

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ANTENA LOG-PERIÓDICA TRAPEZOIDAL DENTADA
PLANAR IMPRESSA EM SUBSTRATO FR4 PARA DTV

RODRIGO AGRA DE OLIVEIRA

Niterói 2017

RODRIGO AGRA DE OLIVEIRA

ANTENA LOG-PERIÓDICA TRAPEZOIDAL DENTADA
PLANAR IMPRESSA EM SUBSTRATO FR4 PARA DTV

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientadora: Prof^a Dra. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri Souza

Coorientador: Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira

Niterói

2017

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

O48 Oliveira, Rodrigo Agra de

Antena log-periódica trapezoidal dentada planar impressa em substrato FR4 para DTV / Rodrigo Agra de Oliveira. – Niterói, RJ: [s.n.], 2017.

76 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2017.

Orientadores: Vanessa Przybylski Ribeiro Magri Souza, Tadeu Nagashima Ferreira

1. Antena de televisão. 2. Televisão digital. 3. Sistema de telecomunicação. I. Título.

CDD 621.384135

RODRIGO AGRA DE OLIVEIRA

ANTENA LOG-PERÍODICA TRAPEZOIDAL DENTADA
PLANAR IMPRESSA EM SUBSTRATO FR4 PARA DTV
UTILIZANDO HFSS

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações

Aprovado em 1º de novembro de 2017

Banca Examinadora

Dra. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri Souza - Orientadora - UFF

Dr. Tadeu Nagashima Ferreira – Coorientador - UFF

Dra. Leni Joaquim de Matos - UFF

Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos - UFF

Dr. Marbey Manhães Mosso – PUC – Rio

Niterói
2017

À minha esposa, por sempre me incentivar a
nunca desistir. À memória de meu avô.

Agradecimentos

À minha orientadora e Prof^a Dra. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri e ao meu coorientador Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira, pelos ensinamentos, paciência e dedicação, motivos que me auxiliaram em meu caminho em busca do êxito.

À minha esposa Camila Medeiros pelo constante suporte, sempre ao meu lado qualquer que seja o caminho percorrido.

Aos Professores do curso de Mestrado, que me proporcionaram o conhecimento necessário à implementação deste trabalho, especialmente à Prof^a Dra Leni Joaquim de Matos pela dedicação e por acreditar no potencial de cada um de seus alunos.

Aos gestores e colegas da área profissional pelo incentivo ao Mestrado.

Ao ex-aluno do Laboratório de Antenas e Propagação, Roberto Di Renna, pelo auxílio na fabricação da antena e pesquisas para a realização desta dissertação.

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
GLOSSÁRIO	xi
Resumo.....	xii
Abstract	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 OBJETIVO	3
1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	3
2. ANTENAS IMPRESSAS.....	4
2.1 PRINCIPAIS ANTENAS UTILIZADAS EM TV DIGITAL	4
2.1.1 ANTENAS PARA TRANSMISSÃO EM BROADCAST	5
2.1.2 ANTENAS PARA RECEPÇÃO	8
2.2 APLICAÇÃO DE ANTENAS IMPRESSAS PARA TV DIGITAL	10
2.2.1 ANTENA LOG-PERÍODICA TRAPEZOIDAL DENTADA	12
3. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	16
3.1 ESCOLHA DO MATERIAL UTILIZADO.....	17
3.2 OTIMIZAÇÃO DAS DIMENSÕES DA ANTENA UTILIZANDO FR4	24
4. FABRICAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS / CARACTERIZAÇÃO	29
4.1 FABRICAÇÃO.....	29
4.2 VSWR, S_{11} e ESPECTRO DO CANAL RECEBIDO.....	34
4.3 RECEPTOR DE SINAL DTV.....	39
5. MINIATURIZAÇÃO DA ANTENA	42
5.1 RO5880.....	43
5.2 FR4	46
5.3 RO6010.....	47
5.4 Dilab 85	51
5.5 Dilab 300.....	55
6. CONCLUSÕES	61
7. BIBLIOGRAFIA.....	63

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1: Antena *Slot*.
- Figura 2.2: Antena Painel de Dipolos.
- Figura 2.3: Antena *Superturnstile*, sem radome.
- Figura 2.4: Antena Log Periódica.
- Figura 2.5: Antena Dipolo de Haste Telescópica.
- Figura 2.6: Antena *Patch* Retangular.
- Figura 2.7: Perda de Retorno da Antena *Patch* Retangular.
- Figura 2.8: Geometria da Antena Espiral Dentada Planar.
- Figura 2.9: Geometria da Antena Trapezoidal Dentada Planar.
- Figura 3.1: Ambiente de simulação do HFSS.
- Figura 3.2: Simulação da antena utilizando RO5880.
- Figura 3.3: Parâmetros da antena retornados pelo HFSS para o substrato RO5880.
- Figura 3.4: Perda de Retorno da antena utilizando RO5880.
- Figura 3.5: Simulação da antena utilizando FR4.
- Figura 3.6: Parâmetros da antena retornados pelo HFSS para o substrato FR4
- Figura 3.7: Perda de Retorno da antena utilizando FR4.
- Figura 3.8: Parâmetros da antena retornados pelo HFSS para o substrato RO6010.
- Figura 3.9: Simulação da antena utilizando RO6010.
- Figura 3.10: Perda de Retorno da antena utilizando RO6010.
- Figura 3.11: (a) Perda de Retorno utilizando RO5880. (b) a mesma medida para FR4.
- Figura 3.12: Simulação com parâmetros modificados.
- Figura 3.13: Perda de Retorno (a) primeira simulação, (b) simulação modificada.
- Figura 3.14: Diagrama de Irradiação da antena simulada no HFSS.
- Figura 3.15: Diagrama de irradiação da antena simulada.
- Figura 3.16: Diagrama de elevação da antena simulada.
- Figura 4.2: Transferência da geometria para placa através do ferro.

Figura 4.3: Área da antena protegida e pronta para corrosão.

Figura 4.4: Placa durante o processo de corrosão.

Figura 4.5: Limpeza da placa após o processo de corrosão com água e sabão.

Figura 4.6: Placa pronta após a limpeza.

Figura 4.7: Corrosão entre os polos criando o *Port Gap*.

Figura 4.8: Antena pronta para os testes.

Figura 4.9: Setup medida de canal.

Figura 4.10: Detalhe do Espectro no CH29.

Figura 4.11: Antena pronta para os testes.

Figura 4.12: Setup para testes de VSWR e Perda de Retorno.

Figura 4.13: VSWR medido da Antena.

Figura 4.14: Perda de Retorno medido da Antena.

Figura 4.15: Perda de retorno: simulada (a) x medida (b).

Figura 4.16: Antena conectada na TV através do adaptador de conector de RF.

Figura 4.17: Alguns canais sendo recebidos na TV através da antena fabricada.

Figura 5.1: Simulação inicial da antena utilizando RO5880.

Figura 5.2: Parâmetros, retornados pelo HFSS, da simulação inicial utilizando RO5880

Figura 5.3: Perda de Retorno da simulação inicial utilizando RO5880.

Figura 5.4: Simulação após modificações nos parâmetros da antena utilizando RO5880.

Figura 5.5: Parâmetros, retornados pelo HFSS, após modificações utilizando RO5880

Figura 5.6: Perda de Retorno da simulação após modificações utilizando RO5880.

Figura 5.7: Simulação inicial da antena utilizando RO6010.

Figura 5.8: Parâmetros, retornados pelo HFSS, da simulação inicial utilizando RO6010.

Figura 5.9: Perda de Retorno da simulação inicial utilizando RO6010.

Figura 5.10: Parâmetros, retornados pelo HFSS, após modificações utilizando RO6010.

Figura 5.11: Simulação após modificações nos parâmetros da antena utilizando RO6010.

Figura 5.12: Perda de Retorno da simulação após modificações utilizando RO6010.

Figura 5.13: Simulação inicial da antena utilizando Dilab 85.

Figura 5.14: Parâmetros, retornados pelo HFSS, da simulação inicial utilizando DILAB 85.

Figura 5.15: Perda de Retorno da simulação inicial utilizando Dilab 85.

Figura 5.16: Parâmetros, retornados pelo HFSS, após modificações utilizando Dilab 85.

Figura 5.17: Simulação após modificações nos parâmetros da antena utilizando Dilab 85.

Figura 5.18: Perda de Retorno da simulação após modificações utilizando Dilab 85.

Figura 5.19: Parâmetros, retornados pelo HFSS, da simulação inicial utilizando DILAB 300

Figura 5.20: Simulação inicial da antena utilizando Dilab 300.

Figura 5.21: Perda de Retorno da simulação inicial utilizando Dilab 300.

Figura 5.22: Parâmetros, retornados pelo HFSS, após modificações utilizando Dilab 300.

Figura 5.23: Simulação após modificações nos parâmetros da antena utilizando Dilab 300.

Figura 5.24: Perda de Retorno da simulação após modificações utilizando Dilab 300.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparativo de Ganhos

Tabela 3.1: Características dos substratos testados.

Tabela 3.2: Comparação entre tamanhos referentes ao substrato.

Tabela 3.3: Parâmetros retornados da primeira simulação utilizando FR4.

Tabela 3.4: Comparativo de parâmetros entre simulações

Tabela 4.1: Intensidade de Campo Mínima para Recepção com Antena Interna

Tabela 5.1: Substratos utilizados nas simulações

Tabela 5.2: Comparativo entre parâmetros da simulação para RO5880.

Tabela 5.3: Comparativo entre parâmetros da simulação para FR4.

Tabela 5.4: Comparativo entre parâmetros da simulação para RO6010.

Tabela 5.5: Comparativo entre parâmetros da simulação para Dilab 85.

Tabela 5.6: Comparativo entre parâmetros da simulação para Dilab 300.

Tabela 5.7: Comparativo entre Constante dielétrica e Dimensões da Antena.

GLOSSÁRIO

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

ISDB-T - *Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial*

LTE - *Long Term Evolution*

UHF - *Ultra High Frequency*

ADK - *Antenna Design Kit*

DTV - *Digital Television*

HFSS - *High Frequency Structural Simulator*

RF - Radiofrequência

VSWR - *Voltage Standing Wave Ratio*

PTFE - Politetrafluoretileno

DUT - *Device under Test*

Resumo

Este trabalho teve origem em uma pesquisa inicial para experimentar substratos com diferentes constantes dielétricas, para fabricação de antenas impressas. Após essa pesquisa foram feitas algumas tentativas iniciais para miniaturizar um tipo específico de antena banda larga de baixa frequência, utilizando esses diferentes substratos.

O objetivo, portanto, tornou-se a fabricação de uma antena impressa barata e utilizável na faixa de televisão digital.

Foram utilizadas técnicas de corrosão para fabricação da mesma, e testes posteriores para validação. Ao término do trabalho foi incluída uma seção referente ao trabalho de miniaturização da antena. Os testes realizados foram satisfatórios e condizentes com as simulações realizadas em laboratório.

Palavras-chave: antenas impressas, log periódica, substrato, miniaturização, constante dielétrica.

Abstract

This work began with an initial research on trying substrates out, with different dielectric constant, on the production of printed antennas. After this, several simulations have been performed with the purpose of miniaturizing a specific type of wideband low frequency antenna type, using substrates with several characteristics.

The goal was then defined as manufacturing a low cost, usable printed antenna, operating on the frequency range of digital television.

In order to produce the antenna, corrosion techniques were used on the manufacturing. After this, tests for validation were performed with the element. In the end of this work, in a specific section, a complementary study is described, that includes a work with another substrates in attempt to miniaturize the antenna. The tests performed were satisfactory and consistent with the simulations carried out in the laboratory.

Keywords: printed Antenna, log periodic, substrate, miniaturization, dielectric constant.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Com a digitalização do sinal de TV no mundo, o Ministério das Comunicações do Brasil em conjunto com a ANATEL, desenvolveu, ao longo dos anos, um plano para renovação e digitalização da TV no país. O plano consiste em digitalizar 100% dos municípios e delimitar datas limites para o desligamento de todo o sistema analógico (conhecido como *switch off*).

O país já está passando pelo processo de desligamento em algumas capitais e devido à essa configuração atual, a demanda por antenas, conversores, novas TV e equipamentos que possibilitem o cidadão a desfrutar do sinal digital, cresceu vertiginosamente nos últimos anos.

Atualmente, no Brasil, a faixa de frequências destinada à TV digital se encontra dentro da banda UHF (*Ultra High Frequency*), 470 MHz a 692 MHz, portanto, nossos esforços estão concentrados em produzir uma antena banda larga que trabalhe dentro da faixa estipulada para aplicação do usuário.

O tamanho de uma antena tem relação direta com a faixa de frequências de atuação da mesma. Quanto menor for a frequência de operação, a tendência é que essa antena fique maior. Devido a essa característica, devemos nos atentar ao fato de que, para construir uma antena menor que os padrões convencionais deveremos utilizar novas técnicas de redimensionamento de antenas impressas para banda larga.

Para o projeto da Antena foram utilizados os seguintes *softwares*: ADK (*Antenna Design Kit*) e HFSS (*High Frequency Structure Simulator*). O primeiro auxiliou nas definições do tipo de antena e substrato, de acordo com a faixa de operação, enquanto o segundo serviu para realizarmos simulações e alterações nas dimensões dos elementos da antena, de maneira a refinar alguns fatores fundamentais como casamento, perda de retorno, diagrama de irradiação, entre outros.

1.1 MOTIVAÇÃO

A necessidade de antenas que atendam a largas faixas de frequência, é de contínua importância, principalmente em determinados campos das comunicações como radares, sistemas de medições, sistemas celulares, Wi-Fi e sistemas de TV, dentre outros.

Em paralelo, a maioria das aplicações necessita antenas que atendam ao perfil compacto de utilização dos usuários. Com o avanço da tecnologia, esses produtos possuem dimensões cada vez menores, sendo tendência a compactação da maior quantidade de funcionalidades em um determinado produto como, por exemplo, *tablets*, *smartphones* e *laptops*, com inúmeras funções e sistemas de comunicações convivendo em paralelo em seu interior. Quanto maior for o número de funções, maior será a quantidade de circuitos eletrônicos e menor será o espaço livre em seu interior.

As antenas *microstrip* possuem inúmeras vantagens e propiciaram o avanço na área de *design* industrial, fazendo com que seja possível construir um produto menor e mais leve que seus predecessores, com *design* arrojado, ergonômico e que permitisse concatenar sistemas de comunicações de diferentes tipos, sem ocupar muito espaço e com confiabilidade. Uma antena deste tipo possui por características pequeno volume, menor tamanho e peso, mais fina (*flatness*), mais baratas e de fácil fabricação.

A motivação deste trabalho, é a fabricação de uma antena para DTV (*Digital Television*) utilizando o substrato FR4, apresentado em um protótipo barato e eficiente, banda larga de aplicação comercial, caracterizando a contribuição científica na literatura.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é produzir uma antena funcional para DTV, através do processo de miniaturização de circuito impresso, utilizando componentes de baixo custo que permitam desenvolver uma antena de tamanho relativamente pequeno, em comparação aos modelos atuais de mercado. Além disso, temos como objetivo apresentar um modelo de antena cuja aplicação é pouco usual em circuitos impressos para a faixa de frequência da TV Digital.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação foi estruturada com embasamento teórico e desenvolvimento prático, divididos de acordo com os capítulos descritos a seguir. O Capítulo 2 apresenta os principais aspectos de antenas para DTV, algumas aplicações de antenas impressas e a descrição técnica do formato de antena escolhida para a fabricação. O Capítulo 3 descreve os resultados obtidos através de simulações, discorre sobre otimizações das dimensões da antena, os materiais escolhidos e procedimentos de escolha das melhores dimensões simuladas. O Capítulo 4 apresentará a técnica de fabricação, resultados experimentais e a caracterização da antena. O Capítulo 5 consiste em um estudo com o objetivo de buscar a miniaturização da antena produzida, utilizando diferentes tipos de substratos, através de uma série de simulações no HFSS. O Capítulo 6 apresenta a conclusão do trabalho a partir dos resultados obtidos, sua relevância para o mercado e sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. ANTENAS IMPRESSAS

Neste capítulo, são descritas as principais antenas utilizadas tanto para recepção quanto transmissão do sinal de TV digital, tipos, bandas e diagramas de irradiação, entre outras características. Além disso, são abordadas a teoria de antenas impressas, funcionamento, características, materiais e utilização. Nesta dissertação, uma variação do padrão de antena do tipo log periódica é usada e a teoria que circunda esse padrão é abordada. Também serão tratados os tipos de substrato, suas características materiais e padrões utilizados.

2.1 PRINCIPAIS ANTENAS UTILIZADAS EM TV DIGITAL

Segundo as normas da ANATEL [1], uma antena é “um dispositivo capaz de, em sistemas de telecomunicações, radiar ou captar ondas eletromagnéticas do espaço. Pode incluir qualquer circuito que a ela esteja mecanicamente incorporado”. No modo de recepção, uma antena opera como um sensor ou transdutor eletromagnético. Já no modo de transmissão, uma antena opera como um atuador ou transdutor eletromagnético. Uma antena é um componente essencial para qualquer sistema de RF em telecomunicações.

O padrão brasileiro de TV digital é o ISDB-T, operando dentro da faixa de UHF em 470 MHz a 692 MHz (canais 14 a 51). Os antigos canais em VHF (2 a 13) não são mais utilizados e os canais superiores (52 a 69) foram leiloados em 2014, para operadoras de telefonia móvel, cuja faixa é para ser usada no 4G (LTE).

2.1.1 ANTENAS PARA TRSMISSÃO EM *BROADCAST*

Antenas empregadas em radiodifusão devem suportar altas potências dos transmissores, serem robustas para resistirem a intempéries e na maioria dos casos, possuem diagramas de irradiação com boa abertura, quando não são omnidirecionais. Além disso, essas antenas são otimizadas para um determinado canal de operação, de modo a contribuir ainda mais, através de seu ganho, para que os sinais cheguem mais longe e com maior integridade.

a. ANTENA *SLOT* (FENDAS/CAVIDADES)

São antenas de fendas colineares autoportante, com polarização horizontal, circular ou elíptica, otimizada para trabalhar com até 3 canais adjacentes. Possuem variação de diagramas de acordo com a montagem/fabricação: omnidirecional, cardioide, direcional ou dedicada. Podem ser instaladas em lateral de torre ou topo. A largura de banda pode chegar a 18 MHz. Dependendo do número de fendas, que pode variar entre 2 a 16, o tamanho da antena varia entre 1,5 m a 10 m [2]. A figura 2.1 retrata a representação de uma antena *slot*, com seu radome.

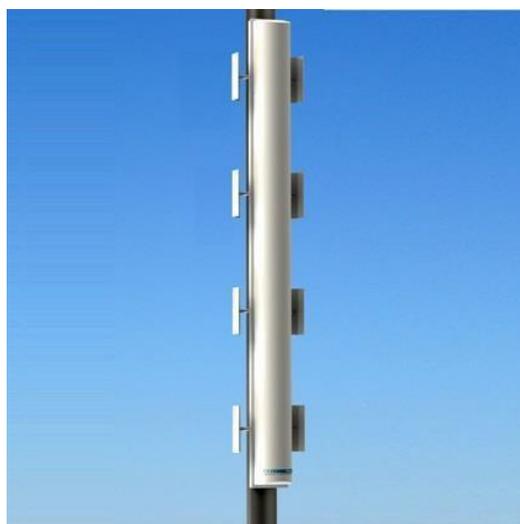


Figura 2.1: Antena *Slot*.

b. PAINEL DE DIPOLOS

O painel é composto por um arranjo de dipolos dispostos no interior de seu radome. O painel pode ser utilizado individualmente ou em um conjunto de antenas, como se vê na figura 2.2.

Dependendo do diagrama de irradiação que se deseja alcançar, painéis podem ser empilhados em diferentes níveis e/ou dispostos em diferentes faces. Este tipo de configuração é bastante utilizado quando se deseja alcançar cobertura de sinal em diferentes direções e/ou com azimutes dedicados. Sua largura de banda pode chegar a até 276MHz. A diferença deste tipo para as outras é que sua instalação é feita em lateral de torre. O diagrama de irradiação é customizado de acordo com o arranjo de painéis e o tipo de polarização é horizontal. Um painel mede, aproximadamente, 1000 mm x 500 mm. [3]



Figura 2.2: Antena Pannel de Dipolos.

c. *SUPERTURNSTILE*

É uma antena de polarização horizontal, omnidirecional, produzida através de dipolos dobrados. Possui largura de banda de 336 MHz e sua instalação é no topo de torre. Esta antena possui radome de 1,6 m de diâmetro e seu tamanho pode variar de 1,9 m a 15 m dependendo do número de elementos. Além disso, pode ser empilhada formando conjunto de antenas de forma a alterar seu diagrama de elevação [4]. A figura 2.3 demonstra uma dessas antenas já instalada.



Figura 2.3: Antena *Superturnstile*, sem radome.

Na tabela 2.1, é demonstrado o ganho para cada tipo de antena. Pode-se verificar que a antena *Slot* é a que possui menor banda, porém é a de melhor ganho. As antenas painel e *superturnstile* possuem maior banda, porém, para se atingir ganhos acima de 10 dBd é necessária a utilização de um conjunto delas. Cada tipo tem sua vantagem e desvantagem, que irá se adequar melhor a determinados projetos e necessidades.

Tabela 2.1: Comparativo de Ganhos

Tipo	Banda (MHz)	Ganho (dBd)
<i>Slot</i> 4 fendas (Omnidirecional)	6 a 18	7.6
<i>Slot</i> 8 fendas (Omnidirecional)	6 a 18	10.6
<i>Slot</i> 16 fendas (Omnidirecional)	6 a 18	13.6
Painel de Dipolos (1 nível e 1 face)	256	12.28
Painel de Dipolos (1 nível e 4 faces)	256	6.28
Painel de Dipolos (4 níveis e 4 faces)	256	12.28
<i>Superturnstile</i> (1 nível)	336	1.6
<i>Superturnstile</i> (4 níveis)	336	7.6
<i>Superturnstile</i> (8 níveis)	336	10.6

2.1.2 ANTENAS PARA RECEPÇÃO

As antenas de recepção devem atender a toda faixa de frequências da TV digital, são menores que as de transmissão e, normalmente, mais diretivas. Os materiais envolvidos na fabricação não necessitam do mesmo nível de resistência das antenas de transmissão e devem ser de baixo custo, com a finalidade de baratear o custo final das mesmas.

a. LOG PERIÓDICA

As antenas desse tipo são projetadas para operarem em diversas faixas de frequências. A concepção deste modelo de antena tem como objetivo principal alcançar um desempenho uniforme e otimizado em toda faixa de operação. A instalação dessa antena normalmente é feita externamente. Um exemplo é mostrado na figura 2.4.



Figura 2.4: Antena Log Periódica.

b. DIPOLO DE HASTE TESLESCÓPICA

As antenas desse tipo são dipolos com as hastes ajustáveis, como mostra a figura 2.5. De acordo com o tamanho ajustado nas hastes, melhor será o acoplamento para a frequência cujo comprimento de onda estiver sintonizado na antena. Esta antena é preparada para uso interno, protegida das intempéries do tempo.



Figura 2.5: Antena Dipolo de Haste Telescópica.

2.2 APLICAÇÃO DE ANTENAS IMPRESSAS PARA TV DIGITAL

As antenas impressas são estruturas irradiantes constituídas por uma camada dielétrica (substrato) que suporta um elemento irradiador em sua superfície. Esse tipo de antena é empregado em aplicações tecnológicas em que tamanho, peso, custo, desempenho, facilidade de instalação e perfil aerodinâmico são parâmetros determinantes.

Entre as vantagens deste tipo de elemento, podemos citar: baixo peso e volume, baixo custo, baixo perfil planar, simplicidade na fabricação. Como desvantagens, podemos citar: pequenas larguras de banda, baixo ganho, perdas ôhmicas e aparecimento de ondas superficiais. Antenas impressas para DTV não são comuns, pois devido às baixas frequências utilizadas, o tamanho da antena tenderá a ser grande. São poucos exemplos que podemos encontrar na literatura, justamente por conta desse empecilho.

Existem diversas geometrias para as antenas impressas, cada uma com sua respectiva característica e aplicabilidade. Em aplicações aeronáuticas, aeroespaciais, de satélite, míssil de alto desempenho e em aplicações comerciais como celulares, *tablets* e outros dispositivos portáteis, antenas com este tipo de estrutura são essenciais. As antenas do tipo *patch* retangular, mostrada na figura 2.6, são bastante utilizadas para aplicações de satélites [5], podendo ter um *array* de 256 *patches* [6]. Na aeronáutica, antenas Yagi-Uda são utilizadas em aviões para sistemas de detecção e de radares [7]. Para cada aplicação existe uma geometria mais adequada.

A decisão a ser tomada, por determinado tipo de antena, permeia alguns parâmetros necessários para o projeto, sendo os principais: tamanho, peso, custo, diretividade, ganho e largura de banda.

O *software* ADK (*Antenna Design Kit*) é uma aplicação que nos permite simular de forma rápida o tamanho e o formato que uma antena terá de acordo com os parâmetros fornecidos como tipo de antena, constante dielétrica, banda de frequência e *thickness*.

Utilizando o ADK, podemos ter acesso a uma série de padrões diferentes, entre eles podemos citar as antenas *Patch*, *Planar Spiral*, Log Periódica Planar e Vivaldi.

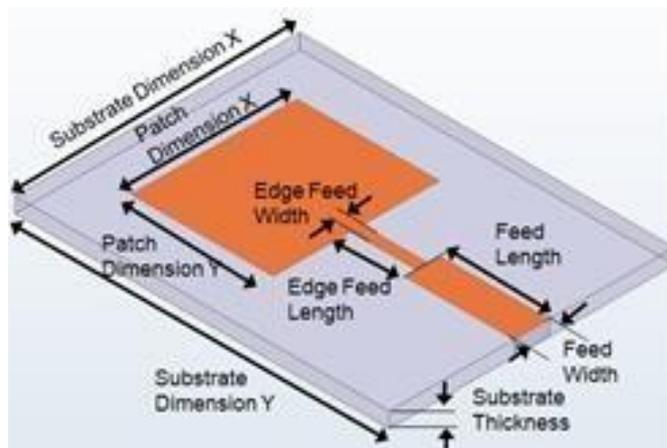


Figura 2.6: Antena *Patch* Retangular [11].

A fim de identificar o melhor padrão para trabalho em banda larga são feitos alguns testes utilizando o ADK.

Utilizando as características do substrato de alta constante dielétrica RO6010 ($\epsilon_r = 10$, tangente de perdas de 0,0023 e *thickness* de 2.5 mm) em conjunto com o ADK, pode-se verificar as dimensões de cada antena na faixa de operação já estipulada.

As antenas do tipo Log Periódica planares são as que apresentaram menores dimensões sendo possível candidata ao nosso projeto. Todas as outras apresentaram tamanhos maiores o que tornam a fabricação complexa e que vão de encontro com nosso objetivo, que é propor uma solução menor e mais adaptável.

Apesar da antena *patch* possuir um bom tamanho, infelizmente sua banda de operação é bastante estreita, conforme pode ser observado na figura 2.7.

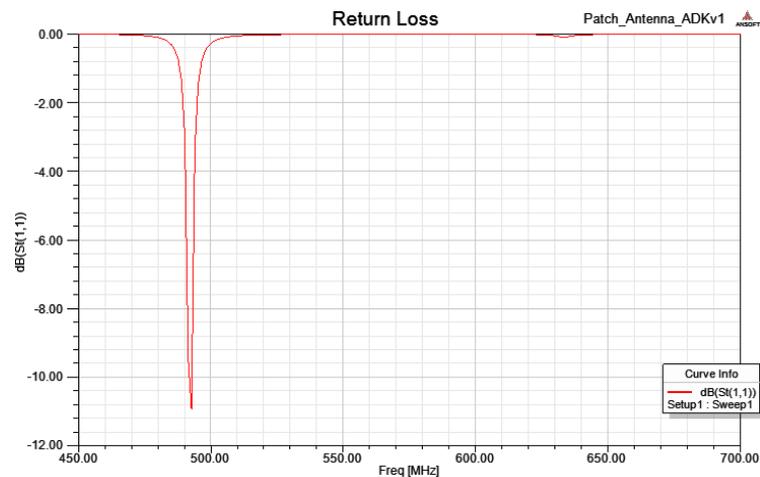


Figura 2.7: Perda de Retorno da Antena *Patch* Retangular.

2.2.1 ANTENA LOG-PERIÓDICA TRAPEZOIDAL DENTADA

Em um contexto geral, as antenas desse tipo fornecem ampla largura de banda, ganho moderado e uma ampla irradiação. [8]

O termo Log-Periódica tem origem na propriedade deste tipo de antena exibir características de radiação que são repetitivas (ou periódicas) em função do logaritmo da frequência de operação, dentro de uma faixa de funcionamento.

Uma antena log-periódica é de banda larga, com multielemento, unidirecional, com largura de feixe estreita, possuindo impedância e radiação características e regularmente repetitivas como uma função logarítmica da sua excitação. Sua estrutura física é composta por vários elementos de tamanhos diferentes, onde cada um desses elementos responde a uma frequência diferente. O comprimento e espaçamento entre elementos aumenta de forma logarítmica de uma ponta à outra. Na figura 2.8 é visualizado o padrão de uma antena de geometria espiral do tipo dentada planar.

O ADK nos fornece duas opções de Antenas Logarítmica: *Toothed Spiral Planar* (Espiral Dentada Planar) e *Toothed Trapezoidal Planar* (Trapezoidal Dentada Planar).

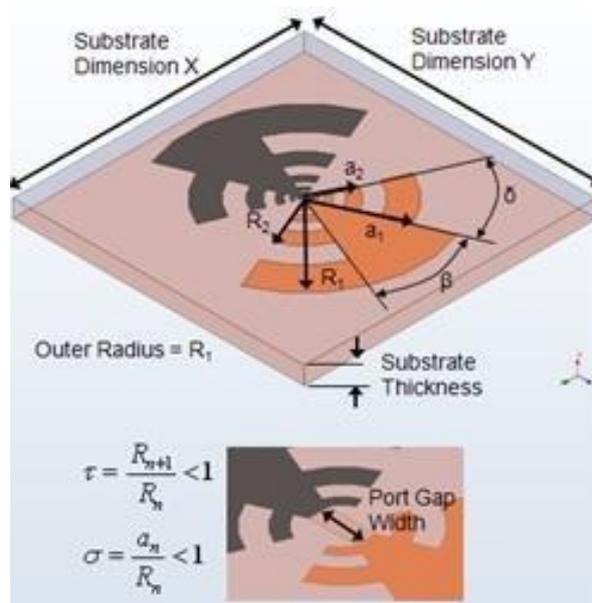


Figura 2.8: Geometria da Antena Espiral Dentada Planar [12].

A antena Log-Periódica Trapezoidal Dentada, mostrada na figura 2.9, é uma versão modificada da Espiral na figura 2.8. Essa modificação torna a construção da antena mais fácil. Os limites de frequência, superiores e inferiores, são definidos pelos dentes maior e menor, respectivamente.

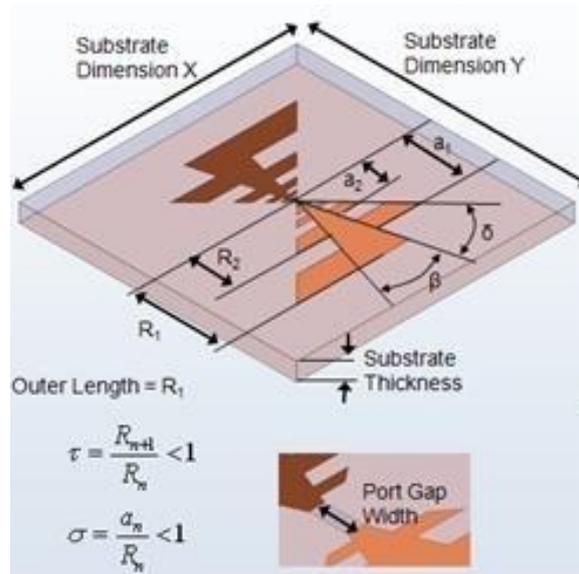


Figura 2.9: Geometria da Antena Trapezoidal Dentada Planar [12].

Optou-se por trabalhar com a Antena Trapezoidal, pois além de uma simplificação na fabricação, durante as simulações feitas no ADK, a mesma se apresentou com dimensões menores do que a Espiral.

Se as geometrias da figura 2.9 usarem dentes periódicos uniformes, a razão geométrica da estrutura é definida por:

$$\tau = \frac{R_n}{R_{n+1}} < 1$$

A razão geométrica τ define o período de operação. Por exemplo, se duas frequências f_1 e f_2 , diferirem por um período, então se relacionam à razão geométrica τ por:

$$\tau = \frac{f_1}{f_2} < 1, \quad f_2 > f_1$$

Outra razão usada é em relação aos elementos irradiantes do lado esquerdo e direito:

$$\sigma = \frac{a_n}{R_n} < 1, \text{ onde } a_n \text{ e } R_n \text{ estão identificados na figura 2.9}$$

Na literatura, pode-se encontrar algumas aplicações para essa antena, entretanto, todas elas são para faixas de frequências acima de 1GHz. A relação estipulada entre tamanho da antena e frequência já é bem conhecida, portanto quanto menor for a frequência de operação maior será a geometria da antena. Veremos mais adiante como reduzir as dimensões dessa antena para uma faixa de frequência baixa.

CAPÍTULO 3

3. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo são abordadas as simulações feitas de forma a seguirmos com a fabricação da antena posteriormente. O *software* utilizado nas simulações é o HFSS e na figura 3.1 podemos ver o ambiente de simulação do mesmo. Este programa resolve equações via método de elemento finito para estruturas eletromagnéticas e é utilizado para projeto de antenas e circuitos eletrônicos de RF complexos incluindo filtros e linhas de transmissão. Por meio do HFSS conseguimos gerar gráficos de parâmetros como perda de retorno, diagrama de irradiação horizontal e vertical, entre outros. Estes parâmetros serão de suma importância para análise posterior, após a fabricação e medição da antena em laboratório.

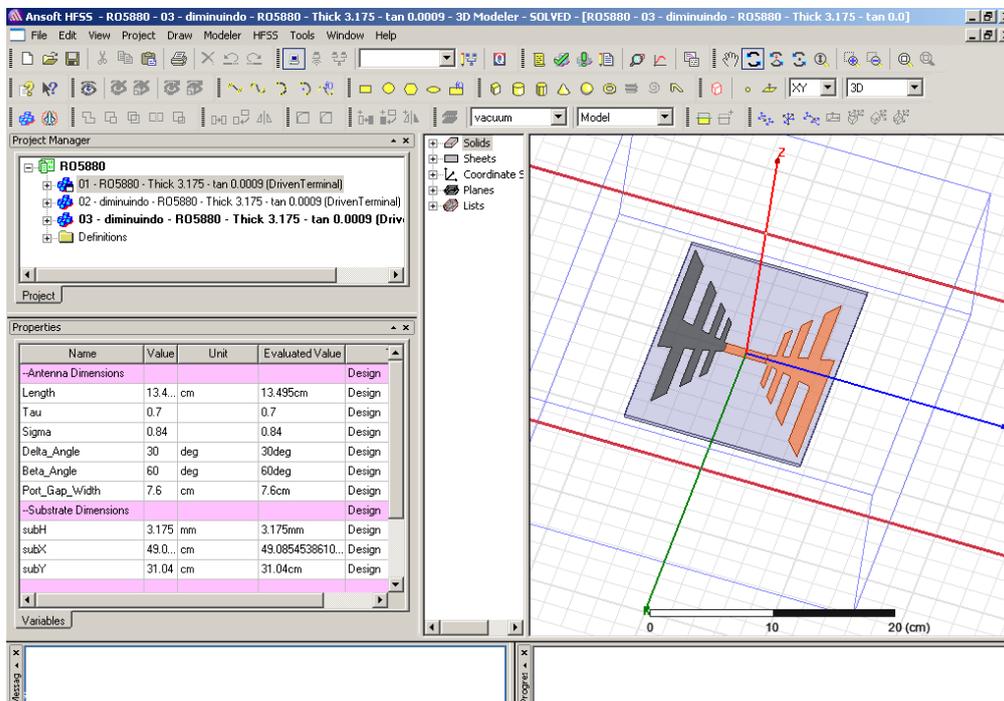


Figura 3.1: Ambiente de simulação do HFSS.

3.1 ESCOLHA DO MATERIAL UTILIZADO

Existem diferentes tipos de substratos para fabricação de antenas e circuitos impressos disponíveis no mercado. Inicialmente, determinou-se trabalhar com substratos de constante dielétrica baixa, média e alta de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 3.1: Características dos substratos testados.

Substrato	Constante Dielétrica	Tangente de Perdas	Thickness (μm)
RO5880	2.2	0.019	3.175
FR4	4.3	0.035	1.575
RO6010	10	0.0023	2500

A primeira simulação foi feita utilizando o substrato RO5880 da *Roger Corporation*. Este substrato é fabricado em microfibras de vidro reforçada com PTFE (teflon), coberto com uma camada de cobre e muito utilizado em sistemas que utilizam banda Ku e de maiores frequências [12].

Selecionando a faixa de frequências de 470 a 692 MHz no ADK e inserindo os valores das dimensões da tabela para o RO5880, exportou-se o modelo 3D do resultado da simulação do ADK para o HFSS e obteve-se os parâmetros da figura 3.3.

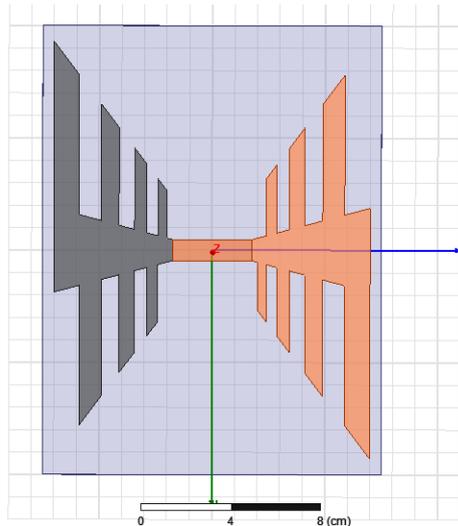


Figura 3.2: Simulação da antena utilizando RO5880.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	13.4...	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	30	deg
Beta_Angle	60	deg
Port_Gap_Width	7.6	cm
--Substrate Dimensions		
subH	3.175	mm
subX	49.0...	cm
subY	31.04	cm

Figura 3.3: Parâmetros da antena retornados pelo HFSS para o substrato RO5880.

A descrição de cada um dos parâmetros obtidos é:

- *Length*: comprimento total do elemento condutor da antena, desde a borda de um elemento irradiante à borda do outro no eixo y;
- Tau (τ): Razão entre distância do centro da antena a um elemento irradiante do lado esquerdo e a distância do centro ao elemento anterior do mesmo lado, conforme já visto na Subseção 2.2.1;
- Sigma (σ): Razão entre distância do centro da antena a um elemento irradiante do lado direito e a distância do centro ao elemento de mesmo número do lado esquerdo, conforme já visto na Subseção 2.2.1;
- Delta (δ): Ângulo de abertura que define o tamanho dos elementos irradiantes;

- Beta (β): Ângulo de abertura que define a largura do elemento alimentador ao centro da antena;
- *Port Gap*: Distância entre um polo a outro da antena. É por esse local que a antena é alimentada;
- Sub X: Tamanho do substrato no eixo x;
- Sub Y: Tamanho do substrato no eixo y.

A perda de retorno obtida está demonstrada na figura 3.4:

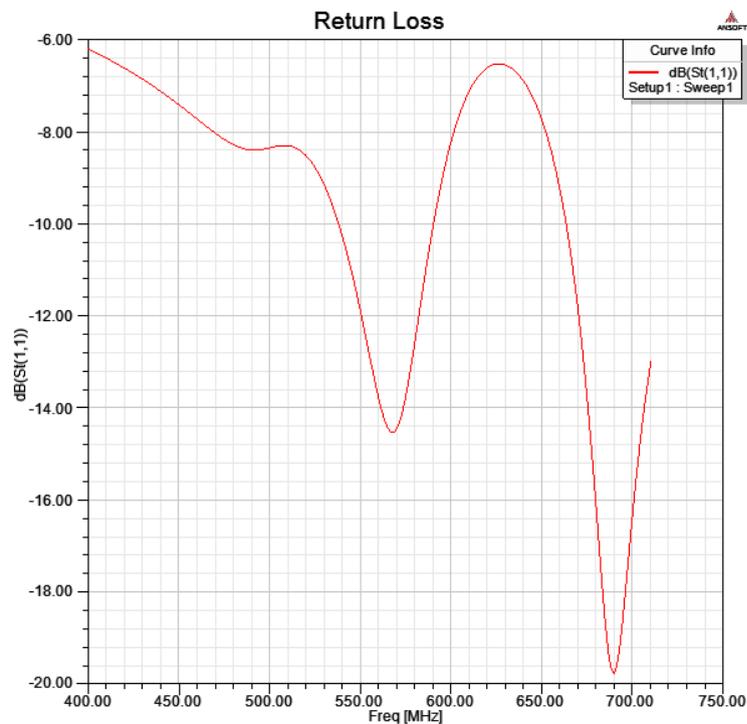


Figura 3.4: Perda de Retorno da antena utilizando RO5880.

A próxima simulação realizada foi utilizando o substrato FR4. Esse material é padrão na indústria para fabricação de placas de circuito eletrônico, feito de fibra, possui uma constante dielétrica de médio valor e uma boa durabilidade.

Ao selecionarmos a faixa de frequências de 470 a 692 MHz no ADK e inserindo os valores de tabela para o FR4, exportamos a simulação para o HFSS e foram obtidos os parâmetros da figura 3.6.

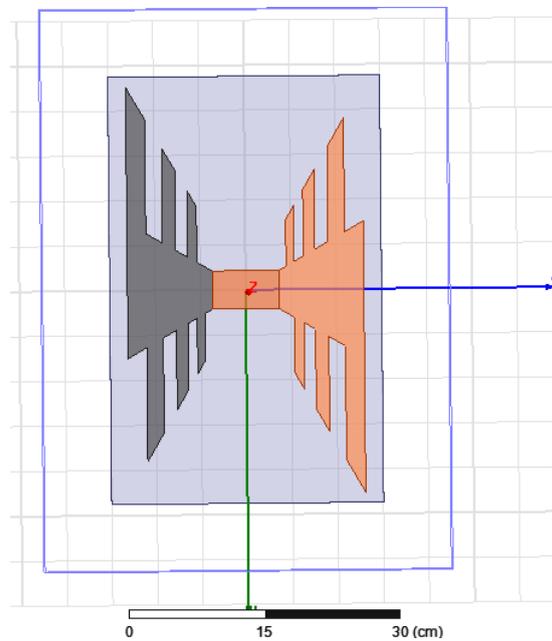


Figura 3.5: Simulação da antena utilizando FR4.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	13.0...	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	30	deg
Beta_Angle	60	deg
Port_Gap_Width	7.36	cm
--Substrate Dimensions		
subH	1.575	mm
subX	47.5...	cm
subY	30.05	cm

Figura 3.6: Parâmetros da antena retornados pelo HFSS para o substrato FR4

A perda de retorno obtida da simulação está ilustrada na figura 3.7.

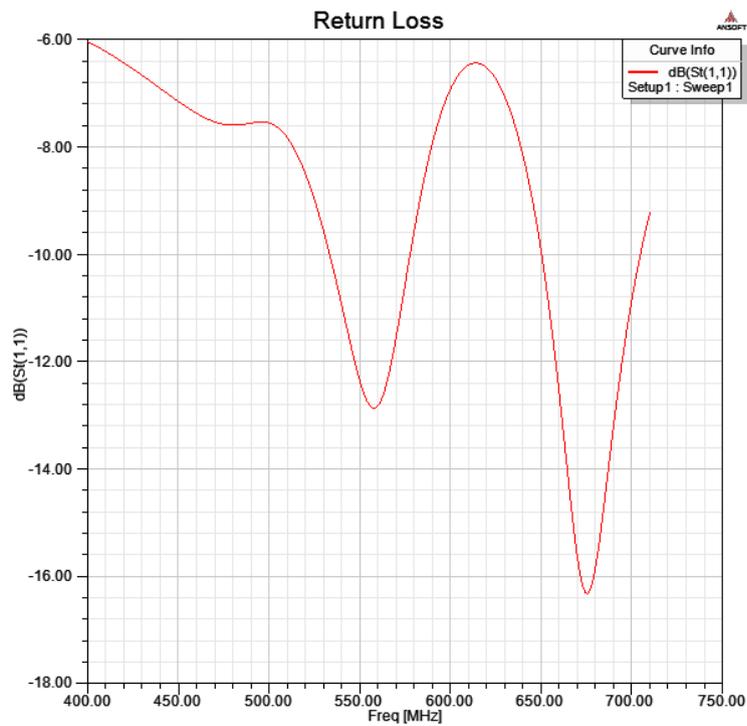


Figura 3.7: Perda de Retorno da antena utilizando FR4.

A último substrato simulado foi o RO6010. Esse tipo de substrato é utilizado na fabricação de circuitos de micro-ondas que necessitam de uma alta constante dielétrica, ele é composto de cerâmica-PTFE e revestido por uma camada de cobre. Configuramos a faixa de frequências de 470 a 692 MHz no ADK e inserimos os valores de tabela 3.1 para o RO6010, exportamos a simulação para o HFSS e obtivemos o seguinte:

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	9.574	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	30	deg
Beta_Angle	60	deg
Port_Gap_Width	5.39	cm
--Substrate Dimensions		
subH	2.5	mm
subX	34.8...	cm
subY	22.02	cm

Figura 3.8: Parâmetros da antena retornados pelo HFSS para o substrato RO6010.

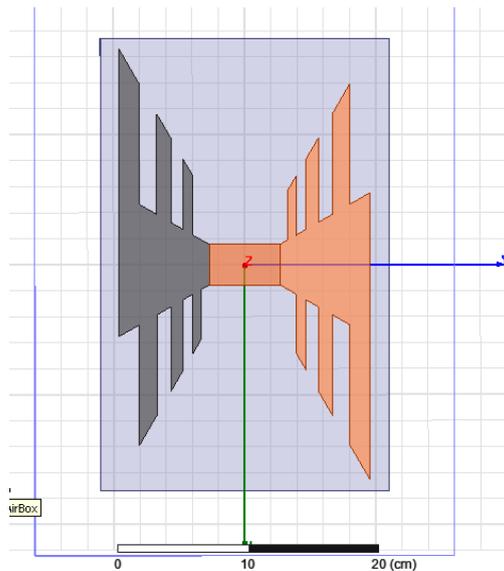


Figura 3.9: Simulação da antena utilizando RO6010.

A perda de retorno obtida da simulação está ilustrada no gráfico da figura 3.10.

Após as simulações e análises optou-se por escolher o substrato FR4. Apesar do RO6010 apresentar uma antena de tamanho menor, sua perda de retorno era pior do que a dos substratos FR4 e RO5880 e, por consequência, o desempenho da antena em banda larga poderia ser comprometido.

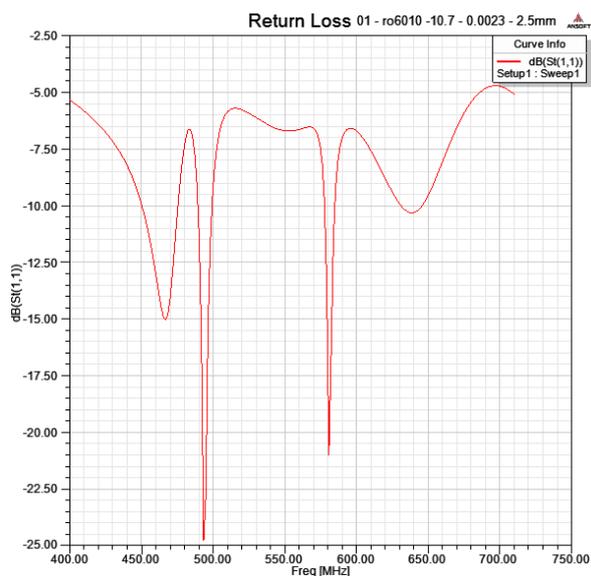


Figura 3.10: Perda de Retorno da antena utilizando RO6010.

As simulações do FR4 e RO5880 resultaram em dimensões aproximadas, conforme tabela 3.2, e os resultados de perda de retorno foram bem próximos. A opção de seguir com o FR4 foi tomada, pois o mesmo é de fácil acesso no mercado e possui um baixo custo, o que contribui para confecção da antena em uma produção em larga escala. A figura 3.1 mostra a comparação de perda de retorno entre os substratos RO5880 e FR4.

Tabela 3.2: Comparação entre tamanhos referentes ao substrato.

Substrato	Comprimento eixo x (cm)	Comprimento eixo y (cm)
RO5880	49.0	31.0
FR4	47.5	30.0
RO6010	34.8	22.0

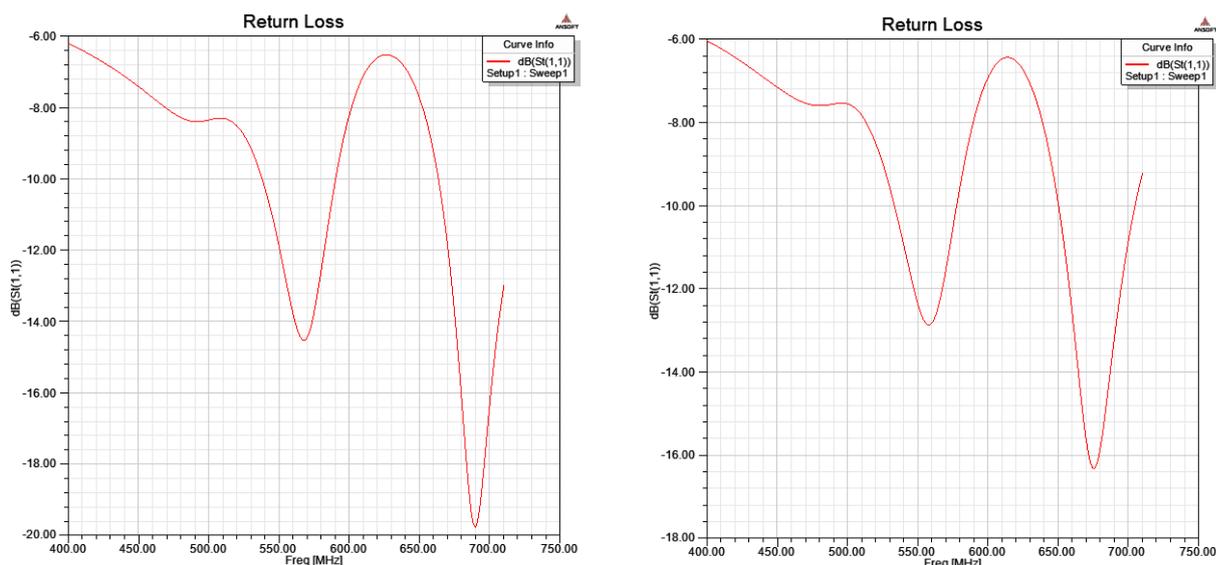


Figura 3.11: Perda de Retorno utilizando (a) RO5880 e (b) FR4.

3.2 OTIMIZAÇÃO DAS DIMENSÕES DA ANTENA UTILIZANDO FR4

Após a escolha do substrato, precisamos nos preocupar em preparar a antena para fabricação. É importante destacar que o substrato FR4 é um elemento barato, de fácil confecção e pouco visto na literatura com aplicação na faixa de DTV, para este modelo de antena.

Comumente, o substrato disponível para impressão da antena é disponibilizado em tamanho A3 (30 cm x 40 cm). Além disso, os tamanhos maiores nos dificultaria o processo de fabricação. A tabela 3.3 mostra os parâmetros retornados após a primeira simulação com FR4.

Tabela 3.3: Parâmetros retornados da primeira simulação utilizando FR4.

Simulação	Length (cm)	Tau	Sigma	Delta (graus)	Beta (graus)	Port Gap (cm)	Sub X (cm)	Sub Y (cm)
FR4 inicial	13.0	0.7	0.84	30	60	7.36	47.5	30.0

Para que pudéssemos fabricar a antena, ainda era necessário efetuar uma otimização em seu tamanho. Assim, partindo da simulação vista anteriormente e dimensionada pela tabela 3.3, os parâmetros Delta (δ) e Beta (β) foram modificados para alterar diretamente no tamanho da antena. A nova simulação nos retornou os valores apresentados na figura 3.12.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	13.065	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	28	deg
Beta_Angle	57	deg
Port_Gap_Width	7.36	cm
--Substrate Dimensions		
subH	1.575	mm
subX	40	cm
subY	30	cm

Figura 3.12: Simulação com parâmetros modificados.

Alterando β para um valor menor, estamos diminuindo diretamente o ângulo de abertura do elemento alimentador dos elementos e, com isso, reduzindo seu tamanho, e diminuindo δ estamos diminuindo o tamanho de seus elementos irradiantes.

Na tabela 3.4 podemos ver, pela comparação dos parâmetros, que o tamanho da antena foi reduzido no eixo X em consequência das alterações feitas em Delta e Beta.

Tabela 3.4: Comparativo de parâmetros entre simulações

Simulação	Length (cm)	Tau	Sigma	Delta (graus)	Beta (graus)	Port Gap (cm)	Sub X (cm)	Sub Y (cm)
FR4 inicial	13.0	0.7	0.84	30	60	7.36	47.5	30.0
FR4 modificada	13.0	0.7	0.84	28	57	7.36	40.0	30.0

A perda de retorno apresentou valores melhores que o obtido anteriormente. A figura 3.13 mostra a perda de retorno resultante da primeira simulação em comparação com a perda de retorno da antena modificada.

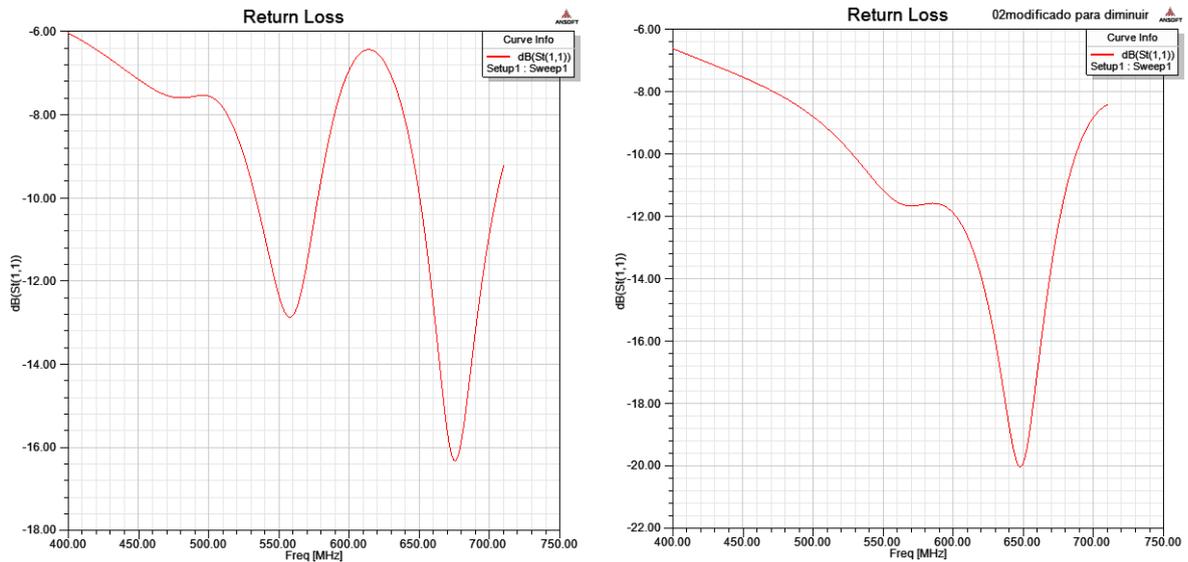


Figura 3.13: Perda de Retorno (a) primeira simulação, (b) simulação modificada.

A figura 3.14 apresenta o diagrama da irradiação da antena simulada.

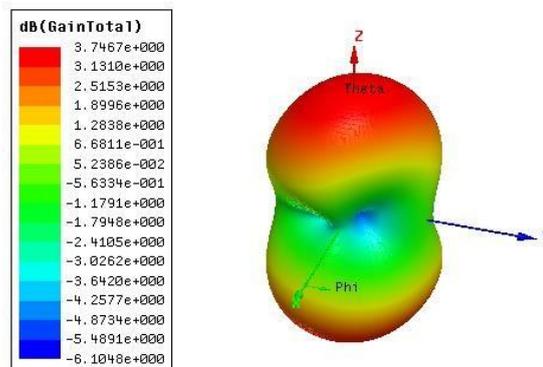


Figura 3.14: Diagrama de Irradiação da antena simulada no HFSS.

A antena está localizada no plano XY, onde seus elementos estão distribuídos perpendicularmente ao longo do eixo Y. Pode-se observar que a mesma possui uma boa irradiação, principalmente nas direções dos eixos y e z. Esse formato cardioide é essencial para o que buscamos, pois permite que antena seja mais independente do posicionamento.

O diagrama polar de irradiação da antena simulada está demonstrado na figura 3.15.

Pode-se notar que este diagrama é bem próximo ao de um dipolo comum e, por esse motivo, é um bom resultado.

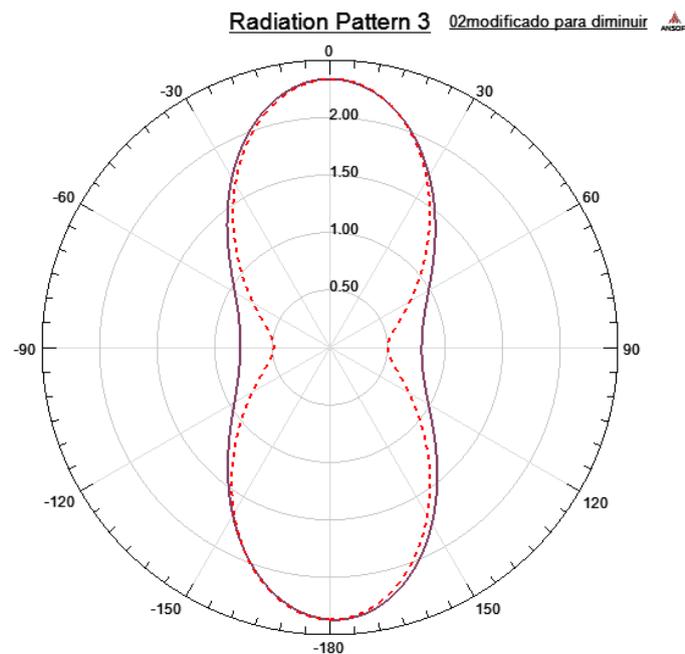


Figura 3.15: Diagrama de irradiação da antena simulada.

O diagrama de elevação da antena simulada está representado na figura 3.16.

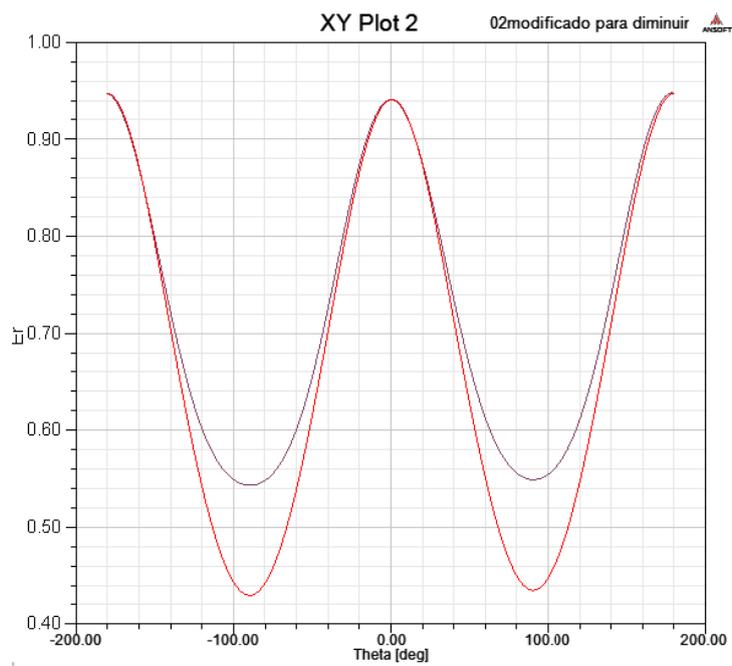


Figura 3.16: Diagrama de elevação da antena simulada.

CAPÍTULO 4

4. FABRICAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS / CARACTERIZAÇÃO

Este capítulo aborda todo processo de fabricação da antena, bem como os testes realizados posteriormente. A maior dificuldade encontrada no processo de fabricação é que a prototipadora de CIs (Circuitos Integrados) do tipo LPKF S103, disponível no laboratório de propagação da UFF não permite a utilização de laminados com tamanho maior do que o de uma folha A4, portanto, para conseguir fabricar o protótipo da antena proposta, foi necessário um processo de fabricação manufaturado, realizado por meio de uma termo-transferência do *layout* da antena e corrosão de cobre por meio de percloroeto de ferro, descritos a seguir.

4.1 FABRICAÇÃO

Para realizar a fabricação da antena, utilizou-se a técnica de termo-transferência do desenho do *layout* da antena, com auxílio de um ferro de passar em alta temperatura, por meio da impressão a laser em papel fotográfico do *layout* da antena em escala 1:1, conforme indicado na figura 4.2. A corrosão do cobre indesejado é realizada utilizando a substância química denominada percloroeto de ferro, que é um composto químico que corrói o metal através de diversas reações químicas. Esta técnica é bastante conhecida na fabricação de placas para circuitos impressos e consiste em proteger bem as áreas onde se deseja manter o elemento condutor e submergir a placa em um recipiente com a solução, conforme mostra a figura 4.3. O objetivo final dessa proteção é proteger partes do elemento condutor que correspondem aos elementos irradiadores da antena, para que o percloroeto não os corra. A placa utilizada somente possui uma de suas faces recoberta por cobre.

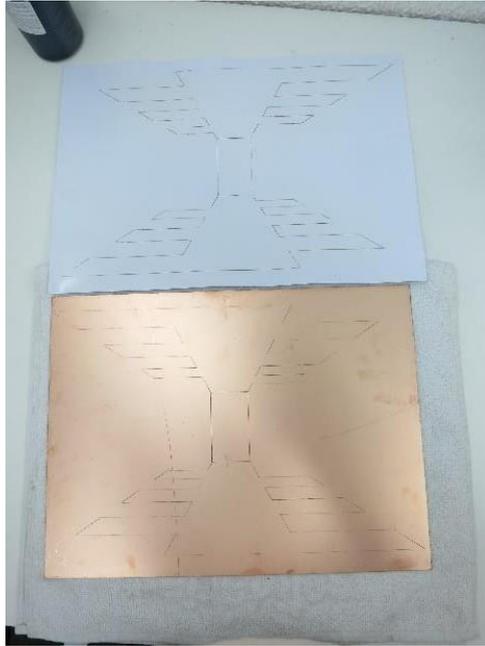


Figura 4.2: Transferência da geometria para placa através do ferro.



Figura 4.3: Área da antena protegida e pronta para corrosão.

Após a demarcação e com a placa protegida, preparamos um recipiente com percloreto de modo a envolver a superfície de cobre. Aguardamos alguns minutos até a corrosão estar completa e, após, limpamos a placa com água e sabão. As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram o processo de corrosão, limpeza e finalização respectivamente.



Figura 4.4: Placa durante o processo de corrosão.

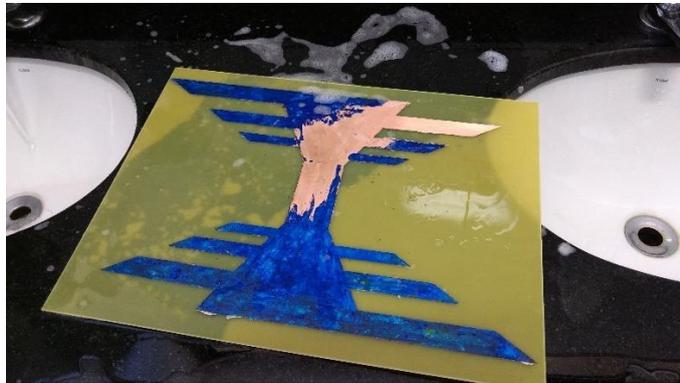


Figura 4.5: Limpeza da placa após o processo de corrosão com água e sabão.

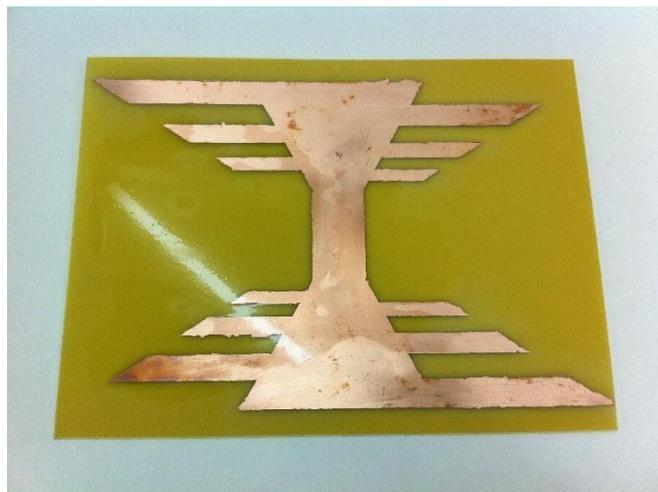


Figura 4.6: Placa pronta após a limpeza.

Novamente foi necessário revisitar o processo de corrosão pois necessitávamos separar os dois polos da antena com o gap entre eles, portanto retomamos todo processo descrito acima, porém visando apenas à corrosão do *gap* mostrado na figura 4.7.



Figura 4.7: Corrosão entre os polos criando o *Port Gap*.

A criação do *Port Gap* se faz necessária uma vez que é através dela que o sinal da antena é excitado. Para que possamos transmitir ou receber o sinal DTV pela antena, utilizamos um cabo coaxial de 75Ω , com conector N(m) em uma das pontas.

Passado esse processo, a antena estava pronta para a caracterização experimental.

Os primeiros testes consideraram o uso da antena sem balun. Testes futuros indicam o uso do ballon para avaliar a qualidade do sinal recebido. A figura 4.8 mostra a antena pronta para os testes.



Figura 4.8: Antena pronta para os testes.

4.2 VSWR, S_{11} e ESPECTRO DO CANAL RECEBIDO

Após a fabricação da antena, foram efetuados alguns testes para comprovar sua funcionalidade e analisar de forma comparativa com as simulações realizadas no capítulo 3.

Nesta seção são abordados todos os testes realizados em laboratório e seus resultados. Os instrumentos utilizados para realização dos testes foram: o *Signal Analyzer*, modelo MS2692A e o *VNA Master*, modelo MS2034A, ambos do fabricante Anritsu. Esse último é um analisador vetorial de rede, capaz de fornecer, com precisão, medidas de espectro e parâmetros S.

O primeiro teste a ser realizado foi o de recepção de espectro de canal. Utilizou-se o *Signal Analyzer*, conectando diretamente a antena em sua entrada, como mostra a figura 4.9.

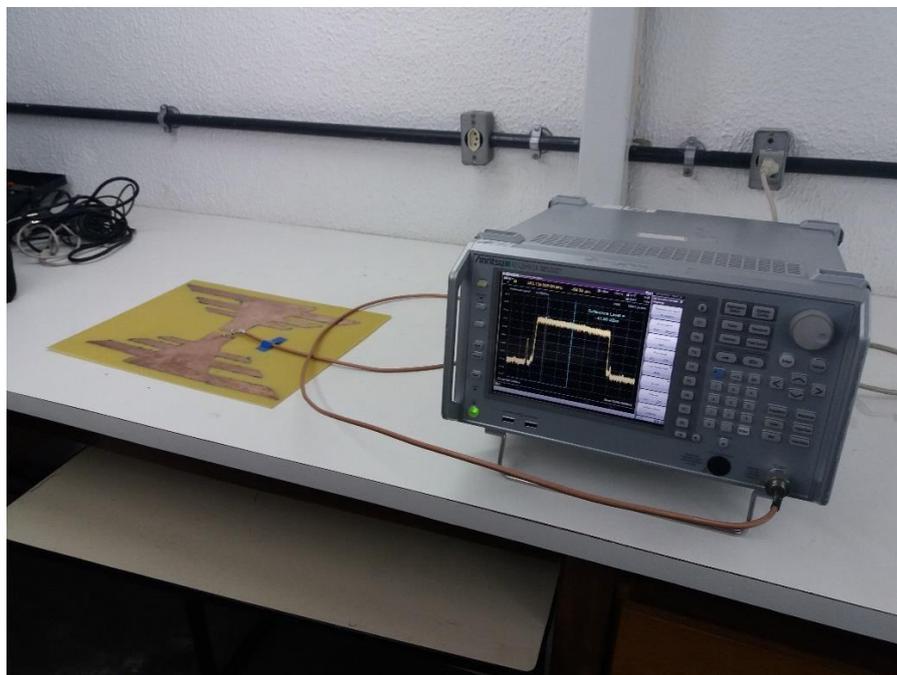


Figura 4.9: Setup de medição para visualização do sinal de RX pela antena.

Optou-se por configurar a frequência central de 563.143 MHz. Como o canal de transmissão possui 6 MHz de banda um span de 10 MHz foi selecionado. O canal correspondente à essa frequência é o CH29 que, na região metropolitana do Rio de Janeiro, é o canal outorgado à TV Globo para sua transmissão digital. Pode-se ver na figura 4.10 o setup montando e o canal sintonizado em sua tela.

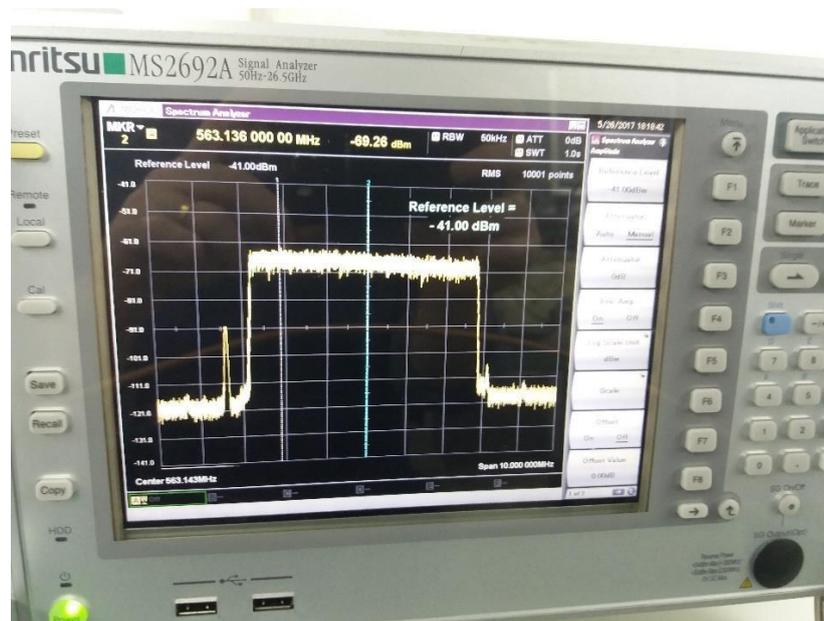


Figura 4.10: Detalhe do Espectro no CH29.

O próximo teste é o de VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*), definido por:

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Na figura 4.11, identifica-se o fluxo desse sinal como sendo o parâmetro S_{11} , basicamente esse parâmetro mede o quantitativo do valor de energia que retornará para o gerador de sinal (ou transmissor) para cada frequência de uma banda de frequências escolhida no analisador.

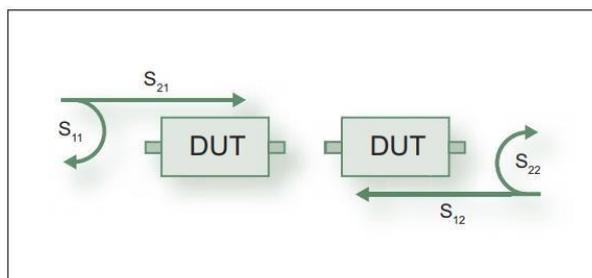


Figura 4.11: Parâmetros S para o DUT (*Device under Test*)

O *setup* do teste montado está mostrado na figura 4.12. A antena foi conectada diretamente na porta de gerador do instrumento de testes.

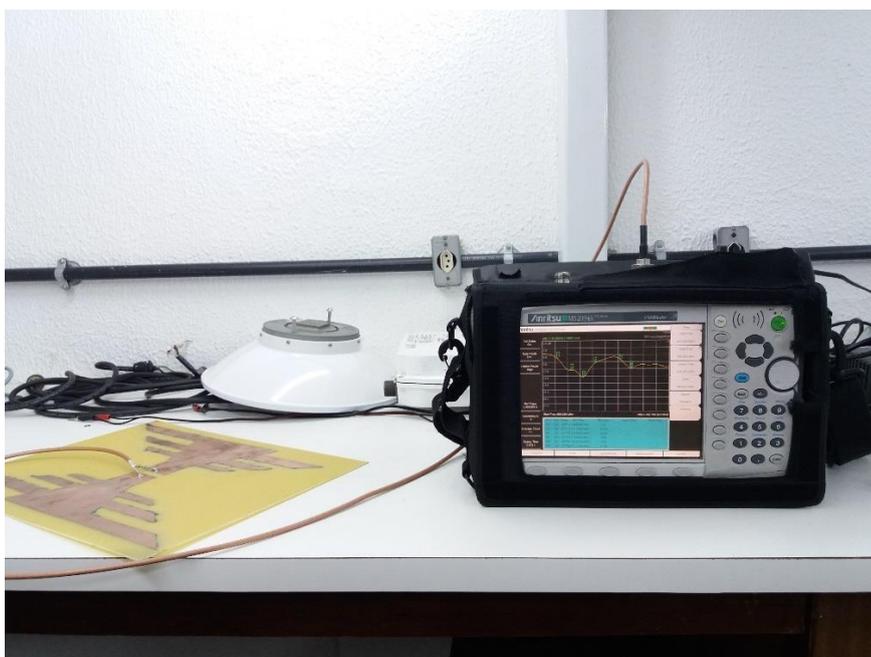


Figura 4.12: *Setup* para testes de VSWR e perda de retorno.

Neste teste, o equipamento gera um pulso de sinal que percorre o cabo até a antena, com sinal retornado ao instrumento devido ao descasamento da impedância. Através dessa medida avaliamos a taxa de onda estacionária (VSWR). O resultado do teste obtido está mostrado na figura 4.13.

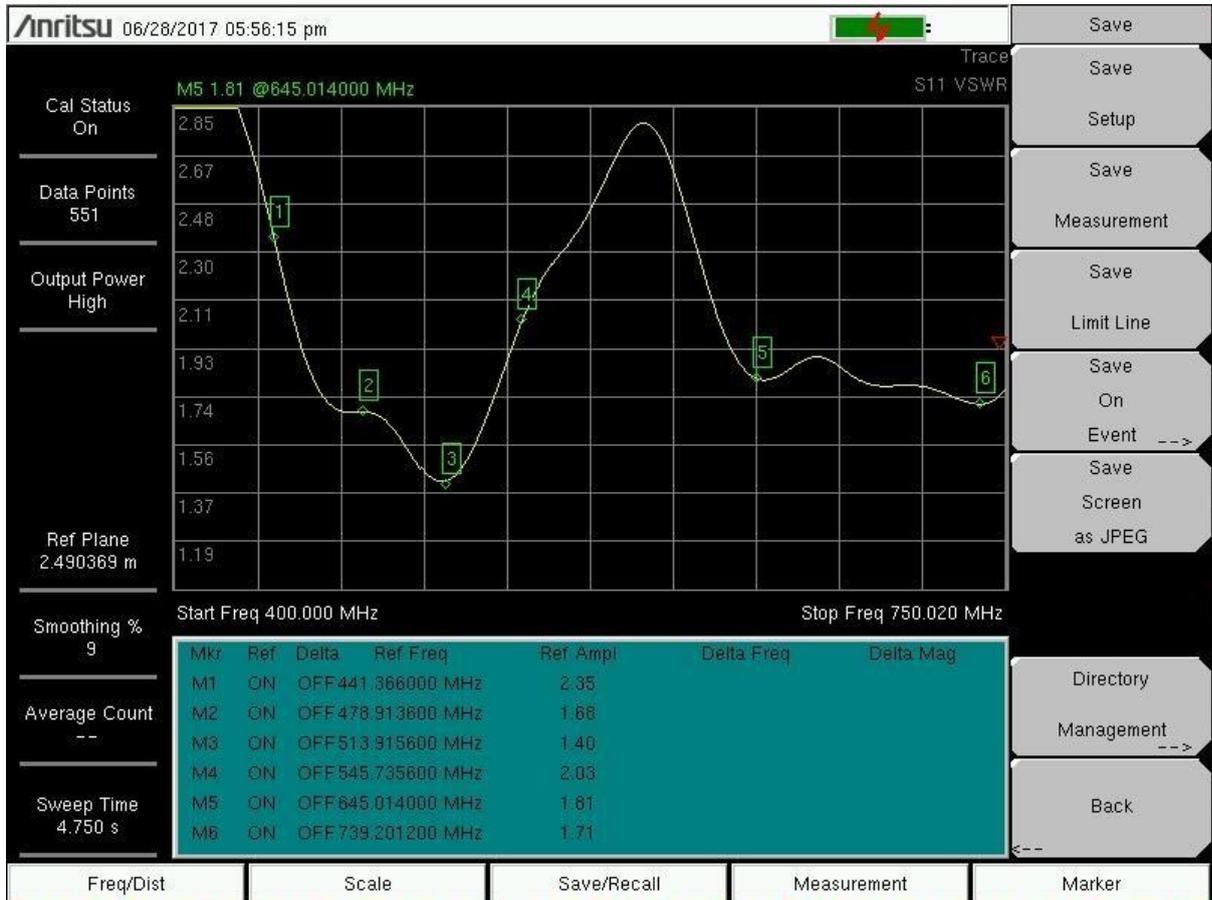


Figura 4.13: VSWR medido da Antena.

A próxima medida é a de perda de retorno, definida como:

$$R = 10 \log \frac{1}{|\Gamma|}$$

Sem desconectar a antena, foi alterado no instrumento a medida para unidade de perda de retorno. O resultado obtido é o da figura 4.14.



Figura 4.14: Perda de Retorno medido da Antena.

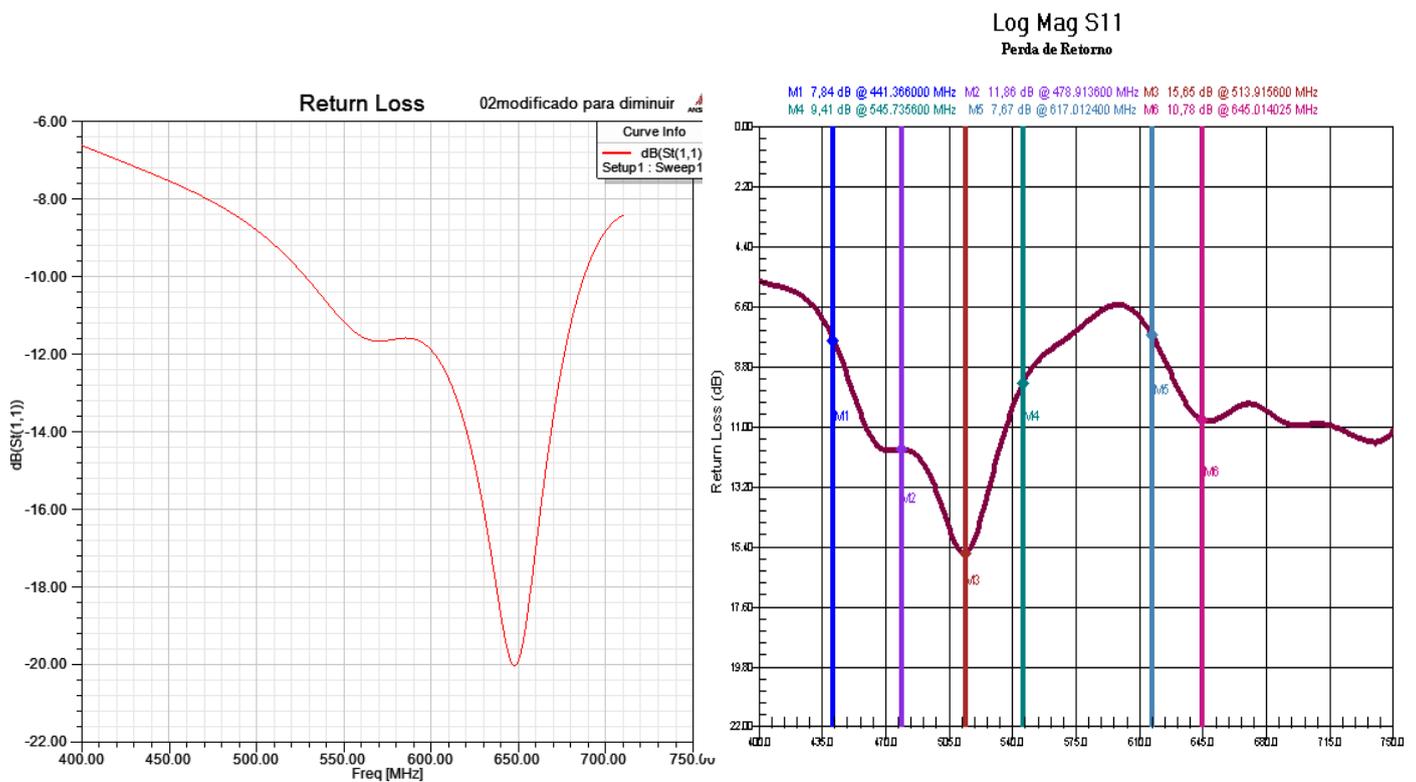


Figura 4.15: Perda de retorno: simulada (a) x medida (b).

Na figura 4.15 é comparado os resultados obtidos com a simulação feita no capítulo 3, figura 3.13 (b).

4.3 RECEPTOR DE SINAL DTV

O próximo teste a ser feito é confirmar a recepção de sinal diretamente em uma TV com conversor digital integrado, para isso a antena é conectada na TV utilizando-se um adaptador de conector do tipo N para conector do tipo F (figura 4.16). Tal adaptação se faz necessária uma vez que a entrada da TV possui conectores do tipo F(f). O objetivo deste teste é avaliar o comportamento da antena em sua utilização fim.

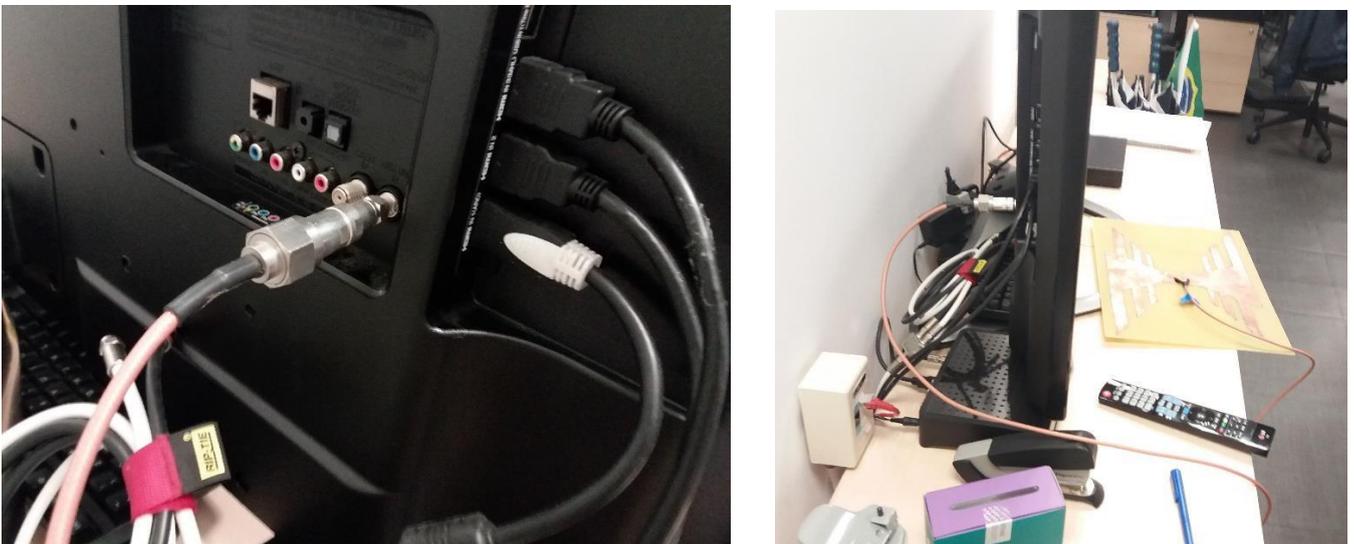


Figura 4.16: Antena conectada na TV através do adaptador de conector de RF.

Após a conexão ser realizada, podemos ver que todos os canais abertos que possuem cobertura na região estão sintonizados e sendo demodulados e decodificados sem nenhuma variação de sinal de vídeo ou áudio, conforme se vê na figura 4.17.

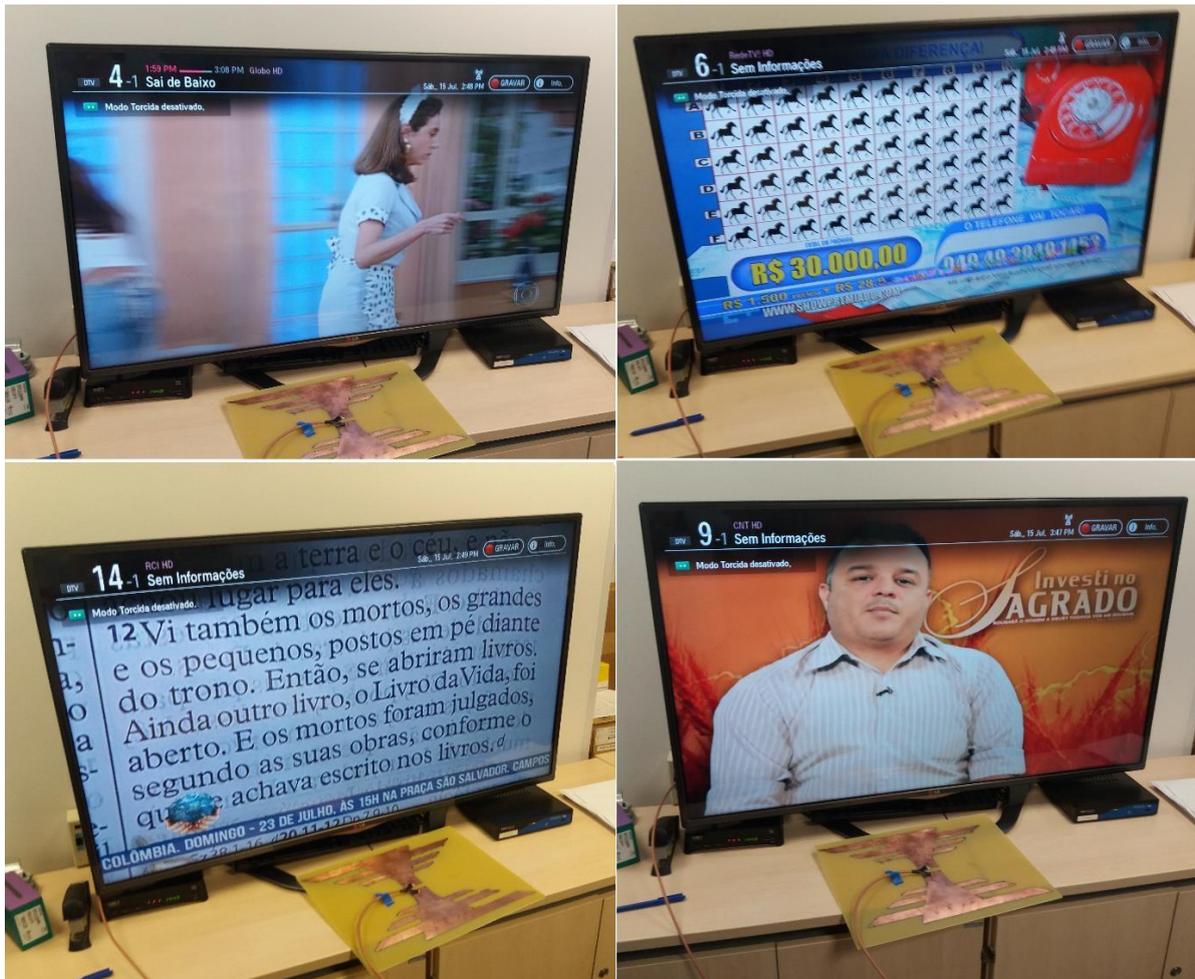


Figura 4.17: Alguns canais sendo recebidos na TV através da antena fabricada.

Após o teste realizado tivemos a certeza de que a antena é completamente funcional e utilizável para recepção interna de TV Digital.

A ANATEL, em parceria com o CPqD, desenvolveu uma documentação [9], onde está estipulada a intensidade de campo para uma recepção interna e externa.

A documentação assumiu uma condição de instalação típica, com a antena posicionada 1,5 metros acima do segundo piso de um prédio. Em se tratando da altura da antena de recepção em relação ao solo, este caso é estipulado como pior caso. A título de comparação estávamos recebendo o sinal em um andar térreo com a antena posicionada a 0,5 metros em relação ao solo.

A definição da intensidade de campo mínima para recepção com antena interna, apresentada pelo documento, considera vários fatores, tais como margem frente a ruído produzido pelo homem, margem por perda de penetração em edificações e margem por redução da altura da antena de recepção.

Tabela 4.1: Intensidade de Campo Mínima para Recepção com Antena Interna

Fator	Símbolo	VHF Baixo	VHF Alto	UHF	Fórmula
Largura de Faixa (MHz)	B	6			
Constante de Boltzmann (Ws/K)	k	1,38 x 10 ⁻²³			
Temperatura absoluta (K)	T	290			
Ruído térmico (dBm)	N _t	-106,20			N _t =kTB
Figura de ruído do receptor (dB)	N _r	10			Baseada nos resultados dos testes de laboratório realizados no Brasil [8]
Limiar de C/N (dB) do sistema digital	C/N	15 + D			D = 0 para ATSC, D = 2 para COFDM FEC 2/3, D = 4 para COFDM FEC 3/4
Mínima potência do sinal (dBm)	P _s	-81,2+D			P _s (dBm)=N _t (dBm)+N _r (dB)+C/N(dB)
Frequência central (MHz)	f _b	69	194	592	Média geométrica entre as frequências extremas da faixa
Comprimento de onda (m)	λ	4,35	1,55	0,51	λ = 300/ f _b
Área efetiva da antena isotrópica (dBm ²)	A _e	1,77	-7,21	-16,90	A _e =λ ² /(4π)
Ganho do dipolo de meia-onda em relação à antena isotrópica (dBi)	G _i	2,15			
Ganho da antena em relação ao dipolo de meia-onda (dBd)	G	-2,2	-2,2	0	Antena comercial típica
Impedância intrínseca (Ω)	η	120π			
Fator de dipolo (dBm-dBμV/m)	K _d	-111,84	-120,82	-130,51	K _d =(A _e G _i)/ η
Perda em cabos (dB)	L _r	0	0	0	
Altura da antena em relação ao piso (m)	H _a	1,5			
Margem por redução da altura da antena de recepção (dB) (segundo piso)	M _h	5	5	6	
Margem por perda de penetração (dB)	M _p	8	8	7	
Margem frente a ruído produzido pelo homem (dB)	M _m	6	1	0	
Intensidade de Campo mínima (dBμV/m)	E _{min}	51,84+ D	55,82+D	62,31+D	E _{min} (dBμV/m)=P _s (dBm)+L _r (dB)+M _m (dB)-G(dBd)-K _d (dBm-dBμV/m)+ ΔL(dB)

CAPÍTULO 5

5. MINIATURIZAÇÃO DA ANTENA

Neste capítulo serão abordadas técnicas de miniaturização utilizadas para a antena produzida anteriormente. O objetivo é desenvolver uma antena ainda menor para que sua aplicação seja a melhor possível. Para trabalhar nessa redução, novas simulações foram feitas e outras modificações de parâmetros foram realizadas. Trabalhou-se com outros substratos, realizando-se modificações de parâmetros em cada um deles.

Os substratos utilizados nas simulações e seus parâmetros podem ser verificados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Substratos utilizados nas simulações

Substrato	Constante Dielétrica	Tan de Perdas	Thickness (μm)
RO5880	2.2	0.019	3.175
FR4	4.3	0.035	1.575
RO6010	10	0.0023	2500
Dilab 85	85	0.003	2.000
Dilab 300	300	0.0003	2.000

Além dos 3 substratos utilizados anteriormente (RO5880, FR4 e RO6010) optou-se por incluir outros dois substratos nos testes de miniaturização. Mais adiante veremos o motivo.

A seguir será descrito o procedimento realizado com cada um dos elementos.

5.1 RO5880

Conforme foi visto no capítulo 3 o resultado inicial para este substrato está novamente apresentado nas figuras 5.1 a 5.3.

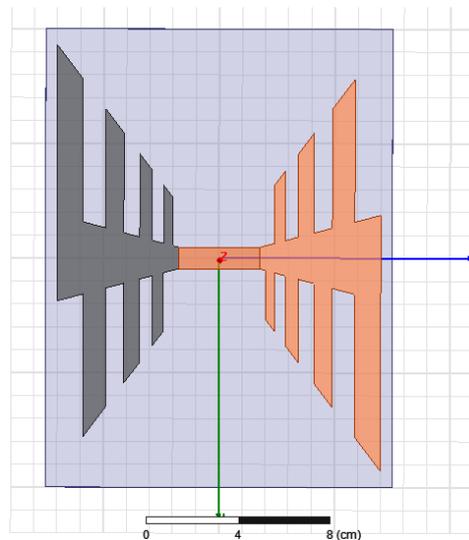


Figura 5.1: Simulação inicial da antena utilizando RO5880.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	13.4...	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	30	deg
Beta_Angle	60	deg
Port_Gap_Width	7.6	cm
--Substrate Dimensions		
subH	3.175	mm
subX	49.0...	cm
subY	31.04	cm

Figura 5.2: Parâmetros retornados pelo HFSS da simulação inicial utilizando RO5880

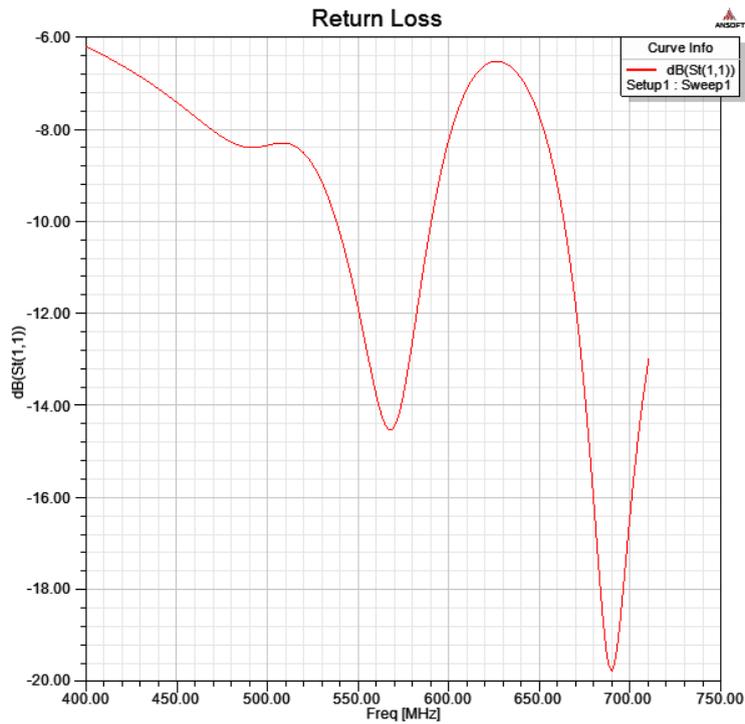


Figura 5.3: Perda de Retorno da simulação inicial utilizando RO5880.

Em busca da miniaturização efetuou-se uma alteração manual nos parâmetros de tamanho da antena (*substrate dimensions*) e procedeu-se com a simulação novamente.

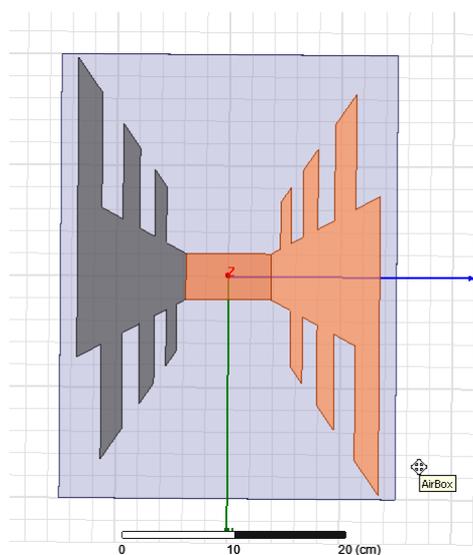


Figura 5.4: Simulação após modificações nos parâmetros da antena utilizando RO5880.

O método visa reduzir o tamanho da antena de forma direta e verificar qual o impacto na sua perda de retorno. Os resultados provenientes dessa modificação podem ser verificados nas figuras 5.4 a 5.6.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	13.4...	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	27	deg
Beta_Angle	57	deg
Port_Gap_Width	7.6	cm
--Substrate Dimensions		
subH	3.175	mm
subX	40	cm
subY	30	cm

Figura 5.5: Parâmetros, retornados pelo HFSS, após modificações utilizando RO5880.

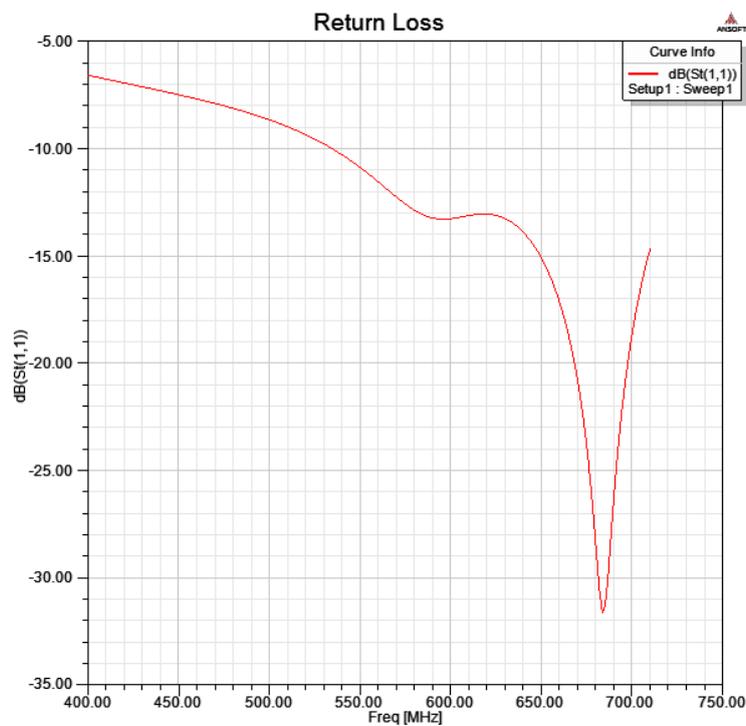


Figura 5.6: Perda de retorno da simulação após modificações utilizando RO5880.

Tabela 5.2: Comparativo entre parâmetros da simulação para RO5880.

Simulação	Length (cm)	Tau	Sigma	Delta (graus)	Beta (graus)	Port Gap (cm)	Sub X (cm)	Sub Y (cm)
RO5880 inicial	13.4	0.7	0.84	30	60	7.6	49.0	31.04
RO5880 modificada	13.4	0.7	0.84	27	57	7.6	40.0	30.0

Alterando os valores de Beta e Delta, obtém-se uma redução de, aproximadamente, 21% na área da antena em relação à simulação inicial. Além disso, percebe-se que obtivemos uma melhoria no gráfico de perda de retorno, principalmente entre 600 MHz e 650 MHz, em torno de 6 dB.

5.2 FR4

Este substrato foi utilizado na fabricação da antena que é objeto de estudo desta dissertação.

No capítulo 3, pode-se ver a simulação inicial e, no capítulo 4, o desenvolvimento para redução das dimensões da mesma. Iremos reproduzir na tabela 5.3 os valores dos parâmetros encontrados através das simulações descritas anteriormente neste trabalho.

Tabela 5.3: Comparativo entre parâmetros da simulação para FR4.

Simulação	Length (cm)	Tau	Sigma	Delta (graus)	Beta (graus)	Port Gap (cm)	Sub X (cm)	Sub Y (cm)
FR4 inicial	13.0	0.7	0.84	30	60	7.36	47.5	30.0
FR4 modificada	13.0	0.7	0.84	28	57	7.36	40.0	30.0

5.3 RO6010

A simulação inicial deste substrato pode ser vista no capítulo 3 e está novamente representada nas figuras 5.7 a 5.9.

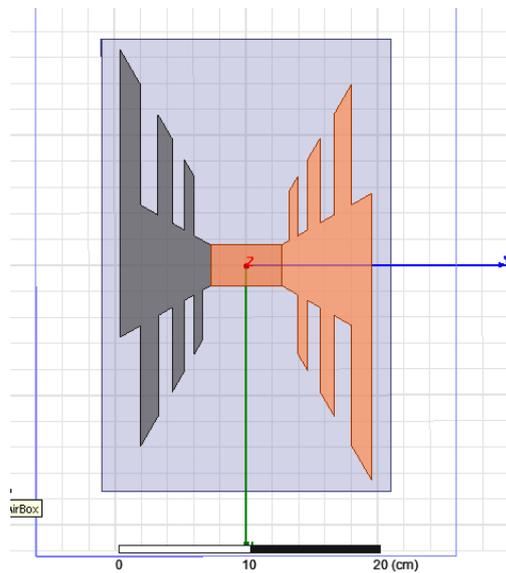


Figura 5.7: Simulação inicial da antena utilizando RO6010.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	9.574	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	30	deg
Beta_Angle	60	deg
Port_Gap_Width	5.39	cm
--Substrate Dimensions		
subH	2.5	mm
subX	34.8...	cm
subY	22.02	cm

Figura 5.8: Parâmetros, retornados pelo HFSS, da simulação inicial utilizando RO6010.

A perda de retorno obtida da simulação está ilustrada na figura 5.9.

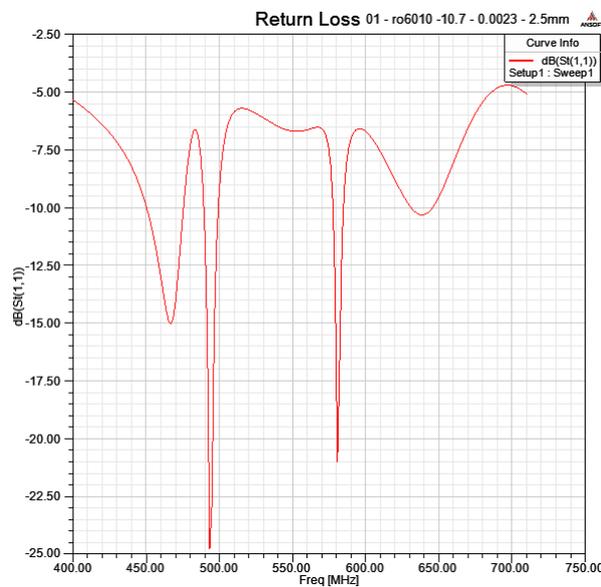


Figura 5.9: Perda de Retorno da simulação inicial utilizando RO6010.

Pode-se ver que o tamanho desta antena é menor que as antenas simuladas com os dois substratos anteriores, porém sua perda de retorno é pior, pois não possui características de uma antena banda larga. Modificando os parâmetros iniciais e produzindo uma nova simulação, têm-se os resultados apresentados nas figuras 5.10 a 5.12.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	9.574	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	28	deg
Beta_Angle	57	deg
Port_Gap_Width	5.39	cm
--Substrate Dimensions		
subH	2.5	mm
subX	30	cm
subY	20	cm

Figura 5.10: Parâmetros retornados pelo HFSS, após modificações, utilizando RO6010.

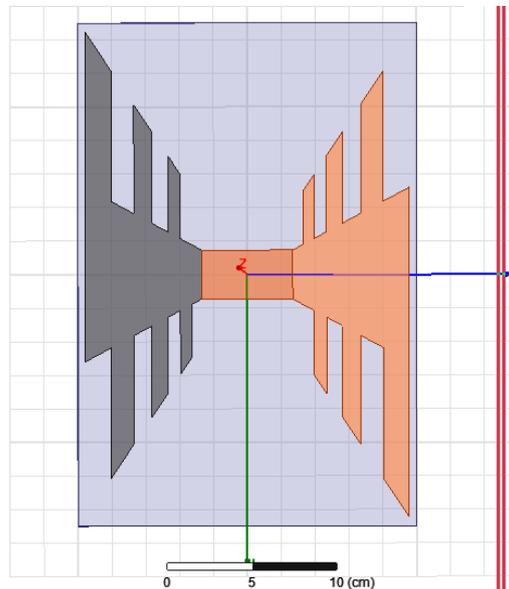


Figura 5.11: Simulação, após modificações, nos parâmetros da antena utilizando RO6010.

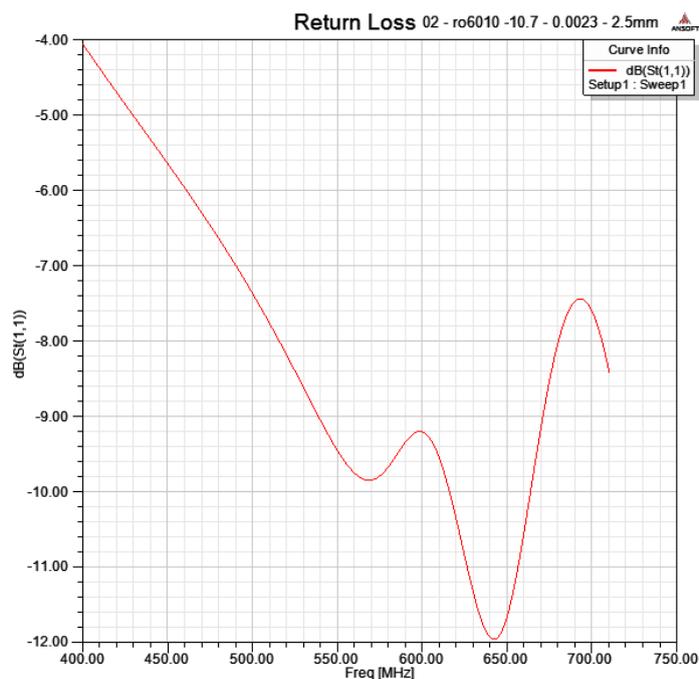


Figura 5.12: Perda de retorno da simulação, após modificações, utilizando RO6010.

Tabela 5.4: Comparativo entre parâmetros da simulação para RO6010.

Simulação	Length (cm)	Tau	Sigma	Delta (graus)	Beta (graus)	Port Gap (cm)	Sub X (cm)	Sub Y (cm)
RO6010 inicial	9.5	0.7	0.84	30	60	5.39	34.8	22.02
RO6010 modificada	9.5	0.7	0.84	28	57	5.39	30.0	20.0

Modificam-se os parâmetros Delta e Beta reduzindo seus valores para 28 e 57 graus, respectivamente, e obtém-se uma redução de, aproximadamente, 21% de área da antena. A Perda de Retorno referente à simulação modificada apresenta resultados bem melhores que a da simulação inicial, entre 600 MHz e 650 MHz a melhora foi de, aproximadamente, 5dB . Após a modificação, a antena passa a funcionar na banda larga de UHF para TV digital.

5.4 Dilab 85

Nesta simulação, foi utilizado um substrato não visto antes nesse trabalho. O Dilab 85 é constituído por cerâmica e possui uma constante dielétrica de alto valor. O objetivo aqui é simular a antena com um substrato não muito usual para aplicações simples e de alta constante dielétrica.

A primeira simulação realizada retornou a geometria e os parâmetros apresentados, respectivamente, nas figuras 5.13 e 5.14.

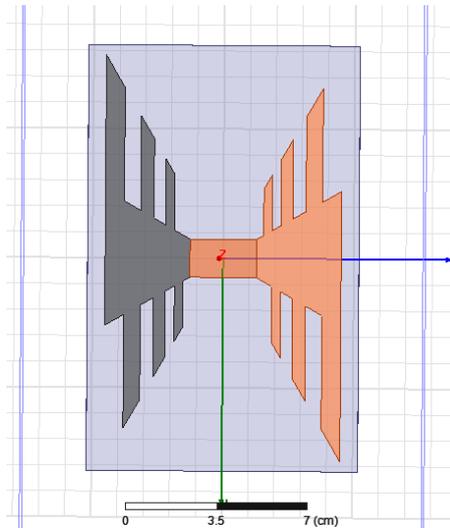


Figura 5.13: Simulação inicial da antena utilizando Dilab 85.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	4.517	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	30	deg
Beta_Angle	60	deg
Port_Gap_Width	2.54	cm
--Substrate Dimensions		
subH	2	mm
subX	16.4...	cm
subY	10.39	cm

Figura 5.14: Parâmetros retornados pelo HFSS da simulação inicial utilizando DILAB 85.

A perda de retorno associada à simulação é mostrada na figura 5.15. Percebe-se que o gráfico apresentado possui uma série de vales que correspondem às bandas de operação da antena, portanto essa antena funcionará em algumas faixas próximas. A antena não será do tipo faixa larga por conta das descontinuidades apresentadas na simulação.

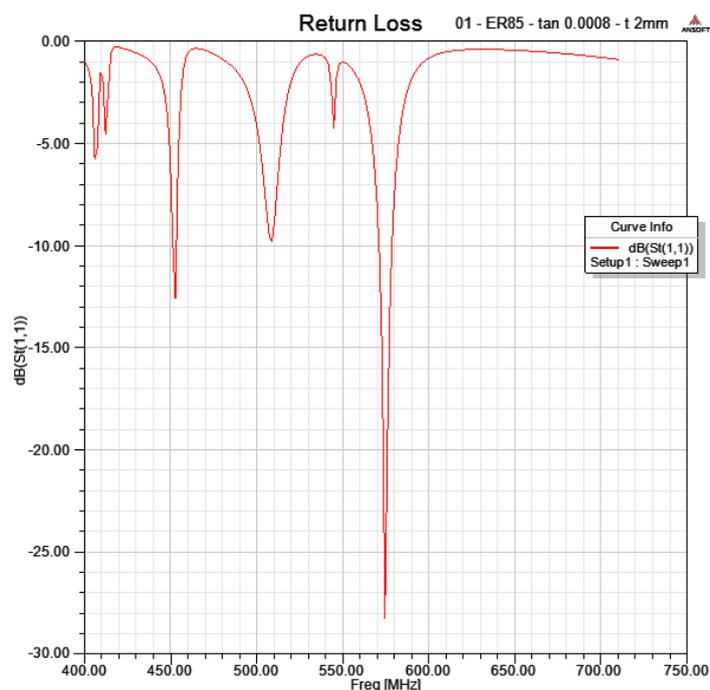


Figura 5.15: Perda de Retorno da simulação inicial utilizando Dilab 85.

Apesar da simulação retornar as menores dimensões até o momento, foi realizada uma nova simulação com o intuito de reduzir ainda mais o tamanho da antena. Modificou-se Delta e Beta e os resultados estão na figura 5.16.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	4.517	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	25	deg
Beta_Angle	55	deg
Port_Gap_Width	2.54	cm
--Substrate Dimensions		
subH	2	mm
subX	12	cm
subY	10	cm

Figura 5.16: Parâmetros retornados pelo HFSS, após modificações, utilizando Dilab 85.

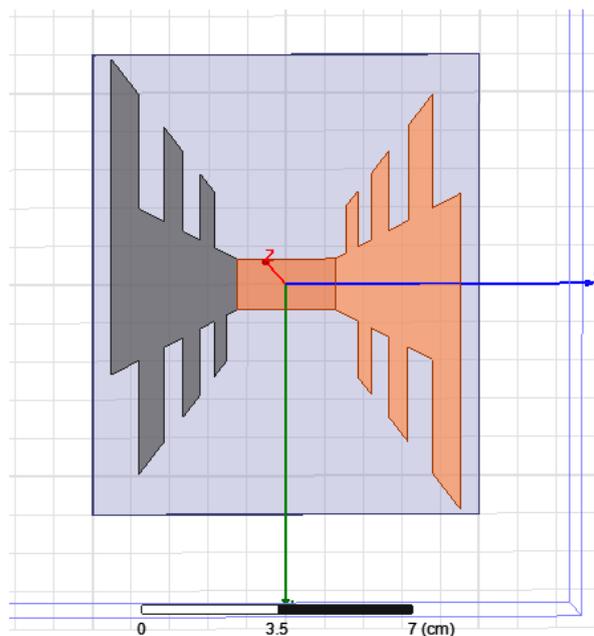


Figura 5.17: Simulação, após modificações nos parâmetros da antena, utilizando Dilab 85.

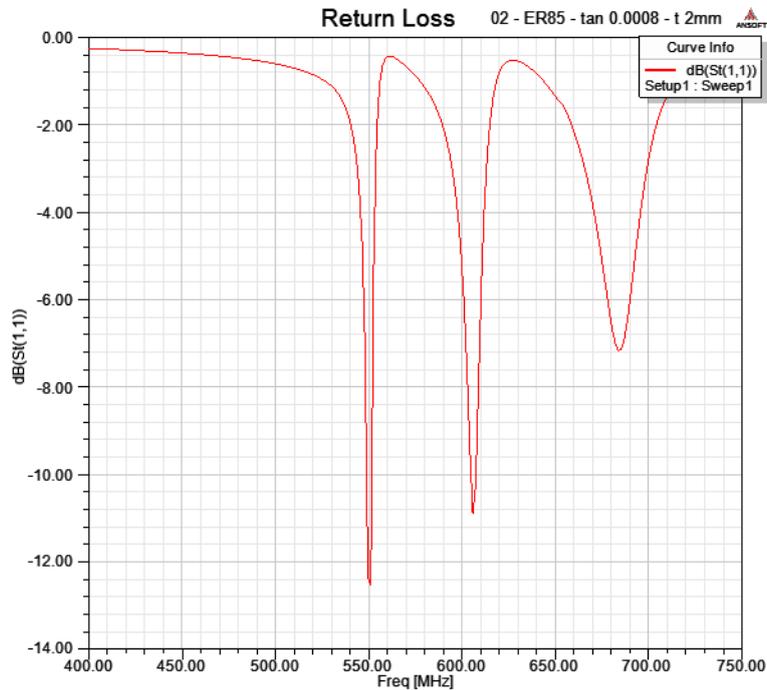


Figura 5.18: Perda de retorno da simulação, após modificações, utilizando Dilab 85.

Tabela 5.5: Comparativo entre parâmetros da simulação para Dilab 85.

Simulação	Length (cm)	Tau	Sigma	Delta (graus)	Beta (graus)	Port Gap (cm)	Sub X (cm)	Sub Y (cm)
Dilab 85 inicial	4.5	0.7	0.84	30	60	2.54	16.4	10.3
Dilab 85 modificada	4.5	0.7	0.84	25	55	2.54	12	10

A tabela 5.5 demonstra o comparativo de parâmetros entre ambas simulações, onde se pode perceber que, através desse substrato, obteve-se o melhor resultado de redução das dimensões da antena, entretanto, em ambas simulações, pode-se perceber que a atuação dessa antena atende apenas determinadas faixas de frequências.

5.5 Dilab 300

Este substrato, assim como o anterior, está sendo visto neste trabalho pela primeira vez.

É produzido através de cerâmica e sua constante dielétrica é igual a 300. Iremos realizar duas simulações, uma inicial onde todos os parâmetros de tamanho serão fornecidos através do HFSS e, posteriormente, uma modificação em alguns parâmetros buscando obter a desejada redução da antena. Primeiramente, simulando a antena obtêm-se os resultados mostrados nas figuras 5.19 a 5.21.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	2.477	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	30	deg
Beta_Angle	60	deg
Port_Gap_Width	1.4	cm
--Substrate Dimensions		
subH	2	mm
subX	9.00...	cm
subY	5.7	cm

Figura 5.19: Parâmetros, retornados pelo HFSS, da simulação inicial utilizando DILAB 300.

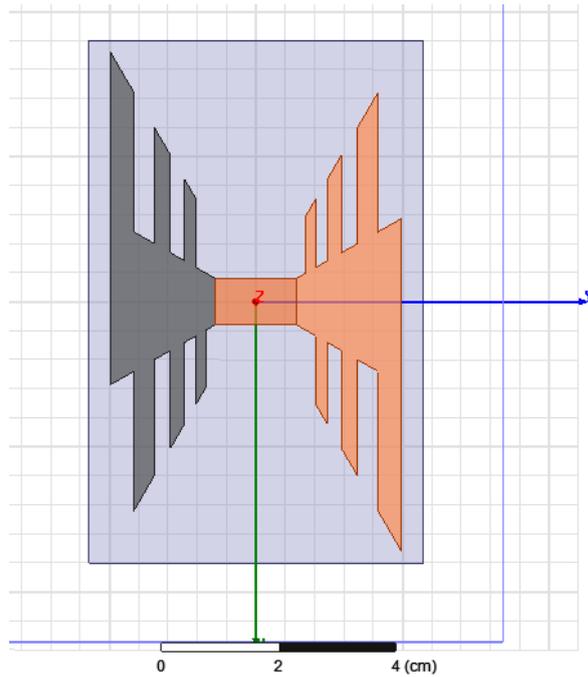


Figura 5.20: Simulação inicial da antena utilizando Dilab 300.

Ao analisar a perda de retorno (figura 5.1), pode-se verificar que existem apenas 3 pequenas faixas de frequência onde a antena irá receber os sinais.

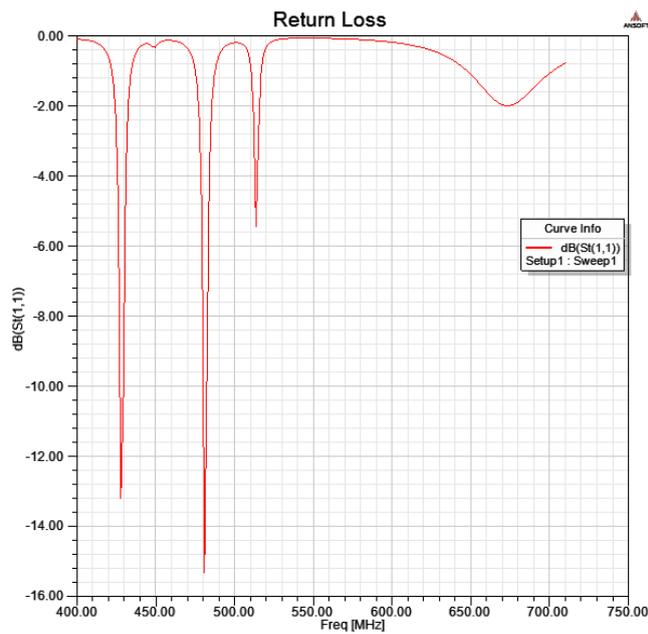


Figura 5.21: Perda de Retorno da simulação inicial utilizando Dilab 300.

Modificando Delta e Beta obtêm-se dimensões menores da antena através de uma nova simulação, conforme figuras 5.22 a 5.23.

Name	Value	Unit
--Antenna Dimensions		
Length	2.477	cm
Tau	0.7	
Sigma	0.84	
Delta_Angle	26	deg
Beta_Angle	55	deg
Port_Gap_Width	1.4	cm
--Substrate Dimensions		
subH	2	mm
subX	7	cm
subY	5.7	cm

Figura 5.22: Parâmetros, retornados pelo HFSS, após modificações utilizando Dilab 300.

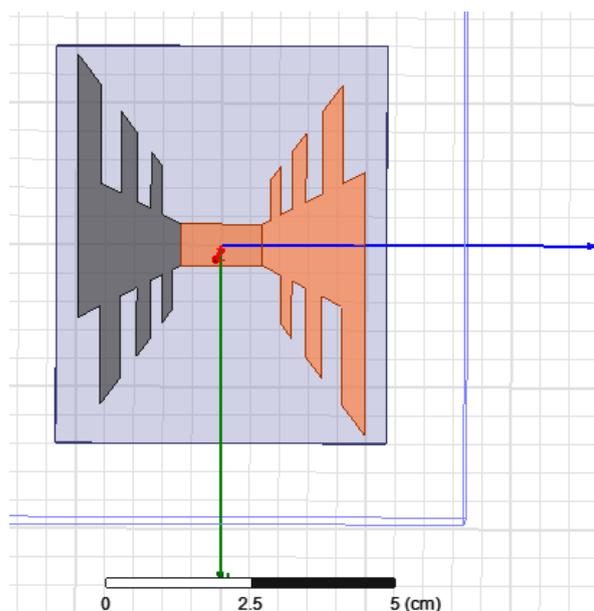


Figura 5.23: Simulação, após modificações nos parâmetros da antena, utilizando Dilab 300.

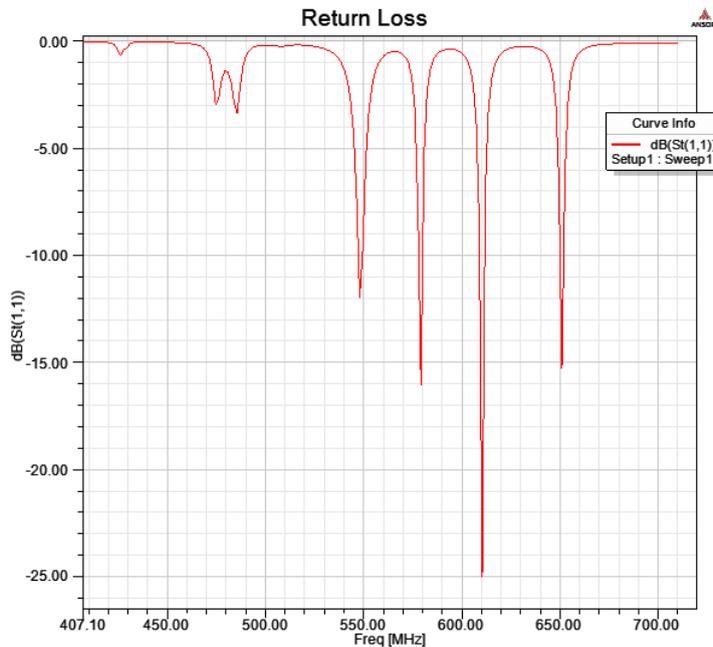


Figura 5.24: Perda de retorno da simulação, após modificações, utilizando Dilab 300.

Nota-se que além da redução de tamanho, houve uma melhora na perda de retorno da antena simulada, conforme figura 5.24, em relação à simulação inicial, entretanto, a simulação ainda retorna uma antena com faixas estreitas de operação. Neste caso, em teoria a antena irá funcionar bem apenas dentro dessas faixas.

Na tabela 5.6 está demonstrado o comparativo entre as duas simulações. Após a alteração dos parâmetros pode-se chegar a uma redução de 2 cm na dimensão do eixo X.

Tabela 5.6: Comparativo entre parâmetros da simulação para Dilab 300.

Simulação	Length (cm)	Tau	Sigma	Delta (graus)	Beta (graus)	Port Gap (cm)	Sub X (cm)	Sub Y (cm)
Dilab 300 inicial	2.4	0.7	0.84	30	60	1.4	9	5.7
Dilab 300 modificada	2.4	0.7	0.84	26	55	1.4	7	5.7

De forma comparativa, após todas as simulações realizadas, percebe-se que quanto maior for a constante dielétrica de determinado substrato, menor serão as dimensões da antena fabricada. Através da tabela 5.7, vê-se claramente isto ocorrendo. Essa redução de tamanho já foi descrita na literatura [10] e é causada pelo chamado *loading effect*.

Tabela 5.7: Comparativo entre Constante dielétrica e Dimensões da Antena.

Simulação	Length (cm)	Tau	Sigma	Delta (graus)	Beta (graus)	Port Gap (cm)	Sub X (cm)	Sub Y (cm)
Dilab 300 inicial	2.4	0.7	0.84	30	60	1.4	9	5.7
Dilab 300 modificada	2.4	0.7	0.84	26	55	1.4	7	5.7
Dilab 85 inicial	4.5	0.7	0.84	30	60	2.54	16.4	10.3
Dilab 85 modificada	4.5	0.7	0.84	25	55	2.54	12	10
RO6010 inicial	9.5	0.7	0.84	30	60	5.39	34.8	22.02
RO6010 modificada	9.5	0.7	0.84	28	57	5.39	30.0	20.0
RO5880 inicial	13.4	0.7	0.84	30	60	7.6	49.0	31.04
RO5880 modificada	13.4	0.7	0.84	27	57	7.6	40.0	30.0
FR4 inicial	13.0	0.7	0.84	30	60	7.36	47.5	30.0
FR4 modificada	13.0	0.7	0.84	28	57	7.36	40.0	30.0

Apesar de dimensões menores serem atingidas, a banda de frequências certamente é afetada e passamos a ter antenas com pequenas faixas de atuação. Tal fato já era esperado pois, de acordo com a literatura [11], geralmente os substratos são separados em 3 categorias:

- A. Entre 1.0 e 2.0: Espuma de poliestireno, colmeia dielétrica;
- B. Entre 2.0 e 4.0: Teflon reforçado com fibra de vidro;
- C. Entre 4.0 e 10: Quartz, Alumina, Cerâmica.

Materiais com ϵ_r acima de 10, devem ser trabalhados com extrema cautela, pois reduzem, significativamente, a eficiência de irradiação e a largura de banda. Isso ocorre devido ao volume das antenas produzidas com os mesmos serem menores do que o comum.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES

Após a definição de modelo geométrico da antena e das simulações para atingirmos os parâmetros de construção ideais, podemos observar que a fabricação da antena ocorreu de forma simples e direta. Além disso, as simulações foram bastante condizentes com os resultados finais, conforme podemos observar no Capítulo 4. As alterações nos parâmetros da antena em FR4, além de reduzir suas dimensões, provocaram uma melhora na perda de retorno, o que contribuiu para que a antena impressa pudesse trabalhar em uma melhor banda de frequências.

Analisando o processo de fabricação, a produção desta antena em larga escala se mostrou viável, os materiais são de fácil acesso e o custo agregado para produção da mesma é favorável, em comparação com as antenas comerciais encontradas no varejo. Por outro lado, o perfil achatado faz com que seja de fácil manipulação e montagem em estruturas como a própria TV. Uma ideia possível é que uma antena deste tipo já poderia vir embutida nas TVs de tela plana sem prejudicar sua recepção. Alternativamente, a TV também teria uma entrada para o caso de uma recepção com antena externa ser o mais indicado para a região.

A partir dos resultados obtidos através do estudo de substratos, foi possível chegar a um desfecho com pontos interessantes e oportunidades para pesquisas futuras. Pôde-se validar, na prática, que a constante dielétrica do substrato interfere diretamente nas dimensões da antena, conforme visto no Capítulo 5. Tal fato é informado em [11], mas comprová-lo praticamente nos fez enxergar outros problemas, descritos a seguir.

Apesar de atingir um dos nossos objetivos e reduzir a antena para que pudesse ser tripulada em dispositivos pequenos como celulares e *tablets*, temos uma mudança no comportamento da resposta em frequência, no qual o elemento não mais se comportará como

faixa larga e passará a operar em pequenas faixas de frequências. É importante observar que, uma antena impressa com substrato cerâmico pode tolerar temperaturas maiores de trabalho. Tendo isso em mente e sua atuação em bandas estreitas, esta antena simulada com os substratos cerâmicos (Dilab85 e Dilab 300) pode perfeitamente ser utilizada para operações em pequenos sistemas de transmissão UHF de TV digital. Existem uma série de possíveis aplicações vislumbradas para essa antena: uso para canais locais de TV dentro de prédios e em outras construções (sistema celular de TV), testes de transmissão em laboratórios e caracterização de antenas de Recepção, são algumas delas.

Para oportunidade de trabalho futuro, é necessário abordar soluções para que a antena reduzida através do uso de substratos de altas constantes dielétricas possa operar em faixa larga.

Somente dessa forma esta antena estará apta para recepção em toda faixa de TV. Além disso novas técnicas para redução dessa antena poderão ser estudadas e até mesmo a utilização de outras geometrias de construção, diferentes das oferecidas pelo ADK poderão ser abordadas, e estudos de construções com conjuntos de antenas podem ajudar na questão da faixa de frequências.

CAPÍTULO 7

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] Resolução nº 572, de 28 de setembro de 2011. Anatel: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2011/45-resolucao-572#item4>
- [2] Datasheet *Slot*: <http://www.idealantenas.com.br/produtosport/tv/Slot%20UHF%20-%20Cavidade%20-%20Pol.%20Horizontal.pdf> , 2017
- [3] Datasheet *Painel*: <http://www.idealantenas.com.br/produtosport/tv/pdfantenaapi.pdf> , 2017
- [4] Datasheet *Superturnstile*: <http://www.idealantenas.com.br/produtosport/digital/SuperturnStyle%20UHF%20-%20Banda%20Larga.pdf>, 2017
- [5] F. Ferrero, “Dual-Band Circularly Polarized Microstrip Antenna for Satellite Applications”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 4, pp. 13-15, 2005
- [6] A. García-Aguilar, “Printed Antenna for Satellite Communications”, IEEE International Symposium, pp. 529-535, 2010
- [7] Yujiro Taguchi, “Aeronautical Low-Profile Yagi-Uda Antennas”, Electronics and Communications in Japan, Part 1, Vol. 81, No. 12, 1998
- [8] C. A. Balanis, Antenna theory “Analysis and Design – Third Edition” John Wiley & Sons, Inc, Publication, New York, 2005.
- [9] CPQD, ANATEL, “Planejamento de Canais de TV Digital”, PD.33.10.53A.0007A/RT-01-AB, Brasil, 2003
- [10] C.A. Balanis, “Modern Antenna Handbook”, John Wiley & Sons, Inc, Publication, EUA, 2008.
- [11] High Frequency Structure Simulator (HFSS) [online] <http://www.ansoft.com>.

- [12] Datasheet RO5880: <http://www.rogerscorp.com/documents/606/acs/RT-duroid-5870-5880-Data-Sheet.pdf>
- [13] R. H. DuHamel, "Broadband Logarithmically Periodic Antenna Structure," IRE National Convection Record, Part I pp. 119-128, 1957.
- [14] R. H. DuHamel, "Logarithmically Periodic Antenna Designs," IRE Convection Record, Part I, pp. 139-157, 1958.
- [15] J. D. Dyson, "The Equiangular Spiral antenna," University of Illinois, Antenna Laboratory, September 15, 1957.
- [16] High Frequency Structure Simulator (HFSS) [online] available: <http://www.ansoft.com>.
- [17] V. B. Romodin, V. I. Oznobikhin, V.V. Kopylov, "Log periodic microstrip array," IEEE, 2000, in press.
- [18] S. Bruni, A. Neto, and F. Marliani, "The ultrawideband leaky lens antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 55, no. 10, pp.2642–2653,Oct. 2007.
- [19] Rakhi Duo, "Design of Planar Trapezoidal Toothed Log Periodic Antenna using HFSS" e-ISSN: 2278-1676,p-ISSN: 2320-3331, Volume 9, Issue 4 Ver. II (Jul – Aug. 2014), PP 26-28.
- [20] D.S. Filipouic and J.L. Volakis, "Novel Slot Spiral Antenna Designs for Dual/Multiband Operation," IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 51, No. 3, pp. 430-440, March 2003.