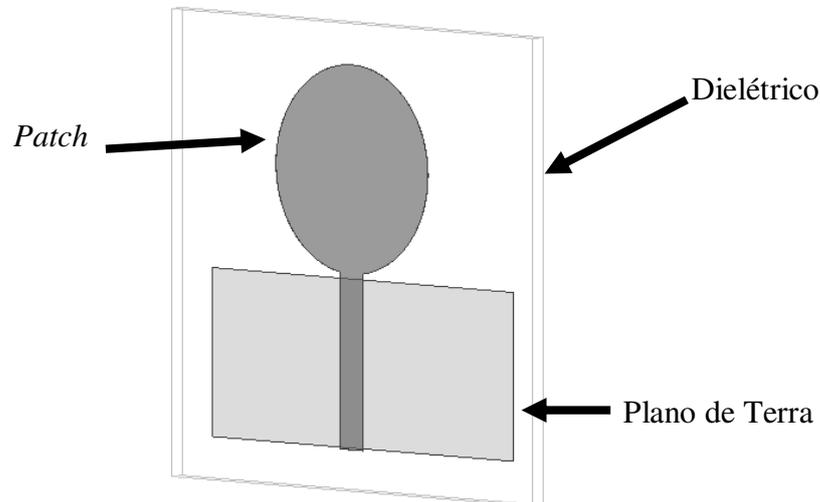


Figura 2.2 – Monopolo planar.

### 2.1.3. Antenas têxteis

Os dispositivos para tecnologia flexível requerem componentes, simultaneamente flexíveis e mecanicamente robustos, ao ponto de suportar torções e flexões. As antenas flexíveis são desenvolvidas em diversos dielétricos, como plásticos, polímeros, tecidos entre outros [19, 20]. As antenas têxteis representam um caso das antenas flexíveis.

Cada material possui características distintas, as quais devem ser levadas em consideração no desenvolvimento do projeto das antenas. Diversas técnicas são utilizadas na confecção das antenas flexíveis, dentre as quais podem ser destacadas: o bordado, no qual a antena com plano de terra é bordada em linha condutora (cobre, alumínio, ou outro condutor) na superfície flexível, geralmente realizado em tecidos; a impressão ou pintura, em que o elemento irradiante e o plano de terra são impressos, ou pintados com tinta condutora sobre o dielétrico flexível [21, 22]; colagem, nesta técnica o elemento irradiante e o plano de terra são desenhados e cortados em material numa lâmina condutora flexível e depois colados no dielétrico [23].

As antenas têxteis em sua maioria são utilizadas em equipamentos ou vestuário próximos ao corpo em aplicações médicas e não médicas. O desenvolvimento de antenas

têxteis está relacionado à tecnologia de redes sem fio próximas ao corpo (WBAN – *Wireless body local area network*). A tecnologia WBAN é uma especialidade das redes sem fio pessoais (WPAN – *Personal local area network*), com a proposta inicial nas aplicações médicas, também chamada de tecnologia sem fio para cuidados de saúde, ou rede de sensores próximos ao corpo. Redes sem fio de uso próximos ao corpo (WBAN) se caracterizam pelo uso de sensores sem fio, estando ligados ao corpo, ou próximos a ele, utilizando a configuração de dispositivos distribuídos e sistemas computacionais de controle [24].

Os tecidos são estruturas planares, porosos e com características dielétricas. Suas propriedades são determinadas pelas fibras, disposições, densidade, volume e tamanho dos fios [22]. Os tecidos utilizados em roupas possuem estrutura planar podendo ser utilizadas no desenvolvimento de antenas impressas. Diversos trabalhos têm utilizado tecidos, principalmente denim, para o desenvolvimento de antenas têxteis com aplicações em diversas faixas de frequências [25–27].

#### **2.1.4. Arranjos de Antenas**

Um arranjo, ou rede de antenas, se caracteriza pela combinação de duas ou mais antenas, em uma disposição geométrica ao longo de um eixo ou, no caso das antenas de microfita, de uma superfície. O objetivo é alterar algum parâmetro da antena, como diagrama de irradiação, largura de banda, ganho, entre outros.

Os elementos do arranjo podem ser apresentados de duas formas: com elementos idênticos, e com elementos diferentes. Os elementos idênticos possuem a mesma ordem espacial, alimentados na mesma fase e amplitude, assim a direção de ganho máximo do arranjo é controlada pelo ajuste nos diferentes elementos, e para que o arranjo tenha uma alta diretividade, os sinais em uma determinada direção, na qual se deseja máximo ganho, são somados em fase. Para os arranjos com elementos diferentes são projetos elementos para frequências próximas, possibilitando o aumento da largura de banda da estrutura [13,28,29].

Para o caso do projeto de antenas em microfita, alguns parâmetros devem ser observados, como a distância entre os elementos e o devido casamento de impedâncias na linha de transmissão. A distância entre os eixos centrais dos elementos não deve ser inferior a um comprimento de onda guiado ( $\lambda_g$ ), e deve-se levar em consideração as técnicas para o casamento das impedâncias na linha de transmissão, com o transformador

de um quarto de comprimento de onda, que utiliza o comprimento de  $\frac{\lambda_g}{4}$  para cada variação da largura da linha e, conseqüentemente da impedância característica. Na Figura 2.3 pode ser observado um arranjo de antenas em microfita com 16 elementos, ou seja, quatro arranjos com quatro elementos (4x4), com casamento de impedâncias por transformador de  $\frac{\lambda_g}{4}$ .

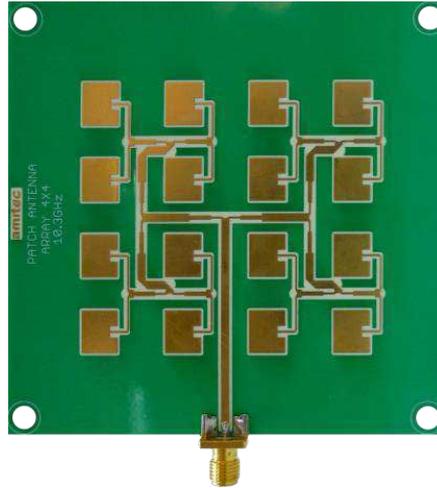


Figura 2.3 – Arranjo de antenas com 16 elementos (4x4) [30].

## 2.2. Antenas bioinspiradas

As antenas bioinspiradas utilizam as formas de seres vivos encontrados na natureza, nos quais podem se observar funções análogas às identificadas nas antenas, como recepção/transmissão de sinais e ondas eletromagnéticas. O objetivo é utilizar as formas naturais para otimizar um ou vários parâmetros das antenas. As pesquisas podem ser divididas em dois grupos: as antenas bioinspiradas em animais e as antenas bioinspiradas em plantas. A seguir são apresentados os trabalhos em antenas bioinspiradas encontrados em revistas e congressos especializados.

### 2.2.1. Antenas bioinspiradas em animais

As antenas bioinspiradas em animais procuram avaliar órgãos internos ou partes externas de animais, que atuam de forma análoga ao funcionamento das antenas utilizadas nos sistemas de comunicação operando em diversas faixas de frequências.

Uma antena bioinspirada na forma de um morcego é apresentado em [31], a antena possui um monopolo como elemento irradiante em um plano de terra cilíndrico, com formato semelhante a uma orelha de morcego, operando nas faixas de 2,6 GHz, 5,8 GHz e 7,8 GHz, e ganho de 14,5 dBi. Em [32] foi desenvolvido um monopolo impresso bioinspirado na forma da cabeça e orelhas de morcego, com faixa de operação entre 2,75 – 13,98 GHz, com aberturas no *patch* para rejeição nas faixas de 3,21 – 4,02 GHz e 4,99 – 6,0 GHz, bandas WiMAX (*Worldwide interoperability for microwave access* – Interoperabilidade mundial para acesso de micro-ondas), WLAN e DSRC (*Dedicated short-range communications* – Comunicação dedicada de curto alcance).

Em [33] foram apresentados dois monopolos de 7 cm de comprimento, com distância de 5 mm entre elas, sobre um plano de terra, operando na faixa de 300 MHz, que utilizaram a forma bioinspirada de antenas de moscas com sensibilidade direcional a incidência das ondas eletromagnéticas. Uma antena *patch* retangular, reconfigurável, bioinspirada em sistema vascular de transporte de dispersão coloidal humano, com alimentação via cabo coaxial e reconfiguração via três linhas de transmissão foi abordada em [34]. Em [11] foi utilizada a forma das antenas de uma barata para o desenvolvimento de um monopolo para faixa UWB, com alimentação via cabo coaxial e diferentes larguras de banda dependentes da proximidade da antena ao plano de terra. Um monopolo planar bioinspirado em uma borboleta foi apresentado em [10], a antena foi projetada para faixa de UWB com largura de banda de 3,0 – 10.8 GHz e alimentação por linha de microfita, no qual foram inseridos cortes no elemento irradiante em forma de disco para rejeição na banda WLAN em 5,0 GHz. Em [35] foi utilizada a forma bioinspirada de antenas curvas de vespas para o desenvolvimento de uma antena tipo CPW (*Coplanar wave guide* – Guia de ondas coplanar) com alimentação por linha de transmissão e largura de banda de 120 MHz (2,285 – 2,505 GHz), operando na faixa WLAN em 2,40 GHz.

Na Tabela 2.1 são apresentadas as pesquisas que utilizam a forma de partes de animais no desenvolvimento de antenas.

Tabela 2.1 – Antenas bioinspiradas em animais.

Título	Ano	Pesquisadores	Descrição
<i>A biomimetic antenna in the shape of bat's ear</i>	2006	Flint [31]	Monopolo com plano de terra bioinspirada em uma orelha de morcego.
<i>Biologically inspired electrically small antenna arrays with enhanced</i>	2011	Behdad, Al-Jounmaly, Li [33]	Monopolo bioinspirado nas antenas de uma mosca operando na faixa de 300 MHz.

<i>directional sensitivity</i>			
<i>Biologically-inspired vascular antenna reconfiguration mechanism</i>	2011	Huff, Goldberger [35]	Antena <i>patch</i> bioinspirada em sistema de fluido vascular com alimentação via cabo coaxial e reconfiguração via linhas de transmissão.
<i>A bio-inspired microstrip antenna based on the idea of a cockroach antenna</i>	2011	Mahmoud, Alkamchouchi [11]	Monopolo com forma de antenas de baratas com alimentação via cabo coaxial operando na banda UWB.
<i>Numerical and experimental investigation of a novel ultra wideband butterfly shaped printed monopole antenna with bandstop function</i>	2011	Armed, Sebak [10]	Monopolo planar bioinspirado em uma borboleta, para operação na faixa UWB (3 – 12 GHz), alimentação via linha de transmissão, com abertura circular no elemento irradiante para as faixas WLAN (5.0 – 5,83 GHz).
<i>A bio-inspired printed-antenna transmission-range detection system</i>	2013	Ebnabbasi [34]	Antena CPW bioinspirada em antenas de abelhas com faixa de operação em 2,4 GHz.
<i>A Planar UWB Bat-Shaped Monopole Antenna with Dual Band-Notched for WiMAX/WLAN/DSRC</i>	2015	Fakharian, Rezaei, Azadi [32]	Monopolo com a forma bioinspirada da cabeça e orelhas morcego, aberturas no elemento <i>patch</i> para operação nas faixas WiMAX, WLAN e DSRC.

### 2.2.2. Antenas bioinspiradas em plantas

As pesquisas na área das antenas com formas bioinspiradas em plantas utilizam as plantas ou parte delas (caule, folhas e flores) para o desenvolvimento de antenas em diversas frequências. No desenvolvimento de antenas bioinspiradas em plantas são utilizadas antenas de banda estreita e de banda larga, como os monopolo impressos e as antenas *patch*. Dentre os trabalhos publicados podem ser destacados os seguintes.

Em [36] foi utilizada a forma bioinspirada em uma folha cônica para desenvolver um monopolo para faixa de UWB com largura de banda superior a 24 GHz (800 MHz – 25 GHz). Alguns trabalhos utilizam a forma bioinspirada das plantas em antenas *bowtie*. Em [37] foi apresentada uma antena *bowtie* com refletor, plano de terra com forma de folhas operando na faixa UWB (4,3 – 11 GHz) e ganho máximo de 13,3 dBi. Em [38] foi desenvolvida uma antena *bowtie* com *slot*, plano de terra com forma de folhas operando na faixa UWB (6 – 9,5 GHz). Outra antena *bowtie* com refletor EGB (*Electromagnetic band gap*) foi desenvolvida em [39], o projeto utilizou forma bioinspirada em folhas elípticas, com faixa de operação de 22 – 29 GHz.

Em [42] foi projetada uma antena com a forma de uma tulipa operando na faixa UWB, com abertura no elemento irradiante para rejeição de operação em 5 GHz. Em [9] foi desenvolvida uma metodologia para o desenvolvimento de um monopolo planar bioinspirado em folha do acero canadense operando na faixa UWB (3 – 14 GHz), com abertura no elemento irradiante para rejeição na faixa WLAN em 5 GHz (5 - 6 GHz). Na Tabela 2.2 são observados os trabalhos publicados com as formas bioinspiradas em plantas, juntamente com nomes dos pesquisadores, uma breve descrição dos trabalhos.

Tabela 2.2 – Antenas bioinspiradas em plantas.

Título	Ano	Pesquisadores	Descrição
<i>Leaf-shaped monopole antenna with extremely wide bandwidth</i>	2006	Bai, Zhong, Liang [36]	Monopolo com forma de um cone invertido, alimentação via linha de transmissão, com faixa de operação superior a 24 GHz (800 MHz a 25 GHz).
<i>2-Element UWB array antenna using leaf-shaped bowtie element</i>	2007	Ito, Ameya, Nojima [37]	Antena <i>bowtie</i> com refletor, com cortes no plano de terra com forma de duas folhas para faixa UWB (4,3 – 11 GHz), alimentação via linha de transmissão e ganho máximo de 13,3 GHz.
<i>Ultra wideband rose leaf microstrip patch antenna</i>	2008	Leyestanak [8]	Monopolo com alimentação via cabo coaxial, forma de uma flor de 4 pétalas, com largura de banda superior a 4 GHz (4 – 8 GHz).
<i>A Band-notched tulip antenna for UWB applications</i>	2008	Askanpour, Gholipour, Faraji-dana [40]	Estudo paramétrico de um monopolo com forma de uma flor de tulipa com largura de banda superior a 5 GHz, com abertura no elemento irradiante para rejeição na faixa de 5,8 GHz.
<i>A novel maple-leaf shaped UWB antenna with a 5.0 – 6.0 GHz band-notch characteristic</i>	2009	Ahmed, Sebak[9]	Monopolo com forma da folha do acero canadense, operando na faixa UWB (3 – 14 GHz), alimentação via linha de transmissão, com cortes no elemento irradiante para rejeição na faixa WLAN (5 – 6 GHz).
<i>Wide-band Tulip-Loop Antenna</i>	2009	Tanyer-Tigrek, Tran, Lager, Ligthart [43]	Antena CPW com largura de banda de 8 GHz (6 – 14 GHz), com forma de uma flor de tulipa.
<i>A study of a leaf-shaped bowtie slot antenna for UWB Applications</i>	2012	Fujita, Yamamoto, Nojima [38]	Antena <i>slot bowtie</i> com abertura no plano de terra com a forma de duas folhas elípticas operando na faixa UWB nas frequências de 6 – 9,5 GHz.
<i>Quasi-millimeter wave leaf-shaped bowtie array antenna backed by an EBG substrate</i>	2012	Manabu, Koyanagi, Nojima [39]	Antena <i>bowtie</i> com cortes no plano de terra em forma de folha sobre uma superfície EBG, para operação na faixa de frequências de 22 a 29 GHz.

<i>A bio-inspired patch antenna array using Fibonacci sequences in trees</i>	2013	Delgado, Mera, Viteri [42]	Arranjo de antenas patch retangulares dispostas como as folhas de uma árvore, segundo o número de Fibonacci.
<i>A leaf shaped patch antenna</i>	2013	Singh [43]	Simulação de uma antena <i>patch</i> com abertura na forma de uma folha com frequência de ressonância em 4 GHz, 6 GHz e 7,8 GHz.
<i>Four-leaf clover UWB planar monopole antenna</i>	2014	Lemos, Silva, Paiva e Silva [44]	Monopolo com forma de um trevo de quatro folhas operando na faixa UWB (3 – 11 GHz).
<i>MIMO Antenna using castor leaf-shaped quasi-self-complementary elements for broadband applications</i>	2015	Patre, Singh [45]	Simulação de uma antena MIMO CPW com complementaridade, forma bioinspirada em uma folha, com largura de banda superior a 11 GHz (2,2 – 13,1 GHz), operando na banda UWB.

### 2.3. Formulação de Gielis

A fórmula de Gielis é uma expressão polar que, semelhante aos fractais e à série de Fibonacci, procura representar as formas observadas na natureza, a partir de expressões matemáticas. A partir da variação dos parâmetros da expressão de Gielis pode-se desenvolver grande variedade de formas que se assemelham às formas de animais e plantas.

#### 2.3.1. Formas das plantas

As formas das plantas representam uma possibilidade de pesquisa em antenas. As plantas captam a energia luminosa (ondas eletromagnéticas) e, pelo processo de fotossíntese, a transformam em energia química, que em certa medida funcionam de forma análoga às antenas parabólicas receptoras. Para a realização do processo, os vegetais fotossintéticos necessitam de água, dióxido de carbono e luz, tendo como produtos finais carboidratos, água e oxigênio (O<sub>2</sub>), gerando energia química para sua sobrevivência [46].

O sistema de processamento de fotossíntese pode ser dividido em duas partes: um centro complexo de captação e um centro de reação [47]. Os centros de captação são compostos por arranjos de antenas com características específicas de absorção de luz. Estes, ao receberem a luz passam para um estado energético maior, e ao retornarem para o estado original liberam energia, que pode seguir três caminhos: liberação de luz e calor

simultaneamente; a liberação de calor; e a transferência de energia por ressonância para o centro de reação, resultando no processo fotoquímico [48,49].

As plantas apresentam estruturas variadas, porém, de forma geral, elas possuem raízes, caule, folhas, flores e frutos. Cada parte possui características especiais que variam de espécie para espécie. Uma estrutura simples de uma folha pode ser visualizada na Figura 2.4, com a indicação da parte central da folha, que é o pecíolo, ligada ao caule pela bainha.

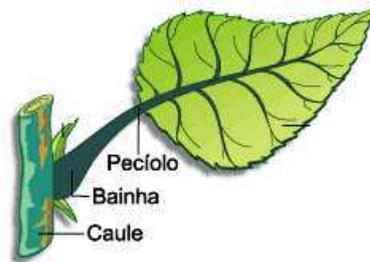


Figura 2.4 – Estrutura básica de uma folha [48].

A estrutura das folhas pode ser dividida em três partes: a **base**, com ligação direta com o caule; a **margem** ou **borda**; e o **ápice**, que é a parte superior da folha [50,51]. Na Figura 2.5 podem ser observados os diversos tipos de bases, margens e ápices da maioria das folhas encontradas na natureza.

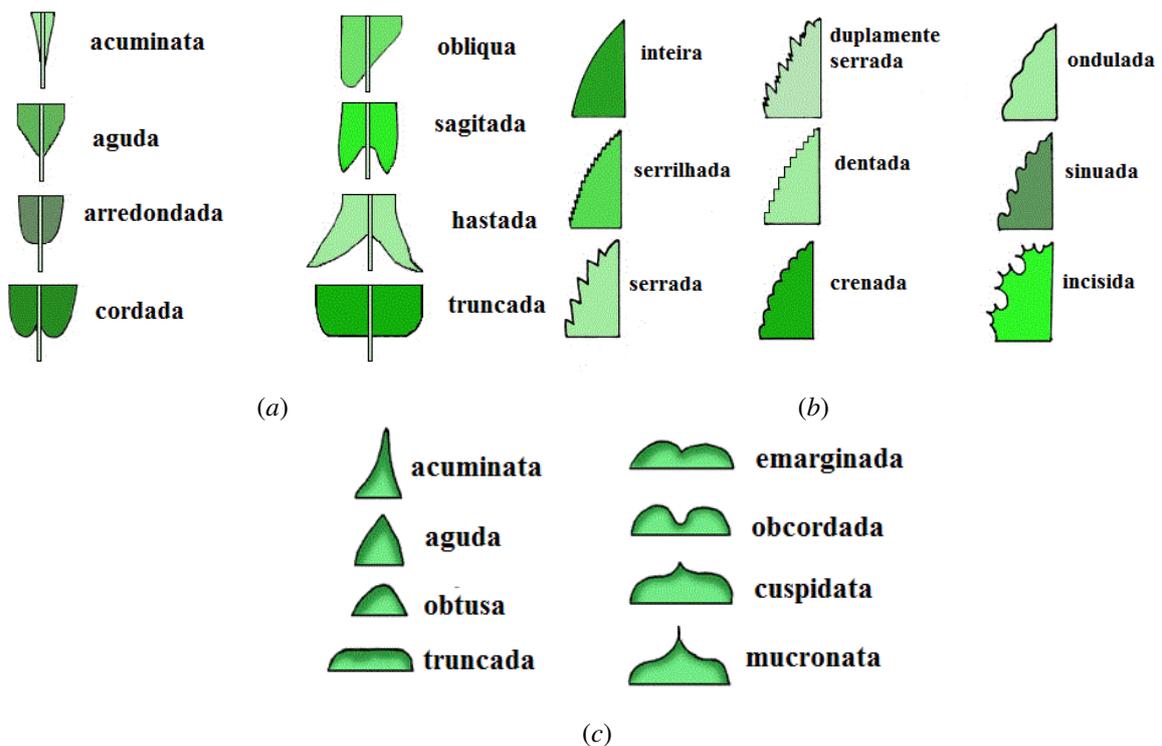


Figura 2.5 – Estrutura das folhas: (a) margens; (b) bases; (c) ápice [50].

### 2.3.2. Expressão de Gielis

Segundo Gielis [52] as formas dos círculos, elipses e retângulos são membros do grupo das superelipses, definidas pela expressão:

$$\left|\frac{x}{a}\right|^n + \left|\frac{y}{b}\right|^n = 1. \quad (2.4)$$

De acordo com [52] estas geometrias possuem como desvantagem a simetria limitada. Gielis propõe o uso da coordenada polar,  $r = f(\theta)$ , pela substituição de  $x = r \cos(\theta)$  e  $y = r \sin(\theta)$ , e a introdução do argumento  $m/4$  do ângulo  $\theta$  que proporciona simetria rotacional específica, assim, é proposto uma expressão polar para  $r(\theta)$ , em que  $n$  e  $m$  pertence ao conjunto dos números reais positivos, e os parâmetros  $a$  e  $b$  são números reais positivos diferentes de zero, com a expressão de Gielis indicada por:

$$r(\theta) = \frac{1}{\left\{ \left[ \left( \left| \frac{1}{a} \cos \left( \theta \frac{m}{4} \right) \right| \right)^{n_2} + \left( \left| \frac{1}{b} \sin \left( \theta \frac{m}{4} \right) \right| \right)^{n_3} \right]^{\frac{1}{n_1}} \right\}} \quad (2.5)$$

A expressão (2.5), que é denominada de superfórmula, pode ser associada a outras funções, possibilitando a geração de uma gama significativa de formas, das quais ele denomina de supercírculos, superelipses e superquadráticos. Esta expressão polar pode ser combinada com outras funções,  $f(\theta)$ , formando uma equação genérica, com a qual é possível gerar uma larga classe de super e sub formas, incluindo super e sub círculos [52], com a forma genérica dada por:

$$r = f(\theta) \frac{1}{\sqrt[n_1]{\left( \left| \frac{1}{a} \cos \left( \theta \frac{m}{4} \right) \right| \right)^{n_2} + \left( \left| \frac{1}{b} \sin \left( \theta \frac{m}{4} \right) \right| \right)^{n_3}}} \quad (2.6)$$

Na Figura 2.6 parâmetros podem ser observadas algumas formas geradas pela expressão de Gielis com os seus respectivos parâmetros.

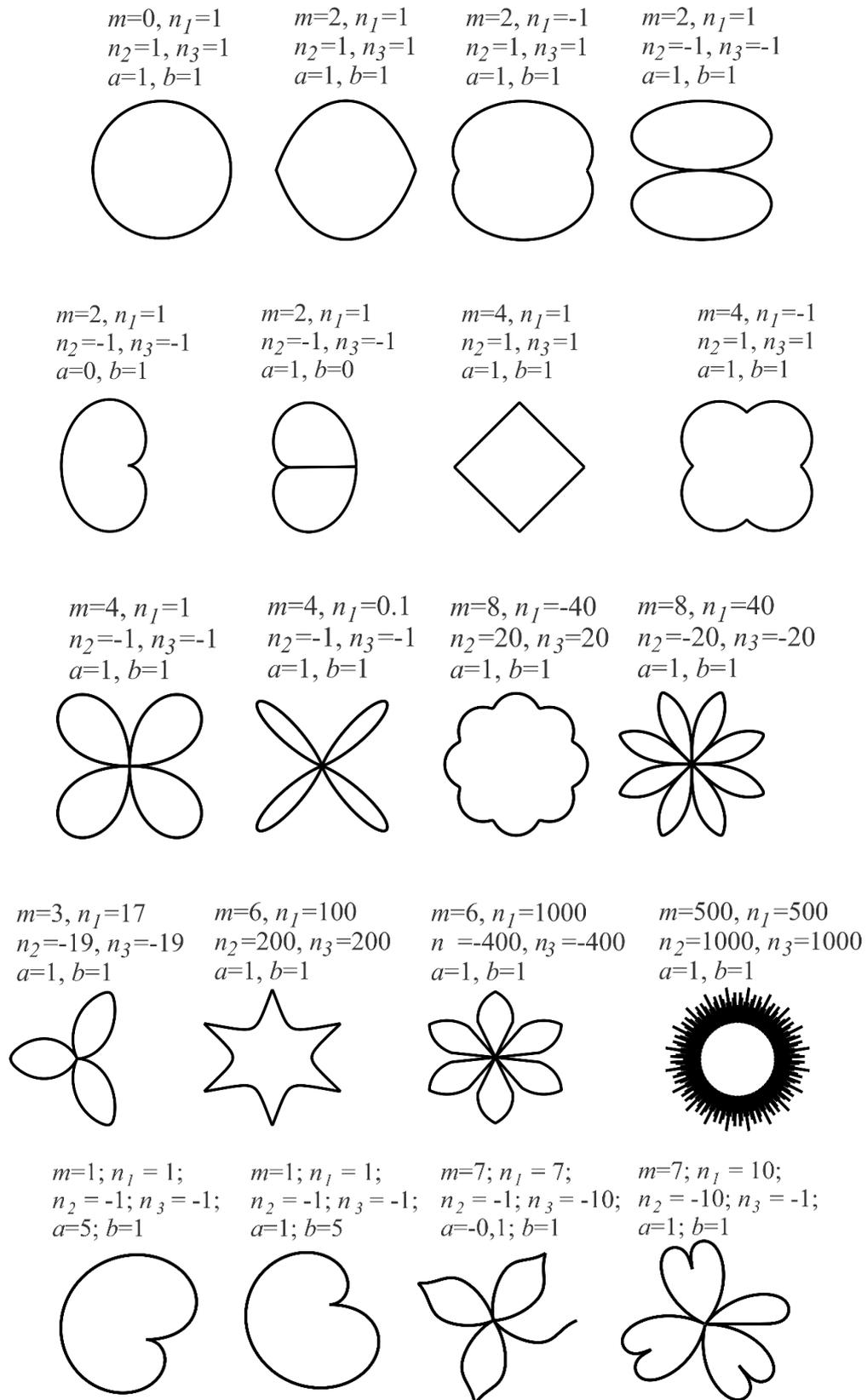


Figura 2.6 –Imagens geradas pela expressão de Gielis com os parâmetros utilizados.

A partir da expressão de Gielis é possível o desenvolvimento de imagens inspiradas na natureza de forma automática, reduzindo os erros decorrentes da reprodução das formas utilizadas.

## 2.4. Procedimentos metodológicos

A metodologia utilizada no projeto de antenas bioinspiradas em plantas, pela expressão de Gielis foi adaptada do modelo apresentado em [19], para o projeto de antenas vestíveis, no qual são apresentados cinco etapas do projeto de antenas, a seleção do material (elemento condutor e substrato), caracterização dos materiais, escolha do tipo de antena, fabricação e medição da antena. O procedimento metodológico utilizado no projeto de antenas bioinspiradas em plantas, com folhas elípticas é ilustrado no digrama da Figura 2.7. O procedimento está dividido em 12 etapas:

- 1 – Escolha da tecnologia em que será utilizada a antena;
- 2 – Identificação das frequências de operação;
- 3 – Escolha do tipo de antena adequada à aplicação escolhida, com banda larga, banda estreita, polarização circular, cruzada, entre outros;
- 4 – Seleção do material condutor e do dielétrico a ser utilizado;
- 5 – Caracterização das propriedades dos materiais, utilizando os dados técnicos informados pelos fabricantes ou com uso de algum método de caracterização disponível;
- 6 – A partir das informações levantadas, projetar uma antena com geometria euclidiana, geralmente, uma antena com geometria quadrada, retangular ou circular, com o objetivo de obter perímetro total da estrutura;
- 7 – Escolha da forma bioinspirada em folhas elípticas que apresentem perímetro total mais próximo da antena com geometria euclidiana;
- 8 – Geração da imagem pela expressão de Gielis, com o uso de técnicas de computação assistida por computador (*computer aided designer* - CAD) na geração das imagens das antenas em formato DXF (*Drawing Exchange Format*) para importação em um programa de simulação de onda completa.
- 9 – Importação da imagem para um programa de simulação de onda completa;
- 10 – Simulação e otimização da antena, com ajustes para frequência de ressonância desejada, procedimento semelhante ao realizado em antenas com a geometria euclidiana;
- 11 – Construção da antena bioinspirada, que deve levar em consideração o tipo de material utilizado e a tecnologia disponível;

## 12 – Medição e comparação com os resultados simulados para validação do projeto.

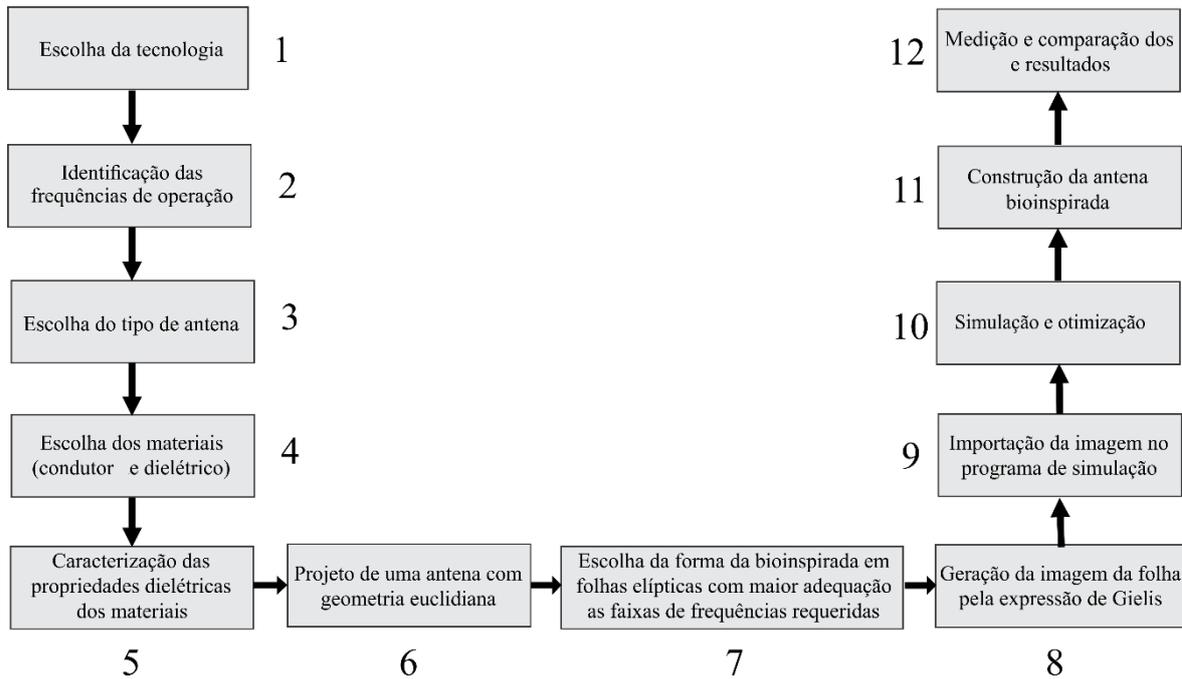


Figura 2.7 – Diagrama do projeto de antenas bioinspiradas em plantas com uso de folhas elípticas.

Na escolha das formas das folhas elípticas, identifica na etapa 7, deve-se levar em consideração as seguintes observações:

- Para o projeto de antenas *patch*, a largura da folha seguirá o mesmo princípio do projeto de linhas de transmissão em microfita [13,55]. Assim, com uso substrato de menor espessura ( $h$ ) e permissividade elétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) mais alta, implicará no projeto de folhas de menor largura;

- Para o projeto de um monopolo planar, as folhas que possuem largura maior que o comprimento, possibilitam o desenvolvimento de antenas com maior largura de banda;

- As antenas bioinspiradas desenvolvidas neste trabalho utilizam disposição e estruturas de folhas simétrica, com o objetivo de obter diagramas de radiação *broadside*, ou seja, com ganho máximo na direção axial ao eixo da antena. Isto, porém, não impossibilita o projeto de antenas com disposição e estruturas das folhas não simétricas, dependendo da aplicação requerida.

- Na escolha de estrutura de folhas compostas deve-se considerar o perímetro identificado no projeto da antena com geometria euclidiana. O objetivo é obter uma estrutura bioinspirada com o perímetro total mais próximo ao da antena com geometria euclidiana;

- A compactação pelo uso das formas bioinspiradas em plantas, promove a redução do elemento irradiante da antena, assim, são observados dois efeitos, a redução do ganho da antena e o aumento da densidade decorrente.

No projeto das antenas bioinspiradas em plantas apresentadas neste trabalho foram escolhidas as tecnologias (etapa 1 e 2): de redes locais sem fio, nas faixas de 2,4 GHz (2,4 – 2,4385 GHz) e 5 GHz (5,15 – 5,85 GHz); ISM em 60 GHz (57 – 64 GHz); e telefonia móvel em 2G, 3G e 4G (1,8 – 2,69 GHz).

Como as aplicações requerem largura de banda estreita e de banda larga, foram escolhidas antenas do tipo *patch* (banda estreita), monopolo planar (banda larga) e antena de abertura (banda larga), com alimentação via linha de transmissão e cabo coaxial (etapa 3).

As antenas foram projetadas, simuladas e construídas em materiais dielétricos fibra de vidro (FR4), denim, poliamida, acetato transparente e silício (etapa 4). No plano de terra e no elemento irradiante das antenas foram utilizados: o cobre, para as antenas em FR4, denim e poliamida; o filme de ITO para a antena transparente em acetato; e o alumínio nas simulações das antenas em silício.

O perímetro das antenas bioinspiradas foram aproximados pelos perímetros de antenas projetadas com geometrias quadradas e circulares, etapa 6.

As formas das antenas bioinspiradas em plantas com folhas elípticas utilizaram, como ponto inicial, a forma indicada por [52], apresentados na Tabela 2.3, com a seleção das formas com maior possibilidade de compactação, tomando como base o perímetro observado nas antenas com geometria euclidiana (etapa 7).

Tabela 2.3 – Parâmetros da expressão de Gielis para a formação da folha elíptica inicial.

$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$a$	$b$	Forma
2	1000	500	500	1	1	

Após a geração e exportação das imagens (etapa 8) foi realizada a importação no programa *Designer*, da plataforma ANSYS (etapa 9), com a simulação e otimização dos parâmetros das antenas bioinspiradas em plantas (etapa 10).

A partir dos resultados otimizados foram fabricadas antenas bioinspiradas (etapa 11), pelas técnicas de: corrosão por percloroato de ferro, na qual as imagens das antenas são coladas sobre a parte condutora, este processo foi realizado nas antenas em denim e poliamida; por fresadora, modelo LPKF ProMat S103, da Universidade Federal de Campina Grande, processo utilizado na antena para uso sobre *chip*; e por corte manual sobre a imagem colada no elemento condutor, utilizada na antena flexível transparente.

Na última etapa foram realizadas as medições das antenas bioinspiradas em plantas com e a comparação com os resultados simulados.

### 2.4.1. Caracterização de materiais dielétricos

O uso dos materiais dielétricos no desenvolvimento de antenas requer a sua caracterização elétrica, com a identificação da permissividade elétrica e da tangente de perdas, etapa 5. Os principais métodos utilizados na caracterização elétrica dos substratos são [53]:

- Sonda coaxial, neste método a permissividade elétrica é calculada a partir do parâmetro  $|S_{11}|$ ;
- Linha de transmissão, neste método a amostra é colocada em um guia de onda ligado a um analisador de rede vetorial (*Vectorial network analyzer* – VNA), as características eletromagnéticas são calculadas a partir da matriz S;
- Espaço livre, neste método são utilizadas duas antenas cornetas ligadas a um VNA, a amostra é colocada entre as antenas e com o coeficiente de transmissão é possível determinar a permissividade elétrica do material;
- Cavidade ressonante, muitos são os métodos que utilizam a cavidade ressonante, dentre eles o mais utilizado é o método da perturbação, neste método a amostra é inserida em uma cavidade ressonante ligada a um VNA, em que a medição é baseada na mudança da frequência de ressonância e na mudança nas características de absorção da cavidade;
- Placas paralelas, neste método a amostra é inserida entre duas placas paralelas, formando um capacitor, a permissividade é calculada a partir da capacitância gerada.

As medições dos materiais com a caracterização elétrica e medição das antenas utilizadas nesta Tese foram realizadas nas dependências de dois laboratórios: os substratos dielétricos foram caracterizados pelo método da sonda, no Laboratório de Medidas do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Campus de João Pessoa, no VNA da *Agilent Technogies* modelo S5071C (300 kHz – 20 GHz), com o

programa *Dielectric Probe* 85070; e as medições das antenas, até a faixa de frequência de 8 GHz, no Laboratório de Radiometria da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no VNA da *Agilent Technologies* modelo S5071C (9 kHz – 8,5 GHz). As medições com valores acima de 8 GHz foram realizadas e no Laboratório de Medidas do IFPB, Campus de João Pessoa, no VNA da *Agilent Technologies* modelo S5071C (300 kHz – 20 GHz). Na Figura 2.8 pode ser visualizado o setup de medição das características dielétricas da poliamida, do denim e do acetato, materiais dielétricos utilizados neste trabalho.



(a) (b) (c)  
Figura 2. 8 – Setup de caracterização por sonda: (a) denim; (b) poliamida, (c) acetato.

Na caracterização elétrica do substrato denim foi observado permissividade elétrica relativa,  $\epsilon_r = 2,03$ , e tangente de perdas,  $\tan(\delta) = 0,2$ , com boa concordância com a caracterização realizada pelo método da linha transmissão [20]. Na Figura 2.9 são visualizados os resultados medidos da caracterização elétrica do denim.

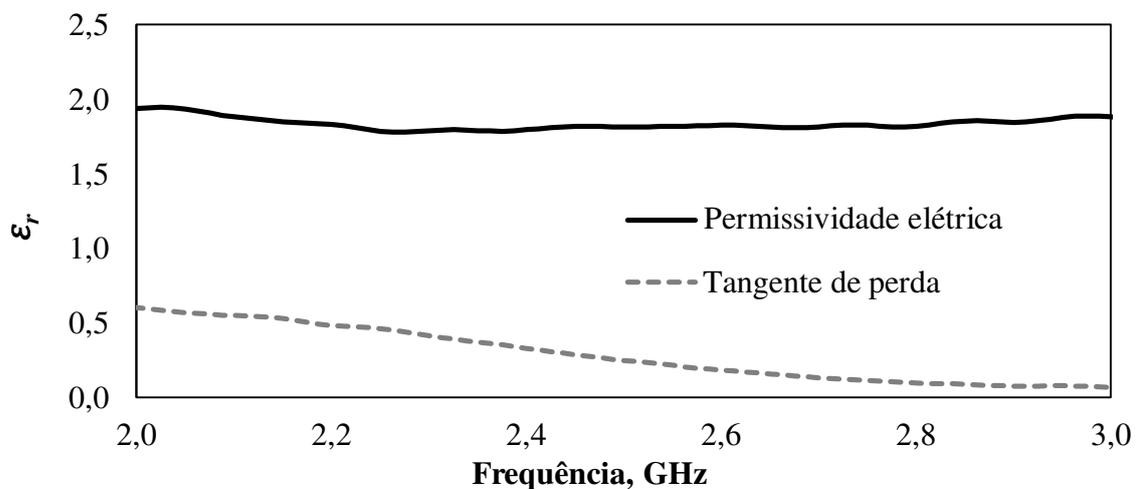
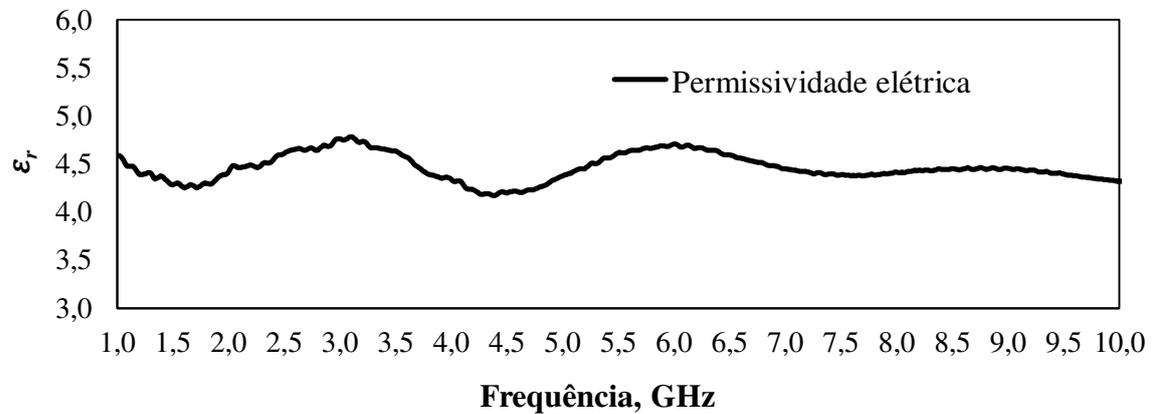
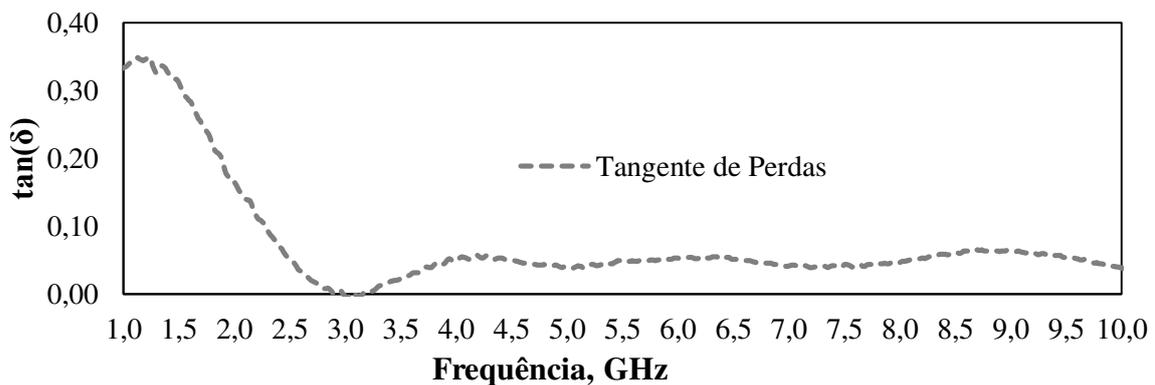


Figura 2.9 – Medição da permissividade elétrica e da tangente de perda do denim.

Na caracterização elétrica da fibra de vidro foi observado permissividade elétrica relativa  $\epsilon_r = 4,54$ , tangente de perdas,  $\tan(\delta) = 0,04$  e espessura de 1,55 mm. Na Figura 2.10 é visualizada a caracterização elétrica da fibra de vidro.



(a)



(b)

Figura 2.10 – Medição da fibra de vidro: (a) permissividade elétrica; (b) tangente de perdas.

Na caracterização do acetato, foi observada permissividade elétrica relativa,  $\epsilon_r = 6,2$ , tangente de perdas,  $\tan(\delta) = 0,08$  e espessura de 0,28 mm. O material condutor transparente usado foi o filme de óxido de tin Índio, com espessura de 0,125 mm. Na Figura 2.11 é apresentado o resultado da caracterização elétrica do acetato de celulose.

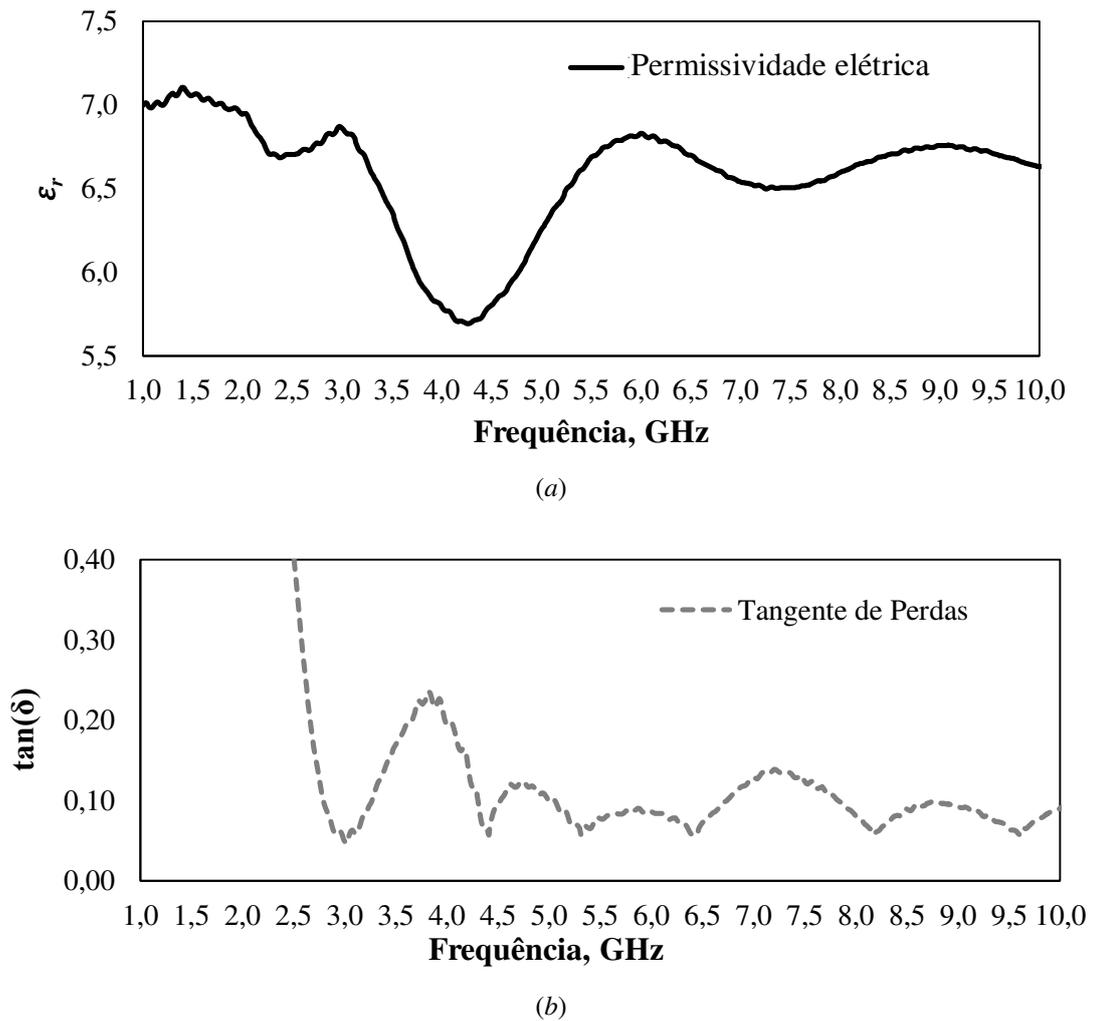


Figura 2.11 – Medição do acetato: (a) permissividade elétrica; (b) tangente de perdas.

Na caracterização elétrica do laminado de poliamida verificou-se permissividade,  $\epsilon_r = 4$ , tangente de perdas,  $\tan(\delta) = 0,04$ , com boa concordância com o indicado pelo fornecedor [59]. Na medição do dielétrico observou-se a espessura do dielétrico de 0,05 mm, e espessura do cobre de 0,035 mm. Os resultados da caracterização da poliamida podem ser observados na Figura 2.12.

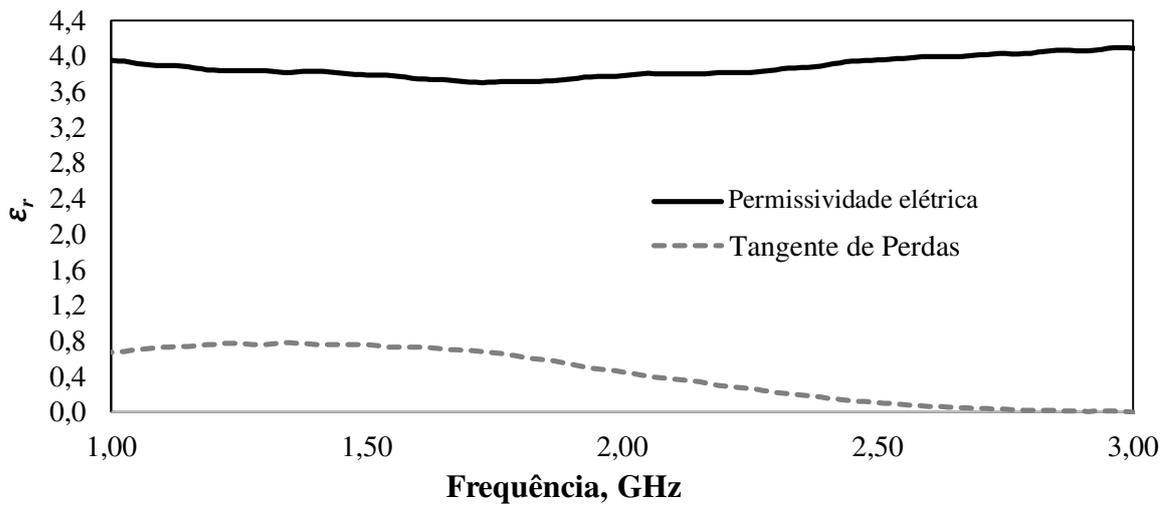


Figura 2.12 – Medição da poliamida.

Neste capítulo foram abordados a fundamentação teórica, as pesquisas relacionadas às antenas bioinspiradas em plantas e animais e a metodologia utilizada no desenvolvimento desta Tese, No capítulo seguinte serão apresentados os resultados simulados e medidos de antenas e arranjos de antenas bioinspiradas em plantas.

## 3. Antenas e arranjos de antenas bioinspiradas em plantas

Neste capítulo são apresentados os resultados simulados e medidos das antenas e arranjos de antenas bioinspiradas em plantas geradas pela expressão de Gielis. São desenvolvidas seis antenas em materiais rígidos e flexíveis para operação nas tecnologias das redes locais sem fio e ISM. Para a rede local sem fio em 2,4 GHz foi projetada uma antena *patch*, construída em denim, bioinspirada na planta *bidens pilosa*. Para as faixas de telefonia móvel em 2G, 3G e 4G foi projetado um monopolo planar, fabricado em denim. Para a rede local sem fio em 5 GHz foram projetados: um monopolo em fibra de vidro, com a forma bioinspirada na planta de palma; uma antena *patch* transparente, construída em acetato e filme de ITO, com forma bioinspirada na planta Ingá-cipó; e duas antenas e dois arranjos de antenas *patch* construídas em poliamida, bioinspiradas na planta ingá-restinga. Para a faixa de ISM 60 GHz foi projetada uma antena e um arranjo de antenas tipo abertura bioinspirada na flor de jasmim.

A seguir são apresentados os resultados obtidos da aplicação da expressão de Gielis no desenvolvimento de antenas bioinspiradas.

### 3.1. Antena têxtil bioinspirada nas folhas *bidens pilosa*

A antena têxtil bioinspirada foi desenvolvida a partir da forma das folhas da *bidens pilosa*, que é um arranjo trifolioso de folhas elípticas. Na Figura 3.1 é apresentado o arranjo da *bidens pilosa*.

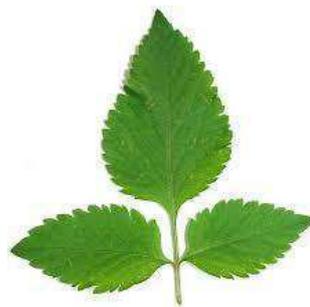


Figura 3.1 – Arranjo trifolioso da *bidens pilosa* [54].

A antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa* foi construída em substrato denim de 1 mm de espessura e laminado de cobre de 0,035mm. O substrato dielétrico foi caracterizado com  $\epsilon_r = 2,03$ , tangente de perdas de 0,2, e comprimento de onda guiada na frequência de ressonância de 2,44 GHz,  $\lambda_g = 99,89$  mm.

Como a frequência de ressonância da antena tem relação direta com seu perímetro, foi projetada uma antena *patch*, com forma circular, frequência de ressonância na faixa WLAN em 2,44 GHz, alimentada por linha de transmissão, e impedância de entrada de 50  $\Omega$ , cujo perímetro foi utilizado como primeiro valor de projeto para a antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*.

A antena *patch* circular foi simulada com perímetro de 155,19 mm e frequência de ressonância central ( $f_0$ ) de 2,43 GHz. A partir do perímetro da antena circular foi projetada uma antena têxtil bioinspirada com três folhas, de base oposta, conexão sésstil com o caule e sem pecíolo. A largura da linha de transmissão foi calculada de acordo com [55].

Na Figura 3.2 é apresentado o desenvolvimento da antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*, com dimensões indicadas pelo comprimento de onda guiado. A folha unitária foi gerada com os parâmetros da expressão de Gielis observados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha unitária da *bidens pilosa*.

<i>m</i>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>a</i>	<i>b</i>	Forma
2	40	120	120	1	1	

Para sintonia fina da estrutura as folhas foram inclinadas com relação ao centro da linha de transmissão. Na folha superior a inclinação foi de 20° e nas folhas inferiores a inclinação foi de 40°, Figura 3.2(a). A imagem gerada da folha unitária foi exportada em formato DXF. As antenas simuladas podem ser observadas nas Figuras 3.2(c) e (d), e a antena medida na Figura 3.2(e).

O perímetro da antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa* foi de 143,3 mm. Na comparação entre as antenas simuladas, observou-se que antena têxtil bioinspirada, em relação à antena têxtil circular, possibilitou a redução do comprimento da antena em 41,2% e da largura em 47,9%, Figuras 3.2(c) e (d), indicando uma estrutura mais compacta.

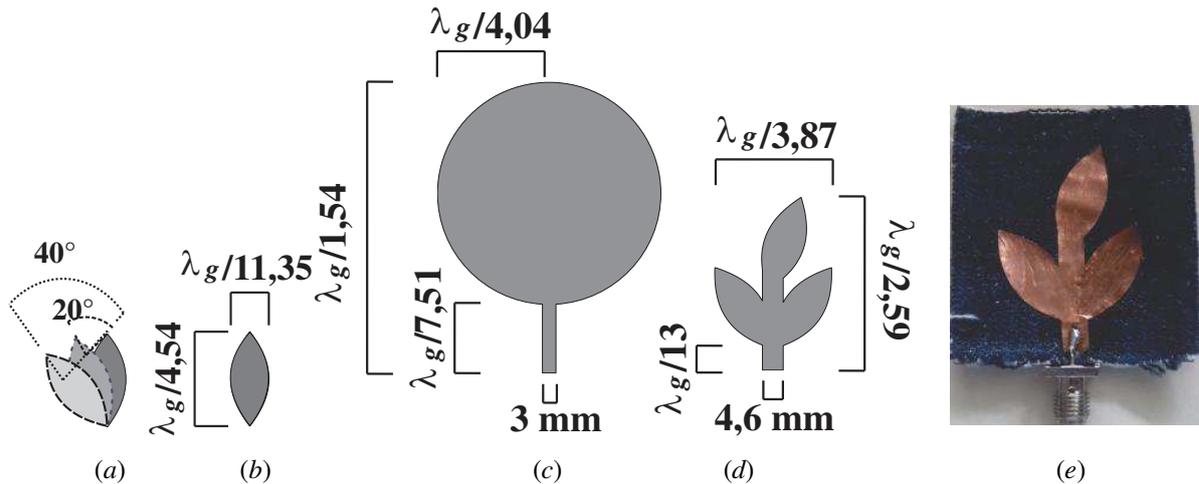


Figura 3.2 – Antenas Simuladas: (a) inclinação das folhas elípticas; (b) folha elíptica gerada; (c) antena circular com dimensões; (d) antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa* com dimensões; (e) protótipo.

Os resultados simulados do parâmetro  $|S_{11}|$  do *patch* circular e da antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa* podem ser visualizadas na Figura 3.3. Nas antenas medidas e simuladas foi observado largura de banda e frequência de ressonância similares, com perda de retorno de -46,3 dB da antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*.

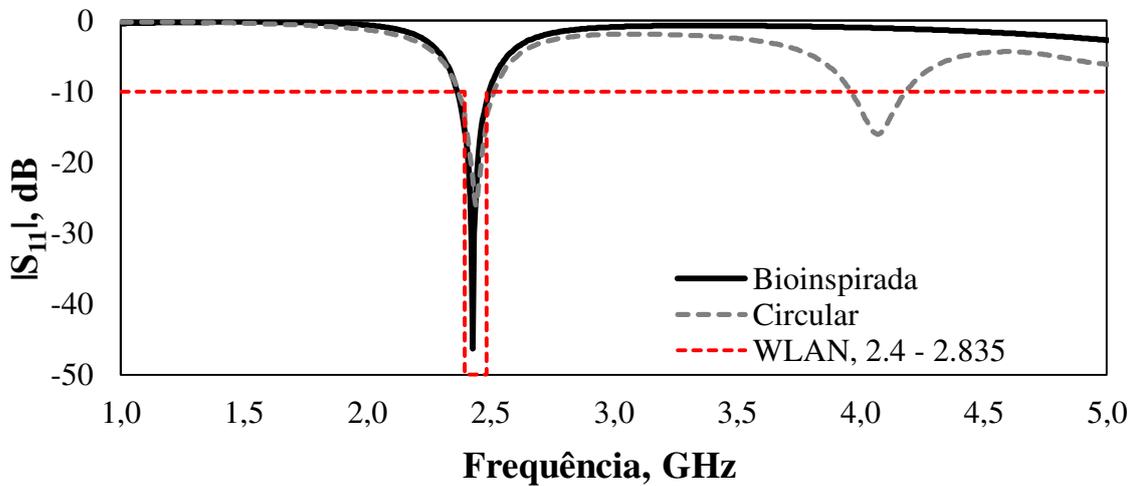


Figura 3.3 – Resultados simulados do parâmetro  $|S_{11}|$  do *patch* circular e da antena bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*.

A partir da antena simulada foi construída a antena no substrato denim e laminado de cobre. Na Figura 3.4 é apresentada a simulação e a medição do parâmetro  $|S_{11}|$  da antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*. Na Tabela 3.2 podem ser observados os resultados medidos e simulados para a frequência de ressonância ( $f_0$ ), primeira frequência inferior a -10 dB ( $f_1$ ), segunda frequência inferior a -10 dB ( $f_2$ ), largura de banda e perda de

retorno. Na antena medida e simulada foi observado frequência de ressonância central similar (2,43 GHz), com boa concordância entre a simulação e a medição, e diferença de 7,7% na largura de banda.

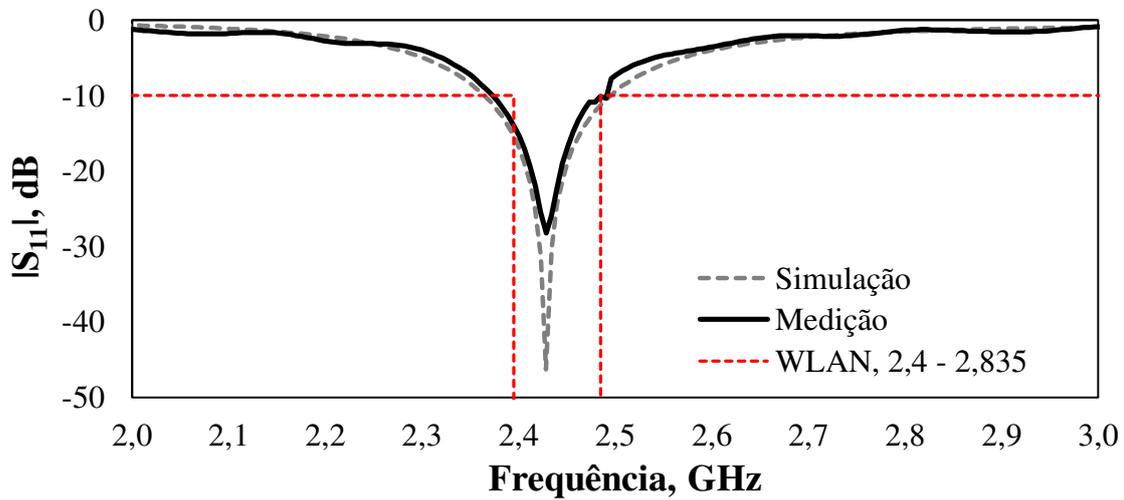
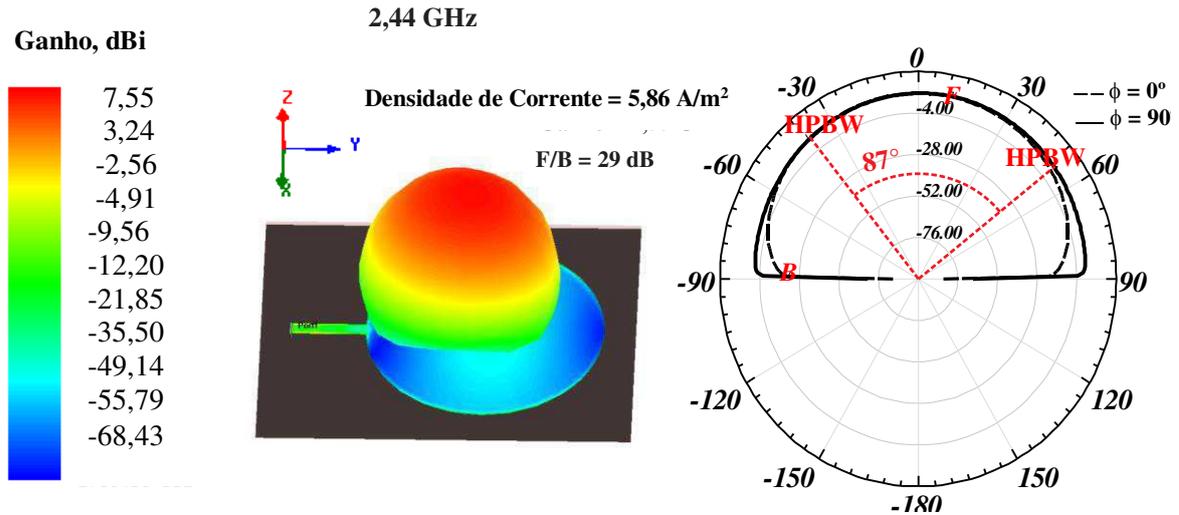


Figura 3.4 – Simulação e medição do parâmetro  $|S_{11}|$  da antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*.

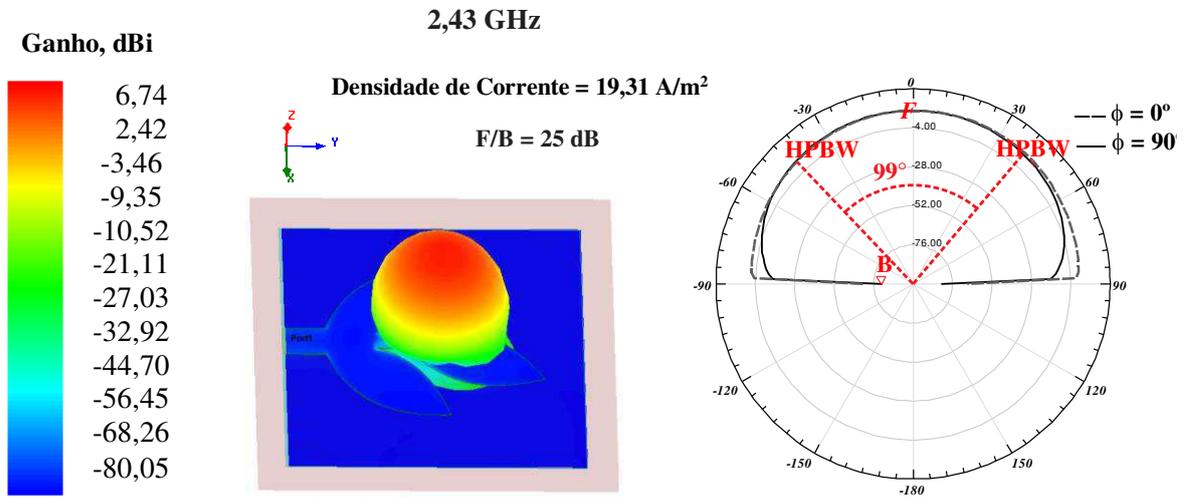
Tabela 3.2 – Resposta em frequência da simulação e da medição da antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*.

Antena	$f_0$ (GHz)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	Largura de Banda (MHz)	Perda de Retorno (dB)
Simulação	2,43	2,36	2,49	130	46,30
Medição	2,43	2,37	2,49	120	28,20

Os diagramas de irradiação 3D e 2D simulados com a indicação da largura de feixe de meia potência (*Half power Beamwidth* – HPBW), relação frente-costas (*Front-to-back*, F/B), densidade de corrente e ganho na frequência de ressonância das antenas têxteis com a forma circular e bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa* podem ser visualizados na Figura 3.5. Como a antena circular possui maior quantidade de metal no elemento irradiante, apresentou maior ganho (7,55 dBi) e F/B (29 dB), enquanto a antena têxtil bioinspirada tem estrutura mais compacta, com maior densidade de corrente (19,31 A/m<sup>2</sup>) e HPBW (99°).



(a)



(b)

Figura 3.5 – Diagrama de irradiação 2D e 3D das antenas *patch* simuladas: (a) forma circular; (b) bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*.

Na Figura 3.6 podem ser visualizadas as impedâncias sobre a carta de Smith da simulação e da medição da antena têxtil bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa* nas faixas de frequências de 2 a 3 GHz. O círculo interno da Figura 3.6(a) representa a largura de banda, ou seja,  $VSWR \leq 2$ . Ambos os resultados demonstram o casamento de impedâncias das antenas próximo de  $50 \Omega$ .

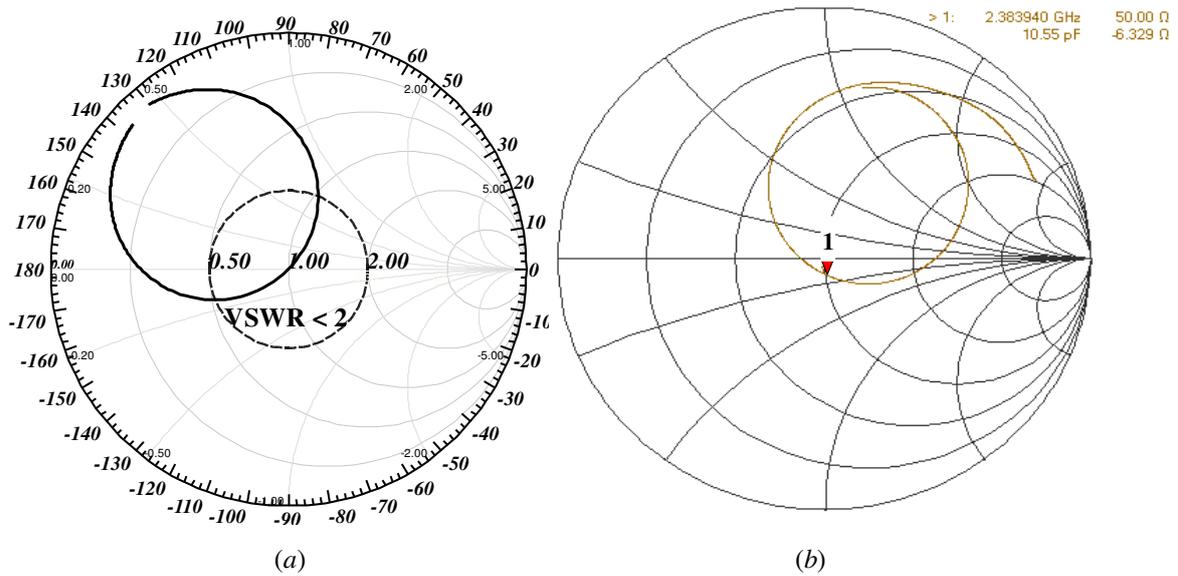


Figura 3.6 – Impedâncias sobre a carta de Smith da antena bioinspirada nas folhas da *bidens pilosa*: (a) simulação; (b) medição.

Como observado nos resultados apresentados, a antena têxtil bioinspirada nas folhas de *bidens pilosa* apresentou estrutura compacta, resultados próximos entre a simulação e a medição, cobrindo as faixas de frequências proposta, com ganho máximo de 6 dBi e perda de retorno medida de -28 dB.

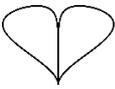
### 3.2. Monopolo planar têxtil bioinspirada na planta de *ginkgo biloba*

A planta *ginkgo biloba* é de origem chinesa podendo ser encontrada em todos os continentes. A forma da folha da planta apresenta boa relação entre o comprimento e largura com maior perímetro que as formas circulares e quadradas, o que permite o projeto de antenas compactas com faixa de operação em frequências mais baixas. A antena têxtil bioinspirada na planta de *ginkgo biloba* foi projetada em denim, para operação nas faixas de 2G (1,85 – 1,9 GHz), 3G (1,92 – 1,975 GHz) e 4G LTE (2,5 – 2,69 GHz), em um monopolo para uso junto ao corpo. O substrato utilizado apresentou espessura de 1 mm, com permissividade  $\epsilon_r = 2,03$ , tangente de perdas de 0,2, o laminado de cobre teve espessura de 0,035mm.

Na Figura 3.7 pode ser observado o desenvolvimento do monopolo planar bioinspirado na planta de *ginkgo biloba* para operação em 2G, 3G e 4G. O monopolo simulado procura reproduzir a forma da planta de *ginkgo biloba*, Figura 3.7(a), com as

dimensões do monopolo indicados como variações do comprimento de onda efetiva, calculado para frequência ressonância de 2,03 GHz,  $\lambda_g = 120$  mm, Figura 3.9(b), que, após as simulações, foram construídas em jeans e laminado de cobre, Figura 3.7(c). A folha de *ginkgo biloba* foi gerada com os parâmetros da expressão de Gielis observados na Tabela 3.3, associado com a alteração da coordenada polar  $x = r\cos(\theta)$  por  $x = \sqrt[3]{(r\cos(\theta))}$ , com  $\theta = 0:\pi$ .

Tabela 3.3 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha de *ginkgo biloba*.

<i>m</i>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>a</i>	<i>b</i>	Forma
4	-0,1	-0,14	1	1	1	

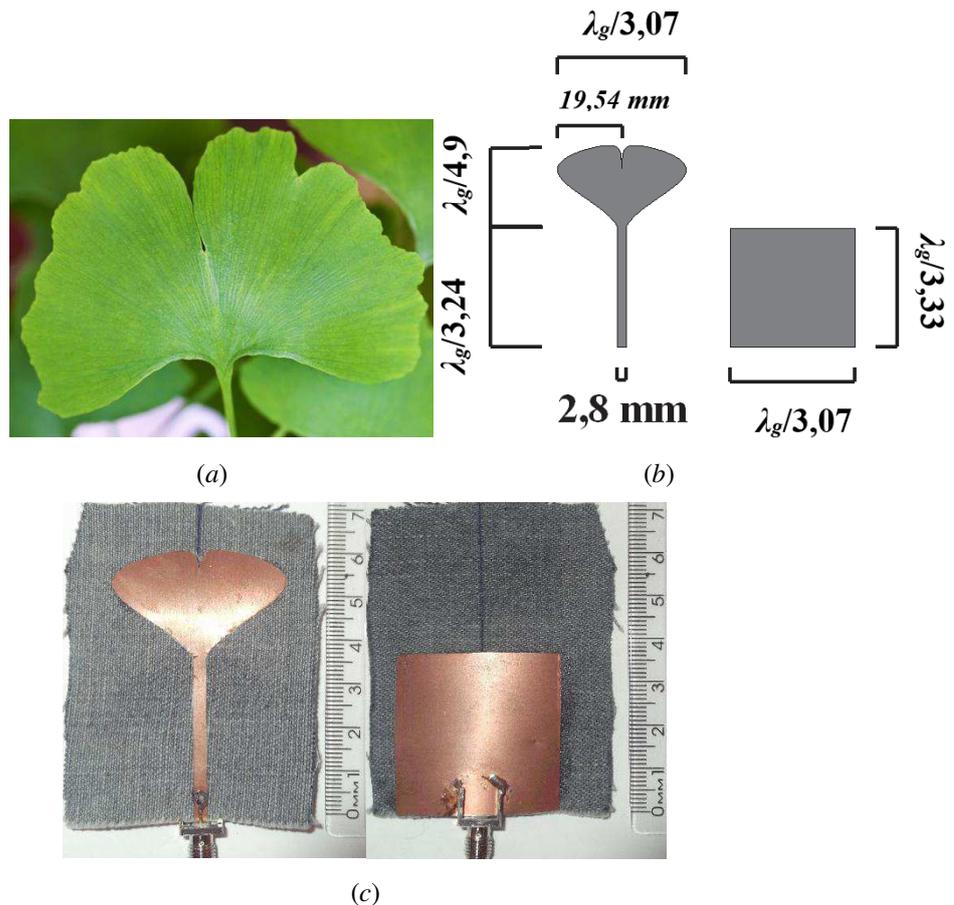


Figura 3.7 – Desenvolvimento do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de *ginkgo biloba*: (a) folha da planta de *ginkgo biloba* [56]; (b) antena simulada com dimensões; (c) elemento irradiante do protótipo e plano de terra do protótipo.

Na Figura 3.8 são apresentados da simulação e da medição do parâmetro  $|S_{11}|$  do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de *ginkgo biloba* e os valores de frequência de ressonância ( $f_0$ ), primeira frequência inferior a -10 dB ( $f_1$ ), segunda frequência inferior a -10 dB ( $f_2$ ), largura de banda e perda de retorno podem ser visualizados na Tabela 3.4. Nas antenas medidas e simuladas foi observado uma diferença nas frequências de ressonâncias de 4,2% e largura de banda maior que a medida em 23%, podendo ser identificada boa concordância entre a simulação e a medição.

Na Figura 3.9 são visualizadas as fotos e a medição do parâmetro  $|S_{11}|$  realizadas com o monopolo planar têxtil junto ao corpo, no bolso (Figura 3.9(a)), sobre a mão (Figura 3.9(b)), e na cabeça (Figura 3.9(c)) de um usuário. Nas medições observou-se que a maior variação, na frequência de ressonância e na largura de banda, foi observada no uso do monopolo planar sobre a mão, com diferença de 13,68% na frequência de ressonância e de 73% na largura de banda. A diferença na largura de banda pode ser associada ao acoplamento eletromagnético entre o elemento irradiante e o corpo do usuário. Como o monopolo planar possui plano de terra truncado pode sofrer interferência de elementos próximos ao seu plano de terra, possibilitando o acoplamento eletromagnético entre o elemento externo e a antena, podendo alterar a frequência de ressonância, a perda de retorno e a largura de banda. Assim, o corpo pode estar atuando como um plano de terra sobre o elemento irradiante.

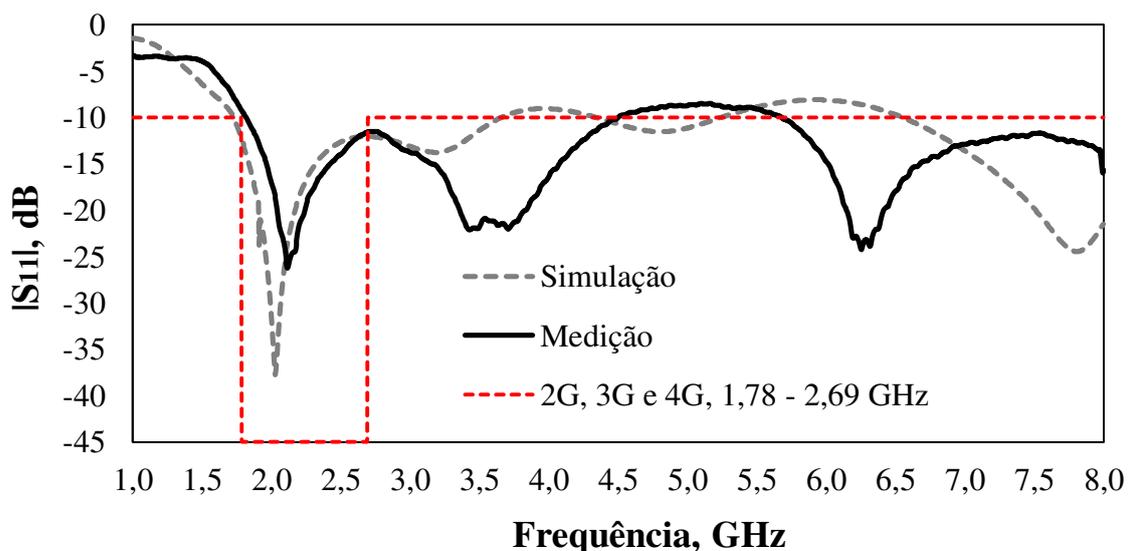


Figura 3.8 – Simulação e medição do parâmetro  $|S_{11}|$  do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de *ginkgo biloba*.

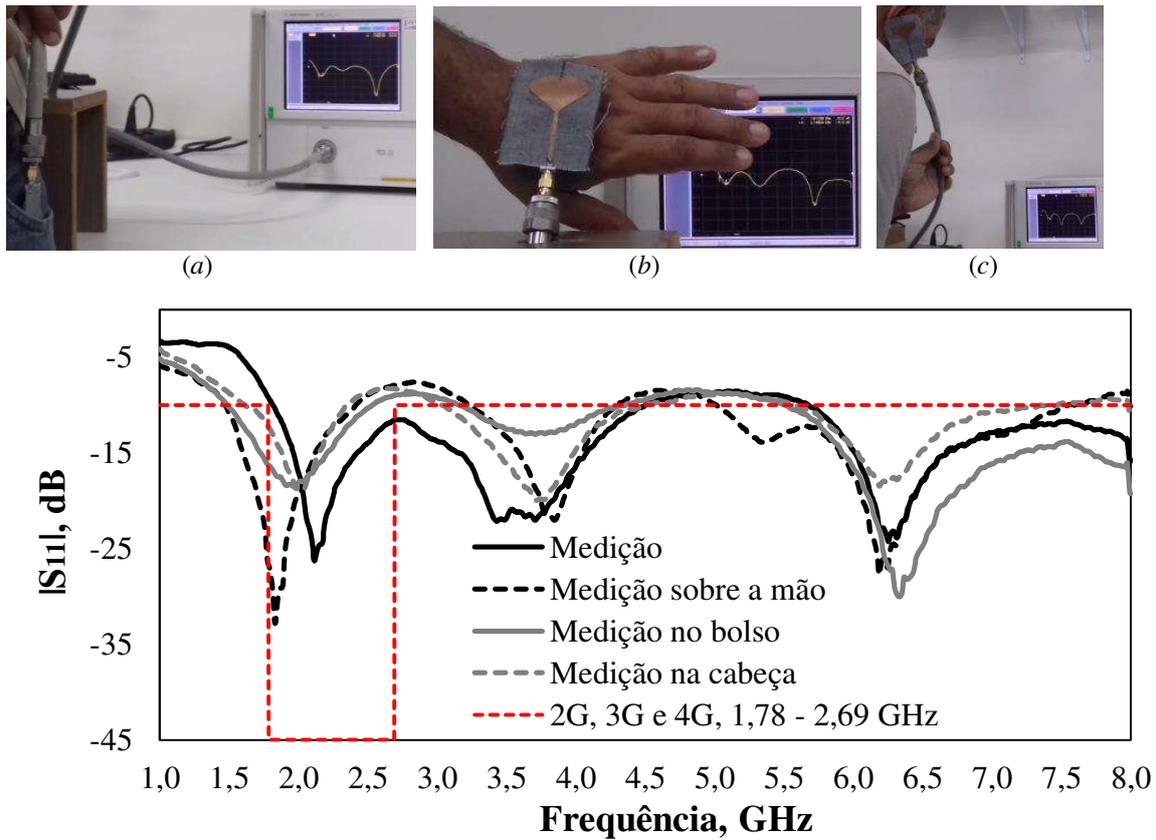


Figura 3.9 – Medição do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de *ginkgo biloba*: (a) foto da medição no bolso; (b) foto da medição na mão; (c) foto da medição na cabeça; (d) parâmetro  $S_{11}$ .

Tabela 3.4 – Resposta em frequência da simulação e das medições do monopolo planar têxtil bioinspirada na planta de *ginkgo biloba*.

Antena	$f_0$ (GHz)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	Largura de Banda (GHz)
Simulação	2,03	1,73	5,24	3,51
Medição	2,12	2,37	4,5	2,7
Medição sobre a mão	1,83	1,61	2,34	0,73
Medição no bolso	1,97	1,49	2,53	1,04
Medição na cabeça	2,04	1,47	2,41	0,94

Os diagramas de irradiação 3D e 2D simulados na frequência de ressonância, com indicação de HPBW, ganho e densidade de corrente, do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta *ginkgo biloba* podem ser visualizados na Figura 3.10. O monopolo obteve máximo ganho na direção *broadside* de 3,1 dBi, com densidade de corrente de 8,56 A/m<sup>2</sup> e HPBW de 102°.

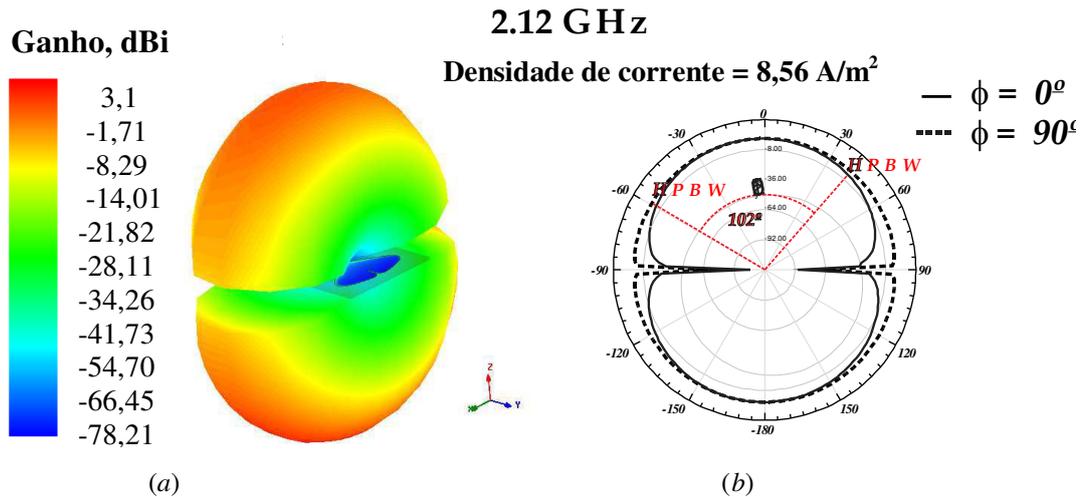


Figura 3.10 – Diagrama de irradiação do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de *ginkgo biloba*: (a) 3D; (b) 2D.

Na Figura 3.11 são apresentadas as impedâncias sobre a carta de Smith da simulação e da medição do monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de *ginkgo biloba* nas faixas de frequências de 1 – 4 GHz. O círculo interno na Figura 3.11(a) representa a largura de banda, ou seja,  $VSWR \leq 2$ . A medição e a simulação obtiveram resultados próximos da frequência de ressonância.

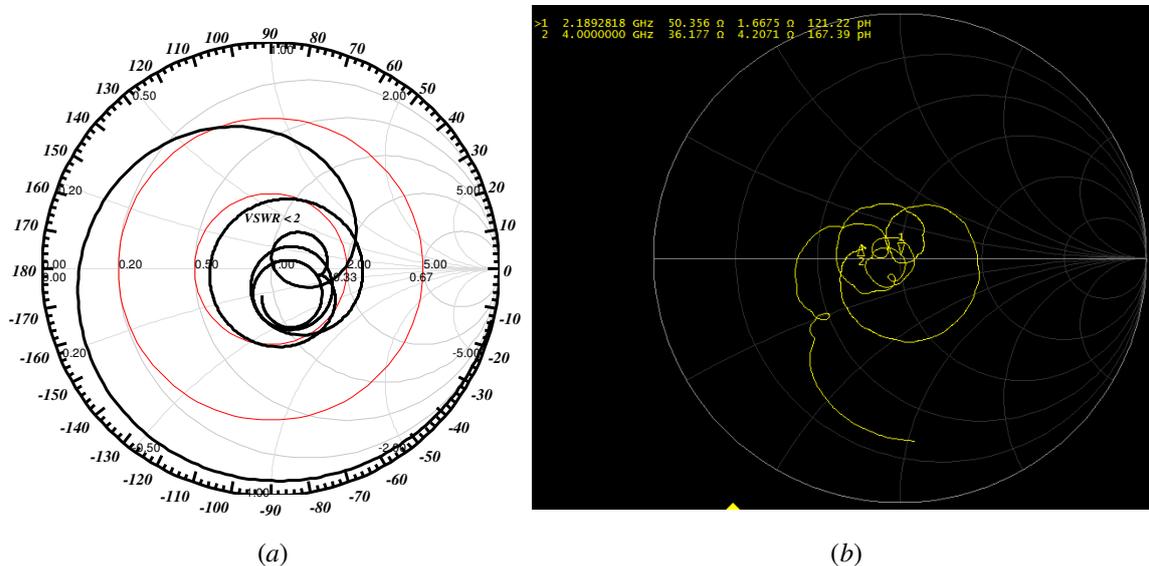


Figura 3.11 – Impedância sobre a carta de Smith do monopolo planar têxtil bioinspirada na planta de *ginkgo biloba*: (a) simulação; (b) medição.

O monopolo planar têxtil bioinspirado na planta de *ginkgo biloba* apresentou bom resultado entre a simulação e a medição, com diferença, na frequência de ressonância, inferior a 5%, demonstrando a possibilidade de uso junto ao corpo.

### 3.3. Monopolo planar bioinspirado na planta de palma

O desenvolvimento de uma antena bioinspirada, para uso sobre *chip*, foi iniciado a partir do projeto da construção de um *chip* para biosensores, dirigido pelo professor Raimundo C. S. Freire. No projeto, o *chip* estaria em conexão com outros dispositivos pela comunicação sem fio utilizando uma antena externa. As limitações da dimensão do *chip* exigiam uma antena com comprimento e largura inferiores a 2 mm, com diagrama de irradiação omnidirecionais, operando em faixa de frequência comercial e alimentação por cabo coaxial. A faixa de frequência escolhida foi a de WLAN em 5 GHz (5,15 – 5,85 GHz), em substrato de fibra de vidro (FR4).

Para a execução do projeto foi escolhida um monopolo planar impresso, por apresentar características de baixa potência efetiva irradiada (-41,3 dBm), diagrama de irradiação omnidirecional, e estrutura compacta. No casamento das impedâncias foi utilizada a alimentação por sonda em uma linha de transmissão conectada ao monopolo.

Os primeiros valores das dimensões da antena foram obtidos pelo projeto e simulação de um monopolo planar com forma quadrada operando na faixa de 5,4 GHz, comprimento de onda guiado,  $\lambda_g = 33,38$  mm. O monopolo planar quadrado apresentou perímetro de 48 mm, com área total de 288,06 mm<sup>2</sup>, e a partir deste valor foi projetado um monopolo planar bioinspirado na planta de palma (*opuntia ficus-indica*), planta encontrada na região nordestina, que apresenta folhas conectadas, sem pecíolo, possibilitando o aumento do perímetro numa estrutura compacta com perímetro final de 46.9 mm e 108,04 mm<sup>2</sup>. A forma da folha unitária foi gerada com os parâmetros da expressão de Gielis indicados na Tabela 3.5. Para redução do tamanho da antena foi realizada a alimentação por sonda com a inserção na base de um toco de linha com comprimento 1/8 do comprimento de onda guiado  $\left(\frac{\lambda_g}{8}\right)$ .

Tabela 3.5 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha unitária da planta de palma.

<i>m</i>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>a</i>	<i>b</i>	Forma
2	400	1200	1200	1	1	

Na Figura 3.12 é apresentado o desenvolvimento do monopolo planar bioinspirado na planta de palma. As imagens da planta de palma e da antena quadrada simulada são

apresentadas nas Figuras 3.12(a) e 3.12(b). As folhas geradas e a antena bioinspirada simulada são observadas nas Figuras 3.12(c) e 3.12(d). Conforme as dimensões das antenas, pode-se verificar que a antena bioinspirada demonstrou estrutura mais compacta, com redução na largura total de 50% e no comprimento de 26,52%, e dimensões totais dentro dos limites de projeto, 20 mm, e redução de 62,5%, quando comparada com a antena quadrada.

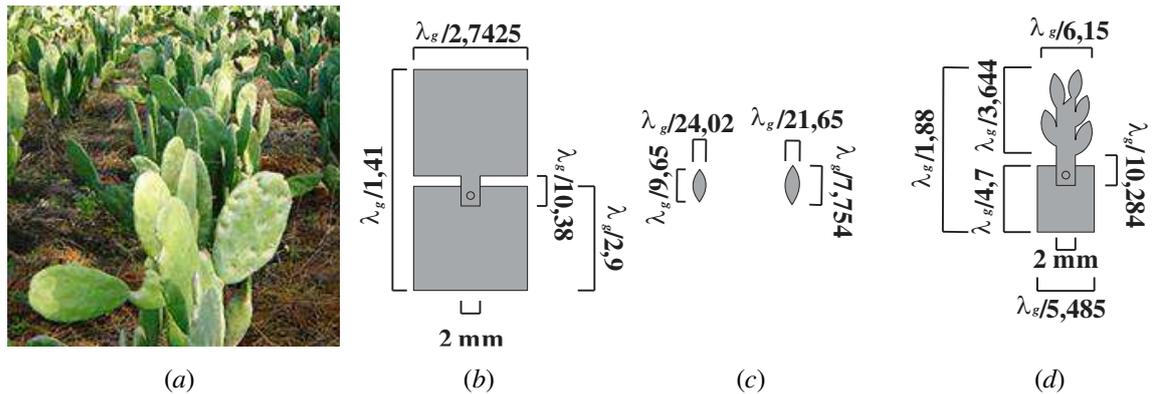


Figura 3.12 – Desenvolvimento do projeto de monopolo planar bioinspirada na planta de palma: (a) planta de palma [57]; (b) monopolo planar quadrado com dimensões; (c) folhas unitárias com dimensões; (d) monopolo planar bioinspirado na planta de palma com dimensões.

A simulação do parâmetro  $|S_{11}|$  monopolo planar quadrado e bioinspirada na planta de palma nas frequências de 1 – 10 GHz é visualizada na Figura 3.13. Na antena quadrada observou-se maior largura de banda (4,47 GHz) que o da antena bioinspirada (1,53 GHz), nas quais ambas cobriram as faixas de frequências de WLAN 5 GHz.

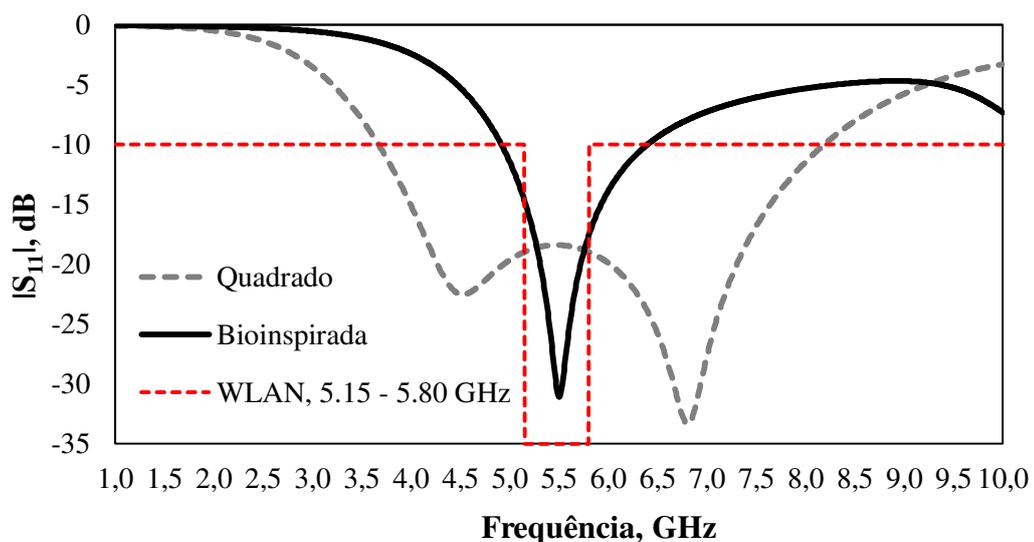


Figura 3.13 – Simulação do parâmetro  $|S_{11}|$  do monopolo planar quadrado e bioinspirado na planta de palma.

A partir do resultado simulado foi construído um protótipo do monopolo planar bioinspirado, Figura 3.14. A comparação do parâmetro  $|S_{11}|$  simulado e medido podem ser observados na Figura 3.15 e os valores de frequência de ressonância ( $f_0$ ), primeira frequência inferior a -10 dB ( $f_1$ ), segunda frequência inferior a -10 dB ( $f_2$ ), largura de banda e perda de retorno podem ser visualizados na Tabela 3.6.

Foram observadas diferenças nas frequências de ressonâncias de 2,7% e variação na largura de banda de 12,4%. As variações entre a simulação e medição, podem ser atribuídas a impedância causada pela solda do conector e pela a diferença na permissividade do dielétrico.

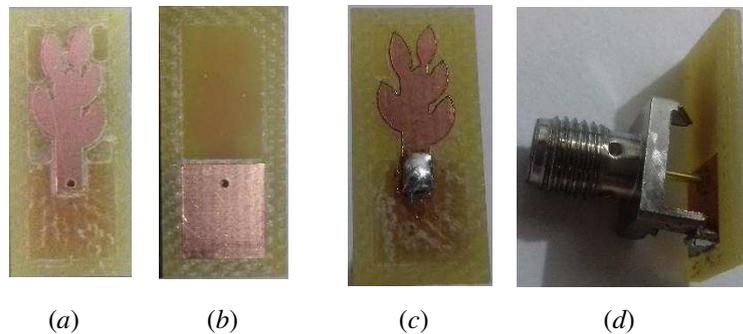


Figura 3.14 – Monopolo planar bioinspirado na planta de palma medido: (a) patch; (b) plano de terra; (c) monopolo planar com o conector SMA; (d) plano de terra com o conector SMA.

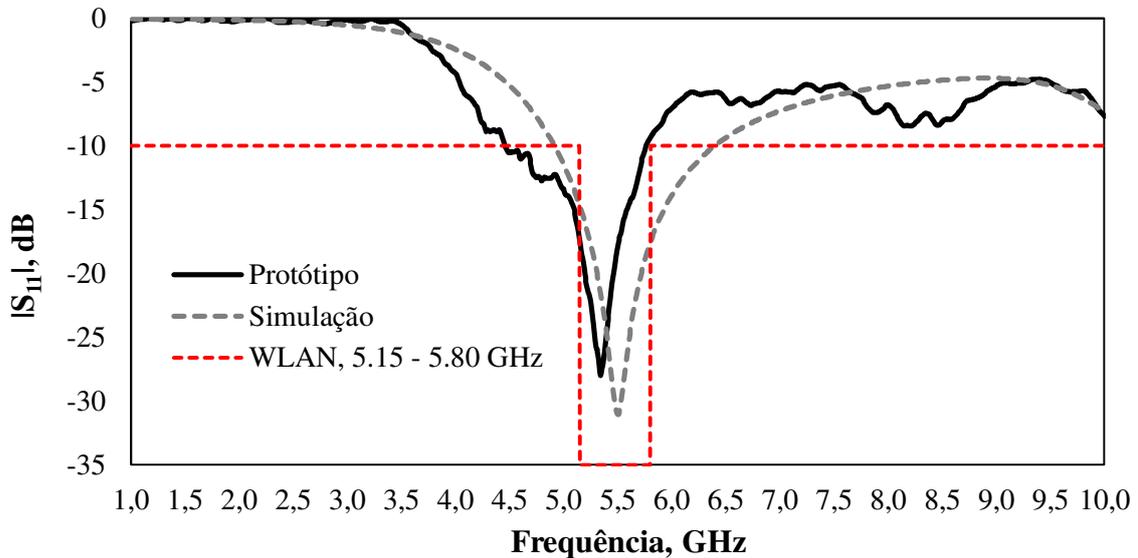


Figura 3.15 – Simulação e medição do parâmetro  $|S_{11}|$  do monopolo planar bioinspirado na planta de palma.

Tabela 3.6 – Resposta em frequência da simulação e da medição do monopolo planar bioinspirado na planta de palma.

Monopolo Planar Bioinspirado	$f_0$ (GHz)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	Largura de Banda (GHz)	Perda de Retorno (dB)
Simulação	5,50	4,92	6,45	1,53	30,80
Medição	5,34	4,41	5,85	1,34	28,00

Os diagramas de irradiação 3D e 2D simulados nas frequências de ressonância, com indicação de HPBW, ganho e densidade de corrente, do monopolo planar quadrado e bioinspirado na planta de palma são visualizados na Figura 3.16. Nas antenas simuladas pode ser observado diagrama de irradiação omnidirecional, porém, como a antena quadrada possui maior área metálica, obteve maior ganho (4,8 dBi), com menor densidade de corrente de  $7,59 \text{ A/m}^2$  e HPBW de  $120^\circ$ . O ganho máximo observado na antena bioinspirada foi de 3,15 dBi, com densidade de corrente de  $53,34\%$  e redução no HPBW de  $75^\circ$ .

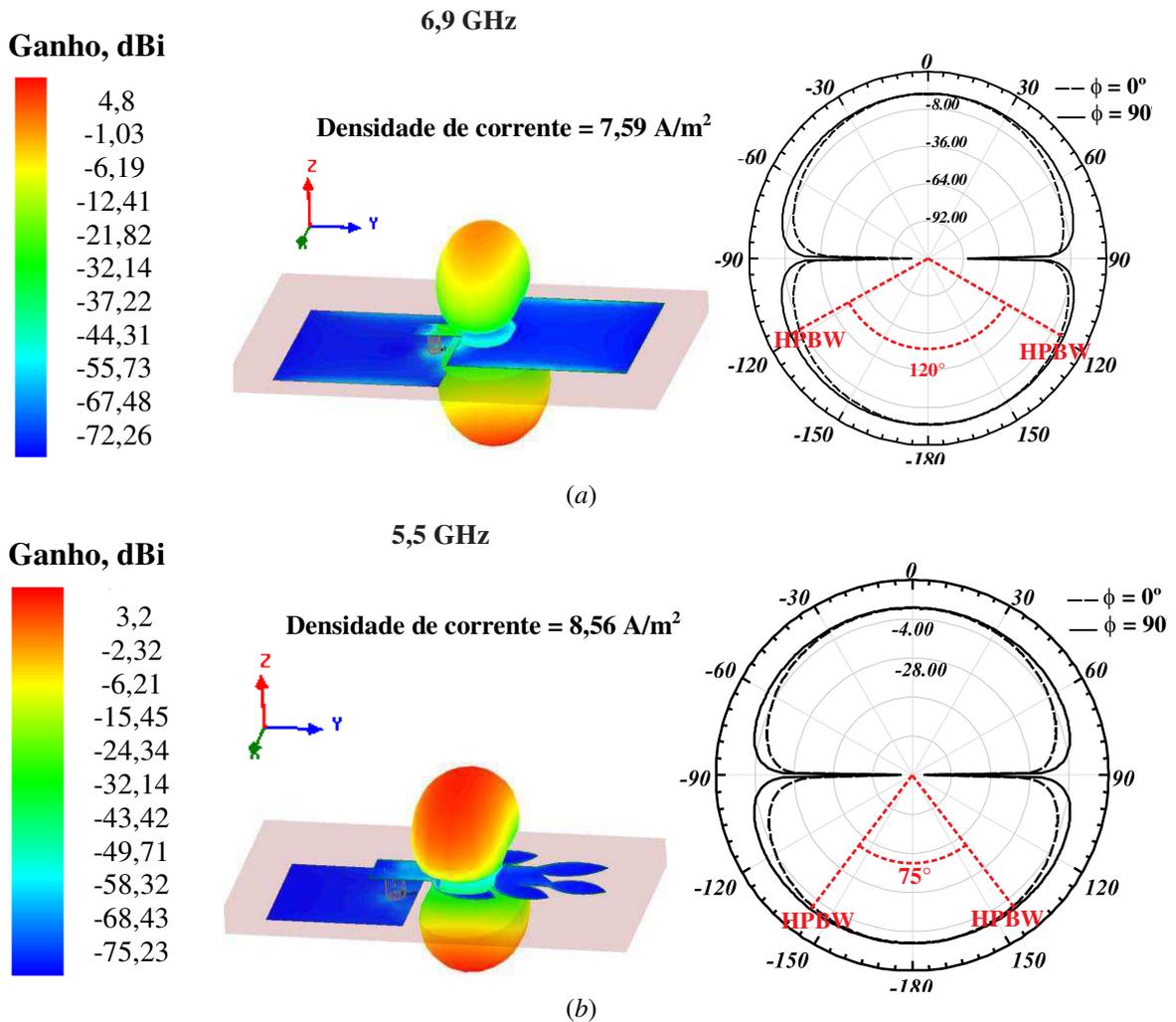


Figura 3.16 – Diagrama de irradiação 3D e 2D dos monopolos planares: (a) quadrado; (b) bioinspirado na planta de palma.

Na Figura 3.17 são observadas as impedâncias sobre a carta de Smith da simulação e da medição do monopolo planar bioinspirado na planta de palma nas faixas de frequências de 4 – 7 GHz. O círculo interno na Figura 3.17(a) representa a largura de banda, ou seja,  $VSWR \leq 2$ . A medição e a simulação obtiveram resultados próximos da frequência de ressonância.

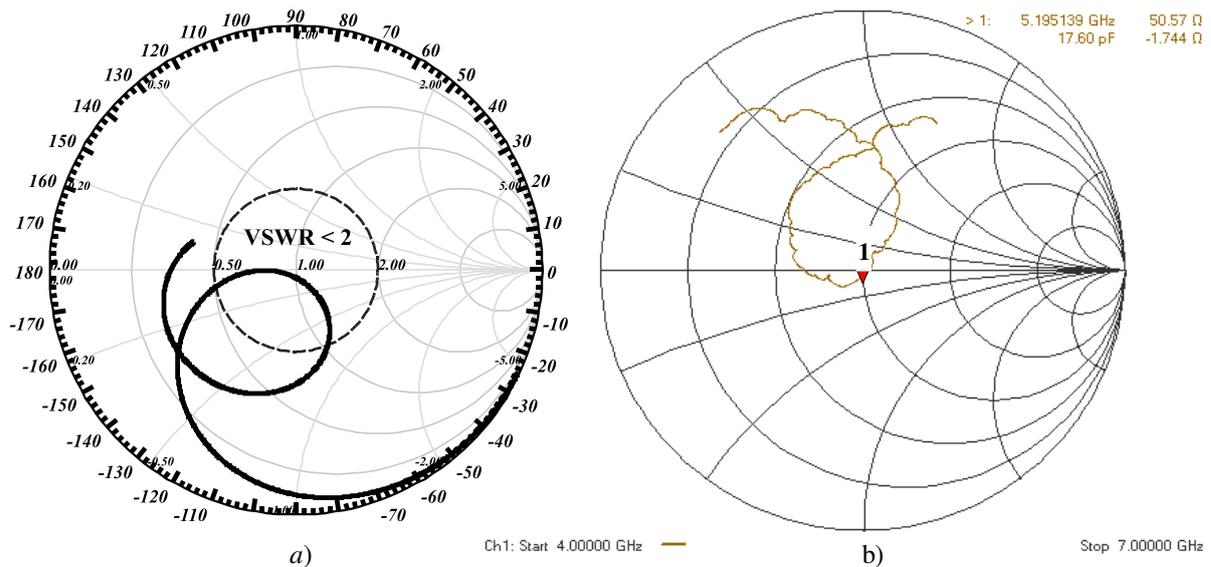


Figura 3.17 – Impedâncias sobre a carta de Smith do monopolo planar bioinspirado na planta de palma: (a) simulação; (b) medição.

O projeto do monopolo planar bioinspirado na planta de palma para faixa de 5 GHz obteve resultados satisfatórios cobrindo a faixa da tecnologia WLAN 5,0 GHz, ganho superior a 3 dBi, com resultados próximos entre as antenas simuladas e medidas.

### 3.4. Antena *patch* transparente bioinspirada na planta de Ingá-cipó

Uma antena *patch* transparente é caracterizada por apresentar dielétrico e elemento condutor (elemento irradiante e plano de terra) em materiais transparentes [21]. O material dielétrico escolhido no projeto da antena bioinspirada transparente foi o acetado de celulose e em pesquisas bibliográficas realizadas, não foram encontrados antenas e outros dispositivos eletromagnéticos desenvolvimento utilizando o acetato de celulose como material dielétrico.

A forma bioinspirada escolhida foi a da planta Ingá-cipó (*Inga edulis Mart.*). A forma da folha unitária foi gerada com os parâmetros da expressão de Gielis observados na

Tabela 3.7. A frequência de ressonância escolhida foi de WLAN em 5,44 GHz, comprimento de onda guiado,  $\lambda_g = 29,28$  mm.

Tabela 3.7 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha unitária da planta Ingá-cipó.

<i>m</i>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>a</i>	<i>b</i>	Forma
2	400	1200	1200	1	1	

O desenvolvimento da antena *patch* transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó pode ser visualizada na Figura 3.18. A forma bioinspirada e a folha unitária gerada podem ser visualizadas nas Figuras 3.18(a) e 3.18(b), e a variação angular das folhas, a antena simulada e o protótipo nas Figuras 3.18(b), 3.18(c) e 3.18(d).

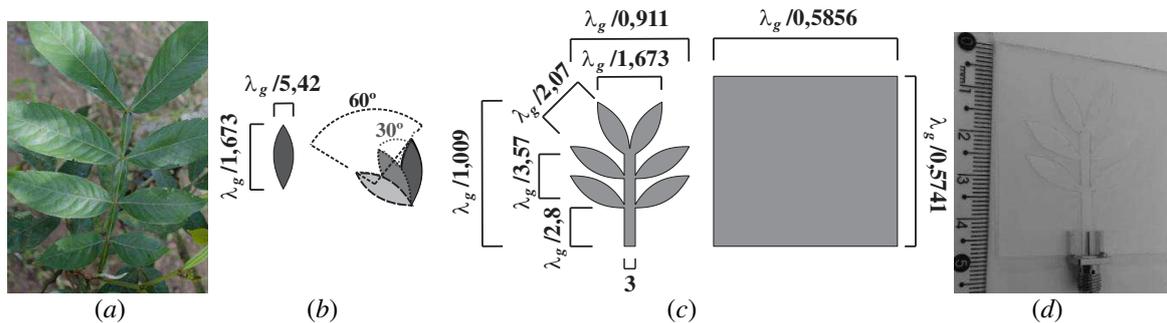


Figura 3.18 – Desenvolvimento da antena *patch* transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó: a) planta de Ingá-cipó [58]; b) folha unitária gerada com a inclinação angular; c) antena simulada com dimensões; d) protótipo.

A simulação e medição do parâmetro  $|S_{11}|$  da antena *patch* transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó é observada na Figura 3.19, e os valores obtidos na frequência de ressonância ( $f_0$ ), primeira ( $f_1$ ) e segunda ( $f_2$ ) frequência em -10 dB, largura de banda na Tabela 3.8. Na antena simulada e medida foram observados resultados próximos com diferença na primeira ressonância ( $f_1$ ) de 2%, com curvas similares cobrindo a faixa WLAN em 5 GHz.

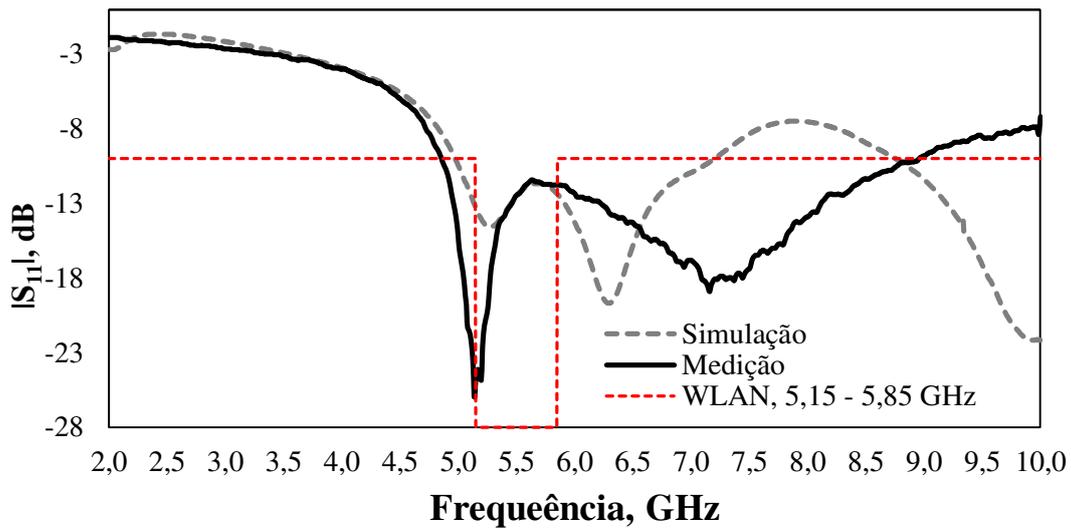


Figura 3.19 – Simulação e medição parâmetro  $|S_{11}|$  da antena *patch* transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó.

Tabela 3.8 – Resposta em frequência da simulação e da medição da antena *patch* transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó simulada e medida.

	<i>Antena Patch Transparente</i>	$f_0$ (GHz)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	<i>Largura de banda</i> (GHz)
1	Simulação	6,44	4,95	7,40	2,45
2	Medição	5,20	4,85	8,96	4,11

Os diagramas de irradiação 3D e 2D simulados na frequência de ressonância, com indicação de HPBW, ganho e densidade de corrente, da antena *patch* transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó podem ser observadas na Figura 3.20. A antena apresenta máximo ganho na direção *end-fire* de 5,4 dBi, F/B de 33,6, HPBW de 126° e densidade de corrente máxima nas bordas da estrutura de 4,6 A/m<sup>2</sup>.

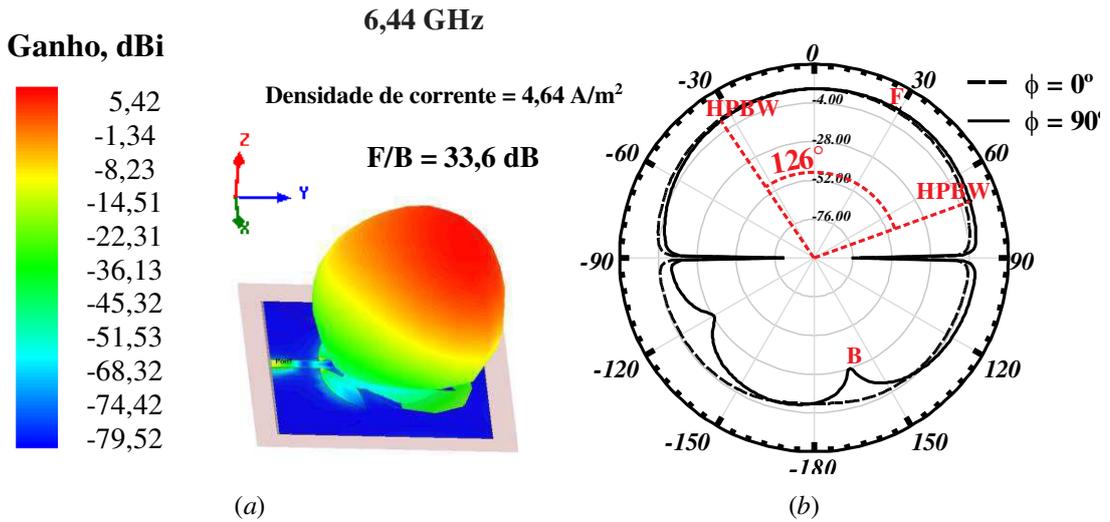


Figura 3.20 – Diagrama de irradiação da antena *patch* transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó: (a) 3D com indicação da densidade de corrente, ganho e relação frente/costas; (b) 2D com largura de feixe de meia potência.

As impedâncias sobre a carta de Smith da antena transparente *patch* bioinspirada na planta Ingá-cipó simulada e medida nas faixas de frequências de 4 – 7 GHz podem ser visualizadas na Figura 3.21. O círculo interno na Figura 3.21(a) representa a largura de banda, ou seja, o  $VSWR \leq 2$ . A medição e a simulação obtiveram resultados próximos da frequência de ressonância com casamento impedâncias em 50  $\Omega$ , indicadas pelas curvas próximas ao centro da carta.

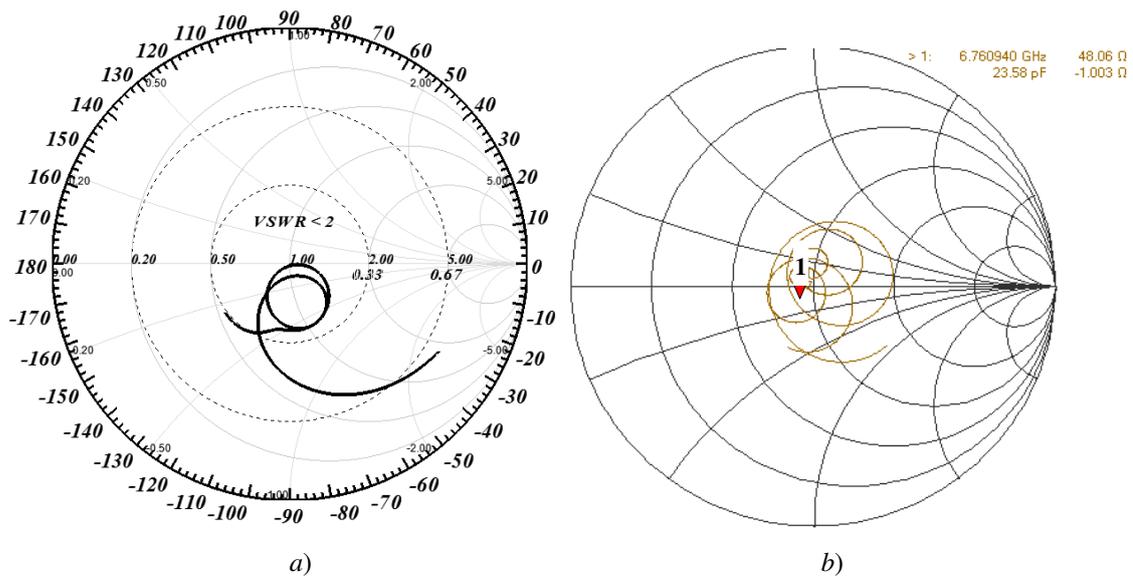


Figura 3.21 – Impedâncias sobre a carta de Smith da antena *patch* transparente bioinspirada na planta Ingá-cipó: (a) simulação; (b) medição.

Foi observado na antena transparente *patch* bioinspirada na planta Ingá-cipó resultados satisfatórios com frequências de ressonâncias próximas, largura de banda cobrindo a banda WLAN em 5 GHz, e ganho superior a 5 dBi, em material ainda não utilizado como dielétrico da antena.

### 3.5. Arranjos de antenas *patch* flexíveis bioinspiradas

Os arranjos de antena *patch* flexíveis bioinspiradas foram projetadas em poliamida, material dielétrico, flexível, resistente a tensões mecânicas e temperaturas de operação acima de 225°C, com aplicações em circuitos flexíveis comerciais [59], para uso no monitoramento de pessoas em locais de risco em altas temperaturas. Com a poliamida é possível o monitoramento de pessoas que atuam em ambientes de risco como bombeiros e trabalhadores de caldeiras ou siderúrgicas. A frequência de operação escolhida foi a de WLAN em 5 GHz, com a antena projetada para frequência central de 5,44 GHz e comprimento de onda guiado de,  $\lambda_g = 35,14$  mm.

A forma bioinspirada escolhida foi a da planta Ingá-da-restinga (*Inga marítima Benth.*). Para a formação do arranjo de antenas foram projetadas duas antenas com a forma da folha de ingá-restinga para as faixas de 5,4 GHz e 5,8 GHz. A forma da folha unitária foi gerada com os parâmetros da expressão de Gielis observados na Tabela 3.9. Para geração da imagem da folha da ingá-restinga foi realizada a alteração da coordenada polar  $x = r \cos(\theta)$  por  $x = \sqrt[3]{r \cos(\theta)}$ , com  $\theta = 0: 2\pi$ .

Tabela 3.9 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da folha unitária da planta ingá-restinga.

<i>m</i>	<i>n<sub>1</sub></i>	<i>n<sub>2</sub></i>	<i>n<sub>3</sub></i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>Forma</i>
2	20	12	12	1	1	

O arranjo com duas folhas foi realizado pela união das folhas para 5,4 GHz e 5,8 GHz e separadas pela distância de um comprimento de onda guiado, tomando como referência o centro de cada antena *patch*, com a linha de transmissão no centro.

No arranjo de quatro folhas foram utilizadas duas folhas em sentido oposto as primeiras, com o objetivo que o diagrama de irradiação apresente máximo ganho na direção *broadside*.

Na Figura 3.22 pode ser observado o desenvolvimento do projeto do arranjo de antenas *patch* flexíveis bioinspiradas na planta Ingá-da-restinga, com: a forma das folhas utilizadas no arranjo de antenas, Figura 3.22(a); as antenas projetadas para 5,4 GHz, 5,8 GHz, o arranjo com duas, o arranjo com 4 folhas, e os planos de terra com dimensões relativas ao comprimento de onda guiada, Figura 3.22(b); e os protótipos, Figura 3.22(c).

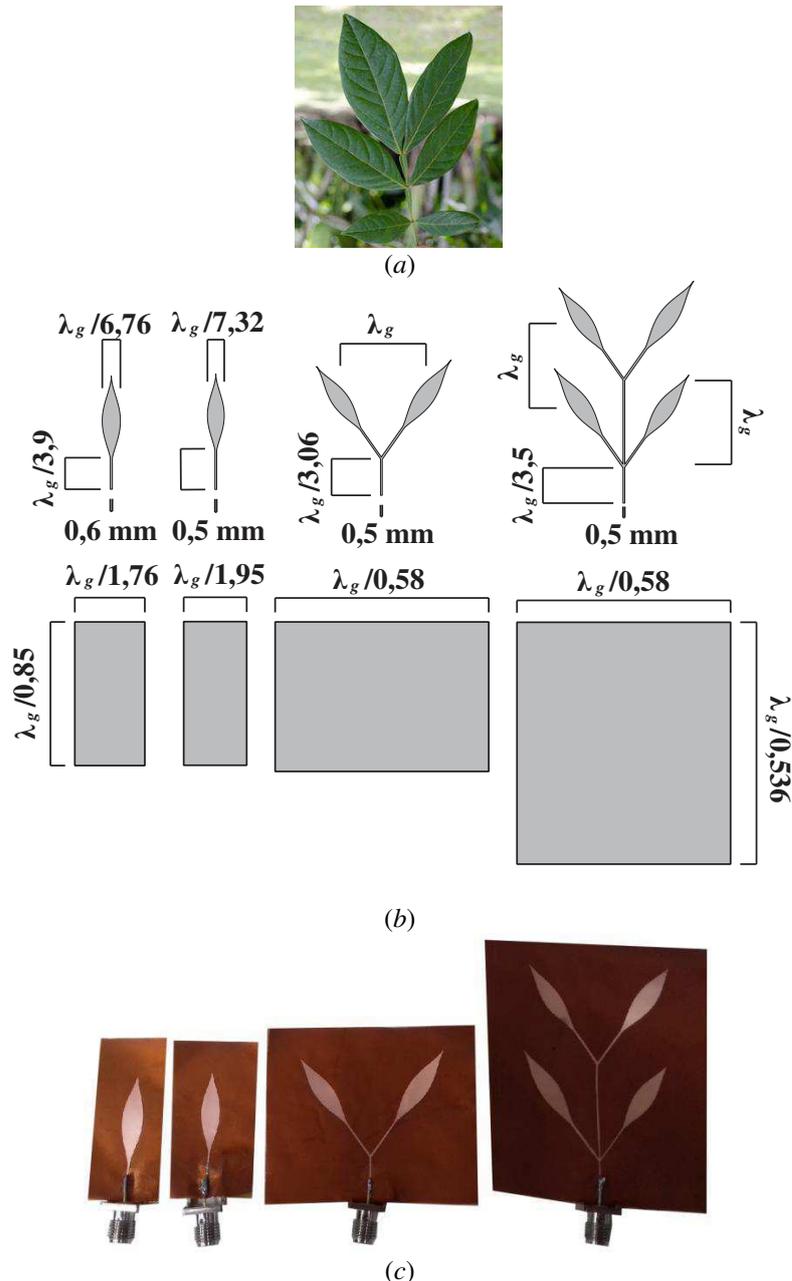
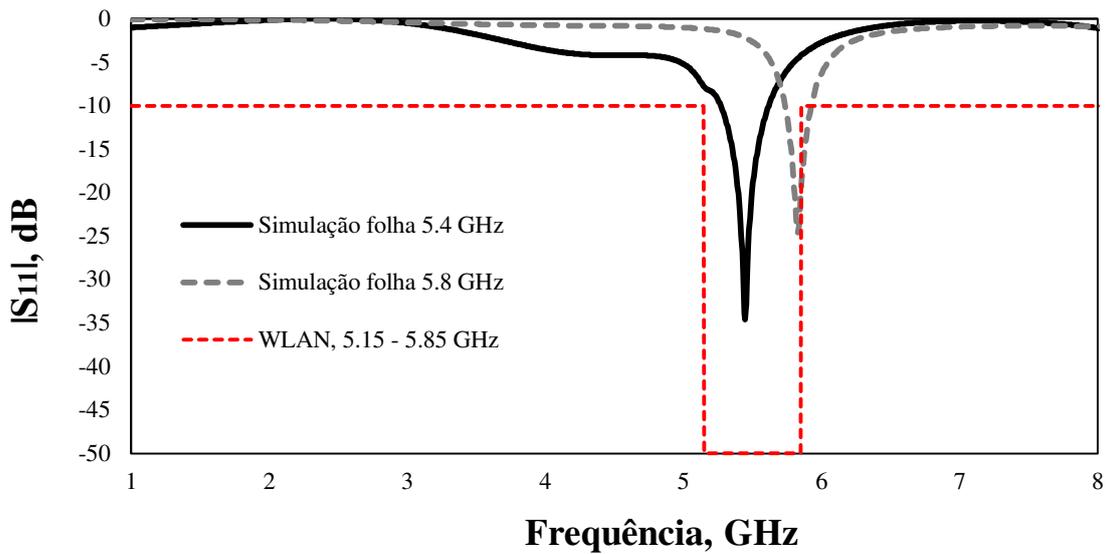


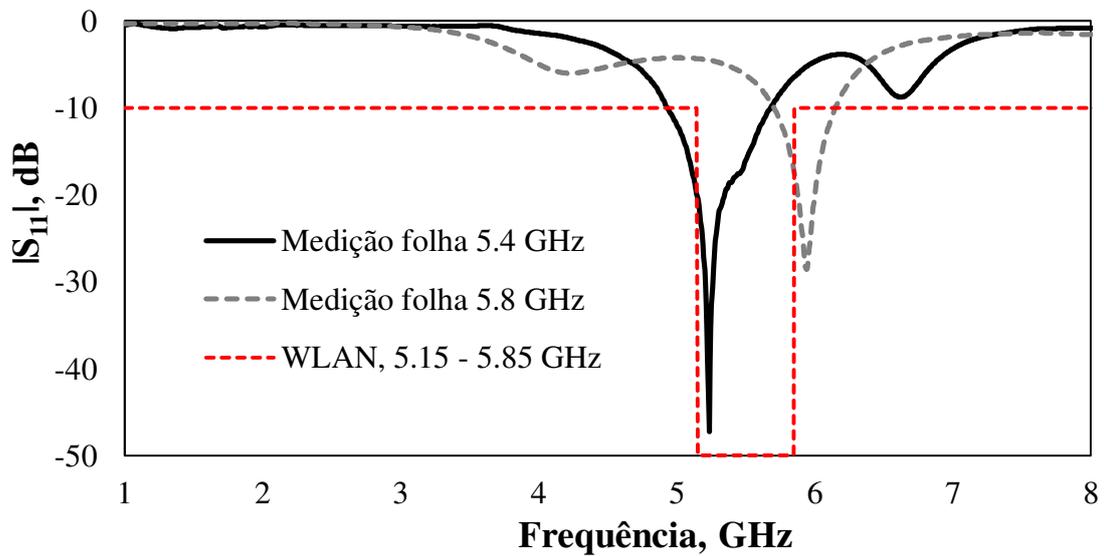
Figura 3.22 – Desenvolvimento do arranjo de antenas *patch* bioinspirado em poliamida: (a) planta Ingá-da-restinga [60]; (b) antenas simuladas; (c) protótipos.

Os resultados simulados e medidos do parâmetro  $|S_{11}|$  das antenas *patch* bioinspiradas na planta Ingá-da-restinga para 5,4 GHz e 5,8 GHz são apresentados na Figura

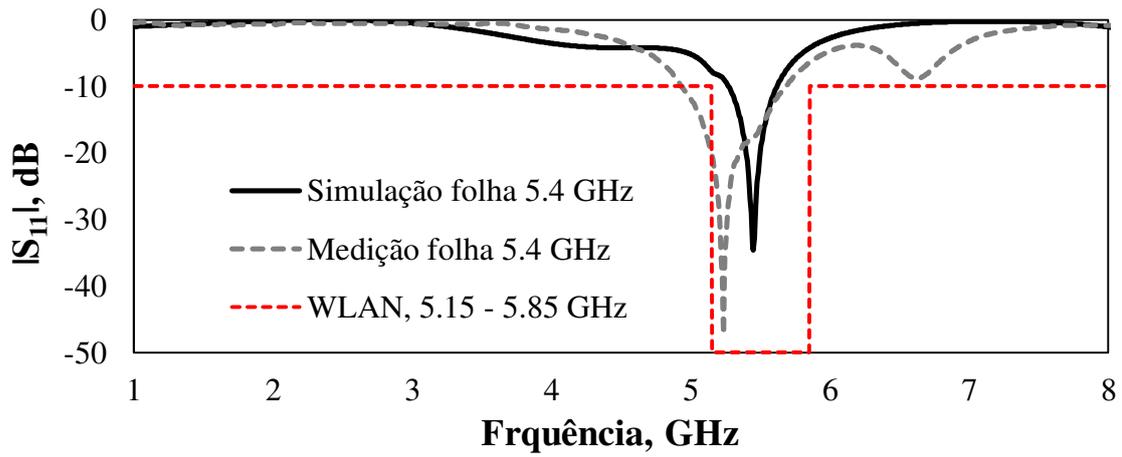
3.23, e os valores da frequência de ressonância ( $f_0$ ), primeira ( $f_1$ ) e segunda ( $f_2$ ) frequência em -10 dB, largura de banda e perda de retorno na Tabela 3.10. Nas antenas simuladas foram observadas frequências de ressonância centrais próximas, com maior diferença observada na antena para 5,4 GHz (3,85%). Nas antenas medidas observou-se que a largura de banda foi duas vezes maior do que o avaliado nas simulações, o que pode ter como causa o processo de fabricação, vinculado a variações na permissividade elétrica do material.



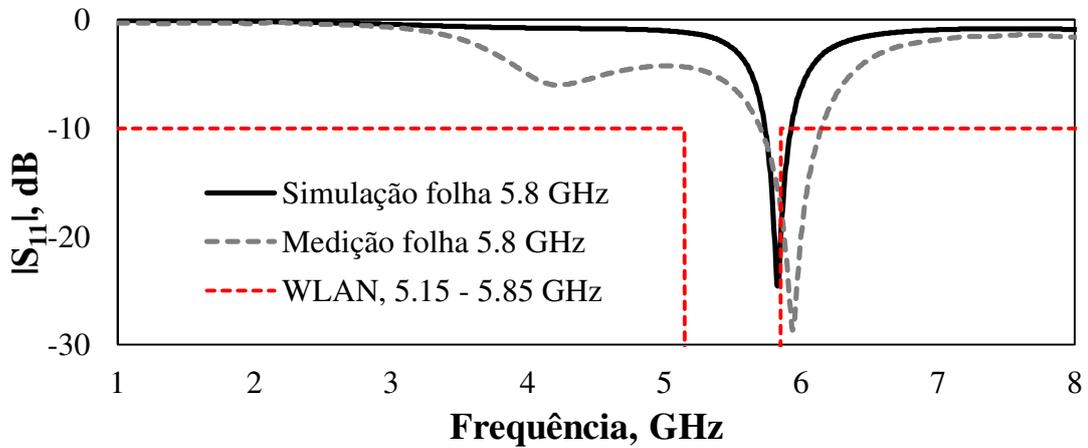
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.23 – Simulação e medição do parâmetro  $|S_{11}|$  das antenas *patch* flexíveis bioinspirados na planta Ingá-da-restinga com folhas para 5,4 GHz e 5,8 GHz: (a) simulação; (b) medição; (c) simulação e medição da folha 5,4 GHz; (d) simulação e medição da folha 5,8 GHz.

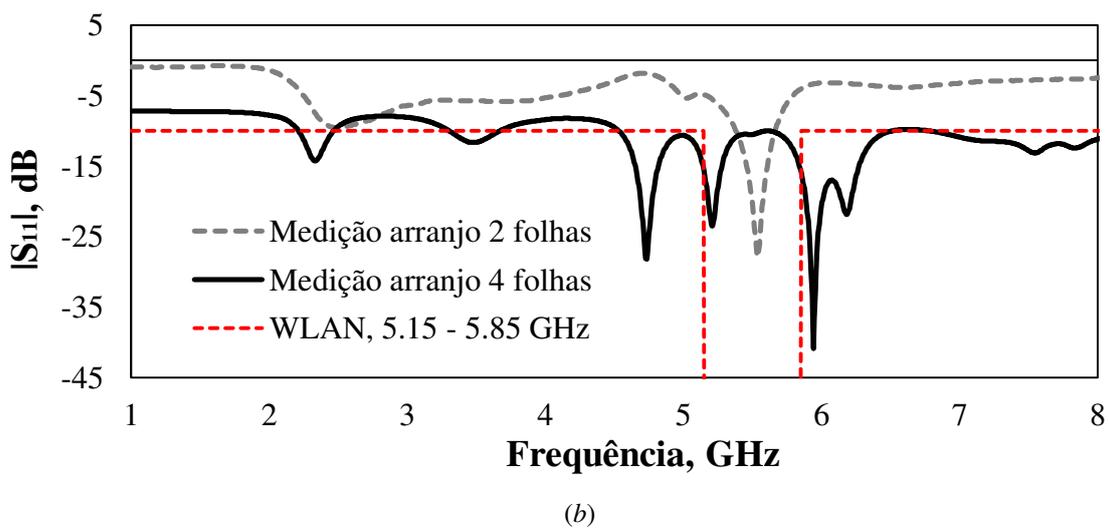
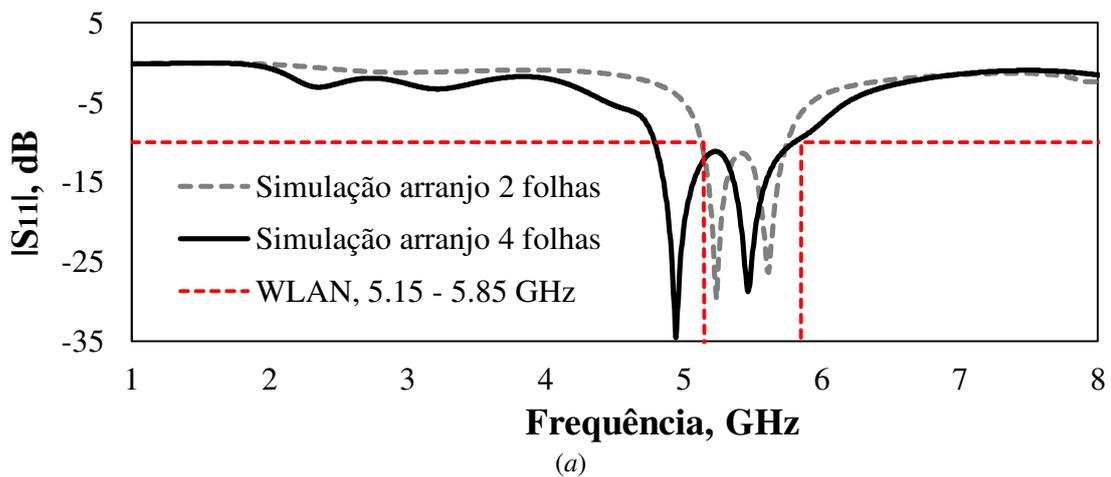
Tabela 3.10 – Resposta em frequência da simulação e da medição das antenas *patch* flexíveis bioinspiradas na planta de Ingá-da-restinga construídas em poliamida.

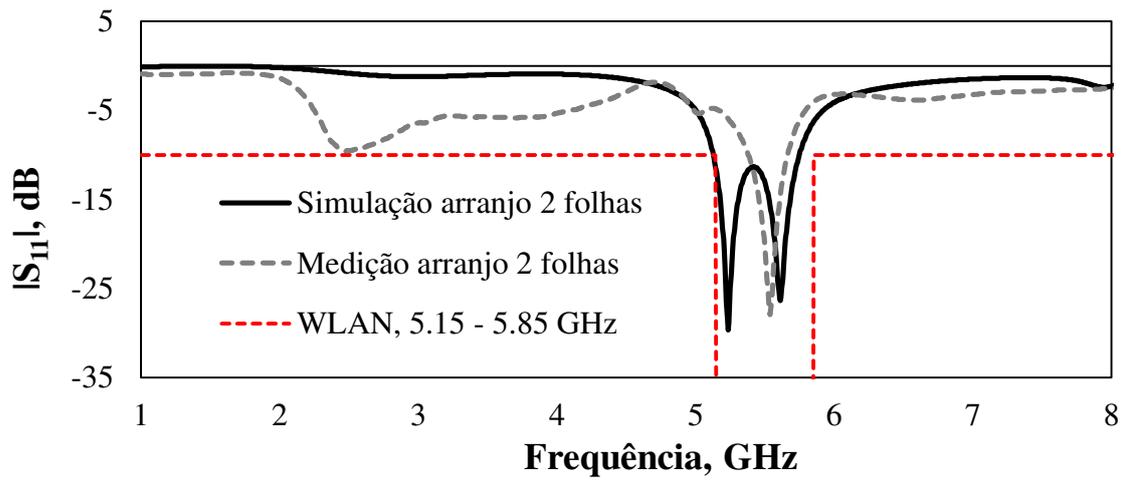
	<i>Antena em poliamida</i>	$f_0$ (GHz)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	<i>Largura de banda</i> (GHz)	<i>Perda de retorno</i> (dB)
1	Simulação 5,4 GHz	5,45	5,27	5,62	0,35	34,63
2	Medição 5,4 GHz	5,24	4,93	5,68	0,75	47,25
3	Simulação 5,8 GHz	5,83	5,74	5,93	0,19	24,62
4	Medição 5,8 GHz	5,94	5,7	6,15	0,45	28,54

Na Figura 3.24 podem ser visualizadas as comparações do parâmetro  $|S_{11}|$  dos arranjos *patch* flexíveis bioinspirados na planta Ingá-da-restinga em poliamida com duas e

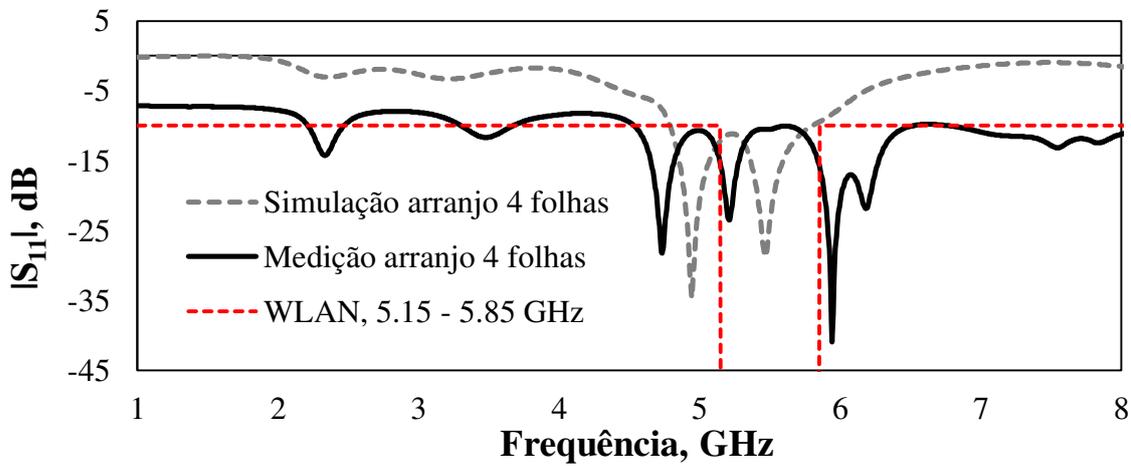
quatro folhas e os valores da frequência de ressonância ( $f_0$ ), primeira ( $f_1$ ) e segunda ( $f_2$ ) frequência em -10 dB, largura de banda e perda de retorno na Tabela 3.11. Nos resultados pode-se observar que, a maior diferença nas frequências de ressonâncias simuladas e medidas foram verificadas no arranjo com duas folhas, diferente da antena simulada, a antena medida apresentou apenas uma ressonância, com largura banda 52,3% menor e frequência de ressonância próxima da frequência mais alta, 5,62 GHz, Figura 3.24(c).

No arranjo com quatro folhas pode ser observado que as duas frequências de ressonância demonstraram deslocamento para frequências mais baixas, com diferença nos resultados simulados e medidos de 4,24% e 4,75%, cobrindo a faixa de frequências de WLAN. Essas diferenças podem ser atribuídas ao método de fabricação de corrosão por perclorato de ferro e pela variação da permissividade do material utilizado.





(c)



(d)

Figura 3.24 – Medição e simulação do parâmetro  $|S_{11}|$  dos arranjos *patch* flexíveis bioinspirados com duas e quatro folhas: (a) simulação; (b) medição; (c) simulação e medição arranjo 2 folhas; (d) simulação e medição arranjo 4 folhas.

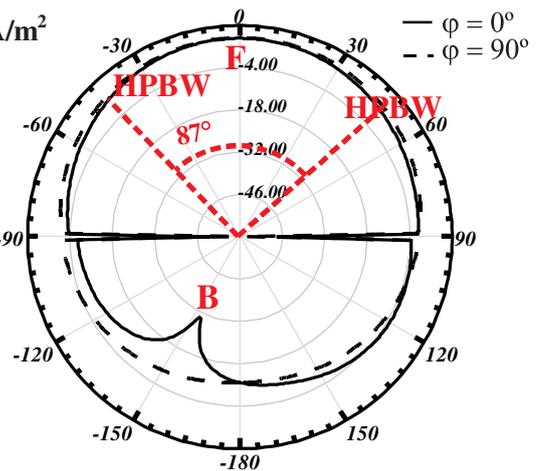
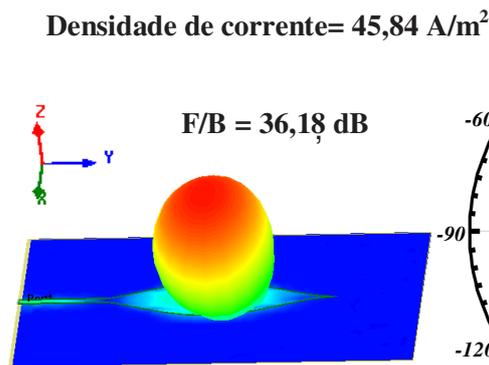
Tabela 3.11– Resposta em frequência da simulação e da medição dos arranjos *patch* flexíveis bioinspirados na planta de Ingá-da-restinga construídos em poliamida.

Antena Patch em Poliamida		$f_0$ (GHz)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	Largura de banda (GHz)	Perda de Retorno (dB)
1	Simulação arranjo 2 folhas	5,15 / 5,61	5,12	5,75	0,63	28,89 / 26,39
2	Medição arranjo 2 folhas	5,54	5,37	5,67	0,3	27,94
3	Simulação arranjo 4 folhas	4,95 / 5,47	4,78	5,82	1,04	333,33 / 28,8
4	Medição arranjo 4 folhas	4,74 / 5,21	4,53	6,52	1,99	28,25 / 23,48

Na Figura 3.25 podem ser observados os diagramas de irradiação 3D e 2D simulados nas frequências de ressonância centrais das antenas e arranjos de antenas *patch* flexíveis em poliamida bioinspirados na planta Ingá-da-restinga, com a indicação de HPBW, ganho, F/B e densidade de corrente. Pode ser observado que, as antenas demonstram diagrama de irradiação característica de uma antena *patch*, ganho característico de um arranjo de antenas, o qual cresce com o aumento do número de antenas agregadas, com ganho máximo na direção *end-fire* de 9,76 dBi no arranjo com quatro folhas. Os arranjos com duas e com quatro folhas obtiveram menor F/B na ordem de 20 dB, o arranjo com folhas apresentou HPBW de 77° e densidade de corrente maior que a observada nas folhas unitárias, superior a 54 A/m<sup>2</sup>.

5,44 GHz

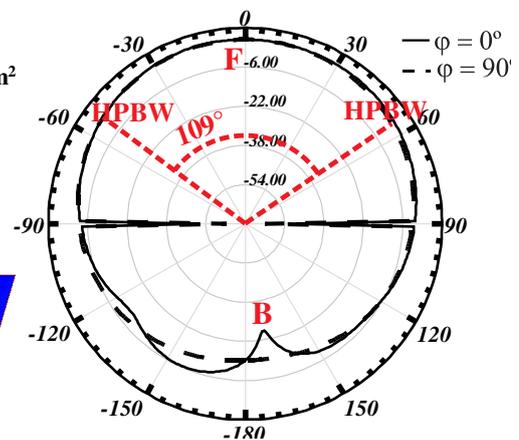
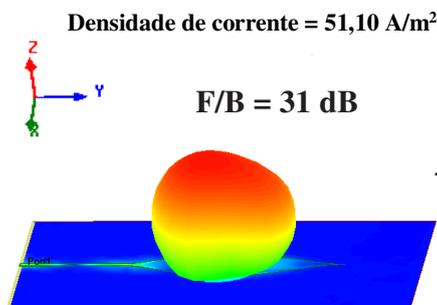
Ganho, dBi



(a)

5,83 GHz

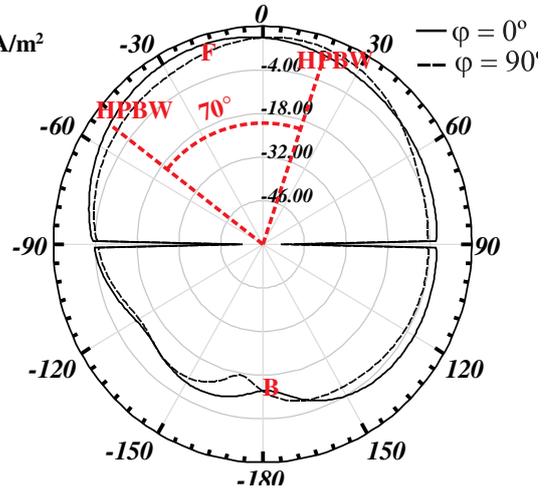
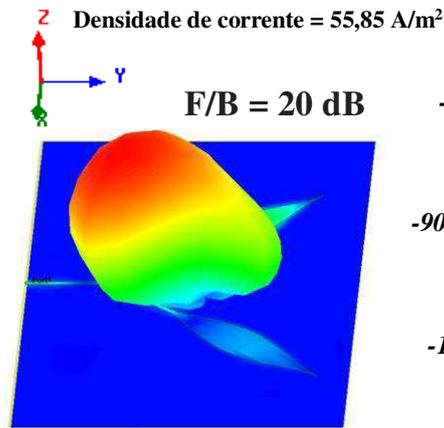
Ganho, dBi



(b)

5,24 GHz

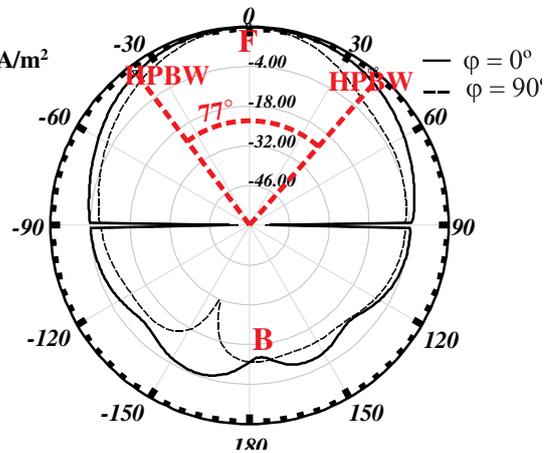
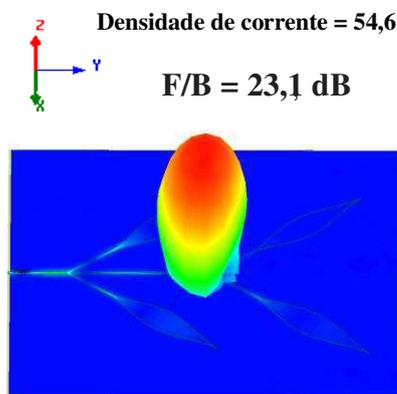
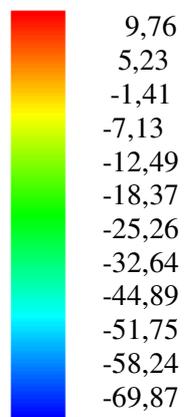
Ganho, dBi



(c)

6,47 GHz

Ganho, dBi



(d)

Figura 3.25 – Diagrama de irradiação 2D e 3D simulado das antenas *patch* flexíveis bioinspiradas na planta de Ingá-da-restinga em poliamida: (a) antena para 5,4 GHz; (b) antena para 5,8 GHz; (c) arranjo com duas folhas; (d) arranjo com quatro folhas.

Foi observado nas antenas e arranjos de antenas *patch* flexíveis bioinspiradas na planta de Ingá-da-restinga em poliamida maior ganho nas frequências de ressonâncias, e aumentando do ganho e da largura de banda de acordo incremento do número de folhas, cobrindo as faixas de frequências de WLAN em 5 GHz, indicando a possibilidade de uso no

desenvolvimento de antenas para monitoramento de pessoas em locais de risco de alta temperatura.

### 3.6. Antenas e arranjo de antenas de abertura bioinspiradas na flor de jasmim para aplicações *on-chip*

As antenas e arranjo de antenas de abertura para aplicações *on-chip* foram projetadas em silício, com espessura de 200  $\mu\text{m}$  e permissividade elétrica,  $\epsilon_r = 11,9$ . Elementos condutores (*patch*, abertura e linha de transmissão) em alumínio, com 10  $\mu\text{m}$  de espessura, para operação na frequência de ressonância de ISM em 60 GHz, com comprimento de onda guiado na frequência central de,  $\lambda_g = 1,97$  mm.

Os valores iniciais da antena foram calculados, pelo comprimento de onda guiado, nas formas circulares do elemento irradiante e da abertura da antena. Sobre as dimensões do elemento irradiante e da abertura com forma circular foi aplicado a forma da flor de jasmim, com 8 pétalas para o elemento irradiante e 4 pétalas para a abertura. A partir dos resultados foram observadas as variações nas respostas em frequência, ganho e nos diagramas de irradiação da antena e do arranjo bioinspirado.

Após a otimização dos resultados da antena bioinspirada na flor de jasmim foi simulado um arranjo de antenas com duas flores. As antenas foram separadas pela distância de um comprimento de onda guiado, medidos a partir do centro dos elementos irradiantes.

Na Figura 3.26 podem ser observadas as antenas simuladas com as indicações das camadas, para a antena circular, Figura 3.26(a), e para a antena bioinspirada na flor de jasmim, Figura 3.26(b).

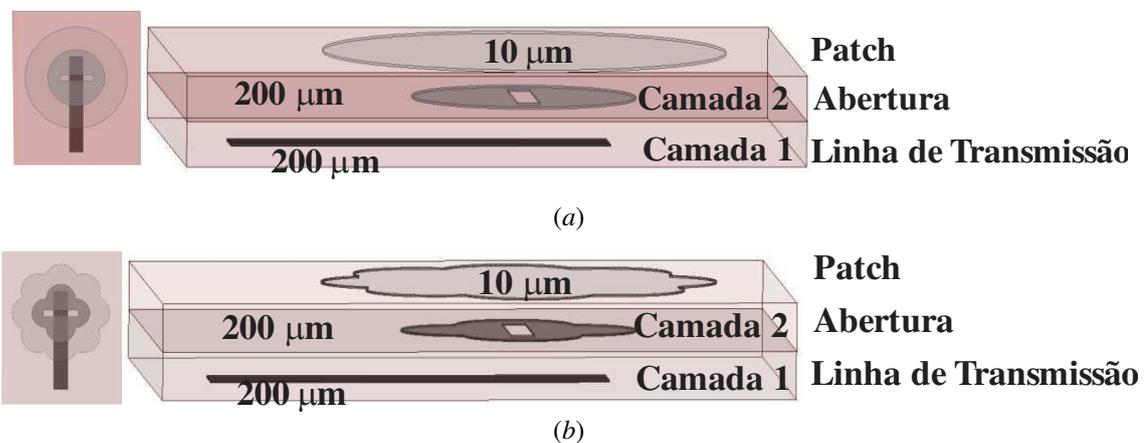
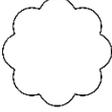
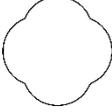


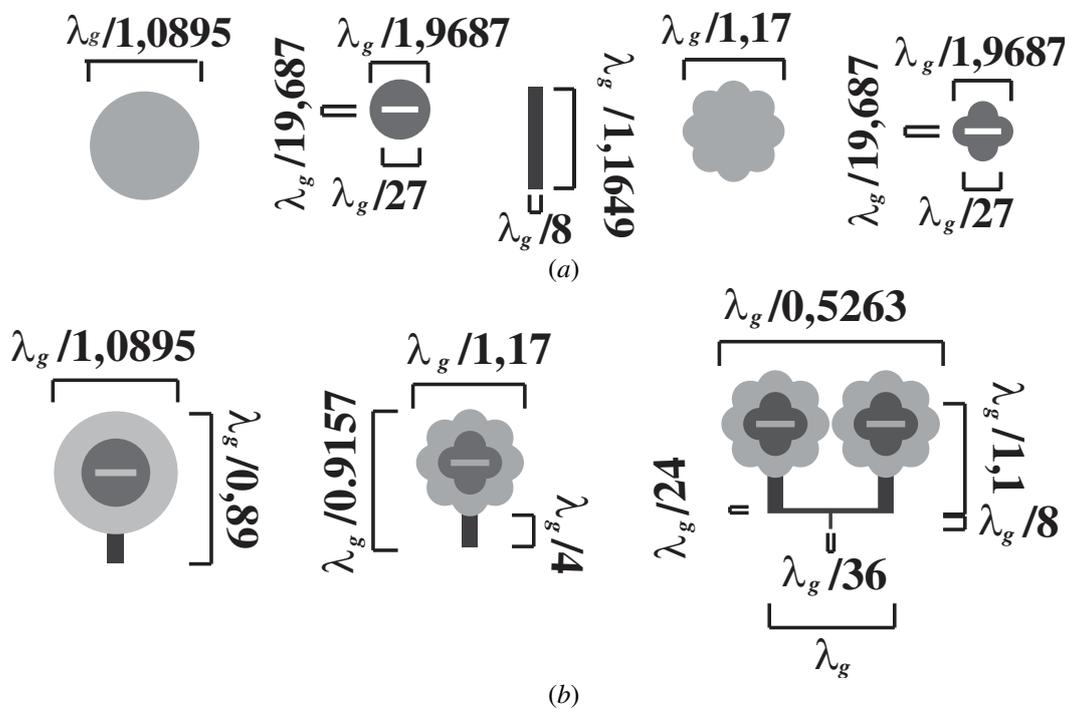
Figura 3.26 – Antenas de abertura *on-chip*: (a) circular; (b) bioinspirada na flor de jasmim.

As formas bioinspiradas foram geradas pela expressão de Gielis com os parâmetros observados na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Parâmetros da expressão de Gielis para geração da flor de jasmim.

<i>m</i>	<i>n</i> <sub>1</sub>	<i>n</i> <sub>2</sub>	<i>n</i> <sub>3</sub>	<i>a</i>	<i>b</i>	Forma
Patch = 8	-60	30	30	1	1	
Abertura = 4						

Na Figura 3.27 são ilustradas as formas e dimensões dos elementos das antenas propostas para aplicação *on-chip*. Como observado o *patch* da antena bioinspirada apresentou redução no raio de 6,67% em comparação com a forma circular (Figura 3.27(a)), com redução no comprimento total de 2,7% (Figura 3.27(b)). A comparação das antenas e do arranjo de antenas em um *chip* de 10 mm podem ser visualizadas na Figura 3.27(c).



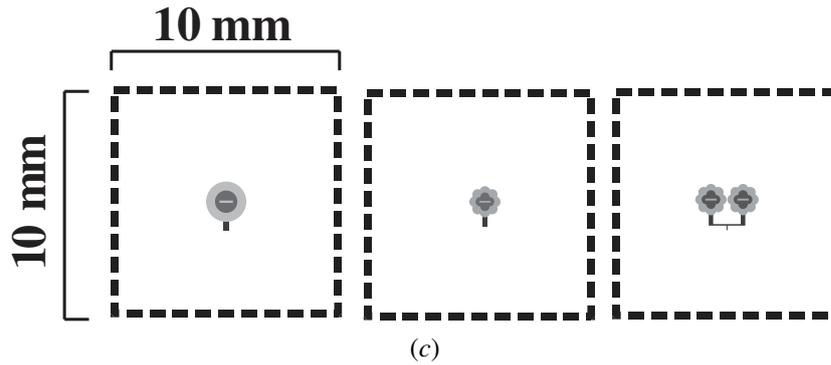


Figura 3.27 – Antenas e arranjo de antenas *on-chip* com dimensões: (a) partes das antenas; (b) dimensões das antenas e do arranjo; (c) antenas e arranjo de antenas em um *chip*.

A simulação do parâmetro  $|S_{11}|$  das antenas de abertura circular, bioinspirada e do arranjo bioinspirado com dois elementos pode ser visualizada na Figura 3.28, e os valores da frequência de ressonância ( $f_0$ ), primeira ( $f_1$ ) e segunda ( $f_2$ ) frequência em -10 dB, largura de banda e perda de retorno na Tabela 3.13. Pela observação dos resultados, pode ser verificado que, a aplicação da forma bioinspirada possibilitou a redução na largura de banda em 22,36%, máxima perda de retorno de -45,55 dB, e frequência de ressonâncias centrais próximas. No arranjo de antenas bioinspirado foi observado o aumento da largura de banda de 48,6%, com diferença na primeira frequência de ressonância de 0,42%.

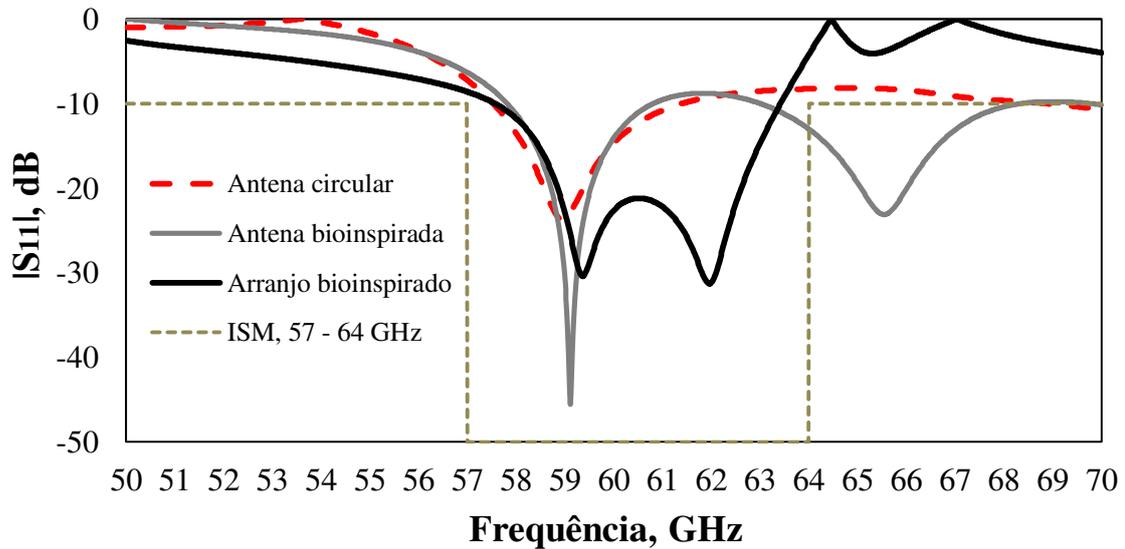


Figura 3.28 – Simulação do parâmetro  $|S_{11}|$  das antenas de abertura *on-chip* com forma circular, bioinspirada e do arranjo bioinspirado.

Tabela 3.13 – Resposta em frequência da simulação das antenas de abertura.

	<i>Antena on-chip</i>	$f_0$ (GHz)	$f_1$ (GHz)	$f_2$ (GHz)	Largura de banda (GHz)	Perda de Retorno(dB)
1	Circular	59,95	57,51	61,40	3,89	23,78
2	Bioinspirada	59,11	57,81	60,83	3,02	45,55
3	Arranjo bioinspirado	59,36 / 61,96	57,55	63,43	5,88	30,40 / 31,29

As curvas de ganho das antenas de abertura *on-chip* com forma circular, bioinspirada e do arranjo bioinspirado na flor de jasmim podem ser visualizadas na Figura 3.29. Como observado, o arranjo de antenas de abertura bioinspirado na flor de jasmim apresentou ganho 3 dBi acima da curva da antena bioinspirada nas faixas das frequências de ressonância, indicando o acoplamento entre os elementos da antena. Assim a aplicação do arranjo de antenas com forma bioinspirada proporcionou a aumento do ganho e da largura de banda, cobrindo a faixa de frequências de ISM em 60 GHz.

Os diagramas 2D e 3D simulados nas frequências de ressonâncias das antenas de abertura *on-chip* com forma circular, bioinspirada e do arranjo de antenas, com a indicação da densidade de corrente e do ganho são apresentados na Figura 3.30. Como observado, na frequência de ressonância central, a densidade de corrente e o ganho da antena bioinspirada é maior que o da antena circular. Foi observado no arranjo de antenas bioinspirada ganho de superior ao da antena bioinspirada com um elemento, com densidade de corrente 54,4% maior, e redução de 42% na largura de feixe de meia potência (HPBW), indicando maior concentração de potência do sinal.

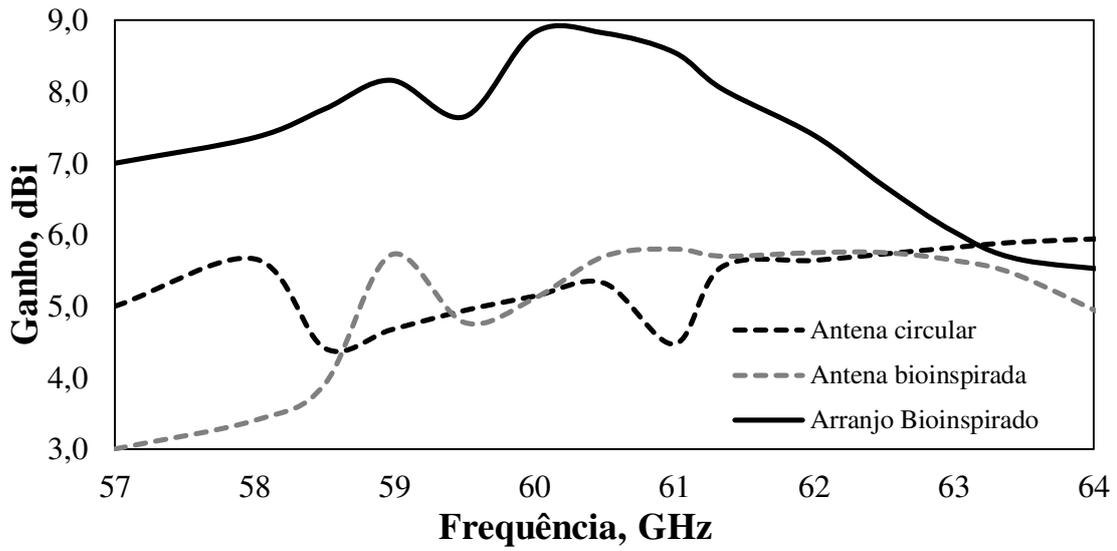
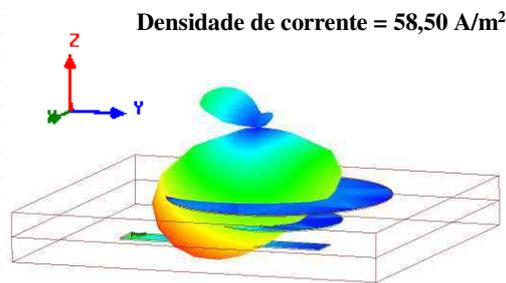
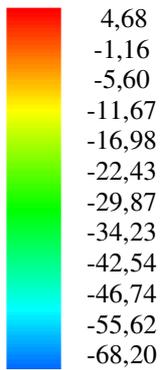


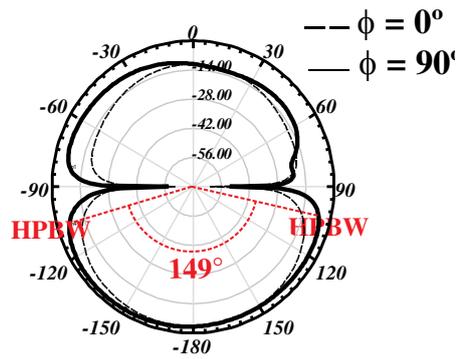
Figura 3.29 – Ganho das antenas de abertura *on-chip*.

### 58,9 GHz

Ganho, dBi

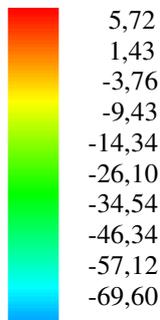


(a)

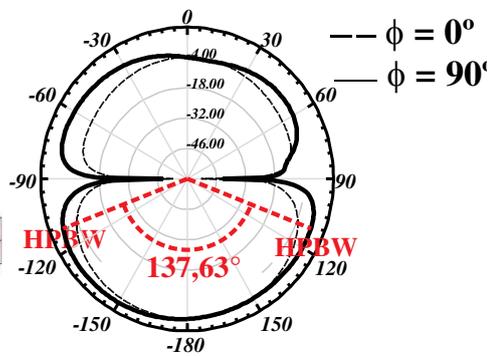


### 59,11 GHz

Ganho, dBi



(b)



## 60 GHz

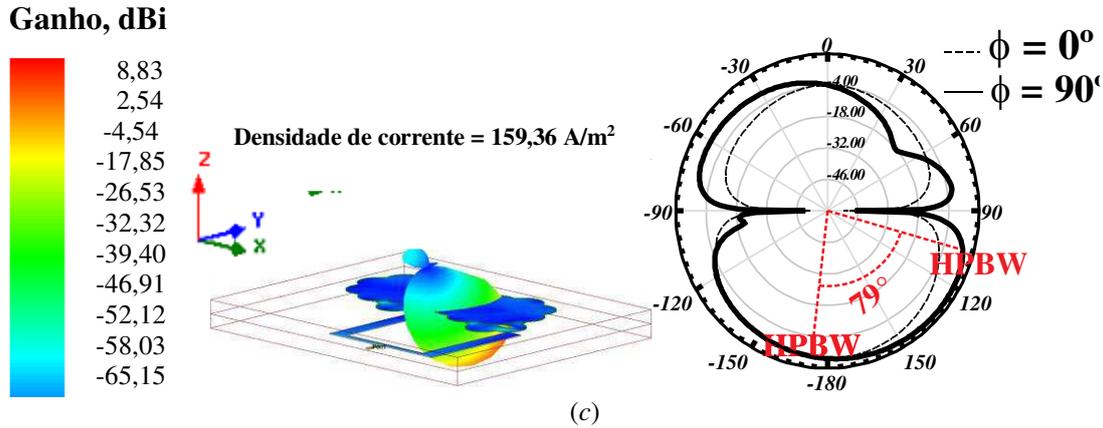


Figura 3.30 – Diagrama de irradiação 3D e 2D das antenas de abertura *on-chip*: (a) circular; (b) bioinspirado; (c) arranjo bioinspirado.

A partir dos resultados das impedâncias sobre a carta de Smith das antenas de abertura *on-chip* com forma circular, bioinspirada e do arranjo bioinspirado nas faixas de frequências de 50 – 70 GHz, Figura 3.31, foi possível identificar o casamento das impedâncias entre a linha de alimentação e os elementos irradiantes ( $50 \Omega$ ), como largura de banda das antenas indicadas pelo  $VSWR \leq 2$ .

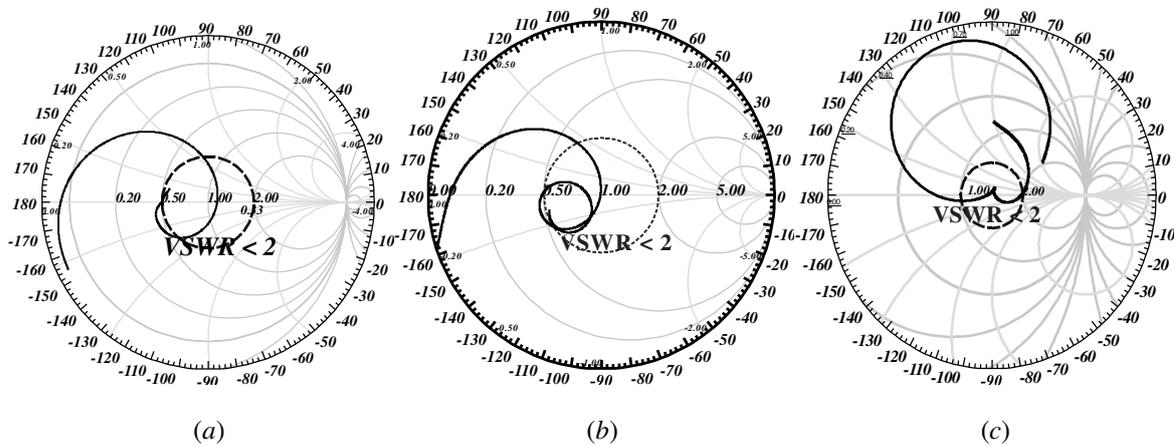


Figura 3.31 – Impedâncias sobre a carta de Smith das antenas de abertura *on-chip*: (a) circular; (b) bioinspirado; (c) arranjo bioinspirado.

Nos resultados obtidos para a simulação da antena e do arranjo de antenas bioinspirado na flor de jasmim, para a banda de ISM em 60 GHz pode-se verificar que: a aplicação da forma bioinspirada sobre a antena circular possibilitou uma estrutura mais compacta, com maior ganho na frequência de ressonância; o arranjo de antenas obteve ganho de 3dBi acima da curva da antena com forma circular e largura de banda cobrindo as faixas de frequências da banda ISM em 60 GHz.

## 4. Conclusões

Neste documento foi apresentado o estudo das formas bioinspiradas em plantas, no desenvolvimento de antenas e arranjo de antenas geradas pela expressão de Gielis, aplicadas em antenas *patch*, monopolos e de abertura em substrato denim, fibra de vidro, poliamida, acetato de celulose e silício para operação nas faixas de frequências de WLAN, telefonia móvel (2G, 3G e 4G) e ISM.

O procedimento metodológico proposto abrange a escolha da tecnologia a ser aplicada, a escolha do tipo de antena, material dielétrico e condutor com a devida caracterização, a escolha das formas bioinspiradas utilizando folhas elípticas geradas pela expressão de Gielis que possuam perímetro com valor próximo ao de antenas com geometrias euclidianas, exportação da imagem para um simulador de onda completa, a construção de protótipos, com a medição e a comparação dos resultados.

O uso das formas bioinspiradas possibilitou o aumento dos perímetros das antenas e, conseqüentemente, o aumento de seus comprimentos elétricos, obtendo antenas mais compactas do que as circulares e quadradas, características semelhantes ao dos fractais, operando nas faixas de frequências projetadas e com diferenças entre as antenas medidas e simuladas inferior a 5%. Pode-se verificar que as antenas bioinspiradas boa concordância entre os resultados medidos e simulados.

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que, com o uso da expressão de Gielis na geração de formas bioinspiradas, podem ser aplicadas em materiais flexíveis e rígidos, em tipos de antenas diferentes, com frequências de operação diversas mesmo com uso de métodos de fabricação diferentes.

Como principais contribuições desta Tese podem ser citadas:

- O uso da expressão de Gielis no desenvolvimento de antenas bioinspiradas em plantas;
- O uso de técnicas de computação assistida por computador (*computer aided designer* - CAD) na geração das imagens das antenas em formato DXF (*Drawing Exchange Format*) a partir de expressões matemáticas para simulação, que possibilitaram a automação do processo e reduções das falhas na reprodução das estruturas;

- O uso das formas das plantas no desenvolvimento de antenas em substratos diversificados (fibra de vidro, acetato de celulose, poliamida e silício);
- O desenvolvimento de uma antena transparente bioinspirada em plantas;
- O desenvolvimento de arranjos de antenas em poliamida, com a possibilidade de monitoramento de pessoas e equipamentos em ambientes com riscos de alta temperatura, bioinspirados em plantas para as faixas de WLAN em 5 GHz;
- O desenvolvimento de antenas têxteis para faixa de operação em telefonia móvel e WLAN; e a simulação de antena *on-chip* para uso na faixa de ISM em 60 GHz.

#### **4.1. Trabalhos Futuros**

São propostos os seguintes trabalhos:

- Investigar a implementação de expressões polares no desenvolvimento de antenas para uso dentro do corpo humano;
- Pesquisar o desenvolvimento de antenas e arranjos de antenas bioinspiradas em plantas para aplicação em 5G;
- Avaliar o uso das formas bioinspiradas em antenas ópticas ou quase-ópticas para aplicação na faixa de THz;
- Aprimorar a metodologia apresentada;
- Analisar possibilidade de uso das formas bioinspiradas no desenvolvimento de filtros, acopladores, superfícies seletivas de frequência e outros dispositivos eletromagnéticos.

## 4.2. Artigos publicados

1. Silva Júnior, P. F., Freire, R. C. S., Serres, A. J. R., Catunda, S. Y., Silva, P. H. F., “Bio-inspired transparent antenna for WLAN application in 5 GHz”. *Microwave and Optical Technology Letters*. vol. 59, pp. 2879–2884, 2017.
2. P. F. Silva Júnior, R. C. S. Freire, A. J. R. Serres, P. H. F. Silva, J. C. Silva, “Wearable Textile Bioinspired Antenna for 2G, 3G and 4G Systems”. *Microwave and Optical Technology Letters*. vol. 58, n. 12, pp. 2018-2023, 2016.
3. P. F. Silva Júnior, P. H. F. Silva, A. J. R. Serres, J. C. Silva e R. C. S. Freire, “Bio-Inspired Design of Directional Leaf-Shaped Printed Monopole Antennas for 4G 700 MHz Band”. *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 58, pp. 1529-1533, 2016.
4. P. F. Silva Júnior, P. H. F. Silva, J. C. Silva, A. F. Santos, M. C. L. M. Frazão, A. J. R. Serres, R. C. S. Freire, “Influence of conductor tube in circular PMA for UWB range”. 2015 SBMO/IEEE MTTT International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015, Porto de Galinhas, pp.1-2, 2015.
5. P. F. Silva Junior, R. C. S. Freire, A. J. R. Serres, T. C. Albuquerque, P. H. F. Silva, M. A. Oliveira and S. Y. C. Catunda, “Dual-Band Frequency Selective Surface with Angular Stability for WLAN Applications”. 2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2017.
6. M. G. Bernardo, R. C. S. Freire, A. K. F. Queiroz, J. I. L. Araújo, S. M. A. Morais, A. J. R. S. and P. F. Silva Júnior, "On-chip aperture-coupled patch antennas for ISM band 60 GHz," 2017 2st International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Fortaleza, Brazil, 2017.
7. M. A. Oliveira, G. Fontgalland, P. F. Silva Jr., R. C. S. Freire, P. H. F. Silva, F. F. Batista, E. P. Andrade, J. N. Carvalho, E. E. C. Oliveira, “Dissimilar Circular Patch Size Antenna Array With Enhanced Bandwidth and Broadside Gain”. 2017 SBMO/IEEE MTTT International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2017, Águas de Lindoia, 2017.
8. M. A. Oliveira, F. F. Batista, E. E. C. Oliveira, P. H. F. Silva, P. F. Silva Júnior, R. C. S. Freire, A. J. R. Serres, “Técnicas de Casamento de Impedâncias por Linha de Microfita em Antenas Patch Circular para Tecnologia ISM em 2,4 GHz”. MOMAG 2016 – 12º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 17º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, LAWOFs 2016 - Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors, Porto Alegre, RS, Jul 2016. Disponível em: [https://www.confTool.com/momag2016/index.php?page=browseSessions&form\\_session=4&presentations=hide](https://www.confTool.com/momag2016/index.php?page=browseSessions&form_session=4&presentations=hide). Acesso: 21 Ago 2016.

9. Silva Júnior, P. F., Freire, R. C. S., Serres, A. J. R., P. H. F. Silva, J. C. Silva, Oliveira, M. A., Oliveira, “Bio-Inspired Jasmine Flower Printed Monopole Antennas for UWB and X-Band Applications”. MOMAG 2016 – 12º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 17º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, LAWOFs 2016 - Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors. Porto Alegre, RS, Jul 2016. Disponível em: [https://www.conftool.com/momag2016/index.php?page=browseSessions&form\\_session=61&presentations=hide](https://www.conftool.com/momag2016/index.php?page=browseSessions&form_session=61&presentations=hide). Acesso: 21 Ago 2016.
10. P. F. da Silva, R. C. S. Freire, A. J. R. Serres, P. H. d. F. Silva and J. C. e Silva, “Bio-inspired antenna for UWB systems,” 2016 1st International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 153-157.

### **4.3. Capítulo de livro publicado**

1. A. J. R. Serres, G. K. F. Serres, P. F. S. Júnior, R. C. S. Freire, J. N. Cruz, T. C. Albuquerque, M. A. Oliveira, P. H. F. Silva, “Bio-inspired Microstrip Antenna”. In: Trends in Research on Microstrip Antennas, InTech, ISBN 978-953-51-5343-6, 2017.

# Referências

- [1] T. Cooklev, *Wireless Communication Standards: A Study of IEEE 802.11, 802.15, and 802.16*, New York: IEEE Press, 2004.
- [2] 3GP, *Technical Specification Group Radio Access Network Requirements 3GP TR 25.913 V9.0.0. Release 9*, 3GP, 2009.
- [3] 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, Brasília, DF, 13 nov., Brasília: ANATEL, 2013.
- [4] A. M. Niknejad, *mm-Waves Silicon Technology 60 GHz and Beyond*, New York: Spring, 2008.
- [5] D. Zhao e P. Reynaert, *CMOS 60-GHz and E-Band Power Amplifiers and Transmitters*, New York: Spring, 2015.
- [6] Y. B. Cohen, *Biomimetrics: Biologically inspired technologies*, Pasadena: Taylor e Francis, 2006.
- [7] F. Dressler e B. A. Ozgur, "A Survey on Bio-inspired Networking," *Computer Networks*, pp. 1-20, 2010.
- [8] A. A. L. Leyestanak, "Ultra Wideband Rose Leaf Microstrip Patch Antenna," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 86, pp. 155-168, 86.
- [9] O. M. H. Ahmed e A. R. Sebak, "A Novel Maple-Leaf Shaped UWB Antenna With a 5.0-6.0 GHz Band-Notch Characteristic," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 11, pp. 39-49, 2009.
- [10] H. O. M. Ahmed e A. R. Sebak, "Numerical and Experimental Investigation of a Novel Ultra Wideband Butterfly Shaped Printed Monopole Antenna with Bandstop Function," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 18, pp. 111-121, 2011.
- [11] M. N. Mahmoud e H. Elkamchouchi, "A Bioinspired Microstrip Antenna Based the Idea of a Cockroach Antenna," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53, nº 1, pp. 135-139, 2010.
- [12] H. Nakano, Y. Ogino e J. Yamauchi, "Bent Four-Leaf Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 223-226, 2011.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3ª ed., vol. I, Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [14] A. S. M. Z. Kausar, A. W. Reza, A. A. Latif e M. H. K. M. E. Ulla, "Optical nano antenas: state of the art, scope and challenges as a biosensor along with human exposure to nano-toxicology," *Sensors*, vol. 15, pp. 8787-8831, 2015.
- [15] C. Tripon-Canselite e J. Chazelas, *Nanoscale Microwave Engineering - Optical Controle of Nanodevices*, Hoboken: Wiley, 2014.
- [16] C. A. Balanis, *Teoria de Antenas: Análise e Síntese*, 3ª ed., vol. I, Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [17] O. Haraz e A.-R. Sebak, "UWB Antennas for Wireless Applications," em *Advancement in Microstrip Antenna with Recent Applications*, A. KishK, Ed., Rijeka, In Tech, 2013, pp. 125-152.
- [18] L. X. BAO e M. J. AMMANA, "Investigation on UWB Printed Monopole Antenna

- with Rectangular Slitted Ground Plane,” *Microwave Optitcal Technology Letters*, vol. 49, pp. 1578-1585, 2007.
- [19] H. R. Khaleel, *Inovation in Wearable and Flexible Antennas*, H. R. Khaleel, Ed., Boston: WIT Press, 2015.
- [20] G. A. Cavalcante, *Desenvolvimento de Circuitos Planares sobre Substrato Têxteis - Tese de Doutorado*, Natal, RN: PPGEE - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- [21] A. Chauaraya, W. G. Whittow, J. C. Vardaxoglou, Yili, R. Torah, K. Yang, S. Beeby e J. Tudor, “Inkjet Printed Dipole Antennas on Textiles for Wearable Communications,” *IET Microwave Antennas Propag.*, vol. 7, pp. 760-767, 2013.
- [22] M. S. Shakhirul, M. S. A. Jusoh, C. M. Nor e H. A. Rahim, “Embroidered Wearable Textile Antenna on Bending and Wet Performances for UWB Reception,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 56, n° 9, pp. 2158-2163, 2014.
- [23] M. Koohestani, N. Pires e A. K. M. A. A. Skrivervik, “Influence of the Human Body on a New Coplanar-fed UltraWideband Antenna,” *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 316-319, 2011.
- [24] M. A. M. El-Bendary, *Developing Security Tools of WSN and WBAN Networks Applications*, Cairo: Springer, 2015.
- [25] C. Hertleer, H. Rogier, L. Vallozzi e L. V. Langenhove, “A Textile Antenna for Off-Body Communication Integrated Into Protective Clothing for Firefighters,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, n° 4, pp. 919-925, 2009.
- [26] G. Monti, L. Corchia e L. Tarricone, “UHF Wearable Rectenna on Textile Materials,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, n° 6, pp. 3869-3873, 2013.
- [27] S. Yan, P. J. Soh e G. A. E. Vandenbosch, “Dual-Band Textile MIMO Antenna Based on Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, n° 11, pp. 4640-4647, 2015.
- [28] T. Milligan, *Modern antenna design*, New Jersey: Wiley, 2015.
- [29] W. L. Stutzman e G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Danvers: 3°, 2013.
- [30] Amitec, “RF e Microwave Antennas,” 2017. [Online]. Disponível em: <http://amitec.co/home/antenna-positioner-transmission-line/rf-microwave-antenna>. [Acesso em 26 Maio 2017].
- [31] J. A. A. Flint, “A Biomimetic Antenna in the Shape of Bat's Ear,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 145-147, Dezembro 2006.
- [32] M. Fakharian, P. Rezaei e A. Azadi, “A Planar UWB Bat-Shaped Monopole Antena with Dual Band-Notched for WiMAXWLAN/DSRC,” *Wireless Pers Commun*, vol. 81, pp. 881-891, 2015.
- [33] N. Behdad, M. A. Al-Joumayly e M. Li, “Biologically Inspire Electrically Small Antenna Arrays with Enhanced Directional Sensitivity,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 361-364, 2011.
- [34] K. Ebnabbasi, “A bio-inspired printed-antenna transmission-range detection systems,” *IEEE Antenna and Propagation Magazine*, vol. 55, n° 3, pp. 193-200, 2013.
- [35] G. H. Huff e S. A. Goldberger, “Biologically-Inspired Vascular Antenna Reconfiguration Mechanism,” *Electronics Letters*, vol. 47, n° 11, pp. 637-638, 2011.
- [36] X.-F. Bai, S.-S. Zhong e X.-L. Liang, “Leaf-Shaped Extremely Wide Bandwidth,”

- Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, nº 7, pp. 1247-1250, 2006.
- [37] M. Ameya, Y. Ito, M. Yamamoto e T. Nojima, "2-Elements UWB array antenna using leaf-shaped bowtie element," *2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1961-1964, 9 June 2007.
- [38] S. Fujita, Y. Manabu e T. Nojima, "A Study of a Leaf-Shaped Bowtie Slot Antenna for UWB Applications," em *Proceedings of ISAP2012*, Nagoya, 2012.
- [39] Y. Manabu, T. Koyanagi e T. Nojima, "Quasi-Millimeter Wave Leaf-Shaped Bowtie Array Antenna Backed by an EBG Substrate," em *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2012.
- [40] A. N. Askarpour, A. Gholipour e R. Faraji-Dana, "A Band-notched tulip antenna for UWB applications," *EuMC 2008. 38th European Microwave Conference*, pp. 881-884, 27 Outubro 2008.
- [41] F. M. Tanyer-Tigrek, D. P. Tran, I. E. Lager e L. P. Ligthart, "Wide-band Tulip-Loop Antenna," *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, pp. 1446-1449, 23 Março 2009.
- [42] Delgado, J. A. Viveros e C. A. V. Mera, "A Bio-Inspired Patch Antenna Array Using Fibonacci Sequences in Trees," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, nº 5, pp. 192-201, 2013.
- [43] A. P. Singh, "A Leaf Shaped Microstrip Patch Antenna," *Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, vol. 2, nº 4, pp. 807-809, 2013.
- [44] N. A. Lemos, A. N. Silva, H. F. Paiva e P. H. F. Silva, "Four-Leaf Clover Uwb Planar Monopole Antenna," *MOMAG 2014: 16 SBMO. Brazil, 1 CD*, 740-744 Agosto 2014.
- [45] S. R. Patre e S. P. Singh, "MIMO Antenna Using Castor Leaf-Shaped Quasi-Self-Complementary Elements for Broadband Applications," em *IEEE International Microwave and RF Conference (IMaRC)*, India, 2015.
- [46] L. Taiz e E. Zeiger, *Fisiologia Vegetal*, 3ª ed., Porto Alegre: Artmed, 2006.
- [47] H. Pakrasi, "Natural Antenna: Structure & Efficiency," 2014. [Online]. Disponível em: <http://parc.wustl.edu/research/themes/natural>. [Acesso em 12 03 2016].
- [48] R. O. A. Cruz, *Licenciatura em Biologia - Botânica Geral e Comparada II*, 1ª ed., Salvador: Faculdade de Tecnologia e Ciência - Ensino a Distância, 2014.
- [49] N. Majerowics, *Fisiologia Vegetal*, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.
- [50] C. B. D. Rojas, L. A. Cardoso, L. H. Chaves, M. Lapp, H. Rodrigues, T. Ruiz e P. Torrecilla, *Botânica Sistemática: Fundamentos para Su Estudio*, Maracay: Universidad Central de Venezuela, 2006.
- [51] S. Macculough e K. C. Rupert, *Botany Handbook for Florida*, Gainesville: IFAS, 1989.
- [52] J. Gielis, "A Generic Geometric Transformation that Unifies a Wide Range of Natural and Abstract Shapes," *American Journal of Botany*, vol. 3, nº 90, pp. 333-338, 2003.
- [53] H. Kassem e F. L. G. Vigneras, *Characterization Techniques for Materials Properties Measurement, Microwave Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antenna and Applications*, InTech, 2010.
- [54] F. F. Gonçalves, C. d. C. Macedo e L. A. A. P. Pasin, "Caracterização Morfológica da *Bidens Pilosa*," *Revista Científica da FEPI*, vol. 6, nº 1, pp. 1-3, 2015.

- [55] S. M. Wentworth, *Eletromagnetismo aplicado: abordagem antecipada das linhas de microfita*, São Paulo: Wiley, 2007.
- [56] Getty, “Ginkgo Biloba,” Saude iG, 2012. [Online]. Disponível em: <http://saude.ig.com.br/bemestar/guiaplantasmedicinais/ginkgo-biloba/ref1237835994021.html>. [Acesso em 19 05 2017].
- [57] A. Costa, “Palma (Opuntia ficus-indica),” 18 Março 2011. [Online]. Disponível em: <https://belezadacaatinga.blogspot.com.br/2011/03/palma-opuntia-ficus-indica.html>. [Acesso em 03 Fevereiro 2017].
- [58] J. Marcelo, “Santa Floricultura,” 03 04 2016. [Online]. Disponível em: <https://www.floriculturasantana.com.br/index.php?route=pavblog/blog&id=18>. [Acesso em 05 Janeiro 2017].
- [59] D. P. AC, “Flexible Circuit Material - Technical Information,” 2016. [Online]. Disponível em: [http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/flexible-rigid-flex-circuit-materials/documents/PyraluxACClad\\_DataSheet.pdf](http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/flexible-rigid-flex-circuit-materials/documents/PyraluxACClad_DataSheet.pdf). [Acesso em 04 Janeiro 2017].
- [60] F. C. P. Garcia e J. M. Fernandes, “Inga,” In: *Listas de Espécies da Flora do Brasil*, Rio de Janeiro, Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Janeiro 2012. [Online]. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. [Acesso em 10 Dezembro 2016].