

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO RENAN ZAMPIER

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ANTENAS FRACTAIS EM DISPOSITIVOS DE RFID

CURITIBA

2018

LEONARDO RENAN ZAMPIER

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ANTENAS FRACTAIS EM DISPOSITIVOS DE RFID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de engenheiro eletricista da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Dartora

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

LEONARDO RENAN ZAMPIER

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ANTENAS FRACTAIS EM DISPOSITIVOS DE RFID

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de engenheiro eletricitista da Universidade Federal do Paraná.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. César Augusto Dartora
Orientador, Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. PhD. Horácio Tertuliano dos Santos Filho
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Prof. PhD. André Augusto Mariano
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 26 de junho de 2018

AGRADECIMENTOS

À minha família, que sempre me apoiou nas dificuldades enfrentadas ao longo do curso.

Ao meu orientador, por todo o conhecimento transmitido durante o curso e durante este trabalho.

Aos meus orientadores dos estágios, que contribuíram com a minha formação pessoal e profissional.

Aos meus amigos da Bateria do C7, que me ajudaram a aproveitar o período de graduação fora das salas de aula.

Cientistas de hoje substituíram a matemática por experiências, e eles afastam-se, equação depois de cada equação, e eventualmente constroem uma estrutura que não tem nenhuma relação com a realidade.

Nikola Tesla

RESUMO

Com a evolução das comunicações e o crescimento da internet das coisas (IoT), a comunicação RFID tem se desenvolvido cada vez mais. O presente trabalho de conclusão de curso tem a finalidade de projetar e entender o impacto da utilização de geometria fractal, que tem se mostrado muito útil em diversos campos de pesquisa, em antenas de dispositivos RFID. Esta geometria tem sido estudada com aplicações na engenharia por suas peculiaridades quando colocadas lado a lado com a geometria já utilizada. Em rádio frequência esta geometria pode nos propiciar ganhos mais elevados para uma antena com as mesmas dimensões físicas, otimização da área ocupada pela antena e até antenas que ressonam em mais que uma frequência com valores muito baixos de perdas de retorno. A utilização de fractais pretende comparar suas vantagens e desvantagens perante modelos mais difundidos de antenas para dispositivos RFID.

Palavras chave: Antena fractal. Geometria fractal. RFID.

ABSTRACT

This research project has the purpose of design and understand the impact of fractal geometry use in RFID antennas. The fractal geometry has been studied in engineering applications because of its peculiarity when compared with the traditional geometry. In radio frequency, this geometry can provide higher gains in an antenna with the same delimited physical dimensions, optimization of the area filled by the antenna and it can be used to design a multifrequency antenna with much smaller return loss. The use of fractal geometry intends to compare its advantages and disadvantages between other popular antenna models used in RFID.

Key-words: Fractal antenna. Fractal Geometry. RFID.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Faixas de frequências e suas aplicações (FINKENZELLER, 2003).	15
Figura 2: Representação da propagação eletromagnética em corte vertical de antena de microfita (WOLFF, 2014).	15
Figura 3: Representação da propagação da onda através da antena (BALANIS, 2005).	20
Figura 4: Representação dipolo infinitesimal (BALANIS, 2005).	21
Figura 5: Representação gráfica de antena dipolo elétrico de meia onda (ORFANIDIS, 2016)	22
Figura 6: Representação de antena de microfita (acima) e comportamento do campo elétrico no substrato dielétrico (abaixo) (BALANIS, 2005)	23
Figura 7: Exemplo de geometria utilizada para antenas patch (BALANIS, 2005)	24
Figura 8: Modelo de antena dipolo de microfita, utilizada em sistemas RFID. (ALIEN TECHNOLOGY, 2013)	24
Figura 9: Representação das 4 primeiras ordens da curva fractal de Hilbert (VINOY et al., 2001)	25
Figura 10: Exemplo de antena monopolo utilizando o fractal de Sierpinski (FUSCO, 2006)	27
Figura 11: Composição do fractal de Hilbert (VINOY; JOSE, 2001)	29
Figura 12: Representação esquemática (à esq.) do balun e um exemplo de balun com núcleo toroidal (à dir.) (O autor, 2018)	33
Figura 13: Representação de balun sem núcleo, feito com cabo coaxial. (O autor, 2018)	33
Figura 14: Configuração utilizada para medir a impedância da antena (O autor, 2018)	34
Figura 15: Configuração para medição do diagrama de radiação da antena proposta.(O autor, 2018)	34
Figura 16: Indicação das variáveis no layout da antena (O autor, 2018)	36
Figura 17: À esquerda a antena implementada na placa, e à direita o layout em papel couchet utilizado (O autor, 2018).	38
Figura 18: RF Impedance Analyzer Agilent HP4191A (O autor, 2018).	39
Figura 19: Baluns contruídos para alimentar a antena (O autor, 2018)	39

Figura 20: Exemplo de fractal de Hilbert de quarta ordem, implementado no HFSS para simulação matemática (O autor, 2018)	40
Figura 21: Parâmetro S11 das três primeiras iterações do fractal de Hilbert sendo elas: 1-amarelo, 2-azul, 3-vermelho. (O autor,2018)	40
Figura 22: Plot das impedâncias do blaun com núcleo de ferrita (O autor, 2018).	41
Figura 23: Plot das impedâncias do balun confeccionado apenas por cabo coaxial (O autor, 2018)	42
Figura 24: Plot dos dados da impedância medida para as antenas 0, 1 e 2 (O autor, 2018)	43
Figura 25: duas configurações utilizadas para a coleta de dados, vertical (á esq.) e horizontal (á dir.) (O autor, 2018)	44
Figura 26: Plots de radiação com polarização vertical e horizontal da antena 0. (O autor, 2018)	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Medidas primeiras antenas	37
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RFID	Radio Frequency Identification
IoT	Internet of things
PCB	Printed Circuit Board
NF RFID	Near-field Radio Frequency Identification
ISM	Industrial, scientific or medical applications
HFSS	High Frequency Structure Simulator
LAMMI	Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação
LACEM	Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO	17
1.1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	ANTENAS	20
2.1.1	ANTENAS DIPOLO ELÉTRICO.....	21
2.1.2	ANTENAS DE MICROFITA.....	23
2.2	GEOMETRIA FRACTAL.....	24
2.2.1	HISTÓRIA	24
2.2.2	FRACTAL DE HILBERT	25
2.2.3	FRACTAIS EM TELECOMUNICAÇÕES	26
2.2.4	SISTEMA RFID	27
3	METODOLOGIA DOS CÁLCULOS E DE COLETA DE DADOS PRÁTICOS.....	29
3.1	MODELAGEM MATEMÁTICA	29
3.2	MEDIDA DA IMPEDÂNCIA DA ANTENA	32
3.3	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	DESIGN.....	36
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO	37
4.3	MEDIDA DA IMPEDÂNCIA DA ANTENA	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
5.1	SIMULAÇÕES.....	40
5.2	PROTÓTIPOS.....	41
5.2.1	IMPEDÂNCIAS.....	41
5.2.2	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO	43
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
6.1	CONCLUSÕES.....	45
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
7	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Os códigos de barras revolucionaram os sistemas de informação alguns anos atrás, visto seu baixo custo e facilidade de implementação em pouco tempo já estavam sendo utilizados para identificação de produtos, pacotes e demais finalidades na indústrias e serviços. Porém, devido à sua limitação de armazenamento de dados e a falta da capacidade de regravar informações, procurou-se uma alternativa mais maleável e tecnológica para ocupar seu lugar (FINKENZELLER, 2003).

Com o crescimento do conceito de Internet das coisas (*IoT*), métodos de identificação por radiofrequências (RFID) têm se tornado cada vez populares nas mais variadas formas de aplicação. Estes tipos de identificação automática são utilizados para fornecer informações sobre pessoas, bens, produtos e animais em trânsito. Estes dispositivos consistem em um leitor (*reader*) e um *tag*, ambos têm antenas na sua composição, dada a necessidade de transmissão de dados sem fio. Comumente, o tipo de antenas utilizadas nestes casos é a antena de microfita (*microstrip*) visto sua versatilidade para projetar e seu ganho relativamente alto para este tipo de aplicação de campo próximo.(FINKENZELLER, 2003; YIN-KUN et al., 2014).

O espectro de frequências é dividido em faixas, as quais podem ser reservadas para certos tipos de aplicação como a industrial, científica e médica (do inglês *ISM bands*). Assim como outros dispositivos amplamente utilizados para comunicação sem fio, RFIDs têm faixas de frequências específicas: LF, HF, UHF e micro-ondas. No entanto as faixas de frequências para RFID não são alocadas igualmente ao redor do mundo, havendo algumas diferenças de país para país (HUNT; PUGLIA; PUGLIA, 2006).

As faixas de frequências mais utilizadas para aplicações RFID são: 0 a 135 kHz, bandas ISM em torno de 6.78 MHz, 13.56 MHz, 27.125 MHz, 40.68 MHz, 433.92 MHz, 869.0 MHz, 915.0 MHz, 2.45 GHz, 5.8 GHz e 24.125 GHz. Destas, as frequências entre 0 e 135kHz e as entre 888 MHz e 956 MHz são as mais amplamente utilizadas, sendo que as faixas são divididas oficialmente em (FINKENZELLER, 2003; HUNT; PUGLIA; PUGLIA, 2006):

- 868–870 MHz – Europa
- 888–889 MHz – Estados Unidos
- 902–928 MHz – Estados Unidos
- 918–926 MHz – Austrália
- 950–956 MHz – Japão

A Figura 1 expressa graficamente parte do espectro de frequências.

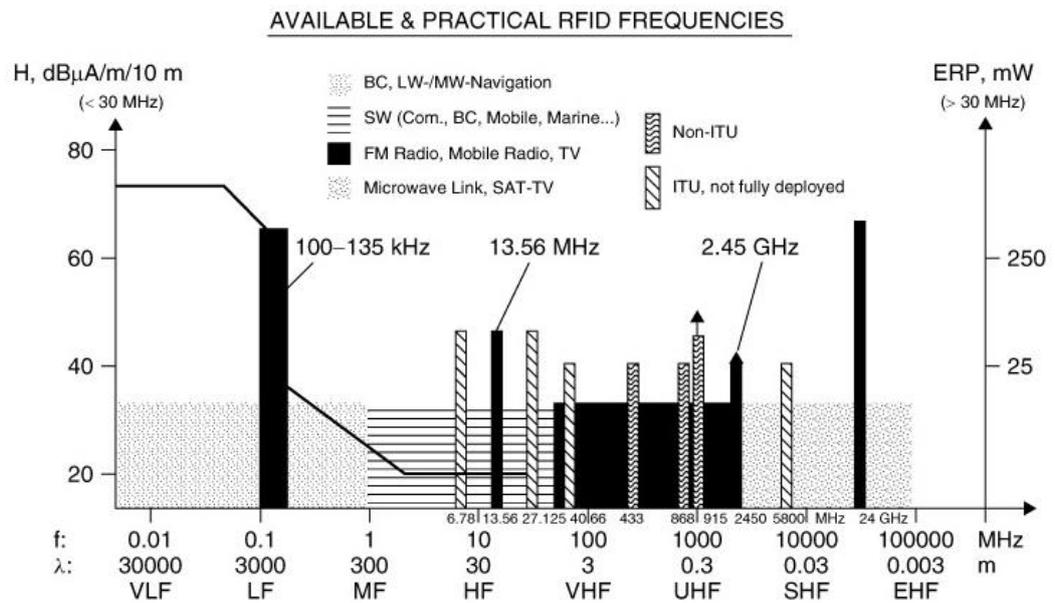


Figura 1: Faixas de frequências e suas aplicações (FINKENZELLER, 2003).

Antena de microfita são projetadas e desenvolvidas sob placas de circuitos impressos (PCBs), onde o conceito de linhas de transmissão é colocado em prática tendo o dielétrico do material da placa e o dielétrico do ar, o que forma o conceito da irradiação deste tipo de antena, conforme demonstrado na Figura 2.

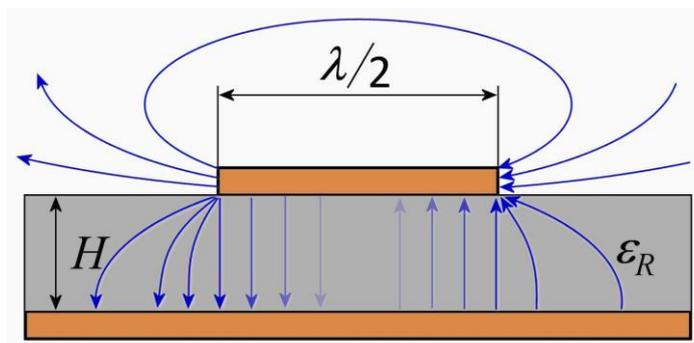


Figura 2: Representação da propagação eletromagnética em corte vertical de antena de microfita (WOLFF, 2014).

A geometria fractal, conhecida como geometria da natureza, descreve na sua forma infinita um padrão geométrico que se repete em todas as escalas do objeto analisado. Dentro da engenharia, padrões de diferentes ordens são estudados dentro da aplicação de radiofrequência, capacitância, termodinâmica entre outros.

A aplicação da geometria fractal em antenas de microfita proporciona efeitos de ressonância em mais que uma frequência e ganhos elevados se comparados à outras antenas de mesma dimensão física. Estes fatores fazem com que as antenas fractais sejam um campo de estudo interessante para a área de comunicação sem fio de curta distância como RFID e *wifi*.

Para sistemas de comunicação RFID de campo próximo (NF RFID) o primeiro problema que pode atrapalhar o projeto da antena são obstáculos que podem comprometer a capacidade da leitura dos *tags*, como por exemplo a carcaça utilizada no dispositivo, água em casos de aplicações externas e qualquer tipo de metal que possa interferir no campo eletromagnético entre o leitor e o *tag*.

Outro problema está na dimensão das antenas, visto que cada vez mais os dispositivos tendem a ser menores, principalmente os *tags*, e o tamanho da antena pode afetar diretamente as dimensões do produto final.

A frequência e o modelo de fractal a serem utilizados serão cruciais para que o estudo demonstre as vantagens e desvantagens destes para este tipo de aplicação, podendo justificar a substituição de modelos hoje utilizados ou não.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa visa o desenvolvimento de uma antena com geometria fractal, montada em microfita para aplicação em *tags* RFID, para desenvolver um protótipo simples para aquisição de dados reais, a fim de comparar a aplicação deste tipo de antenas, a vantagem de seu uso e a comparação de funcionalidades em relação às aquelas mais difundidas para a função. Para atingir este objetivo, serão utilizados para as simulações computacionais o software do tipo QCAD para o layout da antena e no software HFSS (*High Frequency Structure Simulator*) e para o desenvolvimento prático serão utilizados os equipamentos disponíveis no laboratório de corrosão de placas, além de analisador de espectro, analisador de impedâncias e a câmara anecoica para aquisição dos dados práticos necessários.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, podem ser listados:

- Revisão da literatura:
 - Antenas dipolo elétrico e antena de microfita;
 - Tecnologia RFID;
 - Geometria fractal;
- Estudar os efeitos eletromagnéticos desta geometria;
- Modelar matematicamente a antena a ser implementada;
- Simular a antena projetada em software de elementos finitos;
- Conceber a antena dentro dos valores calculados;
- Testar a antena em laboratório;
- Analisar os resultados obtidos em laboratório juntamente com os valores calculados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dada a necessidade de otimizar a área ocupada pela antena do *tag* dos dispositivos RFID, este estudo se faz necessário para comparar as funcionalidades da geometria. Serão avaliadas as características físicas da antena como por exemplo a área da placa utilizada e custo de produção, mas o objetivo final é analisar o comportamento eletromagnético da antena, seu ganho e suas vantagens perante outros tipos de antena mais utilizados no mercado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho se utilizará diversos conhecimentos adquiridos nas disciplinas já cursadas de Eletromagnetismo, Ondas Eletromagnéticas, Antenas, Propagação e Circuitos de Rádio Frequência, as quais serão de suma importância para os desenvolvimentos teóricos dos efeitos de linhas de transmissão, propagação de ondas eletromagnéticas, concepções práticas e análise dos resultados

O trabalho será subdividido em capítulos, sendo eles cinco além da introdução: Referencial Teórico, Metodologia Dos Cálculos e de Coleta De Dados Práticos, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões e as Conclusões e Sugestões para Trabalho Futuros.

No primeiro subcapítulo deste trabalho teremos um apanhado geral sobre as teorias de antenas, geometria fractal e RFID, que serão aplicadas ao longo do projeto.

A segunda parte abrangerá os métodos que serão utilizados, tanto de cálculo quanto para simulações e medidas práticas.

A terceira parte será o desenvolvimento do protótipo da antena em si, sua concepção, verificação e testes preliminares.

Na quinta etapa serão discutidos os resultados obtidos, comparando-os com os dados teóricos e simulados.

Na última etapa serão comentadas as conclusões sobre o trabalho e o que pode ser continuado e melhorado futuramente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ANTENAS

Antenas são definidas pelo dicionário Aurélio como “condutor elétrico empregado nas comunicações sem fio, para facilitar a irradiação e a captação das ondas eletromagnéticas”. As comunicações sem fio são diversas, como televisão, rádio e telefonia por exemplo, e assim como variam as aplicações, variam os tipos de antenas que serão aplicados para cada caso. Na **Figura 3** temos a representação da onda da fonte até o espaço livre não guiado, que é seu meio de propagação após sair da antena.

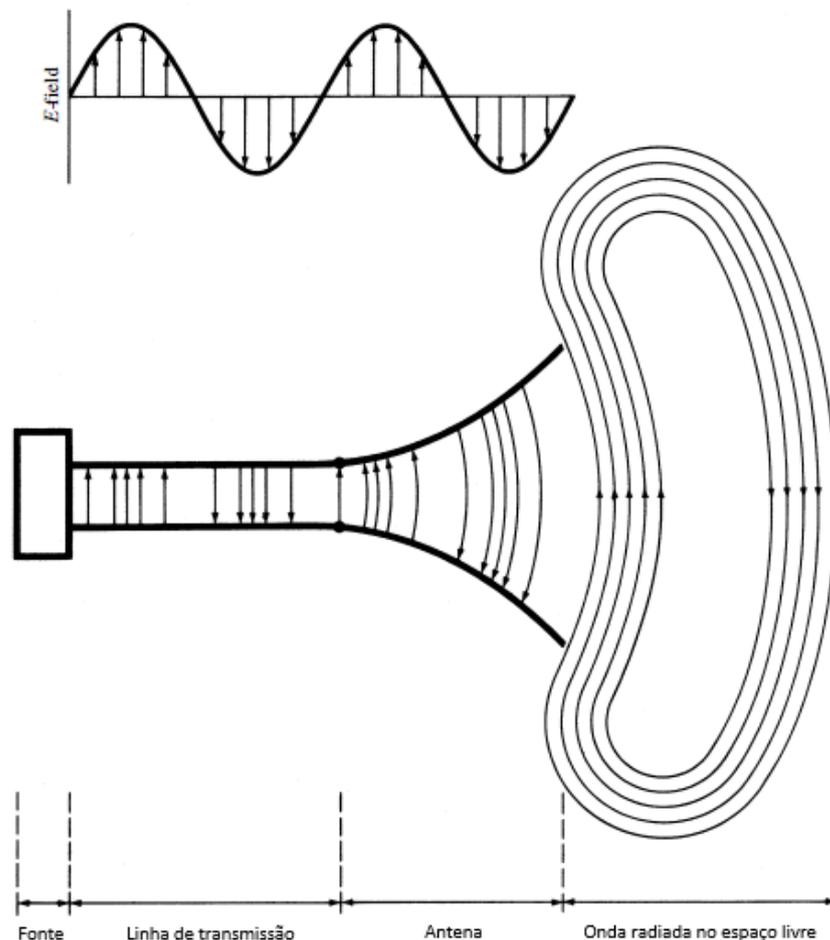


Figura 3: Representação da propagação da onda através da antena (BALANIS, 2005).

As antenas podem ser classificadas em antenas fio, de abertura, microfita, de arranjo, de refletor e de lente. Neste tópico serão abordados os tipos de antena relacionados diretamente com o estudo realizado.

2.1.1 ANTENAS DIPOLO ELÉTRICO

São classificadas como dipolo elétrico as antenas com alimentação diferencial, ou seja, alimentação balanceada, nas quais a distribuição de corrente nos condutores e dimensão física dos mesmos definirão o comportamento eletromagnético da antena.

Segundo Constantine A. Balanis, em seu livro “*Antenna Theory - Analysis and Design*” (2005), podemos classificar dipolos elétricos lineares pela sua dimensão física com relação ao comprimento de onda a ser utilizado, assim temos dipolos infinitesimais ($l \ll \lambda$), dipolos curtos ($\frac{\lambda}{50} < l \leq \frac{\lambda}{10}$), dipolos de meia onda ($l = \frac{\lambda}{2}$) e dipolos finitos (qualquer tamanho).

2.1.1.1 DIPOLOS INFINITESIMAIS

Dipolos infinitesimais são dipolos com o comprimento total muito menor que o comprimento de onda a ser utilizado ($l \ll \lambda$), fazendo com que a distribuição de corrente em \hat{a}_z seja uniforme.

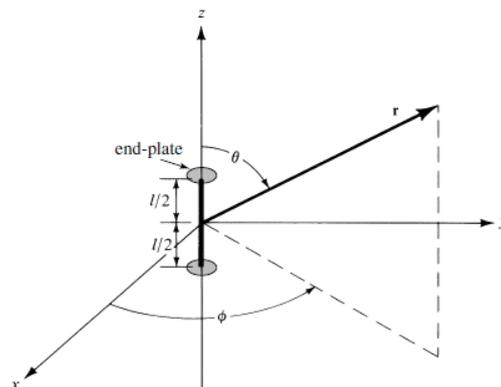


Figura 4: Representação dipolo infinitesimal (BALANIS, 2005).

$$I(z') = \hat{a}_z I_0 \quad (1)$$

2.1.1.2 DIPOLOS CURTOS

Dipolos curtos são as configurações onde o comprimento da antena tem o está contido no intervalo $\frac{\lambda}{50} < l \leq \frac{\lambda}{10}$. Tem as vantagens de fácil construção devido ao seu tamanho e boa eficiência. Entre as desvantagens podemos listar:

- Grandes perdas resistivas;
- Relação sinal-ruído elevada;
- Baixa radiação

Geralmente utilizados em aplicações de banda estreita e circuitos com sintonizadores.

2.1.1.3 DIPOLO DE MEIA ONDA

É o tipo de antena mais simples e mais utilizado, devido à sua praticidade e baixo custo, é o dipolo onde o comprimento total do dipolo é igual a $\frac{\lambda}{2}$, sendo que cada lado tem comprimento de $\frac{\lambda}{4}$, conforme mostrado na Figura 5 abaixo.

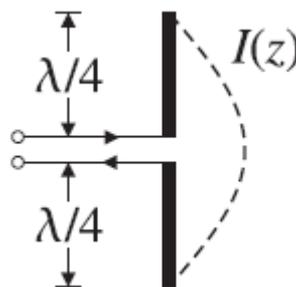


Figura 5: Representação gráfica de antena dipolo elétrico de meia onda (ORFANIDIS, 2016)

2.1.1.4 DIPOLOS FINITOS

São as generalizações de cálculo, que consideram aproximações para simplificar os cálculos, como por exemplo desconsiderar o diâmetro do condutor do dipolo, visto que o mesmo é muito menor que o próprio comprimento de onda a ser

utilizado. Assim, podemos calcular todos os parâmetros para qualquer comprimento de antena.

2.1.2 ANTENAS DE MICROFITA

2.1.2.1 ANTENAS PATCH

As antenas patch são antenas confeccionadas em placas de circuito impresso, normalmente constituídas por uma camada de metal condutor sob um dielétrico que se encontra sobre um plano terra, conforme demonstrado na Figura 6.

São classificadas como antenas de abertura devido ao fato da fonte de radiação ser limitada a uma superfície com meio definido, neste caso, a área de cobre que compõe a antena.

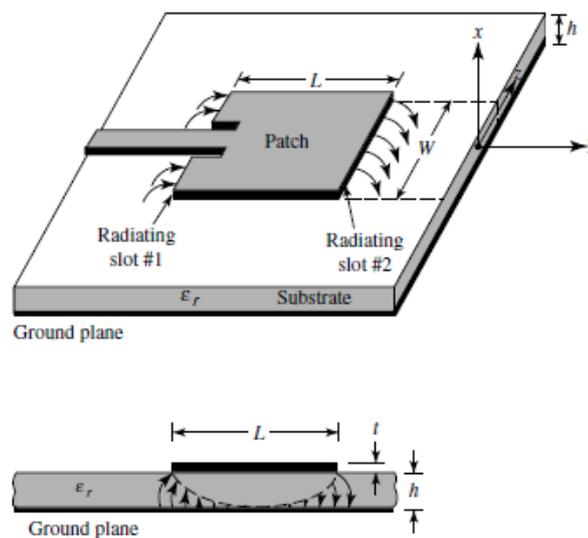


Figura 6: Representação de antena de microfita (acima) e comportamento do campo elétrico no substrato dielétrico (abaixo) (BALANIS, 2005)

Os formatos das antenas de microfita podem ser os mais variados, dependendo do objetivo do projeto, pois cada geometria modificará o comportamento da antena. Na Figura 7 são apresentados alguns exemplos de geometria aplicadas na face de cobre da placa para diferentes tipos de antenas *patch*.

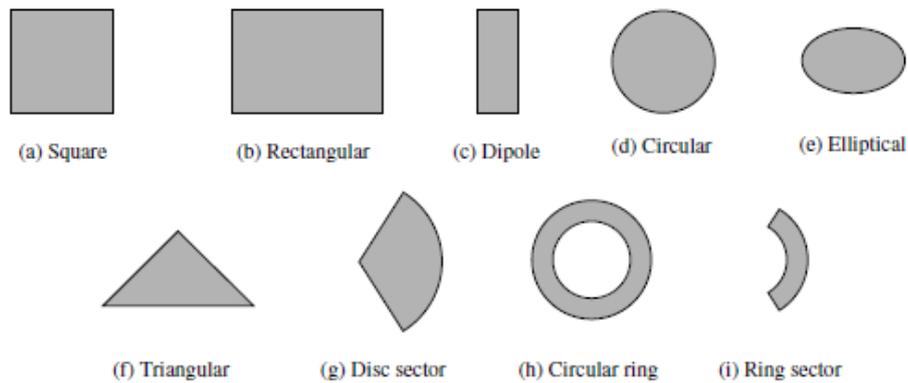


Figura 7: Exemplo de geometria utilizada para antenas patch (BALANIS, 2005)

2.1.2.2 ANTENAS DE MICROFITA SEM PLANO TERRA

Além das antenas de microfita que utilizam plano terra como refletor, deve-se falar sobre as antenas impressas, em específico as que não utilizam plano terra, como por exemplo antenas de *tags* RFID como o da Figura 8, onde no centro do dipolo se encontra o chip RFID responsável pela modulação e comunicação.

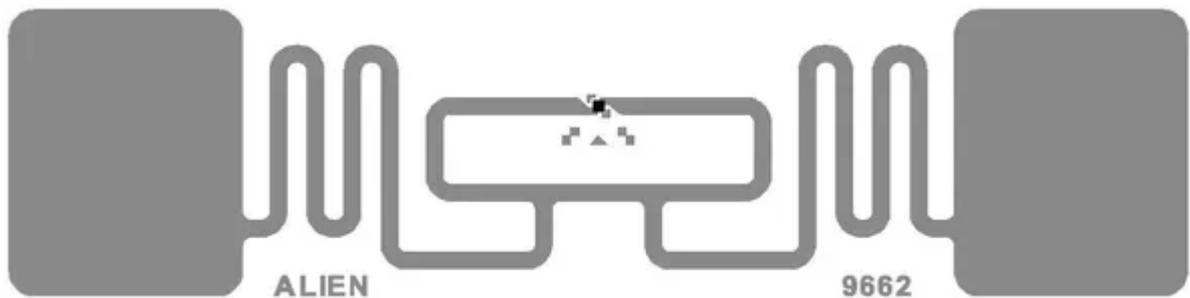


Figura 8: Modelo de antena dipolo de microfita, utilizada em sistemas RFID. (ALIEN TECHNOLOGY, 2013)

2.2 GEOMETRIA FRACTAL

2.2.1 HISTÓRIA

O termo fractal, que foi descrito pela primeira vez por Mandelbrot (MANDELBROT, 1977) significa “criação ou forma fragmentada, quebrada ou que só encontra regras na irregularidade”, e é utilizado para descrever um grupo complexo de formas que possuem similaridades com sua própria estrutura geométrica

(WERNER; GANGULY, 2003) ou ainda, pode ser definido como um grupo de formas que compõem um cascata sem fim de repetições à medida que olha-se mais de perto (BOVILL, 1996).

O conceito de Mandelbrot vem para estender o nosso conceito de geometria clássica composta por pontos, linhas e círculos para o conceito com o irregular, desmanchado e singular, podendo assim descrever os mais variados tipos de padrões, formas geométricas, representações de terrenos, plantas e outros elementos da natureza (LI, 2000; MANDELBROT, 1977).

2.2.2 FRACTAL DE HILBERT

O fractal a ser utilizado neste trabalho é o fractal de Hilbert, sua curva consiste em repetir o segmento de reta da ordem anterior quatro vezes e conectar estas repetições por três segmentos de reta. Partindo de 3 retas da ordem 1, gera-se assim o padrão apresentado na Figura 9.

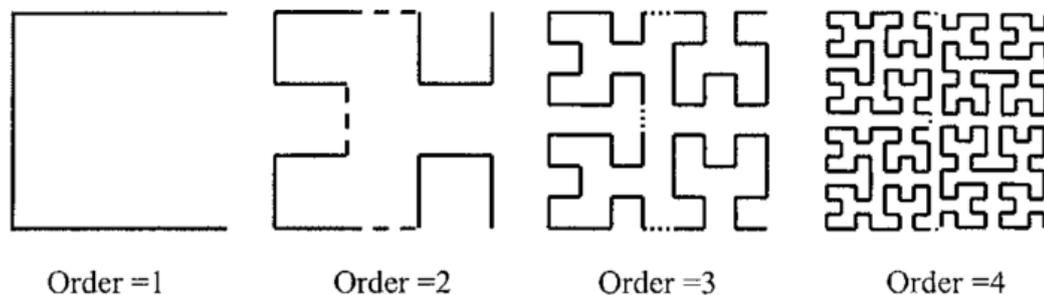


Figura 9: Representação das 4 primeiras ordens da curva fractal de Hilbert (VINOY et al., 2001)

O grande diferencial desta geometria para este trabalho vem do fato que, conforme a ordem da iteração do fractal aumenta, o comprimento resultante da soma dos segmentos de reta aumenta quase em progressão geométrica, enquanto a área permanece a mesma. Portanto uma pequena área pode comportar uma antena com um comprimento linear bem grande. (VINOY; JOSE, 2001)

O desenvolvimento teórico do cálculo da impedância desta antena se baseia nos estudos de José Vinoy (VINOY, 2002; VINOY et al., 2001; VINOY; JOSE, 2001)

sobre antenas que utilizam o fractal de Hilbert. Este desenvolvimento será apresentado no tópico 3.1.

2.2.3 FRACTAIS EM TELECOMUNICAÇÕES

Uma importante propriedade que um fractal tem que ter é a sua dimensão fracionada. Isso é um significado para a definição de como efetivamente o objeto preenche o espaço. Curvas fractais têm a propriedade matemática de preencher um determinado espaço melhor que qualquer superfície Euclidiana clássica, e essa propriedade é a principal na obtenção de antenas que ocupam um espaço pequeno.

A década de 1990 trouxe os primeiros relatórios de antenas multibanda e de tamanhos reduzidos explorando essa área de estudo. As propriedades desse tipo de antena incluem a performance multibanda em frequências não-harmônicas e o casamento da impedância de entrada, que ajuda na redução da complexidade dos circuitos de casamento de impedância. Como tal, as antenas fractais apresentam essencialmente casamento de impedância própria, além disso, os diagramas de radiação de campo distante são geralmente similares com a frequência. (FUSCO, 2006)

Antenas fractais usam uma geometria complexa arranjada a partir da geometria fractal básica, e a ordem da complexidade depende do número de iterações do fractal, quanto maior a ordem, mais complexa a geometria.

A primeira antena com fractal de Hilbert foi usada para telecomunicações em UHF/VHF por Vinoy (VINOY et al., 2001). Na sua pesquisa, Vinoy constatou que diferentes ordens do fractal resultam em diferentes números de frequências de ressonância.

Devido ao potencial de redução de tamanho, esforços consideráveis foram dedicados na implementação de antenas multibanda para telefonia celular na época, para que uma antena funcionasse em 900 e 1800MHz, por exemplo. A Figura 10

apresenta um exemplo de antena fractal, exemplificando as iterações do fractal utilizado.(FUSCO, 2006)

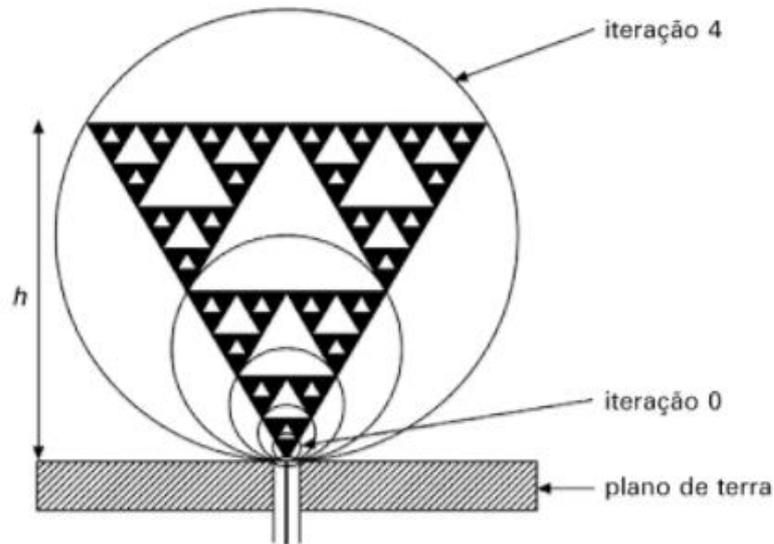


Figura 10: Exemplo de antena monopolo utilizando o fractal de Sierpinski (FUSCO, 2006)

2.2.4 SISTEMA RFID

O funcionamento de um sistema RFID se assemelha à tecnologia aplicada á radares, pois o leitor transmite um sinal modulado para o *tag*, este é alimentado pela potência recebida e responde à este estímulo variando sua impedância de entrada, assim modulando o sinal rebatido, geralmente em modulação em amplitude por chaveamento (do inglês *Amplitude Shifting Keying – ASK*), ou seja, a impedância do chip varia entre dois estados: casamento de impedâncias perfeito e descasamento.

Entre as características desejadas em um sistema RFID, o alcance da leitura geralmente está em primeiro lugar, visto que este demonstra qual é a distância máxima em que o leitor conseguirá ler o *tag*. Este fator depende da potência transmitida pelo leitor, os ganhos das antenas envolvidas na comunicação, casamentos de impedâncias das antenas e a sensibilidade do chip usado no *tag*. O casamento é basicamente o que diferencia um sistema RFID de um sistema de radar.

O design da antena vai além de uma simples antena, pois deve ser uma antena pequena que proporcione um bom casamento de impedâncias e compense a capacitância do chip, portanto a antena deve ter impedância de entrada indutiva.

3 METODOLOGIA DOS CÁLCULOS E DE COLETA DE DADOS PRÁTICOS

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Partindo do raciocínio desenvolvido por K. J. Vinoy em seu artigo intitulado “Resonant Frequency of Hilbert Curve Fractal Antennas” (VINOY; JOSE, 2001), para uma antena fractal utilizando a curva de Hilbert, com uma dimensão externa l e iteração do fractal de ordem n , o comprimento de cada segmento de reta d é dado por

$$d = \frac{l}{2^n - 1} \quad (2)$$

Se considerarmos um fractal de ordem n , haverá m seções de condutores paralelos curto circuitados entre si, cada um com comprimento d . O número de seções é descrito por

$$m = 4^{n-1} \quad (3)$$

Assim, como mostrado na Figura 11, os segmentos que não formam seções de condutores paralelos totalizam um comprimento de

$$s = (2^{2n-1} - 1)d \quad (4)$$

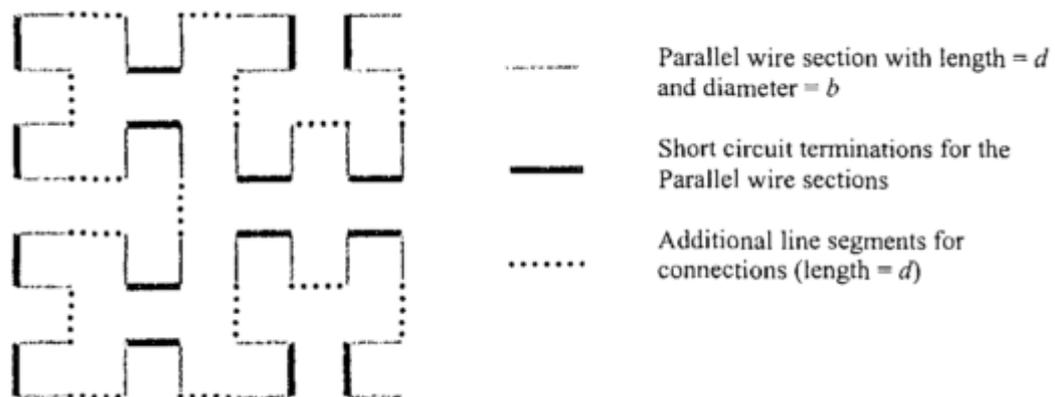


Figura 11: Composição do fractal de Hilbert (VINOY; JOSE, 2001)

A impedância característica de duas linhas paralelas formadas por condutores com o diâmetro b , espaçamento d (visto que são separados por um condutor do mesmo comprimento) entre elas é dada por

$$Z_0 = \frac{\eta}{\pi} \log \frac{2d}{b} \quad (5)$$

onde η é a impedância intrínseca do espaço livre aproximada por $\eta \cong 120\pi$. Isso pode ser usado para calcular a impedância de entrada nos terminais da geometria, que é puramente indutiva

$$L_{in} = \frac{Z_0}{\omega} \tan(\beta d) = \frac{Z_0}{\omega} \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda} d\right) \quad (6)$$

A indutância própria causada por uma linha reta de comprimento s definida em (4) é dada por

$$L_s = \frac{\mu_0}{\pi} s \left(\log \frac{8s}{b} - 1 \right) \quad (7)$$

Há m seções de linhas paralelas, com corrente em sentidos contrários, portanto a impedância total é dada pela soma da indutância própria com a impedância destas seções, conforme a equação (8)

$$L_t = L_s + mL_{in} \quad (8)$$

Substituindo (4) em (6) e aplicando (7) em (8), obtêm-se a indutância total

$$L_T = \frac{\mu_0}{\pi} s \left(\log \frac{8s}{b} - 1 \right) + m \frac{\eta}{\pi} \log \frac{2d}{b} \tan \beta d \quad (9)$$

A indutância própria de uma antena dipolo de meia onda pode ser descrita por

$$L_{\lambda/2} = \frac{\mu_0 \lambda}{\pi 4} \left(\log \frac{2\lambda}{b} - 1 \right) \quad (10)$$

Para encontrar a frequência de ressonância da antena, a indutância total é igualada à indutância do dipolo de meia onda, e isso descreve a primeira frequência de ressonância da antena com fractal de Hilbert

$$\frac{\mu_0}{\pi} s \left(\log \frac{8s}{b} - 1 \right) + m \frac{\eta}{\pi} \log \frac{2d}{b} \tan \beta d = \frac{\mu_0 \lambda}{\pi 4} \left(\log \frac{2\lambda}{b} - 1 \right) \quad (11)$$

Devemos ressaltar que antenas dipolo ressonam quando o comprimento do braço é um múltiplo de um quarto de comprimento de onda ($\lambda/4$). Portanto, alterando o comprimento de onda à direita da equação, podemos obter todas as frequências de ressonância da antena fractal com curva de Hilbert. As primeiras frequências podem ser obtidas através da Equação (12).

$$m \frac{\eta}{\pi} \log \frac{2d}{b} \tan \beta d + \frac{\mu_0}{\pi} s \left(\log \frac{8s}{b} - 1 \right) = \frac{\mu_0 k \lambda}{\pi 4} \left(\log \frac{8 k \lambda}{b 4} - 1 \right) \quad (12)$$

Onde k é um inteiro ímpar. Pode-se notar que d , m e s na equação (12) são expressados em termos da ordem do fractal nas equações (2-4). No entanto, esta expressão não será válida para efeitos em ordens muito maiores e conseqüentemente não será precisa para maiores ressonâncias. (HU; COLE; ZHANG, 2009; VINOY; JOSE, 2001)

A frequência de ressonância depende das características físicas da antena, como distância entre os condutores paralelos, a espessura, o comprimento total e o número de condutores paralelos. A capacitância média pode ser obtida através da indutância obtida em (8), e variando com a frequência, pode ser escrita como (RAHMAN; SARKAR, 2017)

$$C = \frac{1}{(4\pi f)^2 L_T} \quad (13)$$

Um fator importante da antena estudada é que a mesma deve proporcionar entre outros fatores, o casamento de impedâncias com o chip RFID a ser utilizado no *tag*, podendo a relação com este ser ou não o casamento perfeito. O controle da

impedância de entrada neste tipo de antena pode proporcionar variações no comportamento, como aumento no alcance da antena proporcionado por um descasamento de impedâncias proposital, sem perdas no ganho (LIN; CHU, 2010).

Partindo da equação de Friis obtêm-se a potência necessária para o

$$P_{tag} = P_{Trd} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{rd-tag}} \right)^2 G_{rd} G_{tag} = P_{EIRPrd} \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{rd-tag}} \right)^2 G_{tag} \quad (14)$$

Onde P_{tag} é a potência disponível na entrada da antena do *tag*, vindo do sinal incidente, $P_{EIRPrd} = P_{Trd} G_{rd}$ é a potência efetiva isotropicamente radiada pelo leitor, P_{Trd} é a potência radiada pelo leitor, G_{rd} é o ganho do leitor, G_{tag} é o ganho do *tag*, R_{rd-tag} é a distância entre o *tag* e o leitor.

Devido a um possível descasamento ocasionado pela variação de frequência, a potência absorvida pelo chip do *tag* é descrita por

$$P_{in,chip} = (1 - |\Gamma|^2) P_{tag} \quad (15)$$

Onde $Z_{in,chip}$ e Z_a são as impedâncias de entrada do chip e da antena, respectivamente, e o coeficiente de reflexão é dado pela equação (16) (AIVAZIS; SIAKAVARA; SAHALOS, 2011)

$$\Gamma = \frac{Z_{in,chip} - Z_a}{Z_{in,chip} + Z_a} \quad (16)$$

3.2 MEDIDA DA IMPEDÂNCIA DA ANTENA

Para medir a impedância da antena, é necessário colocar um dispositivo que converta modo comum (desbalanceado) para modo diferencial (balanceado), o balun.

Podemos utilizar dois modelos de balun, com e sem núcleo. Ambos os modelos são apresentados nas Figuras 12 e 13 respectivamente.

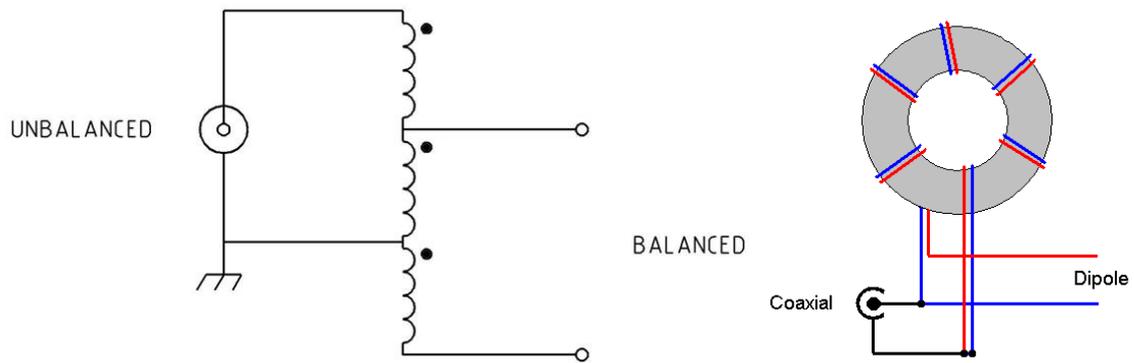


Figura 12: Representação esquemática (à esq.) do balun e um exemplo de balun com núcleo toroidal (à dir.) (O autor, 2018)

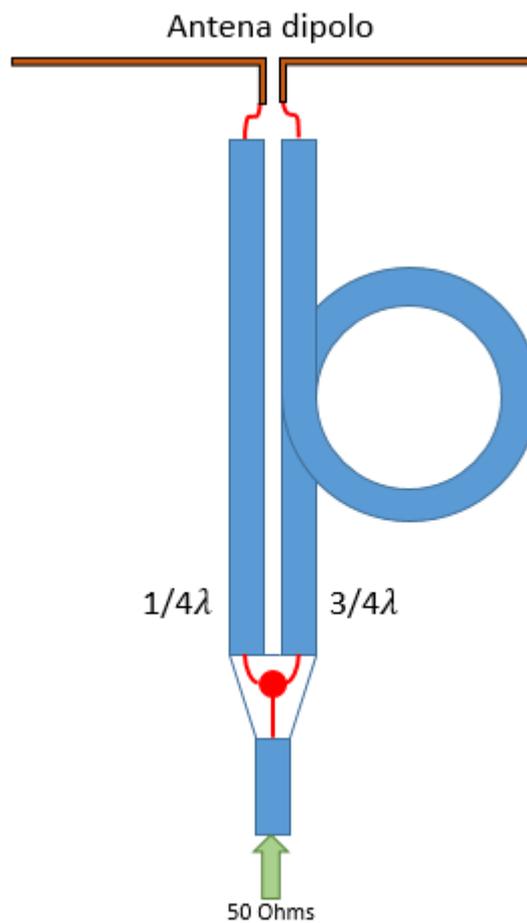


Figura 13: Representação de balun sem núcleo, feito com cabo coaxial. (O autor, 2018)

Portanto a configuração para coletar as medidas da antena utilizando o analisador de impedâncias segue o esquema da Figura 14, onde o cabo coaxial de 50 Ohms é conectado no analisador de impedâncias e na entrada desbalanceada do balun, e na saída balanceada do balun são conectados dos dois braços do dipolo a ser analisado.

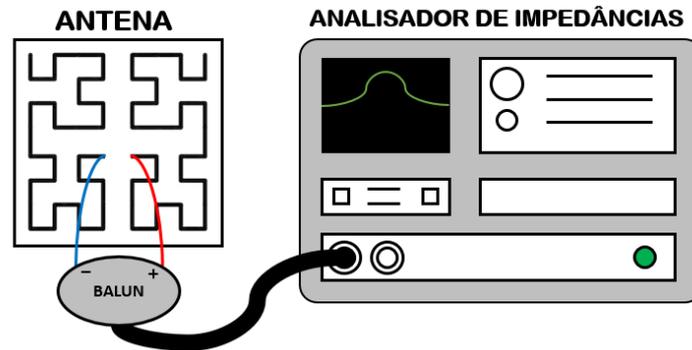


Figura 14: Configuração utilizada para medir a impedância da antena (O autor, 2018)

3.3 DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Para coletar os dados de radiação, será utilizada a câmara anecoica do Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR, dentro da qual há uma antena *x-wing bilog* receptora e a mesa giratória, conforme layout representado na Figura 15.

Será injetada na antena desenvolvida uma potência, a mesma será disposta ao centro de uma mesa rotativa controlada por motor de passo, assim poderemos à distância controlar com precisão a rotação da antena no interior da câmara. Com os dados coletados poderemos traçar o diagrama de radiação polar, característico de antenas.

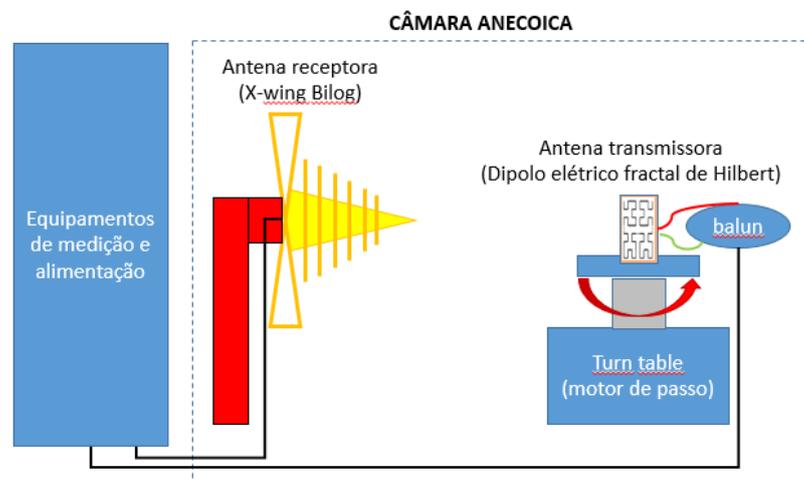


Figura 15: Configuração para medição do diagrama de radiação da antena proposta. (O autor, 2018)

Após a varredura dos 360°, utilizando as 4 configurações de polarização possíveis, sendo elas horizontal e vertical, para cada antena, podemos plotar o diagrama de radiação, em gráfico polar.

O software a ser utilizado será o MATLAB, visto sua praticidade para este tipo de processamento de dados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESIGN

Visando otimizar a área e o comportamento da antena, o design da antena foi baseado no fractal de Hilbert. Após definição da frequência de operação como sendo a frequência destinada à dispositivos RFID no Brasil, que segundo a Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017 da Agência Nacional de Telecomunicações, a faixa de 915MHz a 940MHz foi adotada, visto a proximidade das faixas adotadas por outros países para o mesmo fim.

Após a escolha do fractal e da frequência, tomando como base os modelos comerciais de *tags* para RFID para esta faixa de frequências, procurou-se dimensionar a ordem do fractal a ser adotada, assim como as suas dimensões externas.

Utilizando o MS Excel, foi gerada uma tabela com as antenas inicialmente projetadas, com suas medidas calculadas conforme desenvolvimento apresentado no tópico 3.2 deste texto. As antenas foram inicialmente projetadas com o comprimento linear de um dipolo de meia onda com frequência de operação em 915MHz. As informações das antenas estão na Tabela 1. Na Figura 16, algumas das variáveis do modelo são indicadas no layout.

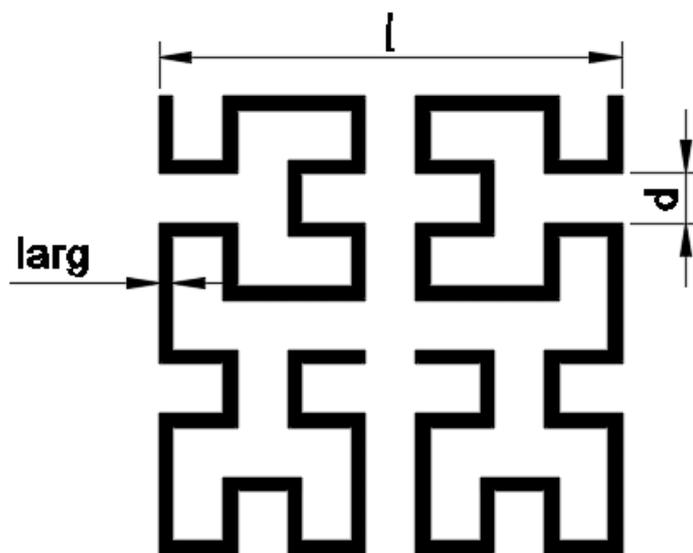


Figura 16: Indicação das variáveis no layout da antena (O autor, 2018)

Tabela 1: Medidas primeiras antenas

	Antena 0	Antena 1	Antena 2
Ordem	3	3	3
Comprimento externo l (cm)	1,8	1,9	2
Comprimento linear L(cm)	16,2	17,1	18
Frequência(MHz)	915	915	915
Comprimento de onda λ(m)	0,327642	0,327642	0,327642
$\lambda/2$(m)	0,163821	0,163821	0,163821
Segmento de reta d(m)	0,0026	0,0027	0,0028
Número de linhas paralelas m	16	16	16
Comprimento s (m)	0,0806	0,0837	0,0868
Largura da trilha (m)	0,001	0,001	0,001
Diâmetro equivalente b (m)	0,006677	0,006677	0,006677
Zo (ohms)	-13,0384	-11,0705	-9,17421
Constante de fase β	19,16726	19,16726	19,16726
Lin (H)	-1,1E-10	-1E-10	-8,6E-11
μ_0	1,26E-06	1,26E-06	1,26E-06
Ls (H)	3,18E-08	3,35E-08	3,53E-08
Lt (H)	2,99E-08	3,19E-08	3,39E-08
Frequência de Ressonância (MHz)	969,1081	927,0083	918,2877

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO

Com o layout da antena especificado, partiu-se para a concepção dos primeiros protótipos, utilizando placas FR408 Epoxi de face simples (espessura do cobre = $35\mu\text{m}$) e com 0.8mm de espessura (ISOLA GROUP, 2012).

Através da transferência térmica utilizando a prensa térmica disponível no Laboratório de Corrosão do departamento e layout impresso à laser em papel *couchet*, pode-se aplicar o layout no cobre, que posteriormente foi imerso em solução de percloreto de ferro para corrosão.

Dada a largura inicial das trilhas de 1mm, a transferência térmica e a corrosão não apresentaram muitos problemas, conforme apresentado na Figura 17.

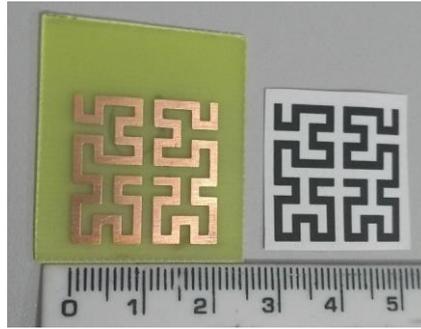


Figura 17: À esquerda a antena implementada na placa, e à direita o layout em papel couchet utilizado (O autor, 2018).

4.3 MEDIDA DA IMPEDÂNCIA DA ANTENA

Partindo do pressuposto que a geometria a ser utilizada não seria a geometria convencional para uma antena dipolo elétrico, havia a necessidade de medir a impedância da antena. Para isso primeiramente foi utilizado o RF IMPEDANCE ANALYZER Agilent HP4191A, o mesmo está disponível no Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação (LAMMI-UFPR), mostrado na Figura 18, o único equipamento com *range* de frequências de 1 a 1000MHz disponível, que atende à necessidade do projeto.

Este equipamento deve ser inicialmente calibrado, utilizando cargas de 0 Ohms (curto circuito), 0 Siemens (circuito aberto) e 50 Ohms, para que assim ele tenha as referências necessárias para as medições. Caso seja necessária a conexão de algum tipo de cabo para medidas, deve-se calibrar levando em consideração o comprimento do mesmo.

Os dados são coletados através de conexão via cabo paralelo/USB conectado à um computador, que utilizando software para leitura dos dados pode-se exportá-los para um programa de gráficos, como por exemplo o Qti Plot, utilizado para este processamento.



Figura 18: RF Impedance Analyzer Agilent HP4191A (O autor, 2018).

Para solucionar o problema da conversão balanceado/desbalanceado, foram projetados dois modelos de balun: um com núcleo de ferrita e fios de cobre esmaltados e outro com defasagem por cabo, apresentados na respectivamente na Figura 19.

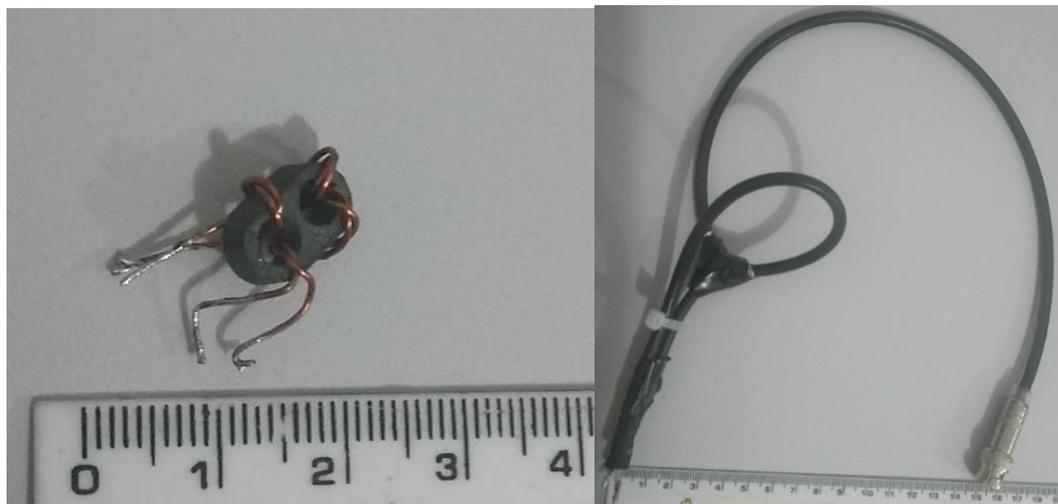


Figura 19: Baluns contruídos para alimentar a antena (O autor, 2018)

Para que a medida seja bem-sucedida, o equipamento deve ser calibrado com o cabo e o balun a serem utilizados, ou seja, as cargas de calibração são conectadas na saída do balun, de modo que a impedância vista pelo equipamento seja apenas a impedância da antena.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 SIMULAÇÕES

As simulações foram feitas no HFSS, onde através de modelagem 3D baseada no layout importado da plataforma QCAD, pode-se atribuir materiais e campos à antena a ser projetada, como exemplificado na Figura 20.

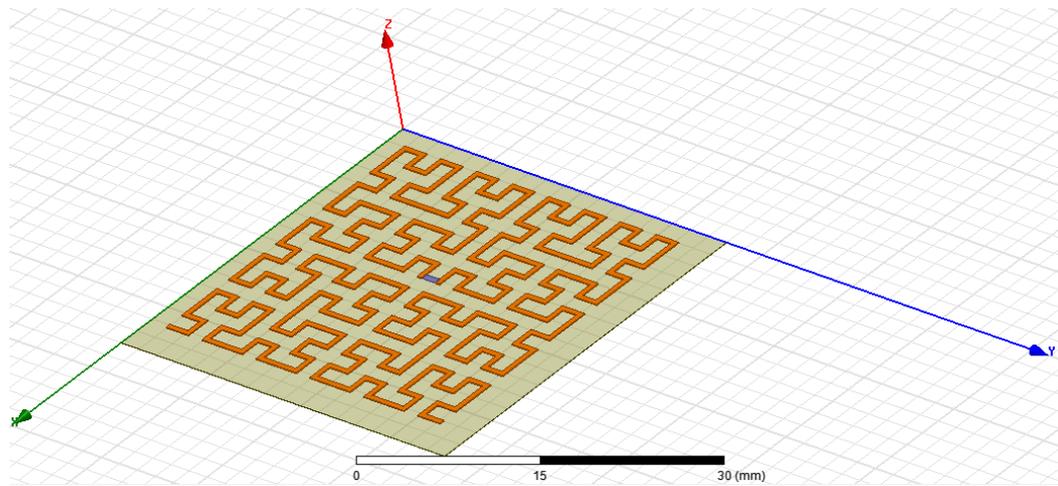


Figura 20: Exemplo de fractal de Hilbert de quarta ordem, implementado no HFSS para simulação matemática (O autor, 2018)

Simulando as três primeiras ordens do fractal, preenchendo um quadrado de 2x2cm e com a mesma espessura da linha, mas variando seu comprimento total, obteve-se o *plot* do parâmetro de reflexão na porta de entrada, S11, conforme a Figura 21.

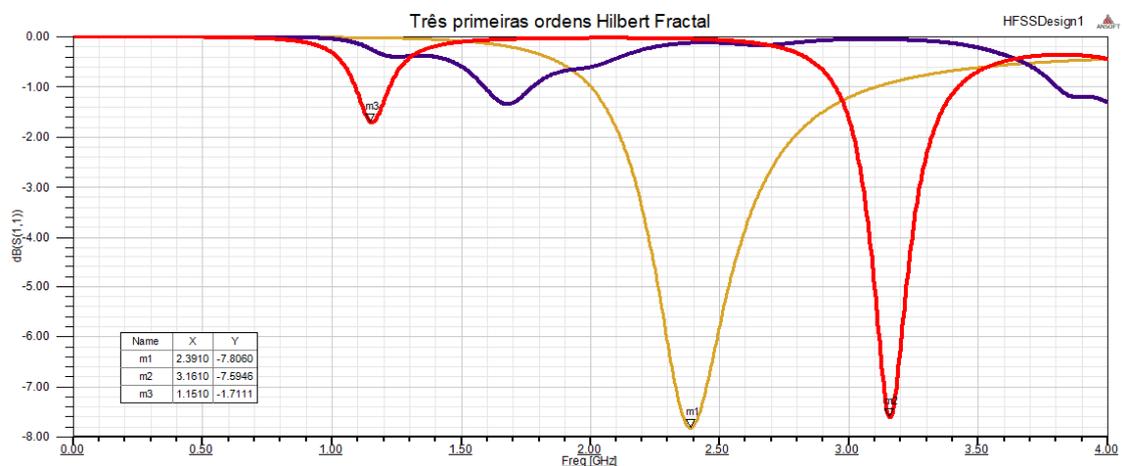


Figura 21: Parâmetro S11 das três primeiras iterações do fractal de Hilbert sendo elas: 1-amarelo, 2-azul, 3-vermelho. (O autor, 2018)

A varredura em frequência foi estipulada de 1MHz até 4GHz, visto que os fractais são conhecidos por causarem ressonâncias em diversas frequências, conforme aumenta-se a ordem dos mesmos. (DARMAW, 2015)

Podemos observar na figura 21 que conforme aumenta-se a ordem do fractal, mais frequências de ressonância começam a aparecer, e as que já estavam presentes têm suas características realçadas, como estreitamento da banda e um S11 cada vez mais negativo.

5.2 PROTÓTIPOS

5.2.1 IMPEDÂNCIAS

Após diversas tentativas de se montar um balun, chegou-se em dois modelos, sendo eles o balun com núcleo de ferrita e o balun com defasagem por cabo, cujos testes de impedâncias são representados respectivamente nas Figuras 22 e 23.

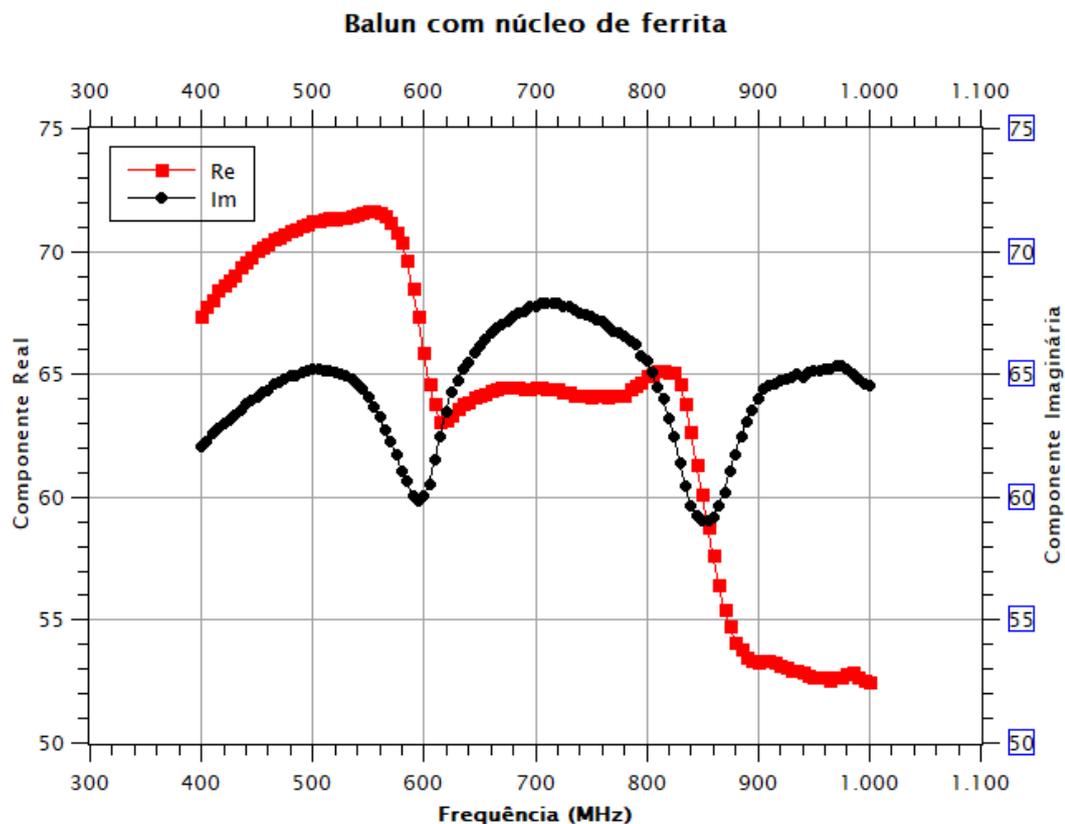


Figura 22: Plot das impedâncias do blaun com núcleo de ferrita (O autor, 2018).

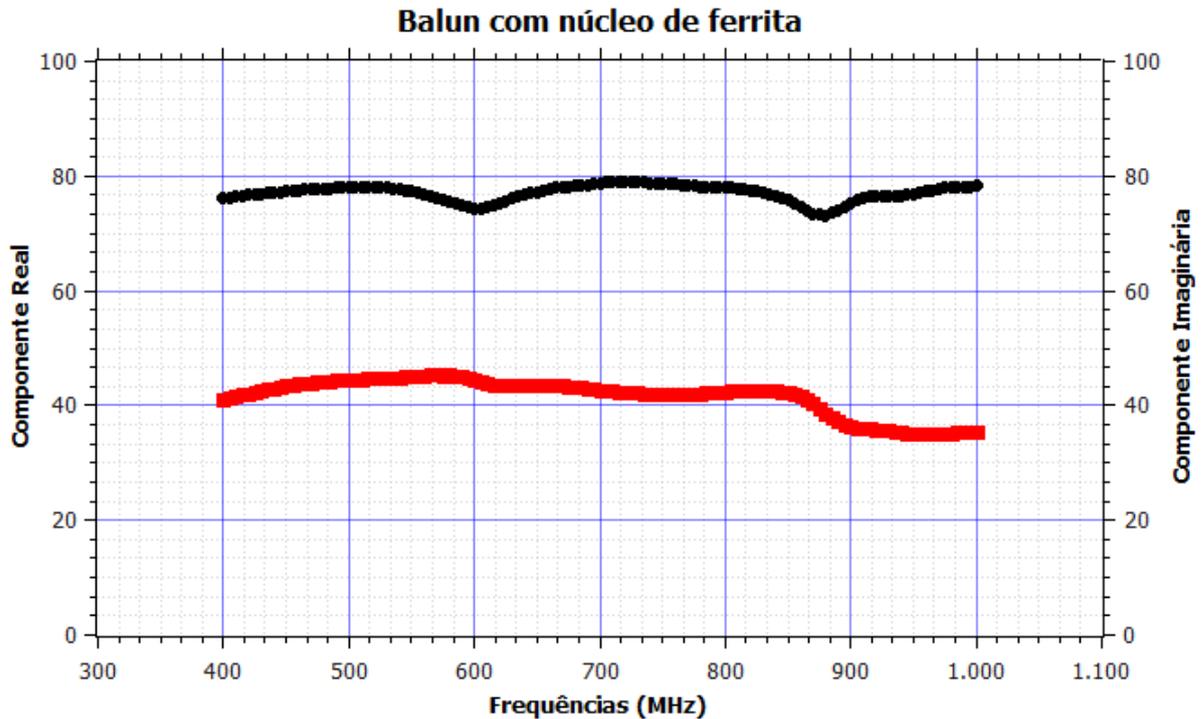


Figura 23: Plot das impedâncias do balun confeccionado apenas por cabo coaxial (O autor, 2018)

Comparando o comportamento dos baluns construídos, optou-se pela opção com núcleo de ferrita, visto que seu comportamento pode ser considerado aproximadamente linear, com variação de cerca de 10 Ohms na faixa de frequência medida.

Na figura 24 é apresentado o plot das 3 primeiras medidas, com as 3 primeiras antenas testas, cuja diferença entre elas é apenas o comprimento total de cada braço do dipolo, visando ver o impacto da variação deste fator na impedância da antena. Para estas medidas, o analisador de impedâncias foi calibrado com o cabo coaxial e o balun já conectados.

Como pode-se observar, as antenas estão com um pico da parte real em aproximadamente 970MHz, porém, não podemos afirmar que este seja o melhor comportamento, visto que a varredura vai até 1GHz apenas.

Com estas medidas de impedância apontando para a frequência de 970MHz, testou-se a antena 0 na câmara anecoica, como mostrado no tópico a seguir.

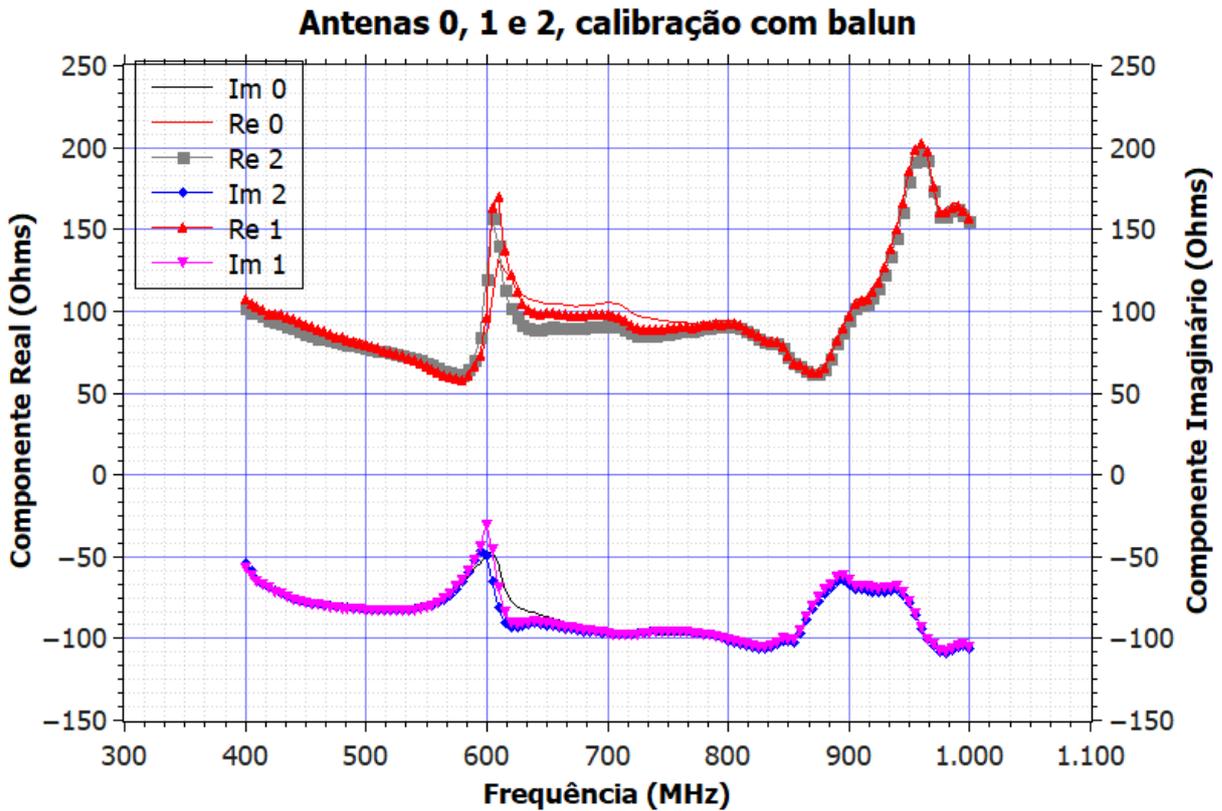


Figura 24: Plot dos dados da impedância medida para as antenas 0, 1 e 2 (O autor, 2018)

5.2.2 DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Utilizando as configurações mostradas na Figura 25, as quais representam respectivamente as polarizações horizontal e vertical, efetuaram-se as medidas de radiação na câmara anecoica, com a frequência de operação em 980MHz, frequência mais próxima da frequência do projeto (915MHz) onde a antenna mostrou a melhor resposta.

A antenna receptora utilizada durante os testes é a antenna *X-wing Bilog*, cujo *range* de frequências de atuação fica entre 20MHz e 2GHz, conforme etiqueta do equipamento, mostrada na Figura 25.

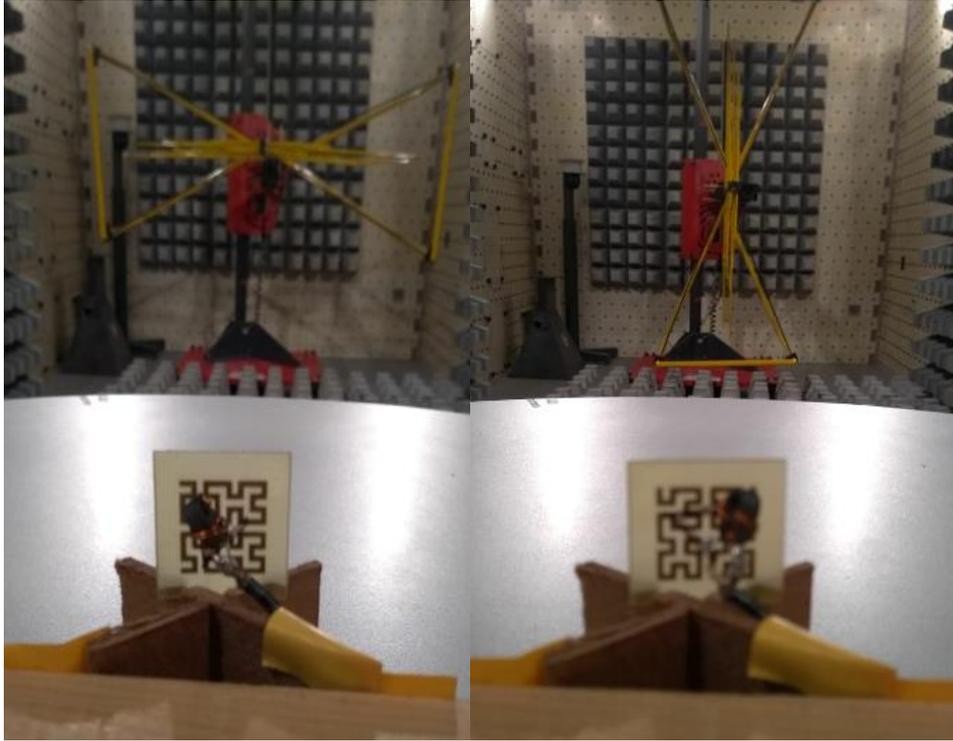


Figura 25: duas configurações utilizadas para a coleta de dados, vertical (à esq.) e horizontal (à dir.)
(O autor, 2018)

Coletando as informações de radiação, utilizando um passo de 10° , e utilizando o MATLAB para os *plots*, para as configurações de polarização horizontal e vertical, onde as duas antenas estavam na mesma orientação para ambos os casos, obteve-se os *plots* da Figura 26 abaixo.

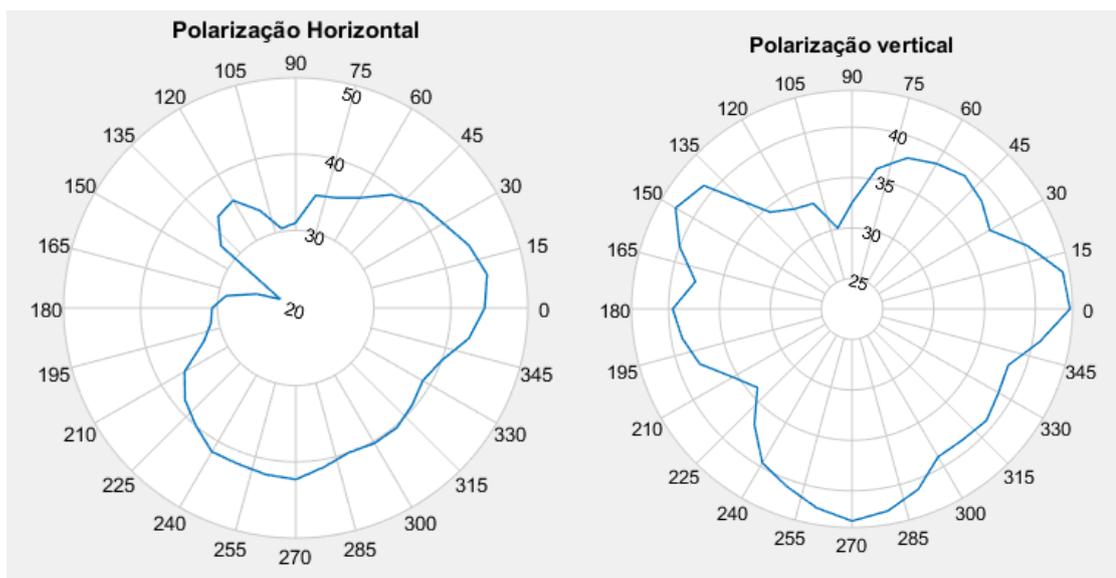


Figura 26: Plots de radiação com polarização vertical e horizontal da antena 0. (O autor, 2018)

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Em diversos fatores, este projeto foi trabalhoso, com muitos desafios ainda não encarados, como as medidas em alta frequência e equipamentos específicos. Esta parte prática com toda certeza foi de suma importância para o desenvolvimento da teoria, mesmo mostrando que a mesma nem sempre se comportará como o esperado na prática, por n fatores.

Com base nos resultados obtidos, percebe-se que as dimensões da antena podem afetar e muito no seu comportamento, visto que a largura das trilhas, a distância entre as trilhas paralelas e o comprimento total dos braços do dipolo não podem ser alterados individualmente mantendo o padrão da curva do fractal, e isto acaba deixando o projeto com diversas variáveis dependentes umas das outras. Caso as trilhas sejam mais largas, a distância entre elas diminui, afetando sua impedância de entrada com dois fatores inversamente proporcionais.

O método de confecção das placas, utilizando transferência térmica do layout para o cobre, é um processo útil, porém gera algumas limitações, como por exemplo a espessura da trilha a ser utilizada, visto que para trilhas muito finas este procedimento se mostra falho.

O tempo disponível para o desenvolvimento do trabalho foi subestimado, não dando tempo de testar todas as variáveis que se desejava. As limitações quanto à equipamentos para a frequência de 915MHz também atrapalhou, pois o equipamento disponível consegue medir até 1GHz, limitando as informações a esta janela.

A câmara anecoica pôde ajudar muito no desenvolvimento prático do trabalho, visto que os equipamentos atendem bem à faixa de frequência e transmitem dados mais confiáveis por tem pouca ou nenhuma interferência do meio externo.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Temas com geometrias fractais aplicadas à antenas ainda serão muito estudados, dadas todas as possíveis aplicações e configurações que esta geometria proporciona, assim como efeitos singulares de ressonância e eficiência no uso das áreas, que cada vez ficam menores.

Mais protótipos podem ser feitos, variando a geometria, criando singularidades nas curvas escolhidas, podendo-se testar assimetrias e outras modificações e quais os seus efeitos sobre as características eletromagnéticas das antenas estudadas.

Dentre os objetivos não listados deste projeto, estava a ideia de se fazer uma antena com outros materiais como substrato, materiais flexíveis com camadas extremamente finas de material condutor, visando simular os *tags* do tipo adesivo.

Ainda há muito a se descobrir sobre esta geometria e suas funcionalidades, principalmente em radiofrequência, como filtros, acopladores entre outros.

7 REFERÊNCIAS

AIVAZIS, E.; SIAKAVARA, K.; SAHALOS, J. N. Design and Analysis of Efficient Fractal Antennas for UHF RFID Passive Tags. p. 3021–3025, 2011.

ALIEN TECHNOLOGY, C. ALN-9662 Short Inlay. 2013.

BALANIS, C. A. **Antenna Theory Analysis and Design Third Edition**. [s.l: s.n.].

BOVILL, C. **Fractal Geometry in Architecture and Design**. 1st. ed. Cambridge: Birkhäuser Basel, 1996.

DARMAW, M. A. Design , Simulation n , and Fabrication of S econd , Third , and Forth Order r Hilbert Antennas as Ultra Frequency y Partial Discharge Sen nsor. v. 1, p. 319–322, 2015.

FINKENZELLER, K. **RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification**. 2nd. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

FUSCO, V. F. **Teoria e Técnicas de Antenas: Princípios e Prática**. 1ª Edição ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HU, Z.; COLE, P. H.; ZHANG, L. A method for calculating the resonant frequency of meander-line dipole antenna. **2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2009**, p. 1783–1786, 2009.

HUNT, V. D.; PUGLIA, A.; PUGLIA, M. **RFID-A Guide to Radio Frequency Identification**. 1st. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

ISOLA GROUP, G. FR408 Data Sheet. p. 2–3, 2012.

LI, B. L. Fractal geometry applications in description and analysis of patch patterns and patch dynamics. **Ecological Modelling**, v. 132, n. 1–2, p. 33–50, 2000.

LIN, W. L. W.; CHU, Q.-X. C. Q.-X. Mismatching design method for RFID tag antenna. **Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE), 2010 9th International Symposium on**, p. 244–246, 2010.

MANDELBROT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature**. 1st. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 1977.

ORFANIDIS, S. J. **Electromagnetic Waves and Antennas**. Piscataway: Rutgers University, 2016.

RAHMAN, M.; SARKAR, A. K. A Method for Calculating the Resonant Frequency of Meander Line Dipole Antenna by Using Antenna ' s Geometrical Parameters. p. 5–10, 2017.

VINOY, K. J. et al. Hilbert curve fractal antenna: A small resonant antenna for VHF/UHF applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 29, n. 4, p. 215–219, 2001.

VINOY, K. J. Fractal Shaped Antenna Elements for Wide- and Multi-Band Wireless Applications. n. August, 2002.

VINOY, K.; JOSE, K. Resonant frequency of Hilbert curve fractal antennas. **Antennas and ...**, p. 648–651, 2001.

WERNER, D. H.; GANGULY, S. An overview of fractal antenna engineering research. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 45, n. 1, p. 38–57, 2003.

WOLFF, C. **Radar Basics - Patch Antenna or Microstrip Antenna**.

YIN-KUN, W. et al. Modified Sierpinski square fractal antenna covering ultra-wide band application with band notch characteristics. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, v. 8, n. 7, p. 506–512, 2014.