



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANTENAS BIOINSPIRADAS EM PLANTAS PARA  
RECUPERAÇÃO DE ENERGIA  
ELETROMAGNÉTICA DO AMBIENTE

*Túlio Chaves de Albuquerque*

Campina Grande - PB

20 de outubro de 2016



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

## ANTENAS BIOINSPIRADAS EM PLANTAS PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA DO AMBIENTE

Túlio Chaves de Albuquerque

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Prof. Raimundo Carlos Silvério Freire, D.Sc  
Orientador

Campina Grande – PB  
Outubro - 2016

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

A345c      Albuquerque, Túlio Chaves de.  
Antenas bioinspiradas em plantas para recuperação de energia eletromagnética do ambiente / Túlio Chaves de Albuquerque. – Campina Grande, 2016.  
65 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire.

Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Antenas Bioinspiradas. 3. Medição de Potência Eletromagnética. 4. Recuperação de Energia. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande (PB). III. Título.

CDU 621.3(043)

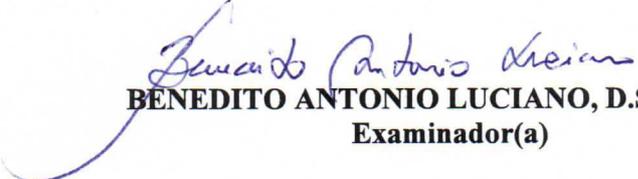
**"ANTENAS BIOINSPIRADAS EM PLANTAS PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA  
ELETROMAGNÉTICA DO AMBIENTE"**

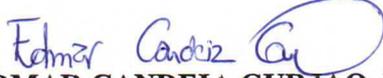
**TÚLIO CHAVES DE ALBUQUERQUE**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/10/2016**

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

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

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

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

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Dedico este trabalho a meus amigos e família, por todo o apoio e compreensão durante esta  
jornada.*

Anything's possible if you've got  
enough nerve.

---

J. K. Rowling

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus orientadores Raimundo Freire e Alexandre Serres, pela paciência, disponibilidade, atenção e tempo dedicados a discussões, sugestões e acompanhamento deste trabalho.

Ao professor Freire, agradeço por todo o apoio e pelas inúmeras oportunidades a mim oferecidas desde quando o conheci em 2011. Sou grato também por sua participação em me tornar uma pessoa melhor e um profissional melhor.

Ao professor Alexandre Serres, agradeço enormemente por ter me orientado efetivamente, mesmo não podendo ter seu nome citado oficialmente como orientador de minha dissertação, por questões meramente administrativas.

Agradeço imensamente à banca examinadora, composta pelos professores Benedito Luciano e Edmar Gurjão, pelas valiosas e pertinentes sugestões: tanto na proposta quanto na dissertação, que além de melhorar a qualidade do texto, engrandeceram a qualidade do trabalho.

Sou imensamente grato à minha namorada Thaís, pelo apoio em todas as etapas deste trabalho – desde a escolha do tema até a escrita e correção da dissertação - e por acreditar incondicionalmente no meu potencial.

Sou imensamente grato aos meus melhores amigos Thaís, Arthur e Cybelle, por poder sempre compartilhar os bons e os maus momentos, além das inúmeras noites viradas no LIMC com as sugestões e correções de cada etapa deste trabalho.

Agradeço aos colegas do LIMC: Bruno Arruda e Newton Sávio pela ajuda prestada na fabricação das antenas, mesmo nos finais de semana e nas primeiras horas das manhãs.

Agradeço a Arthur Souza, Larissa Lima, Alison Candido, Camila Caroline, Carolina Cavalcanti e Weverton Medeiros pela ajuda e colaboração durante as medições de potência do ambiente.

Sou grato também à CAPES pela bolsa de mestrado que a mim foi ofertada para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também ao recurso humano empregado para o bom andamento do Programa da Pós Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, que inclui Ângela, Pedro, Felipe e Edson Guedes, que sempre me guiaram na resolução das questões administrativas e burocráticas do programa.

## Resumo

A fim de alimentar sistemas de baixo consumo, uma alternativa às baterias convencionais é a recuperação de energia, que consiste em converter formas de energia já existentes na natureza em energia elétrica. Este trabalho visa a implementação de antenas para sistemas rectena, que recuperam energia eletromagnética na forma de ondas e a convertem em tensão CC. Para tal, foram estudadas geometrias de antenas bioinspiradas obtidas por meio da superfórmula de Gielis, que permite descrever contornos naturais. Além disso, foram feitas medições de potência eletromagnética no ambiente para a faixa de 1 a 4 GHz em ambientes internos e externos para identificar as faixas de frequência que concentram as maiores parcelas de potência. A partir dos máximos valores medidos, foram propostas três antenas bioinspiradas para serem usadas em sistemas rectenas: flor de framboesa, tulipa e flor anêmona. As topologias foram simuladas no software HFSS e testadas com analisador vetorial de rede. Em seguida, testes foram feitos com analisador de espectro para cada antena, a fim de verificar o correto funcionamento delas como elementos recuperadores de energia. A adequabilidade das antenas propostas para tais sistemas é confirmada pelos resultados experimentais.

**Palavras-chave:** antenas bioinspiradas, medição de potência eletromagnética, recuperação de energia.

## Abstract

In order to power low-consumption systems, an alternative to conventional batteries is energy harvesting, which consists in converting energy forms that already exist in nature in electric energy. This work aims at the implementation of antennas for rectenna systems, which harvest electromagnetic energy from waves and convert them in DC voltage. In order to do so, bio-inspired shapes for antennas were studied using Gielis' superformula, which allows the mathematical description of natural contours. Furthermore, electromagnetic power in the environment was measured for the frequency band between 1 and 4 GHz in indoor and outdoor environments in order to identify the frequency bands that concentrate the biggest amount of energy. From the maximum measured values, three bio-inspired antennas were proposed to be used in rectennas: raspberry flower, tulip and anemone flower. The topologies were simulated in HFSS software and tested with vector network analyzer. Then, for each proposed antenna, tests were performed with spectrum analyzer, in order to verify their good operation when used as power harvesting element. Experimental results confirm their suitability for such systems.

**Keywords:** bio-inspired antennas, electromagnetic power measurements, energy harvesting.

# Sumário

## Lista de Tabelas

## Lista de Figuras

<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.1.1 Objetivo geral . . . . .	3
1.1.2 Objetivos específicos . . . . .	3
1.2 Principais contribuições . . . . .	3
<b>2 Fundamentação teórica</b>	<b>4</b>
2.1 Generalidades sobre antenas . . . . .	4
2.1.1 Antena isotrópica . . . . .	4
2.1.2 Zonas de irradiação . . . . .	5
2.1.3 Diagrama de irradiação . . . . .	6
2.1.4 Diretividade . . . . .	7
2.1.5 Largura de banda . . . . .	8
2.1.6 Polarização da antena . . . . .	8
2.1.7 Equação de Friis . . . . .	9
2.2 Antenas planares . . . . .	10
2.2.1 Antenas planares impressas . . . . .	10

<b>3 Revisão bibliográfica</b>	<b>11</b>
3.1 Rectenas . . . . .	11
3.2 Estado da arte . . . . .	13
3.2.1 Tipo de antena . . . . .	13
3.2.2 Frequência . . . . .	14
3.2.3 Distorção harmônica . . . . .	15
3.2.4 Polarização . . . . .	16
3.2.5 Diagrama de irradiação . . . . .	16
3.2.6 Alimentação das antenas . . . . .	16
3.3 Antenas bioinspiradas em plantas . . . . .	16
<b>4 Materiais e métodos</b>	<b>19</b>
4.1 Medições de potência eletromagnética do ambiente . . . . .	19
4.2 Contornos bioinspirados . . . . .	22
4.3 Antenas bioinspiradas . . . . .	25
<b>5 Resultados</b>	<b>26</b>
5.1 Medições de potência eletromagnética do ambiente . . . . .	26
5.2 Contornos bioinspirados . . . . .	28
5.3 Antenas bioinspiradas . . . . .	39
5.3.1 Antena bioinspirada na flor de framboesa . . . . .	40
5.3.2 Antena bioinspirada na flor de tulipa . . . . .	43
5.3.3 Antena bioinspirada na flor anêmona . . . . .	47
5.3.4 Teste em sistema rectena . . . . .	51
<b>6 Considerações finais</b>	<b>53</b>
6.1 Trabalhos futuros . . . . .	55
<b>Referências</b>	<b>56</b>

# Lista de Tabelas

1	Comparativo das frequências de operação das antenas encontradas na pesquisa bibliográfica. . . . .	15
2	Comparativo das características gerais das principais antenas bioinspiradas encontradas na pesquisa bibliográfica. . . . .	18
3	Formas geométricas bioinspiradas implementadas com a superfórmula de Gielis.	23
4	Formas geométricas bioinspiradas implementadas com a superfórmula de Gielis (continuação). . . . .	24
5	Formas bioinspiradas em plantas, implementadas por meio da superfórmula.	29
6	Formas bioinspiradas em plantas, implementadas por meio da superfórmula (continuação). . . . .	30
7	Formas bioinspiradas em plantas, implementadas por meio da superfórmula (continuação). . . . .	31
8	Formas bioinspiradas em plantas, implementadas por meio da superfórmula (continuação). . . . .	32
9	Variação de parâmetros para o contorno de tulipa. . . . .	33
10	Variação de parâmetros para o contorno de tulipa (vista lateral). . . . .	33
11	Variação de parâmetros para o contorno da flor de anêmona. . . . .	34
12	Variação de parâmetros para o contorno da flor de framboesa. . . . .	34
13	Variação de parâmetros para o contorno de ciriguela. . . . .	35
14	Variação de parâmetros para o contorno da folha de vitória régia. . . . .	35

15	Varição de parâmetros para o contorno de girassol. . . . .	36
16	Varição de parâmetros para o contorno de acero canadense ( <i>maple leaf</i> ). . .	36
17	Varição de parâmetros para o contorno do trevo de 4 folhas. . . . .	37
18	Varição de parâmetros para o contorno da pétala de rosa. . . . .	37
19	Varição de parâmetros para o contorno da palmeira azul. . . . .	38
20	Varição de parâmetros para o contorno da palma. . . . .	38
21	Varição de parâmetros para o contorno de folha. . . . .	39
22	Contornos geométricos obtidos por meio da superfórmula que serviram de inspiração para concepção das antenas deste trabalho. . . . .	40

# Lista de Figuras

1	Sistema de coordenadas esféricas adotado para representar irradiação de antenas. $\theta$ é o ângulo polar e $\varphi$ é denominado ângulo azimutal. . . . .	5
2	Zonas de irradiação de uma antena. . . . .	6
3	Exemplos de diagramas de irradiação de antenas (a) isotrópica; (b) omnidirecional; (c) diretiva. . . . .	7
4	Projeção do campo elétrico no plano perpendicular à direção de propagação. . . . .	9
5	Diagrama de blocos de um sistema rectena. . . . .	12
6	Irradiação em uma antena impressa do tipo microfita. . . . .	14
7	(a) Antena HyperLOG® 30100X, da Aaronia; (b) Respectivo diagrama de irradiação. . . . .	20
8	Perdas de retorno medidas da antena HyperLOG® 30100X, da Aaronia. . . . .	20
9	Medições da potência do ambiente. (a) Medição <i>indoor</i> . (b) Medição <i>outdoor</i> . . . . .	21
10	Gráfico da média da potência eletromagnética do ambiente medida com a antena HyperLOG® 30100X, da Aaronia. . . . .	27
11	Antena fabricada bioinspirada na flor de framboesa. Largura 92 mm; comprimento: 127 mm. . . . .	41
12	Perdas de retorno para a antena bioinspirada na flor de framboesa. . . . .	41
13	Análise espectral para a antena bioinspirada na flor de framboesa. . . . .	42
14	Diagrama de irradiação da antena bioinspirada na flor de framboesa. (a) 2,14 GHz; (b) 1,79 GHz. . . . .	43

15	Antena fabricada bioinspirada na flor de tulipa. Largura 60 mm; comprimento: 55 mm. . . . .	44
16	Perdas de retorno para a antena bioinspirada na flor de tulipa. . . . .	45
17	Análise espectral para a antena bioinspirada na flor de tulipa. . . . .	46
18	Diagrama de irradiação da antena bioinspirada na flor de tulipa. (a) 1,8 GHz; (b) 2,14 GHz; (c) 2,45 GHz. . . . .	47
19	Antena fabricada bioinspirada na flor anêmona. Largura 66 mm; comprimento: 94 mm. . . . .	48
20	Perdas de retorno para a antena bioinspirada na flor de anêmona. . . . .	48
21	Análise espectral para a antena bioinspirada na flor de anêmona. . . . .	49
22	Diagrama de irradiação da antena bioinspirada na flor de anêmona. (a) 1,81 GHz; (b) 1,87 GHz; (c) 2,14 GHz, (d) 2,45 GHz. . . . .	50
23	Teste do sistema rectena com antenas bioinspiradas. . . . .	52

# 1 Introdução

Diversas fontes de energia estão disponíveis no ambiente nas formas luminosa, térmica, eólica, mecânica e eletromagnética. A recuperação ou colheita de energia (do inglês, *energy harvesting*) tem sido amplamente estudada no intuito de converter essa energia disponível no ambiente em energia elétrica, para alimentar sistemas diversos [1].

As principais vantagens do uso de sistemas capazes de recuperar energia do ambiente são o aumento da eficiência energética e a redução do custo, do espaço utilizado e da poluição, com a eliminação de baterias, por exemplo. Além disso, não é necessário pagar pela energia utilizada, visto que ela já se encontra no ambiente [2].

Existem diversas maneiras de recuperar energia, dependendo do sistema utilizado e principalmente da fonte primária de energia. As formas mais usuais são a energia oriunda de vibrações (uso de sistemas piezoelétricos) [3, 4], a energia magnética [5, 6], a luminosa [7, 8], a térmica [9, 10], a eólica [11, 12] e a eletromagnética [1, 13–17].

No contexto de recuperação de energia, existem desafios importantes e específicos a serem superados, de acordo com a forma de energia que se deseja recuperar. No caso do uso da energia eletromagnética, por exemplo, quando são utilizadas bobinas, verifica-se a necessidade de garantir o acoplamento magnético sem prejudicar o funcionamento do sistema já existente. Já quando se trabalha com componentes de radiofrequência, deve-se observar o casamento de impedância entre os dispositivos.

Apesar de existirem diversas formas de energia disponíveis na natureza, a energia elétrica obtida a partir da conversão delas é da ordem de mW, nos casos mais eficientes. Por isso, ainda não é possível o acionamento de motores para realizar movimentos mecânicos

usando a recuperação de energia como fonte de energia, por exemplo [2].

Devido a essa limitação, as principais aplicações dos sistemas recuperadores de energia são a alimentação de redes de sensores sem fio (RSSF) [18, 19], de dispositivos biomédicos implantáveis (sensores de monitoramento biológico e próteses eletrônicas) e de veículos autônomos, além de também possibilitarem a recarga ou o aumento da autonomia de baterias [1, 20].

No caso de redes de sensores sem fio (RSSF), por exemplo, quando um nó é implantado em um local remoto, tomadas e baterias podem ser não confiáveis ou simplesmente serem inviáveis. Neste caso, recuperadores de energia podem fornecer a potência necessária para o funcionamento desses sistemas.

Nos casos em que a energia recuperada é menor do que o necessário, a recuperação de energia pode ser utilizada como fonte de energia suplementar à fonte primária, podendo aumentar a vida útil e a autonomia de baterias e pilhas, reduzindo os resíduos ambientais e custos de manutenção.

Vários trabalhos têm sido feitos visando especificamente a recuperação de energia do ambiente a partir de energia de micro-ondas [13, 15, 21–24]. Neste caso, aproveita-se a energia proveniente de estações de transmissão de rádio, de sinais para dispositivos móveis, entre outros [2]. Além da otimização dos coletores de energia, outras pesquisas foram feitas para o melhoramento dos circuitos que fazem o processamento subsequente da energia [19].

Em paralelo aos estudos sobre recuperação de energia eletromagnética de micro-ondas, alguns trabalhos envolvem o desenvolvimento de dispositivos bioinspirados [25–27], notadamente, antenas bioinspiradas em plantas. Contudo, até então, essas antenas foram desenvolvidas para as aplicações clássicas de comunicações.

Neste trabalho, propõe-se a concepção de antenas impressas bioinspiradas em plantas para aplicações em recuperação de energia de micro-ondas do ambiente.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de antenas bioinspiradas para aplicações de recuperação de energia eletromagnética do ambiente.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar as faixas de frequência com maior potência eletromagnética do ambiente;
- Comparar as características e o desempenho das diversas topologias de antenas bioinspiradas propostas no estado da arte;
- Propor contornos bioinspirados em plantas baseado na superfórmula de Gielis;
- Projetar, fabricar e caracterizar outros tipos de antenas bioinspiradas para sistemas de recuperação de energia.

## 1.2 Principais contribuições

As principais contribuições deste trabalho são a aplicação da superfórmula de Gielis, com propostas de contornos bioinspirados; o estudo das especificações que devem ser atendidas para o projeto de uma antena bioinspirada em sistemas rectena; a comparação do desempenho de diferentes tipos de antena bioinspirada para a aplicações em sistemas de recuperação de energia eletromagnética do ambiente.

## 2 Fundamentação teórica

Neste capítulo é apresentado um resumo sobre a teoria de antenas que fundamenta o trabalho ao qual esta dissertação se refere.

### 2.1 Generalidades sobre antenas

Segundo as definições padrões de termos para antenas do IEEE [28], antena é "a parte de um sistema de transmissão ou de recepção que é projetada para irradiar ou para receber ondas eletromagnéticas". Assim, a principal função das antenas é a transmissão ou a recepção de energia em determinadas direções [29].

#### 2.1.1 Antena isotrópica

Antenas isotrópicas são fontes pontuais hipotéticas e sem perdas que irradiam de maneira uniforme em todas as direções. Esse é um conceito puramente teórico, visto que tal dispositivo é impossível de ser implementado fisicamente [30]. Apesar disso, o estudo de antenas isotrópicas é muito importante, porque elas são frequentemente usadas como fonte de referência no estudo de outras antenas.

A potência irradiada por uma antena isotrópica por unidade de área é dada, em coordenadas esféricas (Figura 1), por

$$P_i(r) = \frac{P_a}{4\pi r^2} (W/m^2), \quad (1)$$

em que

$P_i$  é a potência irradiada por unidade de área;

$P_a$  é a potência que alimenta a antena isotrópica;

$r$  é a distância da antena até o ponto escolhido;

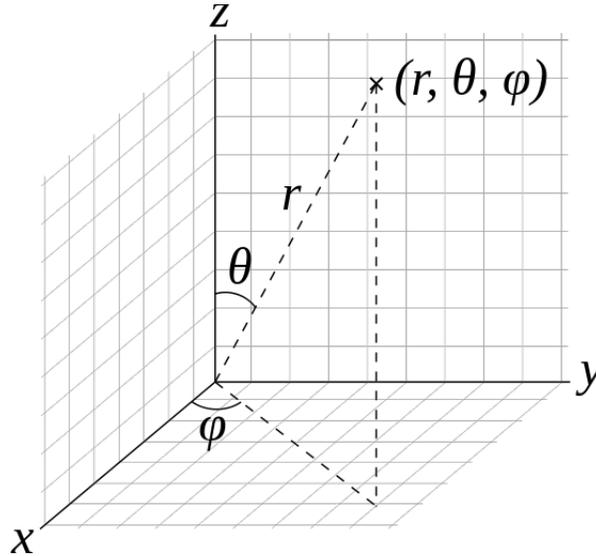


Figura 1: Sistema de coordenadas esféricas adotado para representar irradiação de antenas.

$\theta$  é o ângulo polar e  $\varphi$  é denominado ângulo azimutal.

**Fonte:** Elaboração própria.

### 2.1.2 Zonas de irradiação

No que concerne à irradiação de uma antena, nota-se a distinção de três diferentes zonas no espaço, com características distintas nos campos, conforme mostrado na Figura 2 [30].

A primeira zona é chamada de zona de campo próximo reativo ou zona de Rayleigh e é caracterizada por um campo predominantemente reativo cuja densidade de potência é praticamente constante. Essa região é limitada pela superfície da antena e por uma distância  $R < 0,62\sqrt{d^3/\lambda}$ , em que  $d$  é a maior dimensão da antena e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

A segunda zona, chamada de zona de campo próximo irradiante ou de Fresnel, fica localizada a uma distância  $R$ , tal que  $0,62\sqrt{d^3/\lambda} < R < 2d^2/\lambda$ . Essa região é caracterizada

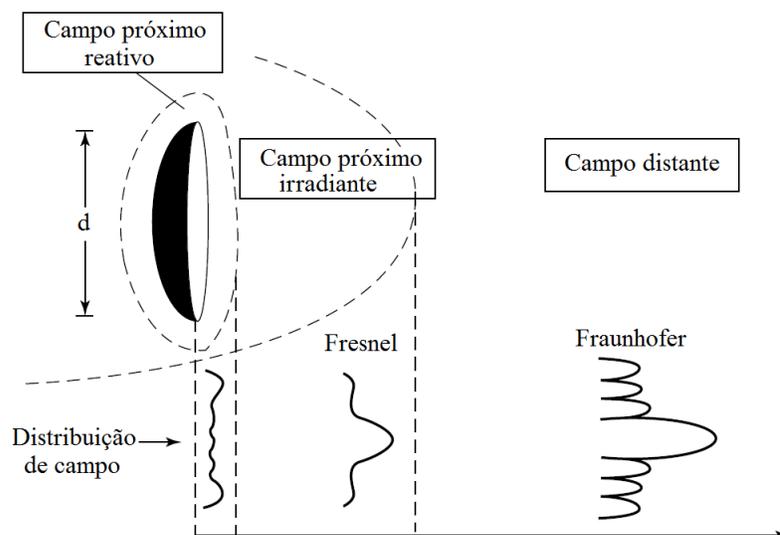


Figura 2: Zonas de irradiação de uma antena.

**Fonte:** Adaptado de [30].

por campos predominantemente irradiantes cuja distribuição angular depende da distância da antena [30]. Além disso, nessa zona, a densidade de potência aumenta com a distância [29].

A terceira região é caracterizada por uma densidade de potência inversamente proporcional ao quadrado da distância da antena, apesar do diagrama de irradiação (forma) não variar com a distância. Essa zona, localizada depois da distância  $R > 2d^2/\lambda$ , é chamada zona de Fraunhofer ou zona de campo distante.

No contexto de recuperação de energia, normalmente as antenas recuperadoras estão localizadas a uma distância muito grande da fonte emissora. Por isso, os estudos deste trabalho se concentram na região de campo distante.

### 2.1.3 Diagrama de irradiação

O diagrama de irradiação de uma antena ou de uma rede de antenas é definido como a distribuição espacial da potência irradiada por uma antena [28]. Ele pode ser diretivo, quando irradia/recebe mais efetivamente em uma direção em detrimento das outras [31, 32], ou omnidirecional, quando, em um determinado plano, não há uma direção privilegiada para a potência irradiada/recebida [30]. Exemplos de diagramas de irradiação isotrópico,

omnidirecional e diretivo estão expostos na Figura 3.

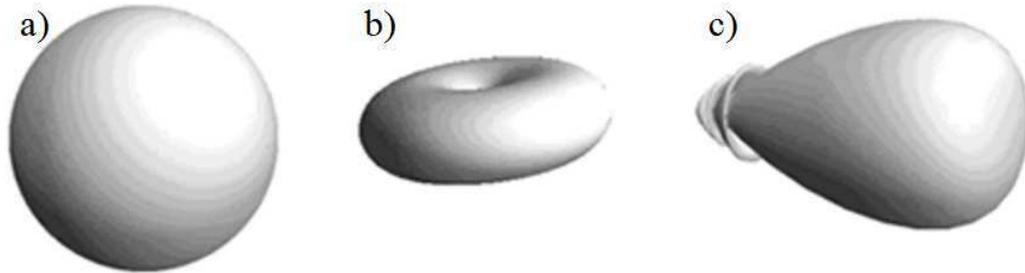


Figura 3: Exemplos de diagramas de irradiação de antenas (a) isotrópica; (b) omnidirecional; (c) diretiva.

**Fonte:** Adaptado de "<http://serviciosinalambricos.com/como-elegir-una-antena>", acesso em 20 de junho de 2016.

No caso de sistemas para recuperação de energia eletromagnética do ambiente, antenas omnidirecionais são as mais indicadas para serem usadas, já que não se sabe exatamente de qual direção a potência RF chega na antena.

#### 2.1.4 Diretividade

A diretividade  $D$  de uma antena em uma determinada direção é definida como a relação entre a densidade de potência irradiada  $P_i$  por ela e a potência irradiada por uma antena isotrópica  $P_{i-isotrope}$  [28]:

$$D(r, \varphi, \theta) = \frac{P_i(r, \varphi, \theta)}{P_{i-isotrope}/4\pi}. \quad (2)$$

Em outras palavras, é a relação entre a intensidade da irradiação em uma determinada direção pela média da intensidade de irradiação em todas as direções, sendo esta última igual à potência total irradiada pela antena dividido por  $4\pi$ .

### 2.1.5 Largura de banda

Apesar de a largura de banda ser um parâmetro que pode ser definido a partir diversos outros parâmetros da antena (ganho, polarização, adaptação), neste trabalho será considerada a faixa de frequências para a qual o coeficiente de reflexão  $S_{11}$  (ver Expressão 3) é inferior a -10 dB, conforme alguns dos trabalhos relevantes sobre o tema [13, 16, 29].

$$S_{11} = \frac{z_a - z_s}{z_a + z_s}, \quad (3)$$

sendo:

$z_a$  a impedância da antena;

$z_s$  a impedância da fonte.

### 2.1.6 Polarização da antena

A polarização de uma antena em uma determinada direção é definida como a polarização da onda transmitida por essa antena [30]. Em outras palavras, a polarização da antena é caracterizada pela projeção do campo elétrico (ou magnético) no plano perpendicular à direção de propagação [29], conforme ilustrado na Figura 4.

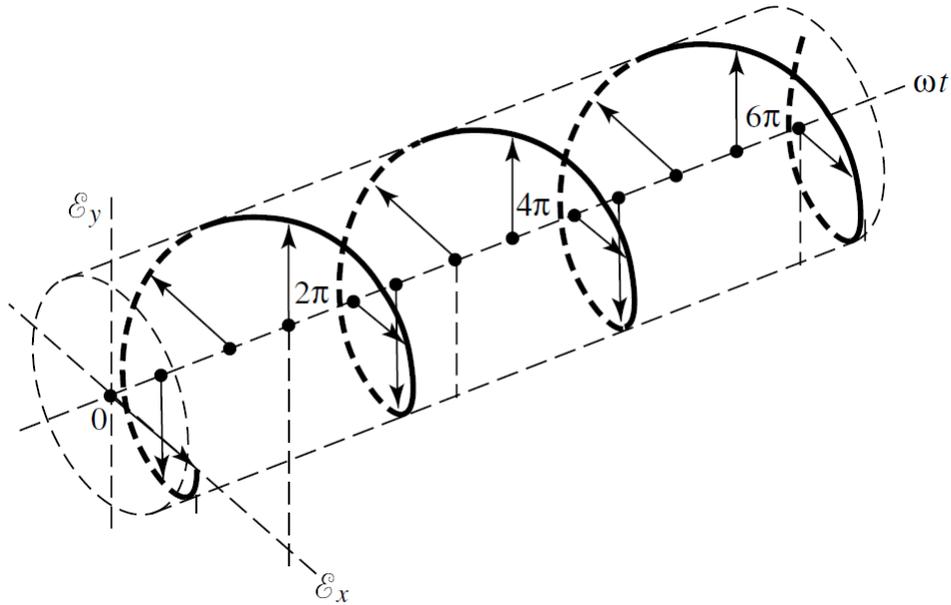


Figura 4: Projeção do campo elétrico no plano perpendicular à direção de propagação.

**Fonte:** Adaptado de [30].

Desta forma, existem três tipos de polarização: linear (orientação constante do campo em relação a um referencial), elíptica (orientação variável no tempo, descrevendo uma elipse) e circular (caso particular da polarização elíptica) [29].

### 2.1.7 Equação de Friis

A equação de Friis relaciona as potências transmitida e recebida entre duas antenas separadas por uma distância  $R$  na condição de campo distante da zona de irradiação [30]:

$$P_r = P_e G_e G_r \frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} \eta_p \frac{1}{\alpha}, \quad (4)$$

em que

$P_r$  é a potência recebida pela antena receptora;

$P_e$  é a potência que enviada pela antena emissora;

$G_e$  é o ganho da antena emissora;

$G_r$  é o ganho da antena receptora;

$\lambda$  é o comprimento de onda propagada;

$R$  é a distância entre as antenas;

$\eta_p$  é o rendimento de polarização;

$\frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2}$  é a atenuação no espaço livre;

$\alpha$  é o coeficiente de atenuação ligado à presença de partículas no canal de transmissão.

## 2.2 Antenas planares

Devido ao fato de antenas serem usadas em diversas aplicações e frequências, muitos tipos diferentes de antenas foram desenvolvidos ao longo da história. Para a aplicação em recuperação de energia do ambiente, a maior parte dos trabalhos usa antenas planares impressas, principalmente devido ao baixo custo e à baixa complexidade delas. Por isso, elas foram priorizadas neste estudo.

### 2.2.1 Antenas planares impressas

Antenas impressas são realizadas por meio da gravura ou impressão das suas topologias sobre uma lâmina de substrato e geralmente possuem um plano de terra. Elas possuem algumas vantagens: baixos volume e massa, fácil integração com circuitos planares, baixo custo e ciclos de produção relativamente rápidos. Entretanto, elas possuem uma banda passante relativamente estreita e um baixo ganho em relação a outros tipos de antenas, além de serem difíceis de modelar, devido à não-homogeneidade de suas estruturas [29, 30].

Inúmeras geometrias são utilizadas como topologias de antenas, sendo as retangulares, elípticas, circulares e triangulares e dipolos as mais conhecidas. As antenas impressas do tipo dipolo são especialmente atraentes porque possuem inerentemente a elas a característica de banda larga [30].

## 3 Revisão bibliográfica

No contexto da recuperação de energia, diversos trabalhos têm se voltado para a captação e o processamento da energia eletromagnética do meio ambiente. Apesar de os valores de potência obtidos atualmente ainda serem pequenos, é possível visar aplicações de baixíssimo consumo, além da possibilidade de usar tais sistemas para aumentar a autonomia de baterias.

Nesta seção são apresentados a revisão bibliográfica e o estado da arte sobre recuperação de energia eletromagnética, notadamente com o uso de rectenas.

### 3.1 Rectenas

O termo “rectena” vem do acrônimo em inglês para “*RECT*ifying an*TENNA*” (*rectenna*) [2]. Assim, rectenas são sistemas compostos por antenas e circuitos retificadores. Esses dispositivos são capazes de captar energia na forma de sinal de radiofrequência e convertê-la em tensão contínua, sem o auxílio de outras fontes de energia [16, 33].

Nos dias atuais, verifica-se a preocupação de tornar circuitos e sistemas energeticamente autônomos. Aproveitando-se da possibilidade de transmissão de energia sem fio, muitos estudos têm sido feitos no intuito de viabilizar o uso de formas de energia disponíveis no ambiente para alimentar esses sistemas, preferencialmente de maneira remota.

As primeiras pesquisas sobre a retificação de ondas eletromagnéticas datam do decênio de 1950 [34], quando recuperação de energia ainda não era visada. Nas publicações mais recentes, verifica-se o uso de rectenas no contexto de colheita de energia [13, 14, 22, 35–37]. A principal aplicação desses sistemas é a alimentação de dispositivos eletrônicos de baixo consumo, visto que as potências possíveis de se obter com os trabalhos atuais ainda são

muito baixas (da ordem de mW, na saída das antenas) [16,20]. Daí, verifica-se a necessidade da identificação das bandas de frequências que apresentam maiores níveis de potência no ambiente e da adaptação das antenas para essas bandas.

De uma maneira geral, o funcionamento de um sistema rectena pode ser descrito conforme o diagrama de blocos apresentado na Figura 5 [29]. A antena é o elemento capaz de captar ondas eletromagnéticas e convertê-las em sinal elétrico. Devido às características não lineares do bloco retificador, harmônicas são geradas e diminuem o rendimento do sistema como um todo. Para atenuar a amplitude destas harmônicas e também para promover o casamento de impedância entre os circuitos, um filtro passa-baixas (ou passa-faixa) é introduzido entre a antena e o retificador [16,38]. A fim de diminuir as oscilações do sinal contínuo na saída do retificador, coloca-se um filtro passa-baixas imediatamente antes de acoplar a carga.

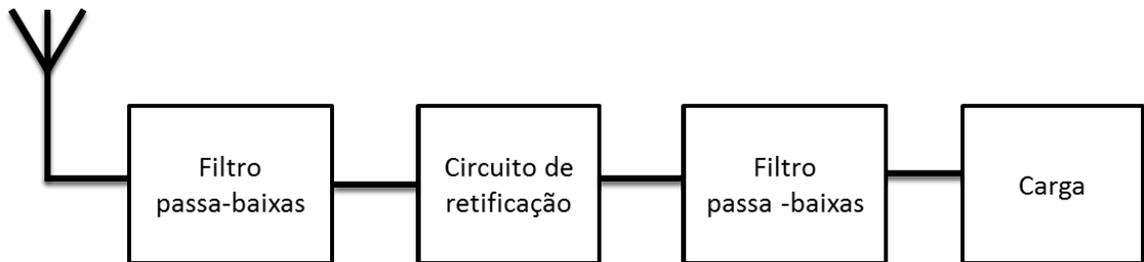


Figura 5: Diagrama de blocos de um sistema rectena.

**Fonte:** Adaptado de [29].

Vários estudos têm sido dedicados à concepção e à otimização dos circuitos retificadores para rectenas [39,40]. Essas pesquisas são relevantes devido principalmente ao fato do desempenho dos retificadores depender da potência do sinal de entrada e também da carga acoplada na saída [16]. Além disso, um dos principais desafios no projeto de rectenas é como realizar o casamento de impedância entre a antena e o circuito retificador para as várias frequências de operação [41].

Este trabalho tem como objetivo a concepção e a otimização de antenas para serem aplicadas em sistemas rectenas para recuperação de energia. Para isso, escolheu-se trabalhar

com antenas impressas (*patch antennas*), visto que são mais baratas do que outros tipos de antena e são de fácil implementação [2]. Diferentemente das antenas convencionais, a otimização das antenas usadas em rectenas não é trivial de se fazer, pois os sinais presentes no ambiente possuem caráter aleatório no que diz respeito à densidade de potência (relativamente baixa e de valor variável), à frequência (a potência de interesse está distribuída em diversas faixas de frequência) e à polarização das ondas, por exemplo [16,17].

Na tentativa de superar esses desafios, são desejáveis antenas com grande largura de feixe no diagrama de irradiação (omnidirecional), uma vez que os sinais podem incidir por ângulos diferentes [16].

Além da própria antena, deve-se levar em consideração também a eficiência de conversão do circuito retificador, bem como o casamento de impedância que deve existir entre estes dois estágios, a fim de garantir o mínimo de perdas [16].

## 3.2 Estado da arte

Nesta seção é apresentado o estado-da-arte sobre antenas utilizadas em sistemas rectenas para recuperação de energia.

### 3.2.1 Tipo de antena

No que concerne os tipos de antena, há variedade nos que são utilizados em aplicações de rectena: dipolo [13,17,24,41–44], Yagi-Uda [20,35], espiral [15,22], slot [45], entre outros. Os tipos de tecnologia utilizados também são diversos, sendo as impressas as mais empregadas [13,36,37,46].

As antenas impressas do tipo microfitas são geralmente as que têm menor custo, e por isso, foram escolhidas para este trabalho. Elas irradiam graças ao efeito de franjeamento nos campos entre a borda da estrutura *patch* e o plano de terra, conforme ilustrado na Figura 6. Além do custo reduzido, antenas fabricadas com essa tecnologia apresentam outras grandes vantagens, como baixos volume e massa; a facilidade de fabricação, a versatilidade de

polarização da antena (linear e circular), a simplicidade na integração com outros circuitos de micro-ondas, a capacidade de operar em múltiplas bandas e o fato de poderem ser implementadas com vários formatos, sendo o retangular e o elíptico os mais comuns. Como desvantagens, podem ser citadas os baixos ganho e eficiência, além da banda relativamente estreita [2].

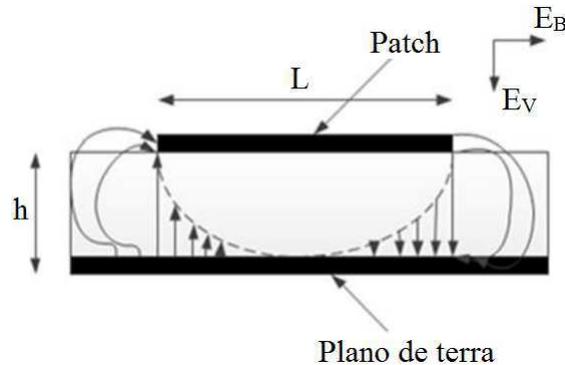


Figura 6: Irradiação em uma antena impressa do tipo microfitas.

**Fonte:** Adaptado de [2].

### 3.2.2 Frequência

A partir do estudo do ambiente em que se deseja recuperar energia, verifica-se quais são as faixas de frequência com maior densidade espectral de potência. Então, projetam-se antenas para estas frequências [16]. Normalmente, a maior parte da potência em sinal RF no ar está nas bandas GSM, 3G e Wi-fi [41]. Evidentemente, essas faixas com maior quantidade de potência dependem do local em que a antena será instalada e, por isso, medições no ambiente visado devem ser feitas previamente.

Neste contexto, as antenas multibanda têm grande destaque, pois são capazes recuperar mais potência, em comparação com antenas de banda única e/ou banda estreita, apesar de possuírem dimensões maiores [16, 41].

As frequências mais utilizadas para a finalidade de recuperação de energia e os respectivos trabalhos que as utilizam estão mostradas na Tabela 1:

Frequência de operação	Referências
915 MHz	[24]
1,7 GHz	[17, 41]
1,8 GHz	[20]
1,85 GHz	[16, 17, 41]
2,15 GHz	[16, 17, 24, 41]
2,2 GHz	[20]
2,45 GHz	[13, 16, 41, 47]
5,8 GHz	[13]
10 GHz	[48]
35 GHz	[48]

Tabela 1: Comparativo das frequências de operação das antenas encontradas na pesquisa bibliográfica.

### 3.2.3 Distorção harmônica

Os circuitos retificadores, por terem características não lineares, geram harmônicas que diminuem o rendimento das retenas. Contudo, já se provou que, ao introduzir filtros entre a antena e o retificador, é possível atenuar consideravelmente a amplitude das harmônicas - especialmente a segunda e a terceira, que têm os maiores valores de amplitude [13, 16, 17, 38].

Existem maneiras de suprimir as harmônicas sem implementar a estrutura física dos filtros separadamente, o que reduz o tamanho do sistema e as perdas de inserção, além de aumentar sua eficiência. Algumas antenas já fazem rejeição de harmônicas ao se introduzir lacunas na estrutura da antena impressa [16]. Além disso, a linha de transmissão usada para alimentar a antena também pode ter lacunas no plano de terra, e isso pode filtrar harmônicas [16].

Uma antena do tipo dipolo plano cruzado (*planar cross dipole*) foi usada em [16]. Nela, foram feitas lacunas na forma de flor (*slots*) em cada polo. De acordo com a dimensão da lacuna, é possível alterar a impedância da estrutura para a frequência da segunda harmônica. Já a linha de alimentação da antena usada em [16] possui uma lacuna na forma de "H" no seu plano de terra. Essa linha de transmissão fica em posição ortogonal à antena e, ao variar o tamanho e a localização da lacuna, é possível alterar a impedância da estrutura para a terceira harmônica.

Apesar desses avanços na miniaturização das estruturas, ainda não existem modelos bem definidos para antenas com este tipo de lacuna e, por isso, é difícil prever os efeitos delas nas características da estrutura.

### 3.2.4 Polarização

No que tange ao uso de antenas para recuperação de energia ambiente, não se pode ter certeza sobre a polarização do sinal que incide sobre a antena. Assim, sistemas que operam com polarização dupla são as mais indicadas para a aplicação, pois podem captar sinais com polarização linear ou circular [16, 41].

### 3.2.5 Diagrama de irradiação

Quanto ao diagrama de irradiação da antena, deseja-se que ela seja o menos diretiva possível, sendo, portanto, omnidirecional. Assim, é possível receber sinais que incidam em ângulos diversos, otimizando a recuperação de energia. Uma antena do tipo bidirecional com feixe largo já foi proposta em [16]. Com ela, foi possível obter larguras de feixe de meia potência (*Half-Power Beam-Width*, ou HPBW) de 109°, 95,6° e 87,5° para as frequências 1,85; 2,15 e 2,45 GHz, respectivamente.

### 3.2.6 Alimentação das antenas

No caso de antenas impressas, as formas mais usuais de alimentação delas é com o uso de linha de transmissão de fitas paralelas (*parallel strip line*) [41] e microfita [20], notadamente para os dipolos impressos, cuja alimentação é feita no centro da placa.

## 3.3 Antenas bioinspiradas em plantas

Sistemas bioinspirados podem ser entendidos como aqueles que têm como base a natureza, utilizando como modelo a física e/ou o mecanismo dos seres vivos. Uma vantagem de

utilizar sistemas bioinspirados é o fato de a natureza ter levado milhões de anos para aprimorar seus mecanismos (evolução), fazendo com que alguns deles sejam melhores do que as tecnologias mais atuais. Alguns exemplos dos mecanismos da natureza que ainda não foram totalmente reproduzidos pelo homem são as teias tecidas pelas aranhas, que são cerca de cinco vezes mais resistentes que o aço, e a dureza das conchas marinhas, que são aproximadamente duas vezes mais duras do que a cerâmica produzida atualmente [25].

Antenas bioinspiradas têm sido amplamente estudadas, especialmente aquelas baseadas em folhas de plantas [25–27, 49–54]. Essas estruturas são otimizadas para a captação da luz, permitindo que as plantas realizem a fotossíntese. Tendo em vista a função importante desempenhada pelas folhas na recepção e absorção da luz, verifica-se o interesse em estudar o comportamento desse tipo de estrutura como antena receptora de sinais eletromagnéticos em frequências diferentes daquelas da luz. Alguns dos formatos explorados foram de folhas de cana-de-açúcar [25], de trevo de quatro folhas [26], de rosa [49], tulipa [50], acero canadense (*maple leaf*) [51].

Algumas antenas bioinspiradas possuem característica Banda Ultra Larga (UWB) [26, 27, 49–54], que tem atraído o interesse dos pesquisadores após ter sido permitido o uso da banda entre 3,1 GHz e 10,6 GHz (UWB) em aplicações comerciais [55].

No contexto de recuperação de energia, é interessante que as antenas operem em UWB, uma vez que o intuito é recuperar energia eletromagnética proveniente da maior faixa de frequências possível. Deseja-se também que a antena seja omnidirecional, que é uma característica observada nas antenas bioinspiradas, incluindo as que não operam em UWB [25] e as que operam [26, 27, 49–54]. A maioria das antenas bioinspiradas são impressas [25–27, 49–52, 54] e são do tipo monopolo [25, 26, 51, 52].

Outra abordagem válida foi feita em [29]: ao invés de utilizar antenas UWB, realizou-se a concepção de antenas com banda estreita que operam em determinada faixa de frequência que possui cerca de metade da potência eletromagnética em certo ambiente. Esse tratamento facilita o projeto de antenas, notadamente no que diz respeito ao casamento de impedância na faixa de interesse.

Na Tabela 2, uma comparação das características gerais das antenas bioinspiradas mais

relevantes encontradas na revisão bibliográfica pode ser encontrada.

<b>Referência</b>	<b>Frequência central</b>	<b>Banda passante</b>	<b>Diagrama de irradiação</b>	<b>Geometria bioinspirada</b>
[56]	25,5 GHz	7 GHz	Diretivo	Folha
[27]	7,2 GHz	6 GHz	Diretivo	Folha
[52]	10,25 GHz	10,3 GHz	Omnidirecional	Folha
[25]	700 MHz	108 MHz	Omnidirecional	Folha de cana-de-açúcar
[26]	8,34 GHz	12,3 GHz	Omnidirecional	Trevo de quatro folhas
[49]	6 GHz	4 GHz	Omnidirecional	Rosa
[50]	7,56 GHz	9 GHz	Omnidirecional	Tulipa
[51]	8,3 GHz	10,4 GHz	Omnidirecional	Acero canadense

Tabela 2: Comparativo das características gerais das principais antenas bioinspiradas encontradas na pesquisa bibliográfica.

## 4 Materiais e métodos

Nesta seção, são apresentados os materiais e os métodos empregados para o desenvolvimento do trabalho de mestrado.

### 4.1 Medições de potência eletromagnética do ambiente

A fim de identificar as bandas de frequência disponíveis no ambiente e os níveis de potência correspondentes a cada faixa, medições foram realizadas com uma antena de Banda Ultra Larga (UWB, *Ultra Wide Band*), de maneira similar às aquelas feitas nas referências [20, 57–59].

Para realizar estas medições, foi utilizada a antena HyperLOG® 30100X da Aaronia (Figura 7 (a)), que opera na faixa de 380 MHz a 10 GHz (graças aos vários dipolos que a compõem) e é diretiva [60]. O diagrama de irradiação desta antena pode ser visto na Figura 7 (b). As perdas de retorno da referida antena foram medidas experimentalmente com analisador de rede e o gráfico com o resultado está mostrado na Figura 8. O analisador de espectro portátil Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A foi acoplado à antena para efetuar as medições.

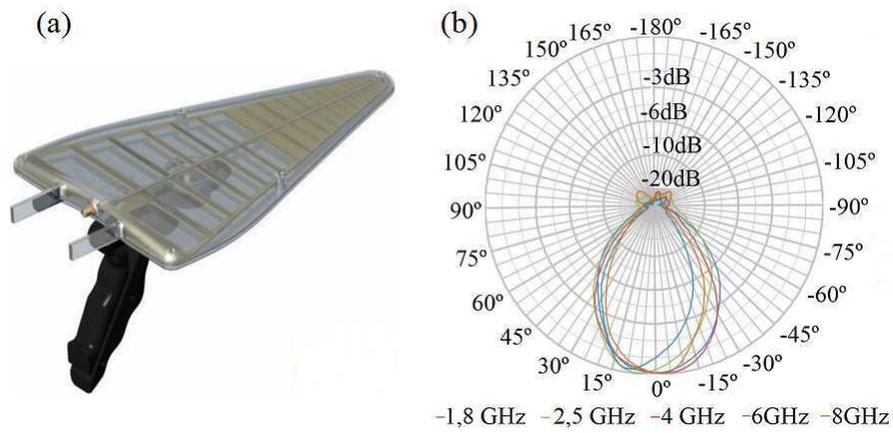


Figura 7: (a) Antena HyperLOG® 30100X, da Aaronia; (b) Respectivo diagrama de irradiação.

**Fonte:** Adaptado de [60].

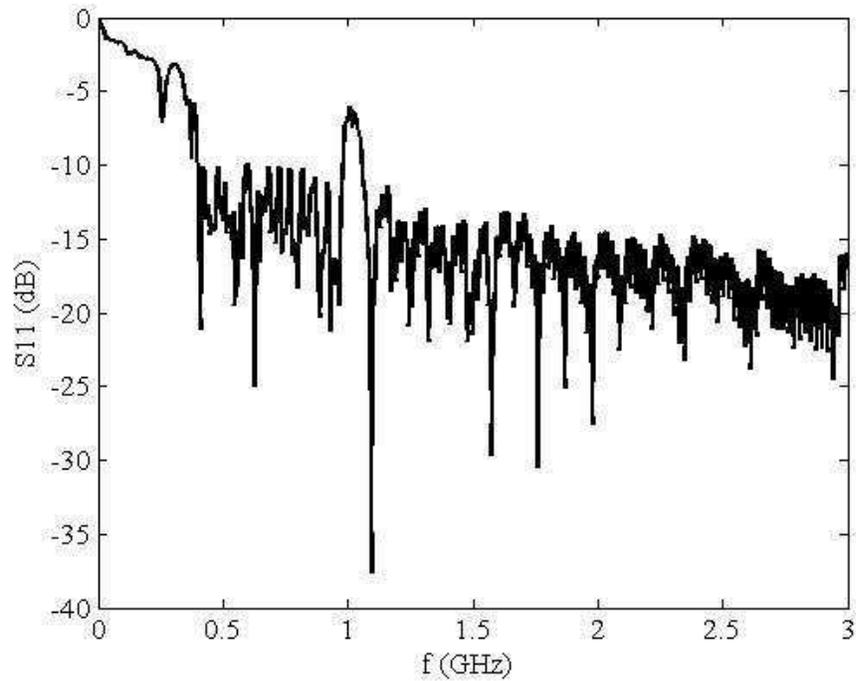


Figura 8: Perdas de retorno medidas da antena HyperLOG® 30100X, da Aaronia.

**Fonte:** [60].

Conhecendo os valores de potência ambiente para cada frequência, é possível projetar antenas para operar naquelas que possuem maior potência, a fim de obter um maior rendimento.

As medições foram realizadas em dois ambientes distintos: *indoor* - dentro do Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC-UFCG); e fora dele, ao ar livre (medição *outdoor*), conforme ilustrado na Figura 9. Para os dois ambientes, foram realizadas medições com a antena na horizontal e na vertical, para verificar a influência da polarização do sinal.



Figura 9: Medições da potência do ambiente. (a) Medição *indoor*. (b) Medição *outdoor*.

**Fonte:** Elaboração própria.

As medições *indoor* foram realizadas nos dias 10, 11, 12, 15 e 16 de agosto de 2016 entre às 13 e às 14 h no corredor do LIMC-UFCG, com a antena na posição horizontal. Para cada dia, variou-se uniformemente de 45 graus o ângulo azimutal  $\varphi$  (em coordenadas esféricas) da antena e as medidas foram salvas, para posteriormente ser realizada uma média dos valores.

Assim, é possível conhecer o espectro eletromagnético do ambiente em questão.

No que diz respeito às medições *outdoor*, os testes foram realizados de maneira similar nos dias 25, 26, 29 e 30 de agosto, além dos dias 01 e 02 de setembro de 2016 na área externa entre os blocos CG e CH da UFCG.

## 4.2 Contornos bioinspirados

Antes de realizar a concepção das antenas bioinspiradas, foi feito um estudo do modelo matemático desenvolvido em 2003 por Gielis [61]. Com esse modelo, é possível descrever matematicamente uma grande variedade de formas naturais e abstratas, como formas de folhas e flores, por exemplo.

Gielis partiu do conceito de superelipses (Expressão 5) e obteve a Expressão 6, que tem por base a ideia de que muitas formas naturais podem ser interpretadas como círculos modificados [61]. Para obter esse resultado, utilizou-se coordenadas polares, substituindo  $x = r \cdot \cos(\phi)$  e  $y = r \cdot \sin(\phi)$ , além de introduzir o argumento  $m/4$ , que confere simetria rotacional em algumas estruturas, e a possibilidade de utilizar diferentes valores do expoente  $n$  para cada termo (por meio de  $n_1, n_2, n_3$ ) [61]. Estas modificações conferem maior flexibilidade na obtenção de contornos.

$$|x/a|^n + |y/b|^n = 1 \quad (5)$$

$$r(\phi) = \frac{1}{\left\{ \left[ \left( \left| \frac{1}{a} \cos\left(\phi \frac{m}{4}\right) \right| \right)^{n_2} + \left( \left| \frac{1}{b} \sin\left(\phi \frac{m}{4}\right) \right| \right)^{n_3} \right]^{1/n_1} \right\}} \quad (6)$$

A partir da manipulação dos seis parâmetros  $(a, b, m, n_1, n_2, n_3)$  da expressão 6, chamada de superfórmula de Gielis, é possível gerar e modificar vários contornos (Tabelas 3 e 4). A superfórmula também pode ser multiplicada por outras funções matemáticas, gerando outras formas. Com isso, diversas geometrias foram propostas e analisadas neste trabalho. Tabelas comparativas também foram feitas para verificar a influência dos parâmetros na forma obtida. Alguns destes contornos foram usados para o projeto de antenas bioinspiradas.

Tendo em vista a possibilidade de utilizar a superfórmula de Gielis para a obtenção de contornos biospirados, optou-se pelo estudo do desempenho de antenas bioinspiradas com contornos obtidos via superfórmula.

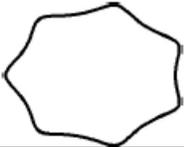
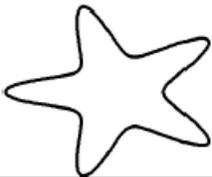
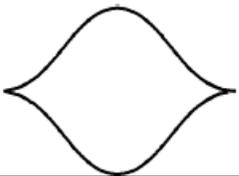
Geometria		Parâmetros da superfórmula								
Nome	Figura	$a$	$b$	$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	Função	$\phi$	Referência
Estrelas		1	1	7	10	6	6	1	0 a $2\pi$	[62]
		10	10	5	2	7	7	1	0 a $2\pi$	[62]
		1	1	5	2	13	13	1	0 a $2\pi$	[62]
Folhas		1	1	2	1000	500	500	1	0 a $2\pi$	[62]
		1	1	2	0,5	0,5	0,5	1	0 a $2\pi$	[62]

Tabela 3: Formas geométricas bioinspiradas implementadas com a superfórmula de Gielis.

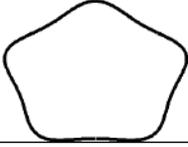
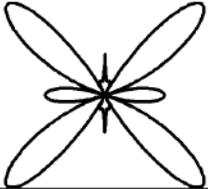
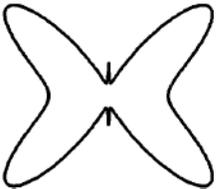
Geometria		Parâmetros da superfórmula								
Nome	Figura	$a$	$b$	$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	Função	$\phi$	Referência
Flor		1	1	5	4	4	4	1	0 a $2\pi$	[62]
Borboletas		1	1	4	0,2	0,5	15	$ \cos(m\phi) $	0 a $2\pi$	Este trabalho
		1	1	4	0,2	0,5	15	1	0 a $2\pi$	Este trabalho

Tabela 4: Formas geométricas bioinspiradas implementadas com a superfórmula de Gielis (continuação).

No contexto de antenas, a vantagem de utilizar estruturas obtidas por meio da superfórmula de Gielis é a reprodutibilidade, uma vez que o ajuste correto dos parâmetros permite a reprodução de determinada geometria.

Pelo exposto nas Tabelas 3 e 4, verifica-se a possibilidade de obtenção de contornos bioinspirados diversos, tais como plantas e animais. No trabalho ao qual esta dissertação se refere, optou-se pelo estudo de antenas bioinspiradas em plantas. Esta escolha foi feita tomando como base vários trabalhos encontrados nesta linha de pesquisa para o projeto de antenas [25–27, 49–54]. No entanto, esses trabalhos foram desenvolvidos para sistemas de comunicação clássicos. Nesta dissertação de mestrado, as antenas são visadas para operar em sistemas de recuperação de energia eletromagnética do ambiente.

### 4.3 Antenas bioinspiradas

De posse dos parâmetros da superfórmula de Gielis, foram feitos códigos em Scilab para obter o contorno. A partir dele, exportou-se a geometria para um arquivo em formato dxf, que pode, então, ser importado no Ansoft Designer.

Os programas Ansoft Designer e HFSS foram usados para realizar a concepção e a simulação das antenas propostas. Com o Designer, foi possível criar estruturas 2D que posteriormente foram exportadas para o HFSS, que as trata como 3D, ao considerar a espessura das camadas condutoras e do substrato dielétrico. O HFSS usa o método dos elementos finitos para fazer cálculo de campos para estruturas que operam em alta frequência [62].

Após esta etapa, as antenas foram fabricadas em substrato FR4, com auxílio da prototipadora LPKF disponível no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas (LIMC), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A fim de caracterizar as antenas desenvolvidas, foram feitas medições das perdas de retorno da antena ( $S_{11}$ ) com o analisador vetorial de rede (VNA) Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A (que também tem funcionalidades de analisador de espectro), disponível no Laboratório de Radiometria da UFCG. No caso de algumas antenas, foi necessário realizar novas simulações para adequação do modelo aos resultados práticos (retrossimulação). Após esses ajustes, testes foram feitos para medição da potência do ambiente com as antenas desenvolvidas, utilizando o mesmo analisador de espectro, nos mesmos locais usados previamente.

# 5 Resultados

## 5.1 Medições de potência eletromagnética do ambiente

De acordo com a metodologia descrita, foi possível medir a potência eletromagnética do ambiente para a faixa de frequências compreendida entre 1 e 4 GHz. Na Figura 10, é possível verificar o resultado das medições *indoor* e *outdoor*.

Nota-se que a maior potência é -41 dBm obtida para o caso *indoor* em 2,44 GHz. Esse valor de potência está compatível com o obtido em medições similares em outros trabalhos, como em [16] e [17], que obtiveram, respectivamente, -47 e -45 dBm de potência na mesma faixa.

Para o caso da medição *outdoor*, verificou-se um pico de potência de -52 dBm em 2,0 GHz, que corresponde à frequência típica de GSM 1800 e 4G. Considerando o porte da cidade de Campina Grande, espera-se que a potência outdoor seja, de fato, pequena.

Mesmo que os locais de medição *indoor* e *outdoor* sejam relativamente próximos entre si, algumas discrepâncias podem ser verificadas (notadamente na faixa de 2,45 GHz). Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que esta frequência é usada por vários dispositivos de comunicação - principalmente roteadores Wi-fi, cada vez mais presentes no ambiente de trabalho.

Ao mesmo tempo, as frequências no entorno de 2 GHz são as que apresentam maior potência no ambiente externo. Essa frequência é usada para telefonia móvel e é natural que tenha maior potência em ambientes externos, visto que há menos obstáculos para atenuar o sinal (paredes, por exemplo).

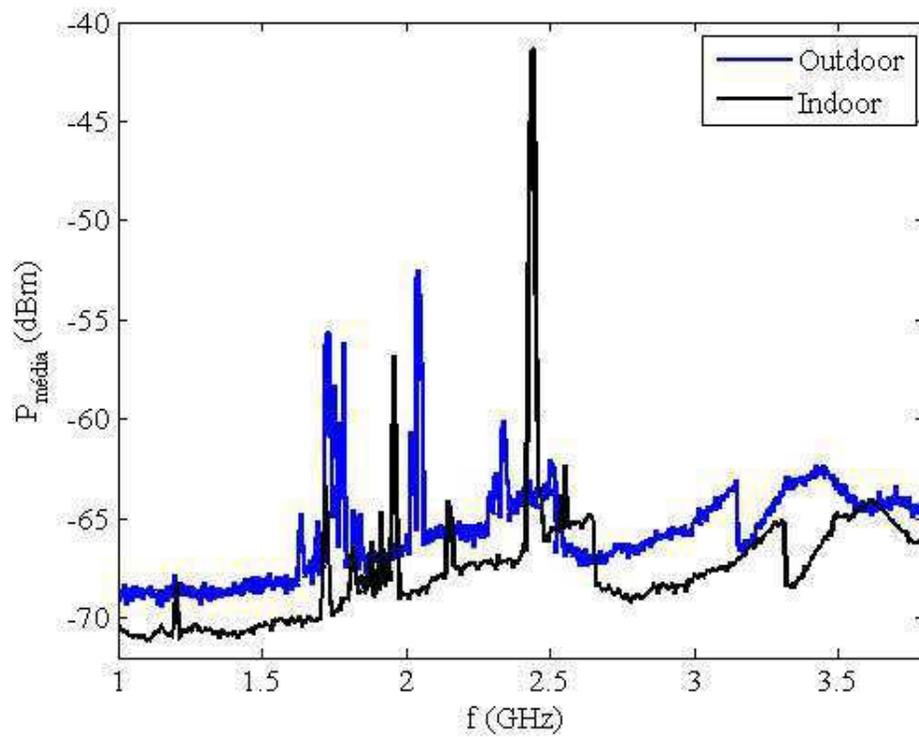


Figura 10: Gráfico da média da potência eletromagnética do ambiente medida com a antena HyperLOG® 30100X, da Aaronia.

**Fonte:** Elaboração própria.

No caso de antenas para recuperação de energia do ambiente, algo que deve ser levado em consideração primordialmente é o local no qual o sistema será instalado. Assim, as antenas do referido sistema devem operar predominantemente na faixa de frequência de maior potência, a fim de aumentar o rendimento. No caso dos ambientes estudados neste trabalho, o maior rendimento ocorrerá em sistemas cujas antenas operem em 2,45 GHz nos ambientes internos e 2 GHz nos ambientes externos. É importante ressaltar que estes resultados estão de acordo com aqueles mostrados no estado da arte [13, 16, 20, 41, 47].

Além destes resultados, outros foram obtidos com a antena posicionada na vertical, a fim de verificar o efeito da polarização dos sinais incidentes. Para este caso, as maiores potências foram, para medições *indoor* e *outdoor*, respectivamente, -39,7 dBm (para 2,32 GHz) e -53,48 dBm (para 2,015 GHz).

## 5.2 Contornos bioinspirados

Devido ao interesse particular em geometrias bioinspiradas em plantas para o projeto de antenas, neste trabalho foi realizado um estudo empírico visando encontrar os parâmetros da superfórmula que permitem a obtenção de contornos bioinspirados em pétalas, flores e folhas de plantas. Os resultados desse estudo são mostrados nas Tabelas de 5 a 8.

Pelas geometrias e parâmetros observados nas Tabelas 5 a 8, verifica-se que, alterando apenas um dos parâmetros, é possível obter variações de uma mesma geometria, assim como contornos completamente diferentes. Dessa forma, pode-se concluir que utilizar a superfórmula de Gielis, de fato, permite a obtenção de formas geométricas bioinspiradas diversas. Além disso, ela possibilita a reprodutibilidade das estruturas, o que é importante no contexto de antenas.

Geometria		Parâmetros da superfórmula							
Nome	Figura	$a$	$b$	$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	função	$\phi$
Tulipa		1	1	4	0,2	0,5	15	1	$-\pi/2$ a $\pi/2$
Tulipa (vista lateral)		1,5	1,5	12	7	1	9	$ \cos(a\phi) $	$\pi/3$ a $\pi$
Flor anêmona		1	1	22	4	20	0,01	1	0 a $2\pi$
Flor de ciriguela		1	1	10	0,1	10	0,01	1	0 a $2\pi$
Folha de vitória régia		2,5	0,1	4	200	-500	-500	$ \cos(m\phi) $	$-\pi/2$ a $\pi/2$

Tabela 5: Formas bioinspiradas em plantas, implementadas por meio da superfórmula.

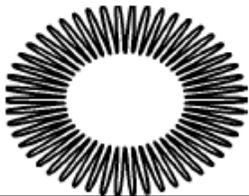
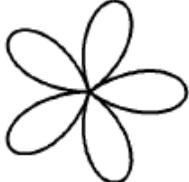
Geometria		Parâmetros da superfórmula							
Nome	Figura	$a$	$b$	$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	função	$\phi$
Girassol		10	1	100	1	0	4	1	0 a $2\pi$
Flor de lótus (vista lateral)		1	1	9	0,8	0	1	$ \cos(m\phi) $	0 a $4\pi$
Rosa (vista lateral)		1,5	1,5	12	7	5	9	$ \cos(a\phi) $	$\pi/3$ a $\pi$
Flor do campo		1	1	2,5	100	2,7	2,7	$ \cos(m\phi) $	0 a $2\pi$
Acero canadense ( <i>Maple leaf</i> )		1,5	1,5	39	7	5	9	$ \cos(a\phi) $	$\pi/3$ a $\pi$

Tabela 6: Formas bioinspiradas em plantas, implementadas por meio da superfórmula (continuação).

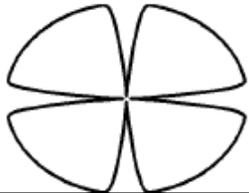
Geometria		Parâmetros da superfórmula							
Nome	Figura	$a$	$b$	$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	função	$\phi$
Trevo de 4 folhas		1	1	8	0,2	100	0	1	0 a $2\pi$
Pétala de rosa		1	1	4	0,3	0,5	15	$ \cos(a\phi) $	$-\pi/2$ a $\pi/2$
Palmeira azul		2	1	28	0,2	0,5	15	1	$-\pi/2$ a $\pi/2$
Capim		20	1	4	0,2	0,5	15	$ \cos(a\phi) $	$-\pi/2$ a $\pi/2$
Palma		2	1	4	0,2	0,3	15	$ \cos(a\phi) $	$-\pi/2$ a $\pi/2$

Tabela 7: Formas bioinspiradas em plantas, implementadas por meio da superfórmula (continuação).

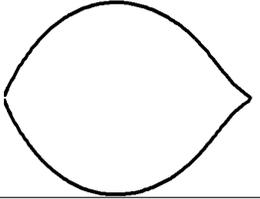
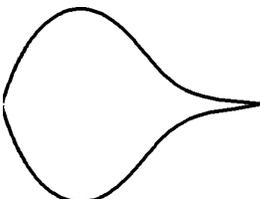
Geometria		Parâmetros da superfórmula							
Nome	Figura	$a$	$b$	$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	função	$\phi$
Folha		1,5	1,5	12	7	5	1	$ \cos(a\phi) $	$\pi/3$ a $\pi$
Folha		1,5	1,5	12	7	15	1	$ \cos(a\phi) $	$\pi/3$ a $\pi$

Tabela 8: Formas bioinspiradas em plantas, implementadas por meio da superfórmula (continuação).

Sabe-se que o perímetro da antena influencia na sua frequência de ressonância. Por isso, durante a etapa de simulações eletromagnéticas, usualmente são feitas alterações na geometria da antena a fim de fazê-la ressoar na frequência de interesse.

É importante ressaltar que nem sempre é possível alcançar a frequência de ressonância desejada alterando apenas o perímetro da antena, seja por impossibilidade associada à geometria escolhida, seja devido a limitações no tamanho da antena proveniente das especificações de projeto.

Outras maneiras de melhorar as características da antena são: acrescentar linhas de microfita auxiliares, alterar o tamanho do plano de terra [50] ou ainda introduzir áreas sem cobre na geometria da antena [16, 17]. As dimensões dessas estruturas utilizadas para melhorar as características da antena são normalmente obtidas por meio de parametrizações nos *softwares* de simulação eletromagnética.

Como o objetivo de utilizar a superfórmula de Gielis é permitir a reprodutibilidade das estruturas, fez-se um estudo empírico acerca de como determinados parâmetros da superfór-

mula influenciam, por exemplo, o perímetro da antena. Esse tipo de estudo é útil porque possibilita ao projetista de antenas bioinspiradas em plantas saber qual parâmetro da superfície mais influencia o perímetro do contorno e, conseqüentemente, na frequência de ressonância. As Tabelas de 9 a 21 contêm os principais resultados desse estudo empírico para várias geometrias previamente citadas.

	$n_2 = 0,2$	$n_2 = 0,5$	$n_2 = 0,7$
$n_1 = 0,1$			
$n_1 = 0,2$			
$n_1 = 0,5$			

Tabela 9: Variação de parâmetros para o contorno de tulipa.

	$n_1 = 3$	$n_1 = 7$	$n_1 = 10$
$m = 12$			
$m = 18$			
$m = 24$			

Tabela 10: Variação de parâmetros para o contorno de tulipa (vista lateral).

	$n_1 = 0.5$	$n_1 = 2.5$	$n_1 = 4$	$n_1 = 10$
$m = 10$				
$m = 22$				
$m = 50$				

Tabela 11: Variação de parâmetros para o contorno da flor de anêmona.

	$n_1 = 0.5$	$n_1 = 2.5$	$n_1 = 4$	$n_1 = 8$
$m = 3$				
$m = 5$				
$m = 8$				

Tabela 12: Variação de parâmetros para o contorno da flor de framboesa.

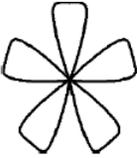
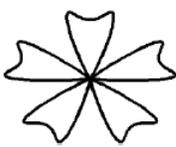
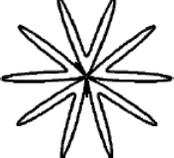
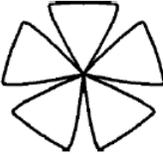
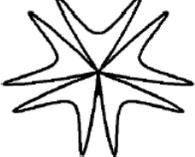
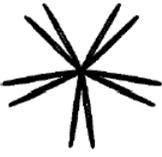
	$n_3 = 0.01$	$n_3 = 0.1$	$n_3 = 0.5$
$n_2 = 10$			
$n_2 = 50$			

Tabela 13: Variação de parâmetros para o contorno de ciriguela.

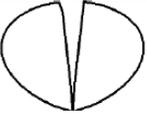
	$n_1 = 100$	$n_1 = 200$	$n_1 = 500$
$f(\phi) = 1$			
$f(\phi) = \phi$			
$f(\phi) =  \cos(m\phi) $			

Tabela 14: Variação de parâmetros para o contorno da folha de vitória régia.

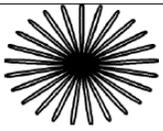
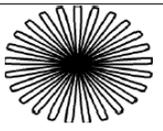
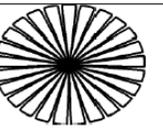
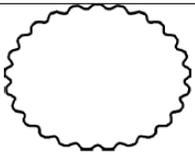
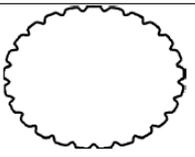
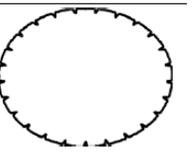
	$n_3 = 4$	$n_3 = 10$	$n_3 = 100$
$n_1 = 0,1$			
$n_1 = 1$			
$n_1 = 10$			

Tabela 15: Variação de parâmetros para o contorno de girassol.

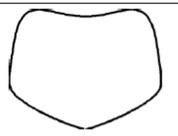
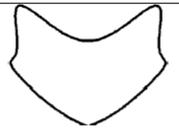
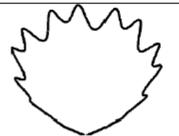
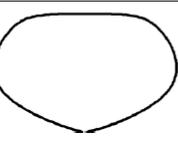
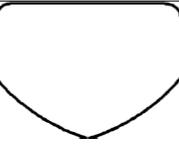
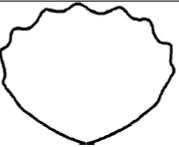
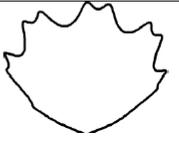
	$m = 12$		$m = 40$	
	$n_3 = 4$	$n_3 = 10$	$n_3 = 4$	$n_3 = 10$
$n_1 = 5$				
$n_1 = 7$				
$n_1 = 15$				

Tabela 16: Variação de parâmetros para o contorno de acero canadense (*maple leaf.*)

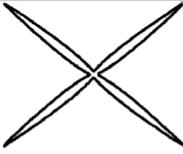
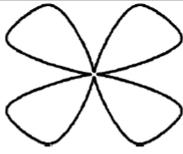
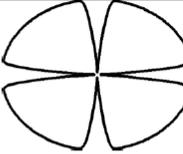
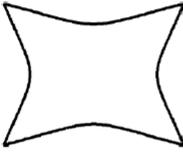
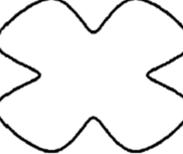
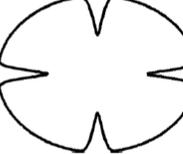
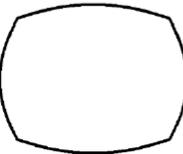
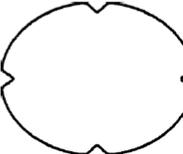
	$n_2 = 1$	$n_2 = 10$	$n_2 = 100$
$n_1 = 0,2$			
$n_1 = 1$			
$n_1 = 5$			

Tabela 17: Variação de parâmetros para o contorno do trevo de 4 folhas.

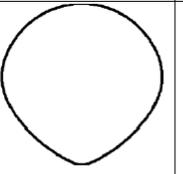
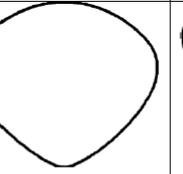
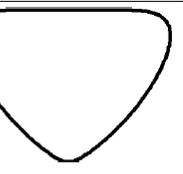
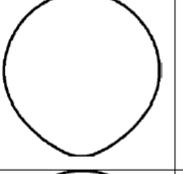
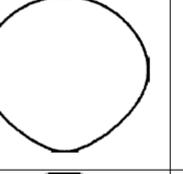
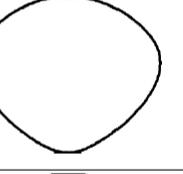
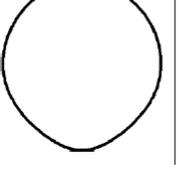
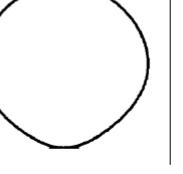
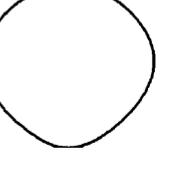
	$n_2 = 0,1$	$n_2 = 0,3$	$n_2 = 0,6$
$n_1 = 0,3$			
$n_1 = 0,6$			
$n_1 = 0,8$			

Tabela 18: Variação de parâmetros para o contorno da pétala de rosa.

	$n_2 = 0,2$	$n_2 = 0,4$	$n_2 = 0,6$
$n_1 = 0,2$			
$n_1 = 0,5$			
$n_1 = 0,8$			

Tabela 19: Variação de parâmetros para o contorno da palmeira azul.

	$n_3 = 5$	$n_3 = 10$	$n_3 = 15$
$a = 2$			
$a = 5$			
$a = 12$			

Tabela 20: Variação de parâmetros para o contorno da palma.

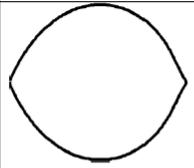
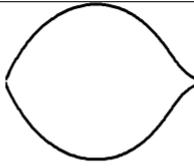
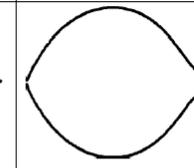
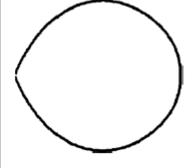
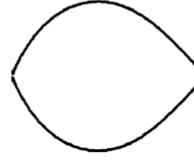
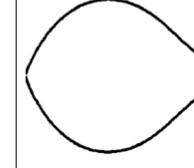
	$n_2 = 5$	$n_2 = 10$	$n_2 = 15$
$n_3 = 1$			
$n_3 = 2$			

Tabela 21: Variação de parâmetros para o contorno de folha.

Verifica-se que, para dado contorno bioinspirado, certos parâmetros da superfórmula de Gielis influenciam muito mais do que outros para obtenção de variações da geometria em questão, proporcionando ainda formas bioinspiradas.

### 5.3 Antenas bioinspiradas

Três geometrias diferentes foram escolhidas para realizar antenas: flor de framboesa, flor de tulipa e flor anêmona, cujos parâmetros correspondentes da superfórmula estão expostos na Tabela 22.

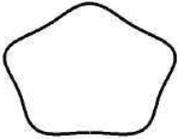
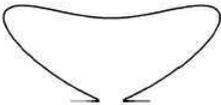
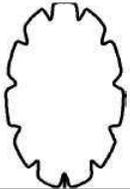
Geometria		Parâmetros da superfórmula								
Nome	Foto	Contorno	$a$	$b$	$m$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	função	$\phi$
Flor de framboesa			1	1	5	4	4	4	32,5	0 a $2\pi$
Tulipa			1	1	4	0,2	0,3	15	750	$-\frac{\pi}{2}$ a $\frac{\pi}{2}$
Flor anêmona			1	1	22	4	20	0,01	1000	0 a $2\pi$

Tabela 22: Contornos geométricos obtidos por meio da superfórmula que serviram de inspiração para concepção das antenas deste trabalho.

### 5.3.1 Antena bioinspirada na flor de framboesa

Após importar a geometria no Ansoft Designer, foi colocada uma linha de transmissão de largura 4 mm e comprimento 48 mm. Estes valores foram obtidos após sucessivas parame-trizações a fim de otimizar o casamento de impedância em 2,45 GHz. Além disso, o plano de terra foi reduzido, de maneira análoga àquela apresentada em algumas referências de antenas bioinspiradas [25, 26, 50–52]. A antena fabricada pode ser vista na Figura 11. Os resultados da simulação das perdas de retorno no HFSS e da respectiva medição podem ser vistos na Figura 12.

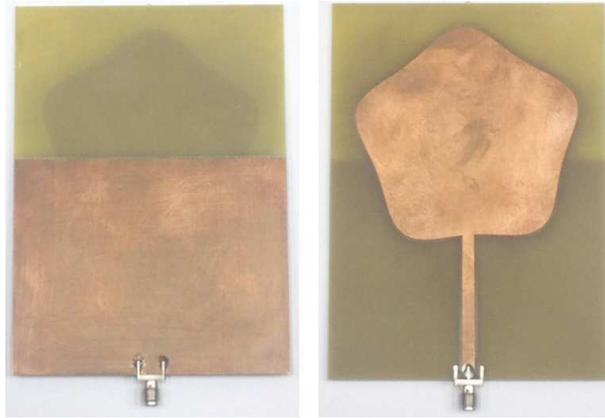


Figura 11: Antena fabricada bioinspirada na flor de framboesa. Largura 92 mm; comprimento: 127 mm.

**Fonte:** Elaboração própria.

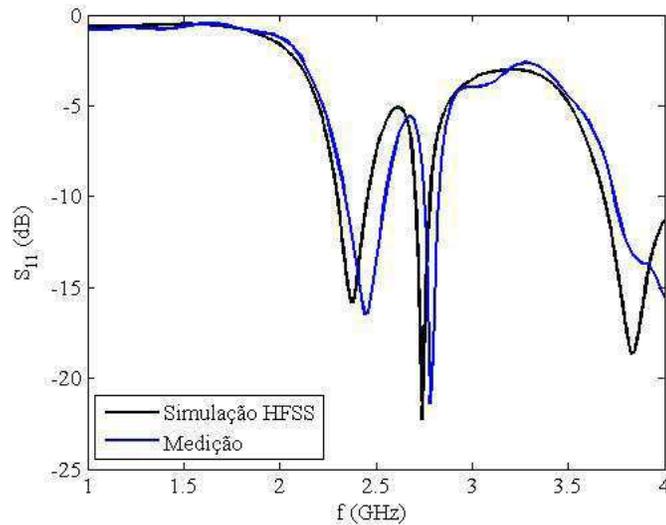


Figura 12: Perdas de retorno para a antena bioinspirada na flor de framboesa.

**Fonte:** Elaboração própria.

É possível perceber que os resultados foram satisfatórios, uma vez que se obteve -15 dB para 2,4 GHz e -22 dB para 2,74 GHz (simulação). Nas medições, obteve-se -16 dB para 2,46

GHz e -21 dB para 2,78 GHz. Os deslocamentos na frequência entre os resultados de simulação e experimental podem ser justificados pela inexatidão no valor da permissividade elétrica do substrato e na espessura do mesmo, como já foi reportado em outros trabalhos [31, 32].

Em seguida, com auxílio do analisador de espectro, mediu-se, com a antena bioinspirada na flor de framboesa, a potência eletromagnética do ambiente nos mesmos locais previamente citados. Os resultados podem ser vistos na Figura 13.

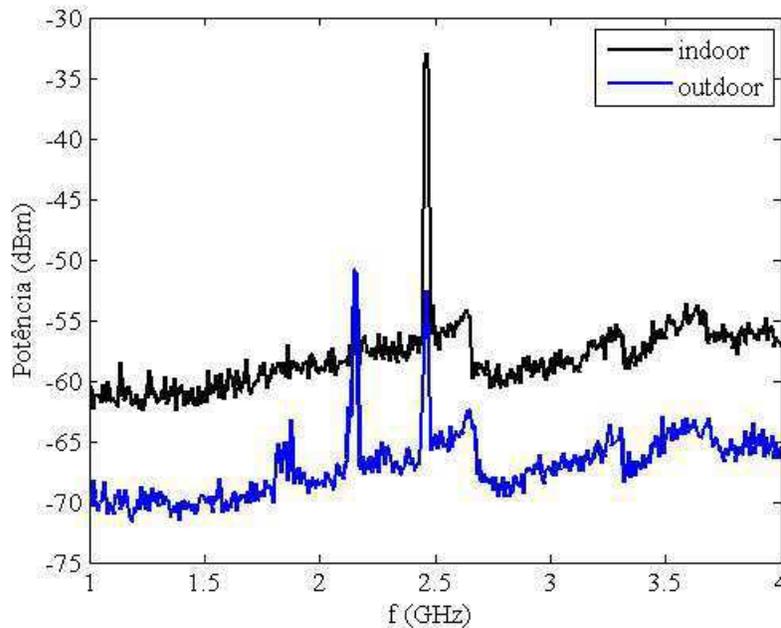


Figura 13: Análise espectral para a antena bioinspirada na flor de framboesa.

**Fonte:** Elaboração própria.

Para a medição *indoor*, conforme esperado, a maior potência foi para 2,45 GHz (-32 dBm). Esse valor foi maior do que aquele medido com a antena da Aaronia (-41 dBm), podendo o resultado ser explicado pela melhor adaptação da antena proposta para esta frequência. Nas medições *outdoor*, houve resultados consideráveis para 2,14 (-50 dBm) e 2,45 GHz (-52 dBm).

Pode-se concluir, portanto, que a referida antena tem desempenho satisfatório para ambientes que possuem dispositivos operando em 2,45 GHz (roteadores de Wi-fi, por exemplo).

Apesar de sua banda passante ser estreita, este não é um grande problema, como comprovado em [29], pois a maior parte da energia disponível no ambiente citado está concentrada na faixa de operação da antena. Além disso, a potência fornecida pela antena em questão é suficiente para o bom funcionamento de alguns circuitos retificadores do estado da arte [16], cuja sensibilidade é de -35 dBm.

Para cada frequência detectada no analisador de espectro, simulou-se o diagrama de irradiação da antena (ver Figura 14). Sabendo que o plano de terra metálico da antena tinha um tamanho considerável, o diagrama de irradiação teve algumas direções preferenciais de propagação.

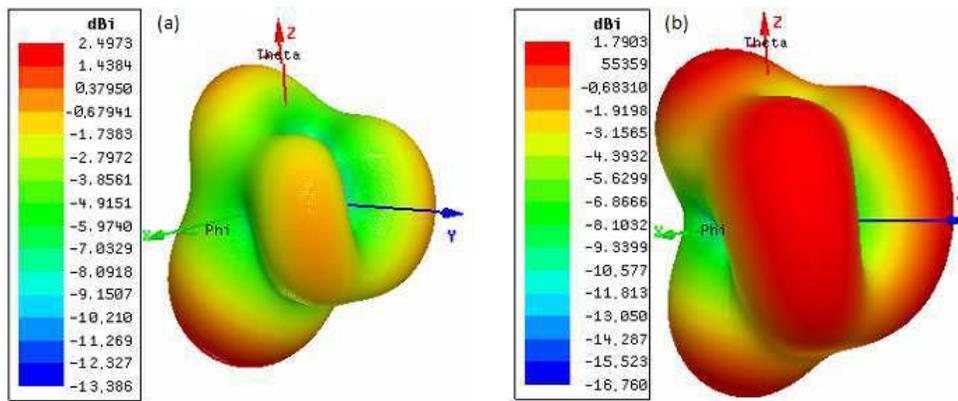


Figura 14: Diagrama de irradiação da antena bioinspirada na flor de framboesa. (a) 2,14 GHz; (b) 1,79 GHz.

Fonte: Elaboração própria.

### 5.3.2 Antena bioinspirada na flor de tulipa

De maneira análoga àquela que foi usada para implementar a antena bioinspirada na flor de framboesa, foi desenvolvida a antena bioinspirada na flor de tulipa. Contudo, uma simples linha de transmissão para alimentar a antena não foi suficiente para obter bons resultados. Após pesquisa bibliográfica, constatou-se que em [29] foi utilizada uma linha do tipo MTAPER para realizar o casamento de impedância da antena. Este tipo de linha possui duas larguras diferentes em suas extremidades.

Assim, usando o Ansoft Design, verificou-se a impedância característica do elemento irradiante (36 ohms, para 2,45 GHz) e usando o *software* ADS (Advanced Design System), foi possível obter as dimensões mais adequadas da linha para realizar o casamento de impedância (larguras: 2,9 e 4,4 mm; comprimento: 28 mm). Este método foi empregado porque os cálculos analíticos para este tipo de estrutura não são triviais de realizar, quando se consideram parâmetros como permissividade efetiva do dielétrico. A antena fabricada pode ser vista na Figura 15.

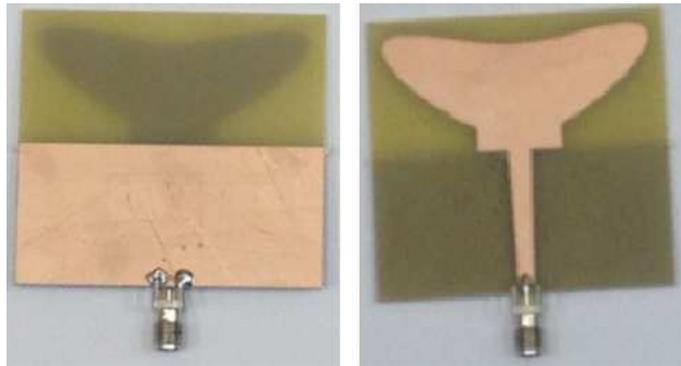


Figura 15: Antena fabricada bioinspirada na flor de tulipa. Largura 60 mm; comprimento: 55 mm.

**Fonte:** Elaboração própria.

As perdas de retorno desta antena estão expostas na Figura 16. Para os resultados experimentais, obteve-se perdas de retorno de -14,4 dB para 2,45 GHz, além de uma banda passante de 615 MHz. Na simulação, a frequência de ressonância foi menor (1,94 GHz), com perdas de retorno iguais a aproximadamente -30 dB.

Novamente, houve discrepâncias entre os resultados de simulação e aqueles medidos, devido às incertezas associadas aos valores de permissividade elétrica e espessura do substrato. Essa diferença entre os resultados foi ainda maior para esta antena, visto que, na simulação, o sinal é aplicado na extremidade da linha de alimentação. Já na antena fabricada, parte da linha não foi utilizada por causa da solda do conector SMA (que fica a alguns milímetros da extremidade da linha). No caso da linha do tipo MTAPER, cuja largura varia com

o comprimento da mesma, a diferença nos resultados é considerável. Entretanto, a antena fabricada estava mais bem adaptada a 2,45 GHz do que aquela simulada, como foi comprovado posteriormente com as medições feitas com analisador de espectro. Sugere-se como trabalho futuro melhorar o modelo usado no *software*, para que este represente melhor a realidade.

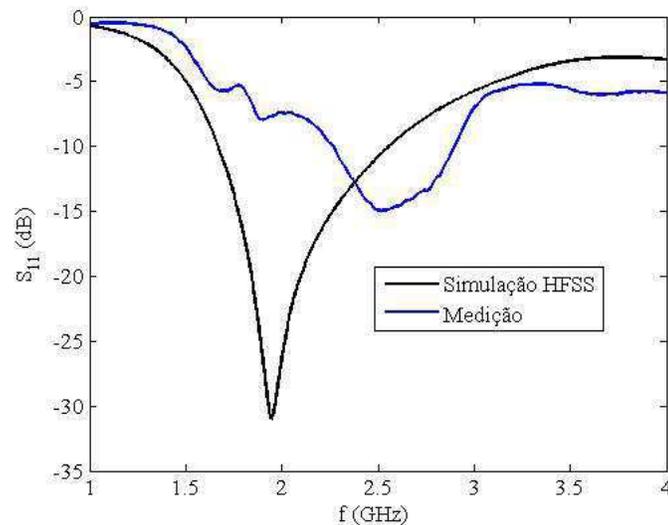


Figura 16: Perdas de retorno para a antena bioinspirada na flor de tulipa.

**Fonte:** Elaboração própria.

No que concerne à medição com analisador de espectro, os resultados estão mostrados na Figura 17. Novamente, o melhor resultado foi para o caso *indoor* a 2,45 GHz (-31 dBm). Contudo, devido à banda desta antena ser maior do que àquela da antena bioinspirada na flor de framboesa, os resultados para medição *outdoor* foram melhores: -49 dBm para 1,8 GHz; -44 dBm para 2,14 GHz.

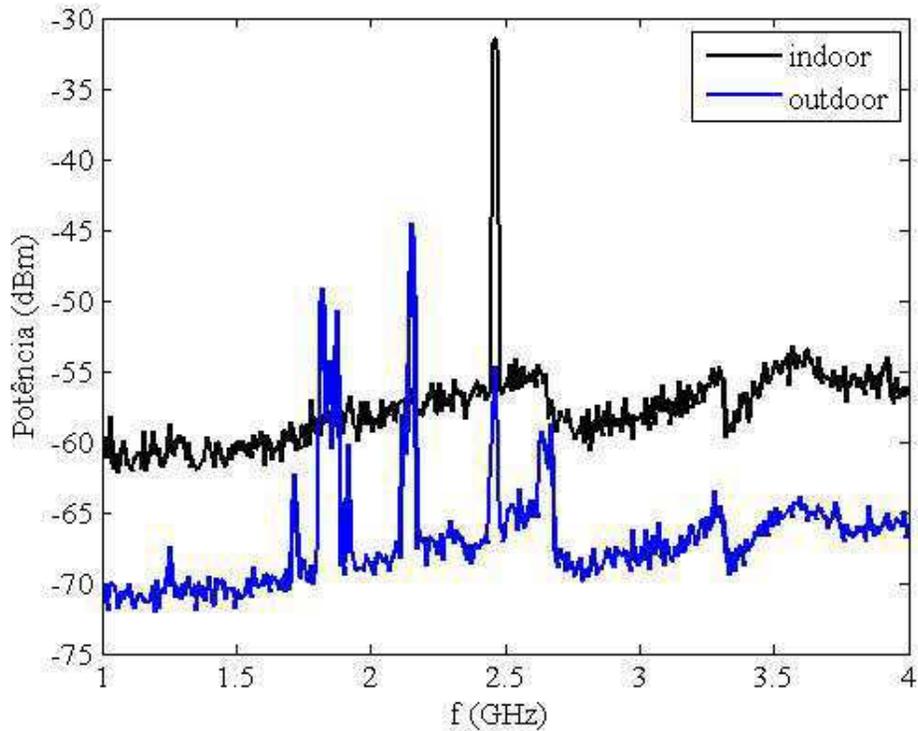


Figura 17: Análise espectral para a antena bioinspirada na flor de tulipa.

**Fonte:** Elaboração própria.

É possível concluir que esta antena tem avanços em relação à anterior, notadamente no que diz respeito à banda passante. Isso a torna melhor para aplicações *outdoor*, quando comparada à antena bioinspirada na flor de framboesa. Contudo, os resultados mais significativos e que são suficientes para a boa operação dos retificadores encontrados no estado-da-arte continuam sendo aqueles obtidos em ambientes internos a 2,45 GHz.

Para cada frequência detectada no analisador de espectro, simulou-se o diagrama de irradiação da antena (ver Figura 18). No caso desta antena, o diagrama de irradiação para todas as frequências medidas foi omnidirecional (variando apenas o ganho), o que pode ser explicado pelo fato do plano de terra ser bastante reduzido nesta antena.

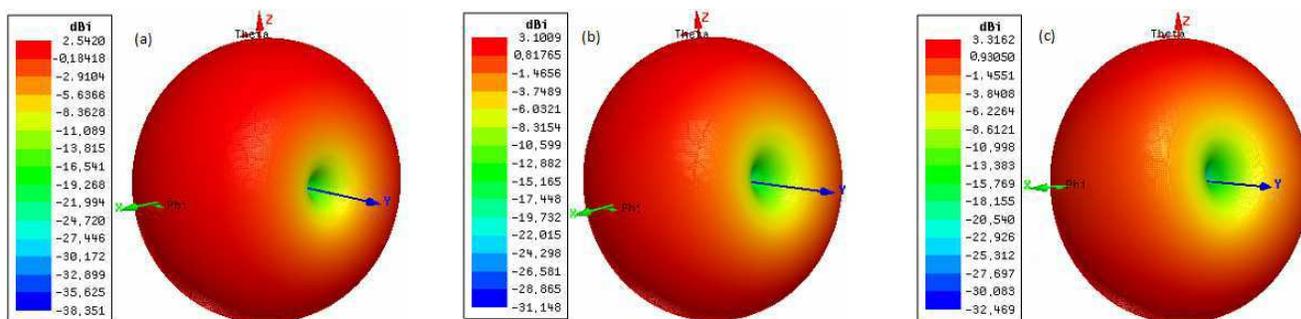


Figura 18: Diagrama de irradiação da antena bioinspirada na flor de tulipa. (a) 1,8 GHz; (b) 2,14 GHz; (c) 2,45 GHz.

**Fonte:** Elaboração própria.

### 5.3.3 Antena bioinspirada na flor anêmona

Para a flor de anêmona, também foi necessário usar uma linha do tipo MTAPER para alimentá-la. Sua impedância de entrada, em módulo, era de 77 ohms. Para adaptar sua impedância em 50 ohms, foi utilizada uma linha com larguras nas extremidades de 2,4 e 1,16 mm, com comprimento de 22 mm. A antena fabricada pode ser vista na Figura 19.

Os resultados simulados e medidos referentes às perdas de retorno da antena bioinspirada na flor anêmona podem ser vistos na Figura 20. Para a simulação, a melhor adaptação da antena ocorre na frequência 1,91 GHz (-33 dB), tendo uma banda passante 1,69 GHz, que pode ser considerada larga. Já para os resultados experimentais, a melhor adaptação foi para 2,8 GHz (-33 dB), com banda passante de 1,52 GHz, que pode ser considerada larga. Novamente, houve discrepância considerável entre os dois resultados, que pode ser explicada pelos mesmos motivos da antena bioinspirada na antena de tulipa.

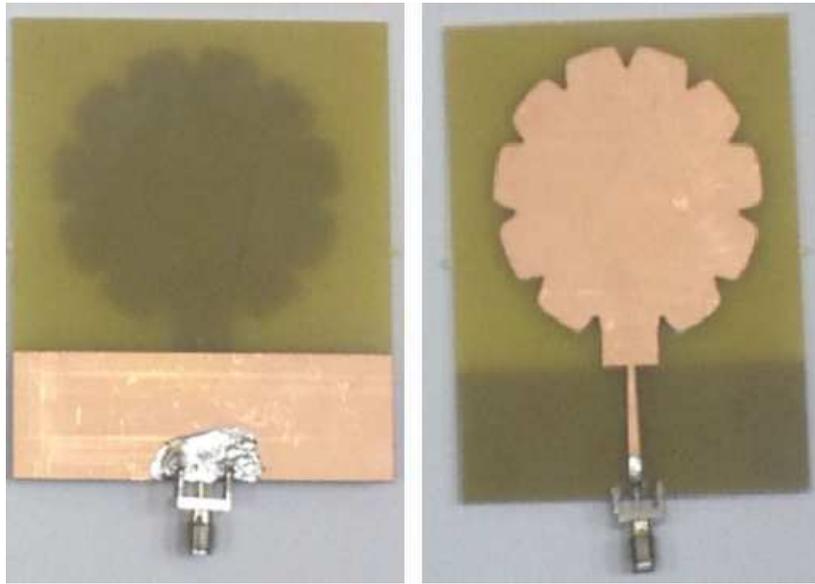


Figura 19: Antena fabricada bioinspirada na flor anêmona. Largura 66 mm; comprimento: 94 mm.

**Fonte:** Elaboração própria.

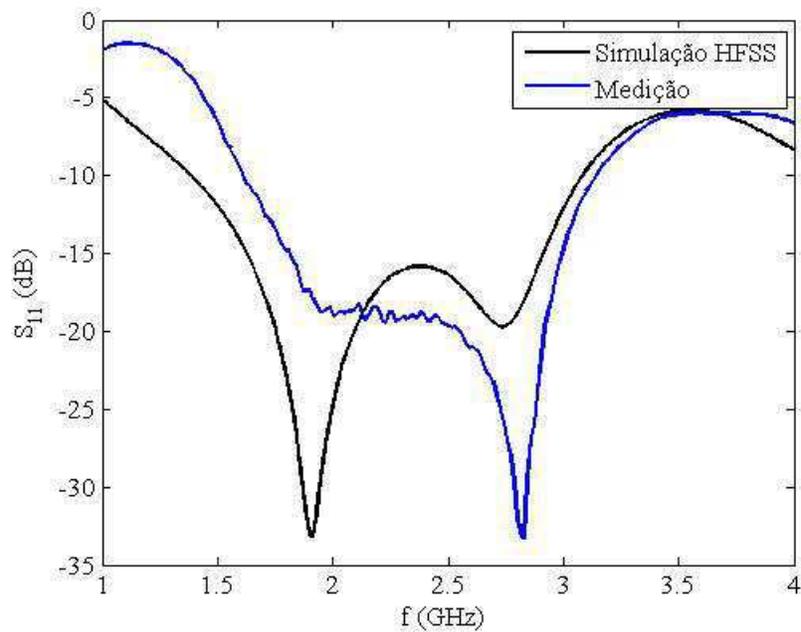


Figura 20: Perdas de retorno para a antena bioinspirada na flor de anêmona.

**Fonte:** Elaboração própria.

Ao realizar medições com analisador de espectro, os resultados obtidos foram expostos na Figura 21. Devido à banda passante desta antena ser maior do que as duas anteriores, é evidente que a sensibilidade desta antena também é maior, especialmente quando são realizadas medições em ambientes externos, cujos sinais medidos possuem frequências bem distintas entre si. Nesses locais, foi possível obter potências entre -40 e -50 dBm para as frequências 1,81; 1,87 e 2,14 GHz.

Nos testes *indoor*, a potência medida para 2,45 GHz foi -28 dBm. Este foi o melhor resultado dentre todas as medições realizadas e confirma a adequabilidade desta antena para a aplicação em sistemas de recuperação eletromagnética do ambiente com roteadores de Wi-fi e outros dispositivos que funcionam na frequência 2,45 GHz.

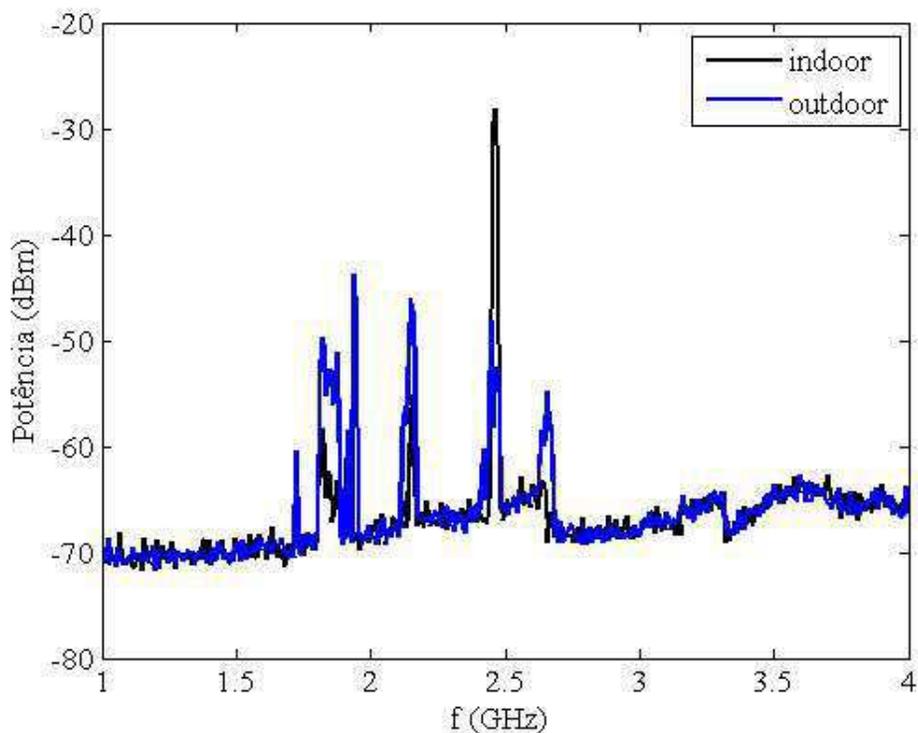


Figura 21: Análise espectral para a antena bioinspirada na flor de anêmona.

**Fonte:** Elaboração própria.

Para cada frequência detectada no analisador de espectro, simulou-se o diagrama de

irradiação da antena (ver Figura 22). No caso desta antena, o diagrama de irradiação para todas as frequências medidas foi omnidirecional (variando apenas o ganho), o que pode ser explicado pelo fato do plano de terra ser bastante reduzido nesta antena, visto que não há plano de terra embaixo do elemento irradiante.

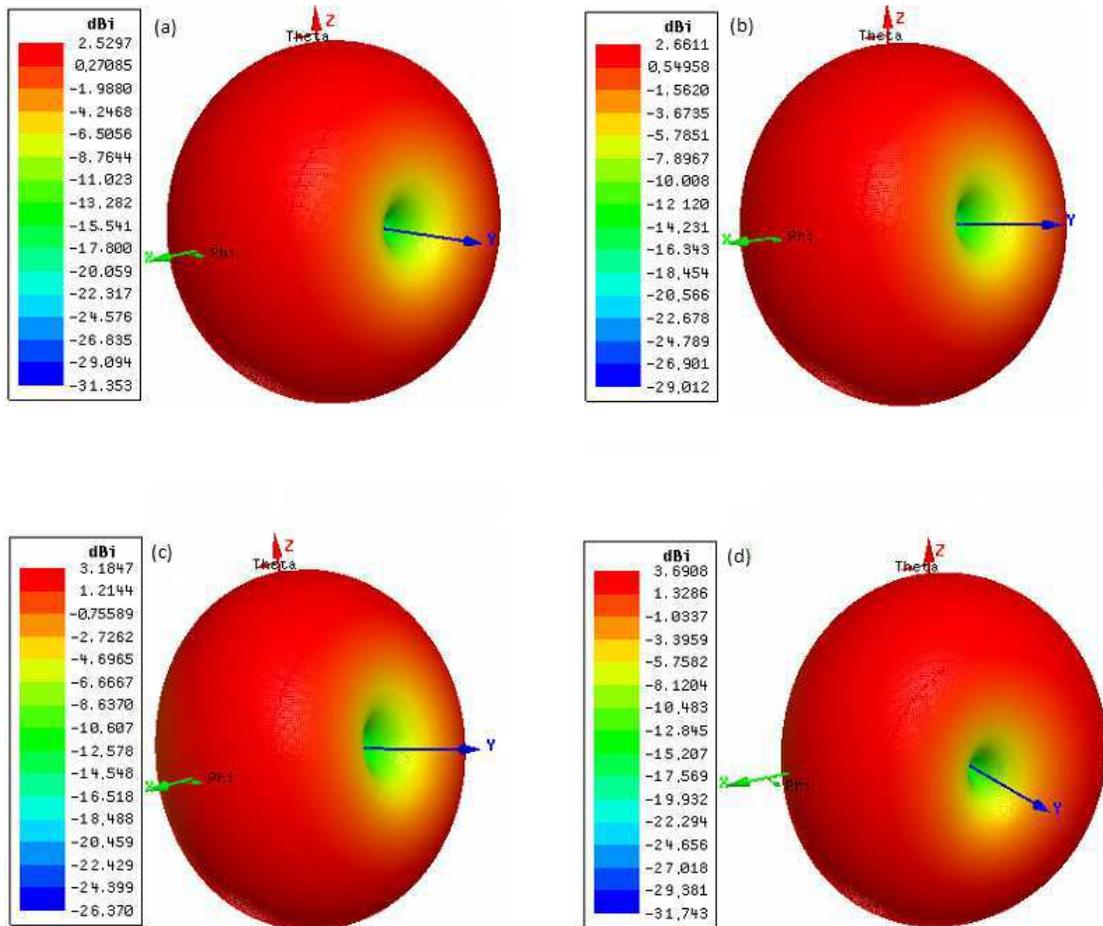


Figura 22: Diagrama de irradiação da antena bioinspirada na flor de anêmona. (a) 1,81 GHz; (b) 1,87 GHz; (c) 2,14 GHz, (d) 2,45 GHz.

**Fonte:** Elaboração própria.

### 5.3.4 Teste em sistema rectena

Usando um retificador e dobrador de tensão que foi desenvolvido em outro trabalho de mestrado em paralelo a este, testou-se o funcionamento das antenas para sistemas rectena. A antena bioinspirada na flor anêmona foi acoplada ao gerador de sinal RF, enquanto a antena bioinspirada na flor de tulipa foi ligada ao circuito retificador. A tensão CC obtida foi aplicada a uma carga resistiva de 470 ohms.

Os resultados para esta medição se baseiam na relação entre as potências de saída e entrada e podem ser vistas no gráfico da Figura 23. O funcionamento do sistema foi comprovado, visto que se obteve em alguns casos, centenas de milivolts contínuos na carga. Apesar do rendimento não ser bom, a potência obtida é suficiente para alimentar circuitos de baixíssimo consumo, como o conversor analógico-digital reportado em [63].

Para as antenas bioinspiradas nas flores de framboesa, tulipa e anêmona, a distância mínima para operação em campo distante a 2,45 GHz é de, respectivamente, 26,4 cm, 5,9 cm e 14,5 cm, conforme expressão citada na fundamentação teórica. O experimento foi realizado considerando esta distância.

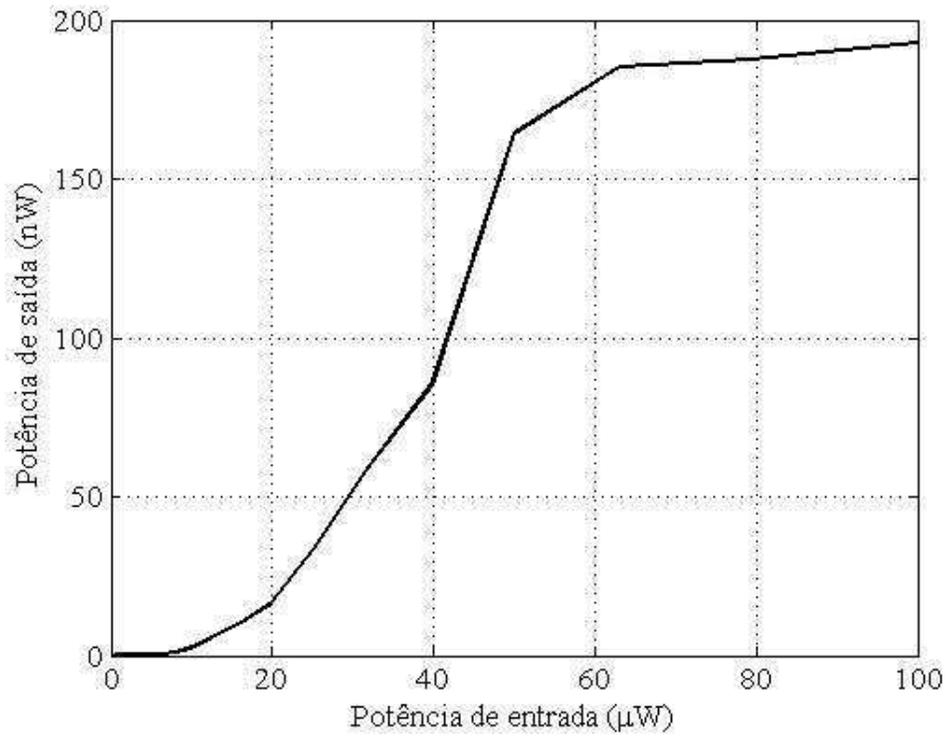


Figura 23: Teste do sistema rectena com antenas bioinspiradas.

**Fonte:** Elaboração própria.

## 6 Considerações finais

Nesta dissertação de mestrado, a temática de recuperação de energia é abordada. O assunto é de grande interesse da comunidade científica e tecnológica, pois está diretamente relacionado à eficiência energética de sistemas diversos (notadamente nós de RSSF). Apesar de a potência recuperada com os sistemas atuais ainda ser baixa, há muitos estudos que visam aumentar o rendimento dos recuperadores e já existem resultados preliminares satisfatórios, como exibido no estado-da-arte. Nesse contexto, estudou-se especificamente a recuperação de energia proveniente das ondas eletromagnéticas do ambiente por meio de rectenas.

Primordialmente deve-se considerar as particularidades de cada ambiente e dos sinais eletromagnéticos presentes nele. Nesse sentido, medições foram feitas com uma antena ultra banda larga comercial, na faixa de 1 a 4 GHz em um ambiente interno (dentro do LIMC-UFCG) e em outro externo (ao ar livre). Diferenças no espectro de cada ambiente foram constatadas. Externamente, prevalecem sinais ligados à telefonia móvel e internamente, os sinais de Wi-fi são aqueles que possuem maior potência. O projeto de antenas para recuperação de energia deve considerar primeiramente em qual ambiente esta será instalada para que a mesma possa ser otimizada para a faixa de frequência com maior potência.

Em paralelo, a comunidade científica tem se interessado no estudo e desenvolvimento de dispositivos bioinspirados, visto que se baseiam em elementos da natureza que evoluíram ao longo de bilhões de anos. Assim, antenas bioinspiradas em plantas são potenciais captadores de energia eletromagnética.

Optou-se pelo uso de antenas impressas, visto que elas tem baixo custo e são relativamente fáceis de se fabricar. Para obter formas e contornos bioinspirados, usou-se a expressão

matemática chamada de superfórmula de Gielis. Cada parâmetro da superfórmula influencia em um aspecto diferente na geometria obtida. Apesar de outros trabalhos encontrados na pesquisa bibliográfica fazerem referência à superfórmula de Gielis, eles não expõem os parâmetros da superfórmula que possibilitam a obtenção dos contornos bioinspirados, exceto Gielis em seu trabalho seminal. Nesse contexto, fez-se um estudo acerca dos parâmetros da superfórmula que possibilitam a obtenção de geometrias bioinspiradas em plantas, bem como a influência de cada parâmetro para a obtenção de variações de dada geometria bioinspirada em plantas.

Após esta etapa, três das topologias estudadas foram utilizadas para conceber antenas bioinspiradas em plantas. Todas foram simuladas e testadas com VNA e analisador de espectro, de maneira análoga àquela feita com a antena UWB comercial da Aaronia.

A antena inspirada na flor de framboesa teve o casamento de impedância relativamente fácil de fazer, bastando apenas uma linha de microfita para alimentá-la. Contudo, a antena em questão ficou com dimensões grandes e banda estreita.

As antenas bioinspiradas na flor de tulipa e na flor anêmona, apesar de mais compactas, necessitaram de uma linha do tipo MTAPER e diversas parametrizações para obter um casamento de impedância satisfatório na frequência de interesse. As bandas de passagem foram maiores do que a primeira antena fabricada neste trabalho.

Em seguida, ao testar as antenas fabricadas com analisador de espectro, constatou-se que em todas elas, os melhores resultados obtidos foram em 2,45 GHz, para medições que ocorreram em ambientes internos, sendo a antena anêmona a que teve maior captação e portanto, sendo a mais adequada dentre as três para esta aplicação.

Apesar de as discrepâncias entre valores simulados e medidos, foi possível constatar com os testes realizados que as antenas fabricadas podem ser usadas em sistemas rectenas, sendo possível, evidentemente, otimizá-las.

## 6.1 Trabalhos futuros

Levando em consideração que este é um trabalho preliminar e que ainda necessita de várias otimizações, sugestões para prosseguir nesta linha de pesquisa foram feitas.

Devido a diferenças consideráveis entre valores obtidos em algumas simulações e seus respectivos valores experimentais, sugere-se um estudo mais aprofundado do *software* utilizado a fim de realizar um modelo que se adeque melhor à realidade.

Sabendo que neste trabalho foram sugeridas muitas geometrias bioinspiradas com seus respectivos parâmetros da superfórmula de Gielis, e que nem todas foram usadas para conceber antenas, sugere-se a realização de outras antenas bioinspiradas com as formas aqui já propostas.

O analisador de espectro e o VNA usados funcionam apenas para frequências até 4 GHz. Assim sendo, é válido o estudo de faixas de frequência que vão além desta, bem como a análise de frequências menores, da ordem das centenas de megahertz, que não foi feita neste trabalho.

Pode-se considerar também outras formas de alimentação das antenas (sendo feita no meio da antena, usando vias, por exemplo). Isso evita o uso de linhas de transmissão suplementares e reduz o tamanho da estrutura. Contudo, essas técnicas são mais difíceis de implementar fisicamente.

Sugere-se, também, a otimização das antenas aqui desenvolvidas, melhorando o casamento de impedância e diminuindo o respectivo tamanho da estrutura, para obter maior potência na saída, quando operando como antenas receptoras.

As antenas bioinspiradas desenvolvidas, bem como as do estado da arte, têm polarização linear. O estudo de antenas bioinspiradas com polarização circular também é recomendado, pois este tipo de polarização é mais adequado para a aplicação de recuperação de energia.

Uma integração das antenas propostas com os circuitos retificadores citados no estado da arte é muito recomendada para a validação do uso delas em sistemas rectenas.

Por fim, o estudo da superfórmula de Gielis aqui realizado foi feito de maneira empírica. Assim, um estudo matemático mais detalhado sobre cada parâmetro da referida expressão pode ajudar a otimizar as estruturas bioinspiradas geradas por ela.

# Referências

- [1] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, *Energy Harvesting Technologies*, S. Priya and D. J. Inman, Eds. Boston, MA: Springer US, 2009, vol. 1. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-76464-1>
- [2] S. Pradhan, S. Ro, L. S.-k. Noh, and D.-y. Choi, “Comparative Study of Rectenna for Electromagnetic Energy Harvesting,” *International Journal of Control and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 101–112, 2014.
- [3] J. Hu, J. Jong, and C. Zhao, “Vibration energy harvesting based on integrated piezoelectric components operating in different modes,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 57, no. 2, pp. 386–394, 2 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5417197>  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/5417197/>
- [4] W. Wang, T. Yang, X. Chen, X. Yao, and Qifa Zhou, “Vibration energy harvesting using piezoelectric circular diaphragm array,” in *2011 International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF/PFM) and 2011 International Symposium on Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials*, vol. 59, no. 9. IEEE, 7 2011, pp. 1–4. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6014117>
- [5] F. J. Huang, T. C. Yo, C. M. Lee, and C. H. Luo, “Design of circular polarization antenna with harmonic suppression for rectenna application,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 592–595, 2012.

- [6] J. Moon and S. B. Leeb, “Power Electronic Circuits for Magnetic Energy Harvesters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 270–279, 1 2016.
- [7] K. A. Kim, S. Kim, and F. Bien, “Fluorescent light energy harvesting using a capacitive touch screen,” *Electronics Letters*, vol. 51, no. 21, pp. 1695–1697, 10 2015. [Online]. Available: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el.2015.2108>
- [8] V. Kotipalli, Zhongcheng Gong, Yuan He, S. Yadav, S. Penmetsa, Jianjun Wei, and Long Que, “Carbon nanotube film-based cantilever for light and thermal energy harvesting,” in *2010 IEEE Sensors*. IEEE, 11 2010, pp. 1165–1168. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5690697>
- [9] M. Gueltig, B. Haefner, M. Ohtsuka, and M. Kohl, “Thermal energy harvesting based on ferromagnetic shape memory alloy microactuation,” in *2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, no. June. IEEE, 6 2013, pp. 2803–2806. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6627388>
- [10] T. Huesgen and P. Woias, “A novel self-starting MEMS-heat engine for thermal energy harvesting,” in *2010 IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. IEEE, 1 2010, pp. 1179–1182. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5442422>
- [11] Y. Xia, J. Zhou, T. Chen, H. Liu, W. Liu, Z. Yang, P. Wang, and L. Sun, “A hybrid flapping-leaf microgenerator for harvesting wind-flow energy,” in *2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, no. January. IEEE, 1 2016, pp. 1224–1227. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7421858>
- [12] Y. K. Tan and S. K. Panda, “Self-Autonomous Wireless Sensor Nodes With Wind Energy Harvesting for Remote Sensing of Wind-Driven Wildfire Spread,” *IEEE Transactions*

- on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 4, pp. 1367–1377, 4 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5701670>
- [13] Y. H. Suh and K. Chang, “A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 7, pp. 1784–1789, 2002.
- [14] B. Strassner and K. Chang, “5.8-GHz circularly polarized rectifying antenna for wireless microwave power transmission,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 8, pp. 1870–1876, 2002.
- [15] J. Hagerty, F. Helmbrecht, W. McCalpin, R. Zane, and Z. Popovic, “Recycling Ambient Microwave Energy With Broad-Band Rectenna Arrays,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 3, pp. 1014–1024, 3 2004. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1273745>
- [16] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, J. Zhang, S. Yuan, and P. Carter, “A High-Efficiency Broadband Rectenna for Ambient Wireless Energy Harvesting,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 8, pp. 3486–3495, 2015.
- [17] C. Song, Y. Huang, J. Zhou, S. Yuan, Q. Xu, and P. Carter, “A Broadband Efficient Rectenna Array for Wireless Energy Harvesting,” in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Lisbon, 2015, pp. 1–5. [Online]. Available: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=7228686](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7228686)
- [18] G. Indumathi and K. Karthika, “Rectenna design for RF energy harvesting in wireless sensor networks,” in *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. IEEE, 3 2015, pp. 1–4. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7226171>
- [19] H. Cho, Y. Cho, C. Shin, and J. Park, “A Study on Renewable Energy Harvesting and Circuit Design Based on a Maximum Power Point,” in *International Journal of*

- Multimedia and Ubiquitous Engineering*, vol. 8, no. 2, 2013, pp. 111–122. [Online]. Available: [http://www.sersc.org/journals/IJMUE/vol8\\_no2\\_2013/11.pdf](http://www.sersc.org/journals/IJMUE/vol8_no2_2013/11.pdf)
- [20] H. Sun, Y. X. Guo, M. He, and Z. Zhong, “A dual-band rectenna using broadband yagi antenna array for ambient rf power harvesting,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 918–921, 2013.
- [21] W. Brown, “The History of Power Transmission by Radio Waves,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1230–1242, 9 1984. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1132833>
- [22] J. A. Hagerty, N. D. Lopez, B. Popovic, and Z. Popovic, “Broadband Rectenna Arrays for Randomly Polarized Incident Waves,” in *30th European Microwave Conference, 2000*. IEEE, 10 2000, pp. 1–4. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4139770>
- [23] T. Paing, J. Morroni, A. Dolgov, J. Shin, J. Brannan, R. Zane, and Z. Popovic, “Wirelessly-powered wireless sensor platform,” in *2007 European Microwave Conference*, no. October. IEEE, 2007, pp. 999–1002. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4405364>
- [24] K. Niotaki, S. Kim, S. Jeong, A. Collado, A. Georgiadis, and M. M. Tentzeris, “A Compact Dual-Band Rectenna Using Slot-Loaded Dual Band Folded Dipole Antenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1634–1637, 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6678723>
- [25] P. F. da Silva Junior, J. Silva, and P. Silva, “Projeto uma antena de folha para 700 MHz,” in *MOMAG 2014: 16º SBMO-Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag-Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, 2014, pp. 758–763.
- [26] A. N. Silva, H. F. Paiva, J. J. R. Barros, N. A. Lemos, and P. F. da Silva Junior, “Four-leaf clover UWB planar monopole antenna,” in *MOMAG 2014: 16º SBMO-Simpósio*

*Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag-Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo2*, 2014, pp. 909–912.

- [27] M. Ameya, Y. Ito, M. Yamamoto, and T. Nojima, “2-Element UWB array antenna using leaf-shaped bowtie element,” in *2007 IEEE Antennas and Propagation International Symposium*. IEEE, 6 2007, pp. 1961–1964. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4395906>
- [28] Antennas Committee IEEE Antennas and Propagation Society, “IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas,” Tech. Rep., 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6758441>
- [29] D. Bouchouicha, “Etude de faisabilité de la récupération d’énergie électromagnétique ambiante,” Ph.D. dissertation, Université François-Rabelais, 2010. [Online]. Available: <http://www.theses.fr/2010TOUR4030/document>
- [30] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005, vol. 3.
- [31] T. Albuquerque, T. Silva, A. Serres, R. Freire, J. Walheim, F. Podevin, F. Burdin, P. Ferrari, and T. P. Vuong, “Implementation of beam-steering front-ends at 2.45 GHz using modified Wilkinson power dividers, reflexion type phase shifters and C-shape monopole antennas: First results,” in *2015 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. IEEE, 11 2015, pp. 1–5. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7369191>
- [32] T. Albuquerque, R. Freire, A. Serres, T. Silva, J. Walheim, F. Podevin, F. Burdin, P. Ferrari, and T. P. Vuong, “Modified Wilkinson Power Divider and Dipole Antenna for Beamforming Systems at 5.8 GHz,” in *CHIP ON THE MOUNTAINS - 1st INSCIT – Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers*, Belo Horizonte, 2016, pp. 10–14.

- [33] N. Shinohara, “Rectennas for microwave power transmission,” *IEICE Electronics Express*, vol. 10, no. 21, pp. 1–13, 2013.
- [34] W. Brown, J. Mims, and N. Heenan, “An experimental microwave-powered helicopter,” in *IRE International Convention Record*, vol. 13, no. October. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1964, pp. 225–235. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1147518>
- [35] R. Gutmann and R. Gworek, “Yagi-Uda Receiving Elements in Microwave Power Transmission system Rectennas,” *Journal of Microwave Power*, vol. 14, no. 4, pp. 313–320, 1 1979. [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/16070658.1979.11689166>
- [36] Y. Fujino, M. Fujita, N. Kaya, S. Kunimi, M. Ishii, N. Ogihara, N. Kusaka, and S. Ida, “A dual polarization microwave power transmission system for microwave propelled airship experiment,” in *Proceedings Of The International Symposium On Antennas And Propagation Japan*, 1996, pp. 393–396.
- [37] C.-H. Chin, Q. Xue, and C. Chan, “Design of a 5.8-GHz Rectenna Incorporating a New Patch Antenna,” *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 175–178, 12 2005. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1430660>
- [38] X. X. Yang, C. Jiang, A. Z. Elsherbeni, F. Yang, and Y. Q. Wang, “A novel compact printed rectenna for data communication systems,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 5, pp. 2532–2539, 2013.
- [39] V. Kuhn, C. Lahuec, F. Seguin, and C. Person, “A Multi-Band Stacked RF Energy Harvester With RF-to-DC Efficiency Up to 84%,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 5, pp. 1768–1778, 5 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7080943>

- [40] M. N. Ruiz and J. A. Garcia, “An E-pHEMT self-biased and self-synchronous class e rectifier,” *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 9, no. 1, pp. 1–4, 2014.
- [41] J.-w. Zhang, Y. Huang, and P. Cao, “An Investigation of Wideband Rectennas for Wireless Energy Harvesting,” *Wireless Engineering and Technology*, vol. 5, no. October, pp. 107–116, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4236/wet.2014.54012>
- [42] W. Brown and J. Triner, “Experimental Thin-Film, Etched-Circuit Rectenna,” in *MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 82. MTT005, 1982, pp. 185–187. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1130655>
- [43] P. Koert and J. Cha, “Millimeter wave technology for space power beaming,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 6, pp. 1251–1258, 6 1992. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=141358>
- [44] Hucheng Sun, Yong-xin Guo, Miao He, and Zheng Zhong, “Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 929–932, 2012. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6262453>
- [45] G. Monti, L. Tarricone, and M. Spartano, “X-Band Planar Rectenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1116–1119, 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6036144>
- [46] E. Falkenstein, M. Roberg, and Z. Popovic, “Low-Power Wireless Power Delivery,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 7, pp. 2277–2286, 7 2012. [Online]. Available: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6197731](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6197731)  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6197731>

- [47] Z. Harouni, “Conception et caractérisation d’une Rectenna à double polarisation Circulaire à 2.45 GHz,” 2011. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00682898/>
- [48] T. W. Yoo and K. Chang, “Theoretical and Experimental Development of 10 and 35 GHz Rectennas,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 6, pp. 1259–1266, 1992.
- [49] A. A. Lotfi Neyestanak, “Ultra Wideband Rose Leaf Microstrip Patch Antenna,” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 86, no. 68, pp. 155–168, 2008. [Online]. Available: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=08090201>
- [50] A. N. Askarpour, A. Gholipour, and R. Faraji-Dana, “A Band-Notched Tulip Antenna for UWB Applications,” in *2008 38th European Microwave Conference*, vol. 1, no. October. IEEE, 10 2008, pp. 881–884. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4751594>
- [51] O. M. H. Ahmed and A. R. Sebak, “A Novel Maple-Leaf Shaped UWB Antenna With A 5.0-6.0 GHz Band-Notch Characteristics,” *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 11, pp. 39–49, 2009. [Online]. Available: <http://www.jpier.org/PIERC/pier.php?paper=09091107>
- [52] R. Seetharaman, E. Gowtham Raj, P. Geethanjali, S. Hariram, and M. Kannan, “Printed Leaf Shaped Monopole Antenna,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 43, no. 5, pp. 6–13, 4 2012. [Online]. Available: <http://research.ijcaonline.org/volume43/number5/pxc3878289.pdf>
- [53] H. Nakano, Y. Ogino, and J. Yamauchi, “Bent Four-Leaf Antenna,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 223–226, 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5738658>
- [54] M. Yamamoto, T. Koyanagi, and T. Nojima, “Leaf-shaped bowtie antenna backed by a periodic patch-loaded grounded slab,” in *2011 IEEE Inter-*

- national Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*. IEEE, 7 2011, pp. 622–625. [Online]. Available: [ap-s.ei.tuat.ac.jp/isapx/2010/pdf/114.pdf](http://ap-s.ei.tuat.ac.jp/isapx/2010/pdf/114.pdf)  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5996788>
- [55] Federal Communication Commission, “Revision of Part 15 of the Commission’s Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems,” *First Report and Order in ET*, no. FCC02-48, pp. 1–118, 2002. [Online]. Available: <http://ci.nii.ac.jp/naid/10011635689/>
- [56] M. Yamamoto, D. Tokuyama, and T. Nojima, “Design of quasi-millimeter wave leaf-shaped bowtie array antenna for uwb applications,” *2010 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and CNC-USNC/URSI Radio Science Meeting - Leading the Wave, AP-S/URSI 2010*, pp. 4–7, 2010.
- [57] M. Pinuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, “Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 7, pp. 2715–2726, 7 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6519964>
- [58] H. J. Visser, A. C. F. Reniers, and J. A. C. Theeuwes, “Ambient RF Energy Scavenging: GSM and WLAN Power Density Measurements,” in *2008 38th European Microwave Conference*, no. October. IEEE, 10 2008, pp. 721–724. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4751554>
- [59] M. Pinuela, D. Yates, P. Mitcheson, and S. Lucyszyn, “London RF survey for radiative ambient RF energy harvesters and efficient DC-load inductive power transfer,” *IEEE 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, no. Eucap, pp. 2839–2843, 2013.
- [60] Aaronia, “Active directional antenna up to 20GHz HyperLOG® 30 X Series,” pp. 1–7, 2011. [Online]. Available: <http://www.aaronia.com/Datasheets/Antennas/Active-Directional-Antenna-HyperLOG3080X.pdf##>

- [61] Johan GIELIS, “A Generic Geometric Transformation That Unifies A Wide Range Of Natural And Abstract Shapes,” *American Journal of Botany*, vol. 90, pp. 333–338, 2003. [Online]. Available: <http://www.amjbot.org/cgi/doi/10.3732/ajb.90.3.0>
- [62] ANSYS, “ANSYS HFSS - High Frequency Electromagnetic Field Simulation,” 2016. [Online]. Available: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>
- [63] M. Liu, K. Pelzers, R. van Dommele, A. van Roermund, and P. Harpe, “A 106 nW 10 b 80 kS/s SAR ADC With Duty-Cycled Reference Generation in 65 nm CMOS,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 10, pp. 1–11, 2016. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7524788/>