

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo Zavareze da Costa

**ESTUDO E ANÁLISE DE ANTENAS PLANARES PARA APLICAÇÕES  
EM CUBESATS**

Santa Maria, RS  
2019

**Leonardo Zavareze da Costa**

**ESTUDO E ANÁLISE DE ANTENAS PLANARES PARA APLICAÇÕES EM  
CUBESATS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,  
RS), como requisito parcial para obtenção do  
grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

**ORIENTADOR:** Prof. Natanael Rodrigues Gomes

Santa Maria, RS  
2019

---

©2019

Todos os direitos autorais reservados a Leonardo Zavareze da Costa. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Miguel Couto, n. 35

Fone (0xx) 55 99949 7924; End. Eletr.: leonardozavareze@gmail.com

**Leonardo Zavareze da Costa**

**ESTUDO E ANÁLISE DE ANTENAS PLANARES PARA APLICAÇÕES EM  
CUBESATS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,  
RS), como requisito parcial para obtenção do  
grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 10 de julho de 2019:**

---

**Natanael Rodrigues Gomes, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Andrei Piccinini Legg, Dr. (UFSM)**

---

**Eduardo Escobar Bürger, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

## AGRADECIMENTOS

*Inicialmente, agradeço a minha família, Valdivia Aneci Zavareze da Costa, Nei Paulo Silva da Costa e Jéssica Zavareze da Costa, essenciais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. O apoio incondicional de vocês e constante incentivo para a conclusão de meus estudos, desenvolvimento pessoal e profissional guiou meus passos até aqui.*

*Agradeço ao meu mentor, orientador e amigo, Dr. Nelson Jorge Schuch, por ter contribuído exaustivamente na minha formação pessoal e profissional desde minha saída do Ensino Médio, dando seu exemplo de perseverança e profissionalismo. Por todos os projetos que passei e pessoas que conheci neste período, devo meu agradecimento especial ao Nelson.*

*Ao meu orientador, Dr. Natanael Rodrigues Gomes, agradeço pelo acompanhamento destas atividades e pelo empenho em desenvolver um trabalho de qualidade.*

*Ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/COCRE/INPE-MCTIC e todos seus servidores, que me acompanham desde o segundo semestre de 2010, pela ótima infraestrutura, organização e gentileza durante os serviços prestados. Com 9 anos de serviços prestados na área da pesquisa e desenvolvimento nas dependências do INPE, sempre fui muito bem atendido por meus colegas.*

*Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro no âmbito dos Programas Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), de Capacitação Institucional (PCI) do INPE. À Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência - FATEC pelo auxílio financeiro no âmbito do Programa NANOSATC-BR.*

*Agradeço as amigas que trago de longa data e as formadas no processo acadêmico. Aos amigos que, sempre presentes, teceram laços fortes de confiança e irmandade. Alguns destes me acompanham desde os primeiros anos de vida, Guilherme Schneider Ullrich e Marcel da Silva Atarão. Outros, formei amizade com o decorrer do tempo e amadurecimento da vida: Harrison Garcia, Celio Goulart, Cristiano Sarzi, Fernando Pedroso, Thales Mânica, Pietro Moro, Samara Hermman, Deiverson Taschetto, Rodrigo Marques. E a todos os outros que participaram desse processo, meu obrigado.*

*Two antennas met on a roof, fell in love and  
got married. The wedding wasn't great but  
the reception was excellent.*

*(Just a joke)*

## RESUMO

# ESTUDO E ANÁLISE DE ANTENAS PLANARES PARA APLICAÇÕES EM CUBESATS

AUTOR: Leonardo Zavareze da Costa  
ORIENTADOR: Natanael Rodrigues Gomes

Este trabalho apresenta uma análise do atual sistema de antenas dos satélites da série NANOSATC-BR e a proposta de um sistema alternativo utilizando antenas planares. O Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de Cubesats tem como objetivo o desenvolvimento de uma constelação de nanossatélites científicos brasileiros para pesquisa espacial. No ano de 2014, foi lançado o primeiro satélite da série, o NANOSATC-BR1. Completando, em 2019, 5 anos em órbita, o satélite cumpriu todos os objetivos científicos e tecnológicos e forneceu um extensivo banco de dados para os pesquisadores envolvidos. O segundo satélite da série, o NANOSATC-BR2, já está em fase de finalização e tem previsão de lançamento para o quarto trimestre de 2019. Ambos os satélites contam com o mesmo sistema de antenas para comunicação: um par de antenas dipolo operando em VHF e UHF. Com o objetivo de mitigar alguns dos problemas presentes com estes sistemas e desenvolver novas tecnologias nacionais, é proposto um sistema alternativo de antenas planares para instalação nos cubesats. Por meio de simulações, são demonstrados parâmetros elétricos e físicos desses sistemas e discutidos os *tradeoffs* consequentes dessa possível troca.

**Palavras-chave:** Cubesats. NANOSATC-BR. Antenas. Planar.

## **ABSTRACT**

### **RESEARCH AND ANALYSIS OF MICROSTRIP ANTENNAS FOR CUBESATS APPLICATIONS**

**AUTHOR:** Leonardo Zavareze da Costa

**ADVISOR:** Natanael Rodrigues Gomes

This work presents an analysis of the current antenna system of NANOSATC-BR series satellites and the proposal of an alternative system using planar antennas. The NANOSATC-BR Program, Development of Cubesats aims to develop a constellation of Brazilian scientific nanosatellites for space research. In 2014 the first satellite of the series, the NANOSATC-BR1, was launched. Completing in 2019 5 years in orbit, the satellite fulfilled all scientific and technological objectives and provided an extensive database for the researchers involved. The second satellite in the series, the NANOSATC-BR2, is already in the finalization stage and is scheduled for launch in the fourth quarter of 2019. Both satellites have the same antenna system for communication: a pair of dipole antennas operating in VHF and UHF. In order to mitigate some of the problems present with these systems and to develop new national technologies, an alternative system of planar antennas for installation in cubesats is proposed. By means of electrical simulations, parameters of these systems are demonstrated and the tradeoffs consequent on this possible exchange are discussed.

**Keywords:** Cubesats. NANOSATC-BR. Antennas. Planar.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de diagrama de irradiação em 3D para antena dipolo .....	15
Figura 2.2 – Visão geral do satélite MarCO e antenas. ....	19
Figura 2.3 – Exemplo de diagrama de radiação para antena microfita. ....	20
Figura 2.4 – Representação gráfica da antena proposta em Alam et al. (2018) .....	20
Figura 3.1 – Foto do AESP-14. ....	22
Figura 3.2 – Foto do Tancredo-I. ....	23
Figura 3.3 – Representação gráfica do ITASAT-I. ....	24
Figura 4.1 – <i>Layout</i> do Circuito Integrado RH-DRVTestChip-I .....	26
Figura 4.2 – Diagrama de Blocos - EPS NCBR1 .....	28
Figura 4.3 – Visão geral do sistema de antenas do NCBR1. ....	29
Figura 4.4 – Diagrama de irradiação das antenas. ....	29
Figura 4.5 – Vista inferior do sistema de antenas do NCBR1 com antenas fechadas. ....	31
Figura 4.6 – Vista isométrica do NCBR2 .....	32
Figura 4.7 – Localização das ETs do Programa NANOSATC-BR .....	33
Figura 4.8 – Antenas do CRS .....	33
Figura 5.1 – Representação gráfica da área disponível para instalação da antena. ....	36
Figura 5.2 – Vista em perspectiva de um Cubesat 1U. ....	36
Figura 5.3 – Molde-zero para análises. ....	37
Figura 5.4 – Ganho para o molde-zero. ....	38
Figura 5.5 – Perda de retorno para o molde-zero. ....	39
Figura 5.6 – Relação VSWR para molde-zero. ....	39
Figura 5.7 – Modelo 1 de antena planar e campo elétrico. ....	40
Figura 5.8 – Ganho para modelo 1. ....	41
Figura 5.9 – Resposta de VSWR para modelo 1. ....	41
Figura 5.10 – Modelo 2 de antena planar e campo elétrico. ....	42
Figura 5.11 – Ganho para modelo 2. ....	43
Figura 5.12 – Perda de retorno para modelo 2. ....	43
Figura 5.13 – Modelo 3 de antena planar e campo elétrico. ....	44
Figura 5.14 – Ganho para modelo 3. ....	44
Figura 5.15 – Perda de retorno para modelo 3. ....	45
Figura 5.16 – Modelo 4 de antena planar e campo elétrico. ....	45
Figura 5.17 – Ganho para modelo 4. ....	46
Figura 5.18 – Perda de retorno para modelo 4. ....	46
Figura 5.19 – Modelo 5 de antena planar e campo elétrico. ....	47
Figura 5.20 – Ganho para modelo 5. ....	48
Figura 5.21 – Perda de retorno para modelo 5. ....	48
Figura 5.22 – Modelo 6 de antena planar e campo elétrico. ....	49
Figura 5.23 – Ganho para modelo 6. ....	49
Figura 5.24 – Perda de retorno para modelo 6. ....	50
Figura 5.25 – Modelo 7 de antena planar e campo elétrico. ....	50
Figura 5.26 – Ganho para modelo 7. ....	51
Figura 5.27 – Perda de retorno para modelo 7. ....	51
Figura 5.28 – Modelo 8 de antena planar F. ....	52
Figura 5.29 – Ganho para modelo 8. ....	52
Figura 5.30 – Perda de retorno para modelo 8. ....	53

Figura 5.31 – Modelo 9 de antena planar e campo elétrico. ....	54
Figura 5.32 – Ganho para modelo 9. ....	54
Figura 5.33 – Perda de retorno para modelo 9. ....	55
Figura 5.34 – Modelo 10 de antena planar e campo elétrico. ....	55
Figura 5.35 – Ganho para modelo 10. ....	56
Figura 5.36 – Perda de retorno para modelo 10. ....	56
Figura 5.37 – Modelo 11 de antena planar e campo elétrico. ....	57
Figura 5.38 – Ganho para modelo 11. ....	57
Figura 5.39 – Perda de retorno para modelo 11. ....	58
Figura 5.40 – Modelo 12 de antena planar e campo elétrico. ....	58
Figura 5.41 – Ganho para modelo 12. ....	59
Figura 5.42 – Perda de retorno para modelo 12. ....	59
Figura 5.43 – Modelo 13 de antena planar e campo elétrico. ....	60
Figura 5.44 – Ganho para modelo 13. ....	60
Figura 5.45 – Perda de retorno para modelo 13. ....	61
Figura 5.46 – Modelo 14 de antena planar e campo elétrico. ....	61
Figura 5.47 – Ganho para modelo 14. ....	62
Figura 5.48 – Perda de retorno para modelo 14. ....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Bandas de Frequência .....	18
Tabela 4.1 – Cargas Principais do Sistema Elétrico de Potência do NANOSATC-BR1 ...	27
Tabela 4.2 – Parâmetros técnicos das antenas do NCBR1 .....	30

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ADCS</i>	<i>Attitude Determination and Control Subsystem</i>
<i>ANTS</i>	<i>Antenna System</i>
<i>CRS</i>	Centro Regional Sul
<i>CC</i>	Corrente Contínua
<i>EPS</i>	<i>Electrical Power System</i>
<i>ET</i>	Estação Terrena
<i>I2C</i>	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
<i>INPE</i>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>ISIS</i>	<i>Innovative Solutions In Space</i>
<i>ISS</i>	<i>International Space Station</i>
<i>ME</i>	Modelo de Engenharia
<i>MV</i>	Modelo de Voo
<i>NASA</i>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>NCBR1</i>	Nanossatélite Científico Brasileiro 1
<i>OBC</i>	<i>On Board Computer</i>
<i>PCB</i>	<i>Printed Circuit Board</i>
<i>POV</i>	Plano Operacional de Voo
<i>SAMA</i>	Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul
<i>TRXUV</i>	<i>Transceiver (UHF receiver, VHF downlink)</i>
<i>TC</i>	Telecomando
<i>TM</i>	Telemetria
<i>TLE</i>	<i>Two Line Element</i>
<i>UFABC</i>	Universidade Federal do ABC
<i>UFMG</i>	Universidade Federal de Minas Gerais
<i>UFSC</i>	Universidade Federal de Santa Maria
<i>UHF</i>	<i>Ultra High Frequency</i>
<i>UPS</i>	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
<i>VHF</i>	<i>Very High Frequency</i>
<i>WBS</i>	<i>Work Breakdown Structure</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	12
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	13
<b>2</b>	<b>ANTENAS</b> .....	<b>14</b>
2.1	PARÂMETROS DE ANTENAS .....	14
<b>2.1.1</b>	<b>Ganho</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Padrão de Irradiação</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Diretividade</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Eficiência</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Impedância</b> .....	<b>16</b>
<i>2.1.5.1</i>	<i>Voltage Standing Wave Ratio - VSWR</i> .....	<i>17</i>
2.2	MODELOS DE ANTENAS .....	17
<b>2.2.1</b>	<b>Monopolo e Dipolo</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Array</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Planar</b> .....	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>CUBESATS</b> .....	<b>21</b>
3.1	MISSÕES .....	21
<b>3.1.1</b>	<b>AESP-14</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Tancredo-I</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1.3</b>	<b>ITASAT-I</b> .....	<b>23</b>
3.2	SUBSISTEMAS .....	23
<b>4</b>	<b>PROGRAMA NANOSATC-BR</b> .....	<b>25</b>
4.1	NANOSATC-BR1 .....	25
<b>4.1.1</b>	<b>Estrutura</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Cargas Úteis</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Sistema Elétrico de Potência</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Antenas</b> .....	<b>29</b>
4.2	NANOSATC-BR2 .....	30
4.3	NANOSATC-BR3 & 4 .....	31
4.4	SEGMENTO SOLO .....	32
<b>5</b>	<b>SISTEMA PROPOSTO</b> .....	<b>35</b>
5.1	MOTIVAÇÃO .....	35
5.2	PARÂMETROS .....	35
5.3	SIMULAÇÕES .....	37
<b>5.3.1</b>	<b>Planar F</b> .....	<b>40</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Espiral Quadrada</b> .....	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>64</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	64
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	65
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>66</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O baixo custo de missões de Cubesats é o motivo do crescente desenvolvimento de missões deste porte. Como comparação, podemos adotar a missão do satélite Amazônia-1, em desenvolvimento no Brasil sendo o primeiro satélite de observação da terra completamente projetado, integrado, testado e operado no Brasil de acordo com INPE (2019). O satélite irá operar numa órbita de 750 km e está incluso na classe de satélites de 500 kg. De acordo com a FAPESP (2019), já foram gastos R\$183 milhões no desenvolvimento do satélite e os custos previstos para finalização da missão estão próximos aos R\$230 milhões. O satélite NANOSATC-BR1 teve custo aproximado de desenvolvimento, lançamento e manutenção em órbita de R\$ 1,5 milhões, de acordo com INPE (2019).

Consideradas as suas limitações, os satélites de pequeno porte são atrativos como alternativa para testes de novos sistemas e tecnologias no espaço, podendo operar como laboratórios em órbita. Algumas das missões atuais de satélites de pequeno porte envolvem o monitoramento de fronteiras, validação de experimentos e desenvolvimento de link de alta velocidade de internet.

O Programa NANOSATC-BR adquiriu as plataformas de seus dois primeiros satélites, NCBR1 e NCBR2, pela *Innovative Solutions In Space - ISIS*, uma empresa holandesa de fornecimento de cubesats e soluções espaciais. Essa plataforma conta com um sistema de antenas dipolo *deployable*, ou seja, antenas flexíveis que são alojadas no interior do satélite e abertas quando este se encontra em órbita. Esse sistema de antenas apresenta algumas fragilidades mecânicas que devem ser consideradas, como a adição de vários pequenos elementos para realização da abertura das antenas em órbita. Esse é um evento único na missão mas que acrescenta massa ao satélite e a possibilidade de falha de abertura, decorrente da não queima dos fios de sustentação das antenas ou falha no comando. O evento de falha de abertura foi observado na missão AESP-14, apresentada no capítulo 3.

Este trabalho tem o objetivo de apresentar uma discussão pertinente sobre um sistema alternativo viável de antenas para satélites de pequeno porte. O sistema proposto tem como objetivos mitigar as possibilidades de falhas, aumentar a robustez e ter características elétricas similares as do sistema atual, de forma a não alterar outros subsistemas relacionados. São apresentadas simulações realizadas, os parâmetros considerados e uma comparação do sistema proposto com o atual sistema de antenas da série NCBR.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo analisar as características físicas e elétricas do atual sistema de antenas dos satélites da série NANOSATC-BR e apresentar uma alternativa viável

na forma de uma antena planar.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Para a realização da proposta desta pesquisa, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Analisar os dados técnicos das antenas dipolo VHF e UHF do NANOSATC-BR1;
- Simulação de um sistema alternativo de antena planar para operação com Cubesats;
- Comparação das características elétricas e físicas do atual sistema com o sistema proposto;
- Apresentação dos resultados e discussão da proposta.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho possui seis capítulos, organizados conforme descrito a seguir:

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução ao trabalho com o objetivo de contextualizar o leitor sobre os tópicos que serão abordados e os objetivos da pesquisa. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais parâmetros que são considerados no design de antenas e alguns modelos de antenas existentes. Será dado foco aos sistemas aplicados em satélites, tendo em vista os objetivos desse trabalho. O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica de missões de pequenos satélites, suas aplicações e objetivos, seus subsistemas e motivações. No Capítulo 4 é apresentado o Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de Cubesats, base e motivação para a pesquisa apresentada nesse trabalho. São apresentados os objetivos do Programa e a metodologia aplicada, bem como suas previsões de trabalhos futuros. No Capítulo 5 é apresentado o motivo de estudo do trabalho: o desenvolvimento de um sistema alternativo de antenas para o Programa NANOSATC-BR. Nesse capítulo são apresentadas as motivações, parâmetros adotados, simulações realizadas, análise e comparação com os atuais sistemas e os resultados atingidos. Por fim, o Capítulo 6 trata das considerações finais e sugestões para trabalhos futuros a fim de dar continuidade à pesquisa.

## 2 ANTENAS

Antenas são meios físicos de irradiação de energia para a transferência de informações utilizando como meio o ambiente, sendo o ar e o vácuo os ambientes mais comumente utilizados Balanis (1997). As antenas são utilizadas quando não é viável ou possível a utilização de outros meios para transferência de dados, como, por exemplo, cabos, conforme Milligan (2005). Um sistema de antenas robusto e eficiente é o diferencial em uma comunicação entre fonte e receptor e reduz o estresse sobre os circuitos componentes de ambos os pontos da transmissão. As principais características de uma antena são sua frequência de operação, padrão de irradiação, directividade, eficiência, ganho, largura de feixe, lóbulos laterais, impedância, largura de banda e polarização.

### 2.1 PARÂMETROS DE ANTENAS

O design de antenas é baseado em seus parâmetros, características físicas e elétricas do componente que definem a performance da antena em operação, de acordo com Balanis (1997). O controle da corrente que flui pela antena e, portanto da energia que irradia dela, é a principal preocupação do projetista, objetivando a eficiência do sistema sem que exista interferência em circuitos próximos.

#### 2.1.1 Ganho

O ganho de uma antena é a medida da habilidade da antena de direcionar a potência de entrada em radiação em uma direção específica em relação a uma radiação de uma antena isotrópica. O ganho é medido em função da directividade e pode ser adimensional ou convertido em dB. De acordo com Balanis (1997), o ganho pode ser calculado pela equação (2.1).

$$G = \frac{4\pi * U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.1)$$

Na equação (2.1),  $U(\theta, \phi)$  é a directividade da antena e  $P_{in}$  é a potência de entrada. O ganho de uma antena de 3 dB indica que a potência recebida em certa distância da antena será 3 dB maior que a potência que seria recebida se a energia fosse irradiada de uma antena isotrópica.



### 2.1.2 Padrão de Irradiação

O padrão de irradiação de uma antena define a variação de potência irradiada no espaço ao redor da antena, sendo normalmente determinado para região de campo-distante. A região de campo distante é definida como uma região em que as características de irradiação da antena não alteram sua forma com a distância. Para definir o campo distante, sendo  $D$  a máxima dimensão linear da antena e  $\lambda$  o comprimento de onda, temos:

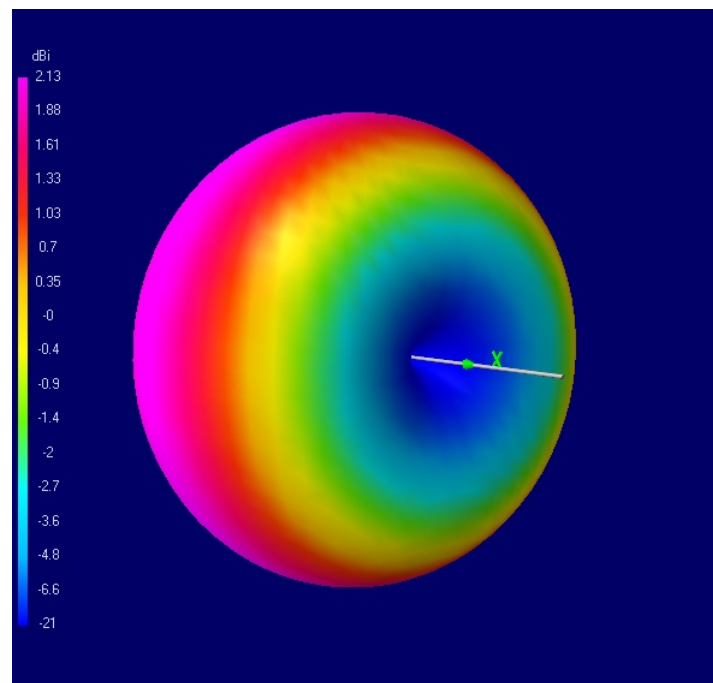
$$R > (2D^2)/(\lambda) \quad (2.2)$$

$$R \gg D \quad (2.3)$$

$$R \gg \lambda \quad (2.4)$$

As propriedades que são componentes do diagrama de radiação são: densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, força do campo, fase de diretividade e polarização da antena. Um exemplo de diagrama de irradiação simples para uma antena dipolo é apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Exemplo de diagrama de irradiação em 3D para antena dipolo



Fonte: Autor

### 2.1.3 Diretividade

De acordo com Milligan (2005), a diretividade é a medida da concentração de radiação da antena em sua direção de máxima potência. Diretividade e ganho se diferem apenas pela eficiência, entretanto, a diretividade é facilmente estimada pelos padrões da antena. A diretividade é dada pela razão entre a máxima intensidade de irradiação e a intensidade média de irradiação, de acordo com a Equação 2.5. A intensidade média é a potência total irradiada da antena sobre  $4\pi$ .

$$D = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi * U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.5)$$

### 2.1.4 Eficiência

A medida de eficiência de uma antena informa a relação de potência entregue a esta antena e a potência irradiada dela. Uma antena eficiente tem a maior parte de sua potência de entrada irradiada para o espaço. Uma antena pouco eficiente tem a maior parte de sua potência de entrada absorvida em perdas no sistema ou refletida pela incompatibilidade de impedâncias. A eficiência é representada por um número entre 0 e 1, visto que é uma taxa de relação entre duas potências. Ela também pode ser expressa em termos de porcentagem e decibéis. Um parâmetro de interesse é o ângulo de meia potência de uma antena, ângulo no qual a antena atinge -3dB de potência na irradiação.

Algumas das perdas que fazem com que uma antena não tenha 100% de eficiência são: (1) perdas por condução, pela condutividade dos materiais componentes da antena, (2) perdas dielétricas, pela condutividade de um material dielétrico próximo a essa antena e (3) perdas no casamento de impedância da antena.

### 2.1.5 Impedância

A impedância de uma antena é a relação entre a tensão e a corrente na entrada desta antena e é representada por um número complexo, portanto, fornece a defasagem entre tensão e corrente. A parte real deste número indica a potência que é irradiada ou absorvida pela antena e a parte imaginária representa a potência que é "armazenada" no campo próximo a antena. A impedância da antena varia com sua frequência. A conexão adequada entre fonte e antena, chamada de casamento de impedâncias, é essencial para a eficiência do sistema.

$$Z = R + jX \quad (2.6)$$

Na equação (2.6), Z representa a impedância da antena, R é a parte real e resistiva e X a

parte imaginária e reativa.

### 2.1.5.1 Voltage Standing Wave Ratio - VSWR

Como apresentado, trabalhar com a impedância da antena é fundamental para minimizar as perdas que ocorrem pelo casamento de impedância em um sistema de transmissão. Uma medida de o quão bem a antena está "casada" com sua linha de transmissão ou fonte é a VSWR. Esse parâmetro é um número real que é sempre igual ou maior que 1. Uma relação de VSWR de 1 indica que não há perdas no casamento de impedância, ou seja, o casamento é perfeito. Valores superiores a 1 indicam reflexão da potência na antena e, portanto, perdas no sistema.

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (2.7)$$

Na equação (2.7),  $\rho$  é utilizado como coeficiente de reflexão de tensão e pode ser calculado pelas impedâncias do sistema. Na equação (2.8),  $Z_A$  é a impedância da antena e  $Z_0$  é a impedância característica.

$$\rho = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (2.8)$$

A VSWR também pode ser apresentada por perda de retorno, ou seja, a razão entre o sinal de entrada e a quantidade desse sinal refletida na fonte. A perda de retorno é dada em *dB* e é normalmente referida como  $S(1, 1)$ , sendo calculada pela equação (2.9).

$$S(1, 1) = -20 \log_{10} \left( \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \right) \quad (2.9)$$

## 2.2 MODELOS DE ANTENAS

As antenas projetadas para satélites devem manter sua operação independentemente da atitude do satélite em órbita. Algumas características importantes em sistemas de comunicação são: tamanho compacto, baixas perdas, alta confiabilidade e padrão de irradiação de esfera completa, Gao et al. (2018). Este último é dificilmente obtido apenas com uma antena e, para tanto, são utilizadas combinações de antenas instaladas em locais diferentes do satélite. A Tabela 2.1 apresenta a relação entre as principais bandas e os intervalos de frequências utilizadas em satélites.

Alguns mecanismos de abertura de antenas em cubesats são abordados em Lokman et al. (2017). O objetivo principal destes mecanismos é reduzir a área ocupada por antenas no interior das plataformas de lançamento e liberar estas antenas apenas quando o satélite estiver

Tabela 2.1 – Bandas de Frequência

<b>BANDA</b>	<b>INTERVALO DE FREQUÊNCIAS</b>
VHF	30-300 MHz
UHF	300-3000 MHz
S	2-4 GHz
X	8-12 GHz
Ku	12-18 GHz
Ka	27-40 GHz

Fonte: Balanis (1997)

em órbita. Nas subseções a seguir, serão apresentados alguns dos modelos mais comuns de antenas para nanossatélites.

### 2.2.1 Monopolo e Dipolo

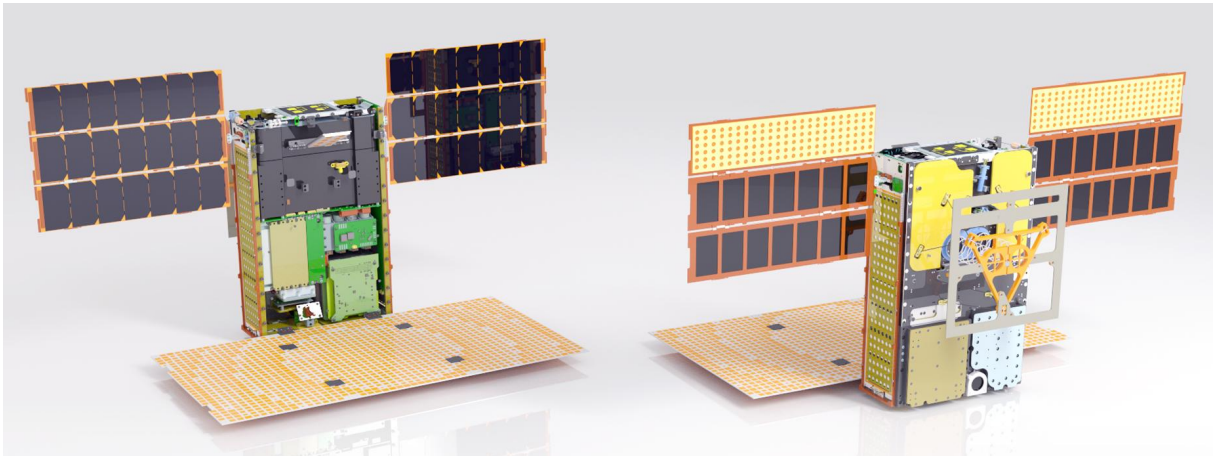
As antenas monopolo e dipolo são amplamente utilizadas em pequenos satélites devido a seu baixo custo de implementação, eficiente padrão de irradiação e simplicidade de operação, Lokman et al. (2017). Esse modelo de antenas, entretanto, tem baixa diretividade e requer alojamento interno no satélite durante a fase de lançamento. O posicionamento destas antenas ocupa espaço no interior da plataforma apenas durante a fase de lançamento, ficando esse espaço disponível e não utilizado durante toda a vida útil do satélite juntamente com o sistema de abertura das antenas. A abertura das antenas é um evento essencial na vida do satélite e casos de falhas de abertura são críticos para a missão. O caso brasileiro mais recente é o AESP-14. Apesar de não ser confirmado tecnicamente, a equipe do projeto sugere que uma falha na abertura das antenas do satélite, logo após o lançamento dele pela ISS, impediu a comunicação da equipe com o mesmo. O satélite ficou sem comunicação até que seu sistema de baterias foi descarregado e a missão finalizada. Pesquisas como a de Mandeep e Mustapha (2013), estudam o posicionamento de antenas dipolo em cubesats e a influência que diferentes antenas (VHF e UHF) exercem sobre si. Exemplos de antena dipolo são apresentados nos capítulos 3 e 4, nas Figuras 3.3 e 4.3.

### 2.2.2 Array

Algumas missões utilizam um *array* de antenas, como é o caso da missão da NASA, MarCO. Basicamente, um *array* é uma combinação de pequenas antenas conectadas de forma a constituírem um sistema com qualidades de uma antena maior. Esse tipo de arranjo é utilizado em missões de radares, em que é necessário um alto ganho, Lokman et al. (2017). O satélite

MarCO, 6U, que tem como missão explorar a órbita de Marte, é projetado para trabalhar em banda X com um ganho de 28 dBi, de acordo com Gao et al. (2018). A Figura 2.2 apresenta a visão geral do satélite MarCo. Para alimentação do *array* de antenas é utilizado um caminho de microfita que acompanha a abertura do sistema consumindo aproximadamente apenas 4% do espaço utilizável da estrutura.

Figura 2.2 – Visão geral do satélite MarCO e antenas.



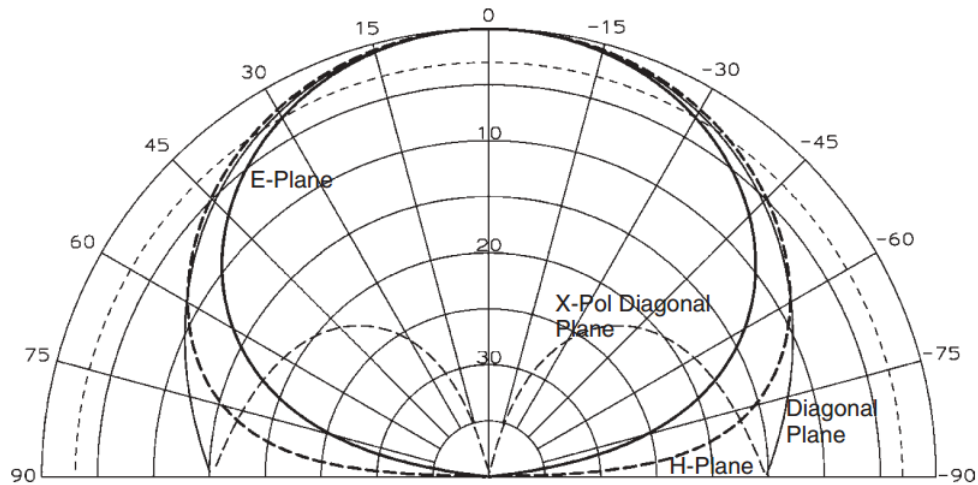
Fonte: NASA

### 2.2.3 Planar

Uma antena planar, ou microfita, é basicamente composta de uma camada de substrato entre um plano terra e um plano condutor. Essas antenas são de simples desenvolvimento, tem baixo custo, alta diretividade e são mecanicamente robustas, Balanis (1997), característica extremamente atraente em sistemas aeroespaciais tendo em vista as condições experimentadas em órbita. Algumas das desvantagens que esses sistemas oferecem são a baixa eficiência, baixa potência e largura de banda reduzida. A energia irradia, nestas antenas, pelas bordas e cantos presentes em suas estruturas, de acordo com Milligan (2005). A Figura 2.3 apresenta uma diagrama de radiação exemplo para antena de microfita.

Em Garzón (2013) são apresentadas as características das antenas planares. No estudo, é abordada a influência que a geometria da antena planar exerce sobre sua frequência de ressonância, largura de banda, padrões de irradiação e ganho. De acordo com Garzón (2013), a posição do aterramento, alimentação e a largura do *patch* da antena controlam sua característica de irradiação. A tensão nula no ponto de curto-circuito entre substrato e plano-terra não exerce influência sobre o campo elétrico, deixando a frequência de ressonância exclusivamente resultado das características geométricas da antena. Essa característica permite a operação em múltiplas frequências quando consideradas estruturas com fendas ou ranhuras.

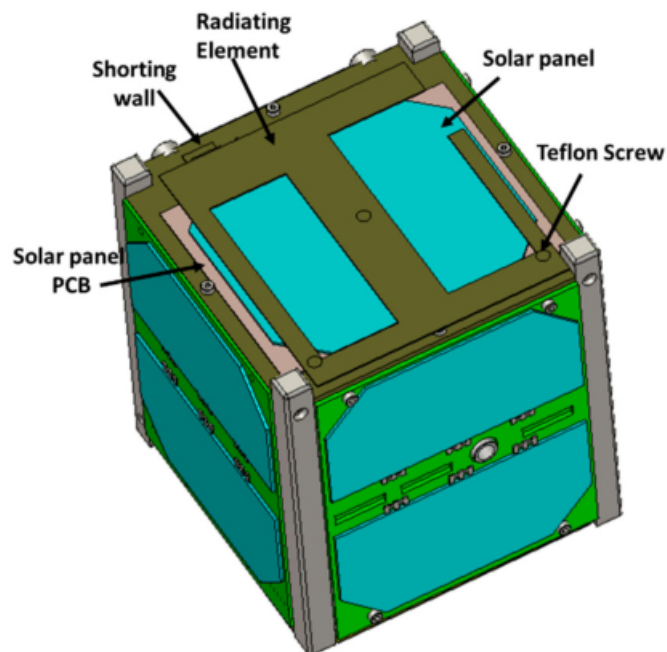
Figura 2.3 – Exemplo de diagrama de radiação para antena microfita.



Fonte: Milligan (2005)

Um recente trabalho demonstrou a possibilidade de aplicação de antenas microfita personalizadas em cubesats. No trabalho de Alam et al. (2018), é proposta uma adaptação de antena microfita a ser instalada sobre uma das faces de um cubesat 1U. A antena desenvolvida tem largura de banda de 6 MHz, operando entre 447,5 e 453,5 MHz, ganho de 0,6 dB e relação de perda de retorno de -15 dB a 450 MHz, com eficiência de 67,45%. A representação gráfica do sistema proposto no trabalho é apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Representação gráfica da antena proposta em Alam et al. (2018)



Fonte: Alam et al. (2018)

### 3 CUBESATS

Este capítulo aborda o desenvolvimento de Cubesats. O objetivo é apresentar algumas missões de satélite de pequeno porte, tanto em desenvolvimento quanto já em órbita, suas principais motivações, objetivos científicos e tecnológicos e os sistemas projetados para tanto. De acordo com classificações internacionais, um nanossatélite é qualquer satélite com massa entre 1 e 10 kg. Para comparação, baseado em Kulu (2019), abaixo é apresentada uma relação resumida da classificação de satélites em função de seu peso.

- Pequenos Satélites: < 500 kg
  - Picosatélites: 100 g a 1 kg
  - Nanosatélites: 1 kg a 10 kg
  - Microsatélites: 10 kg a 100 kg
  - Minisatélites: 100 kg a 500 kg
- Satélites Médios: 500 a 1000 kg
- Satélites Grandes: > 1000 kg

#### 3.1 MISSÕES

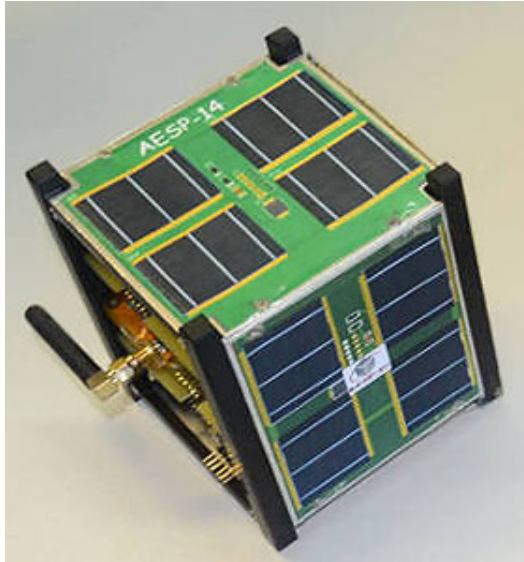
Nesta seção serão abordados algumas das missões espaciais de universidades ou institutos brasileiros que visam o desenvolvimento de Cubesats. Para uma breve introdução, de acordo com Kulu (2019), em Janeiro de 2019, 1.116 nanossatélites estavam em órbita, destes, 1.030 da classe cubesat. Dois desses cubesats são satélites interplanetários, orbitando o espaço profundo. Atualmente, 61 países tem satélites de pequeno porte em órbita, para diversas aplicações como comunicações, experimentos científicos, tecnológicos e projetos militares.

##### 3.1.1 AESP-14

O AESP-14 é um cubesat brasileiro 1U desenvolvido em cooperação científica e tecnológica entre o ITA e o INPE, em São José dos Campos, SP. Como apresentado em Gunter's Space Page (2015), os objetivos do satélite eram investigar os mecanismos de geração das bolhas de plasmas equatoriais. Essa análise seria realizada pela sonda de Langmuir acoplada ao satélite para medições de densidade de elétrons no plasma ionosférico. Infelizmente, de acordo com a equipe técnica do projeto, uma falha no sistema de abertura de antenas fez com que não fossem

recebidos quaisquer sinais do satélite após o lançamento (G1, 2015). O lançamento ocorreu em 10 de Janeiro de 2015, pelo foguete americano Falcon9, da Estação da Força Aérea de Cabo Canaveral, Flórida. A Figura 3.1 apresenta uma foto do satélite AESP-14.

Figura 3.1 – Foto do AESP-14.



Fonte: G1 (2015)

### 3.1.2 Tancredo-I

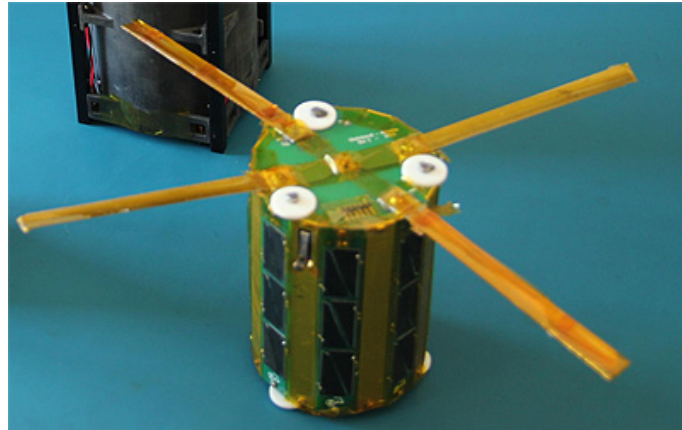
O satélite Tancredo-I é um picossatélite brasileiro desenvolvido por alunos da escola municipal Presidente Tancredo Almeida Neves, Ubatuba - SP. O objetivo da missão é aproximar alunos entre 10 a 13 anos de tecnologias espaciais, ensinar sobre conceitos de engenharia e instigar o interesse de jovens na área aeroespacial.

De modelo *tubesat*, usa plataforma estrutural desenvolvida pelo INPE e foi lançado em duas partes: (I) em 9 de Dezembro de 2016, do Centro Espacial de Tanegashima, Kyushu, pela Agência Espacial Japonesa JAXA para a ISS e (II) em 19 de Janeiro de 2017, da Estação Espacial Internacional, pelo mecanismo de ejeção italiano TuPOD, para órbita.

O satélite tinha massa de 750 gramas, 13 centímetros de altura e 9 centímetros de diâmetro. Orbitava em altitude de aproximadamente 400 km e transmitia em 437,2 MHz (UHF). O sistema de geração de energia era baseado em cinco placas fotovoltaicas que forneciam energia para o sistema de *housekeeping* e as duas cargas úteis instaladas: (I) Gravador de Voz para rádioamadores, uma carga útil educacional e (II) uma sonda de Langmuir simplificada para monitoramento da formação de bolhas de plasma na ionosfera, carga útil do grupo de Ionosfera do INPE. A duração da missão em órbita foi de 10 meses e 1 semana. Ele teve sua reentrada na atmosfera em 18 de Outubro de 2017.



Figura 3.2 – Foto do Tancredo-I.



Fonte: Gunters Space Page (2016)

### 3.1.3 ITASAT-I

O ITA desenvolveu outro cubesat: o ITASAT-1, um cubesat de plataforma 6U. Esse satélite originalmente tinha objetivo de ser um microsatélite (classe de 80kg), porém, por dificuldades em encontrar oportunidades de lançamento financeiramente viáveis, a equipe reprojeteu o satélite para plataforma 6U, de acordo com Page (2018). Ele foi lançado em 3 de Dezembro de 2018, pelo foguete Falcon9 como *piggyback* em um lançamento com outros 71 micro e cubesats.

De acordo com ITA (2016), o ITASAT-1 carrega, como suas cargas úteis, (I) um sistema de coleta de dados, (II) um receptor de GPS e (III) uma câmera com resolução de 4MP e 80 metros a 600 km de altitude. O sistema do satélite do ITASAT-1 utiliza a mesma configuração de antenas que o NANOSATC-BR1, dipolos *deployable*. A Figura 3.3 demonstra a representação gráfica do ITASAT-1.

## 3.2 SUBSISTEMAS

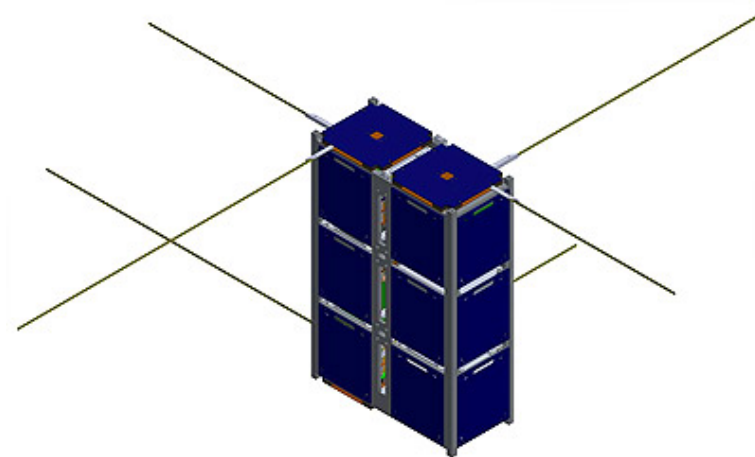
Essa seção aborda brevemente os principais subsistemas que são utilizados em satélites de pequeno porte. A estrutura modular de Cubesats permite a fácil identificação de seus subsistemas e simplificação de processos como testes e integração.

- Sistema de Potência

O sistema de potência é alimentação central do satélite. Ele realiza a conexão entre as fontes de energia, normalmente os painéis solares, as baterias do satélite, controladores de energia e seus subsistemas.

- Sistema de Comunicações

Figura 3.3 – Representação gráfica do ITASAT-I.



Fonte: ITA (2016)

O módulo de comunicação processa sinais analógicos e digitais transmitindo dados de telemetria continuamente para a estação solo. Tais dados são utilizados para realizar o controle do satélite. Os artigos Gao et al. (2018), Lokman et al. (2017) citam uma variedade de antenas que podem ser utilizadas em sistemas de Cubesats.

- Controle de Atitude

O sistema de controle de atitude deve conduzir o satélite e mantê-lo em órbita. Pode ser composto por bobinas magnéticas, atuadores mecânicos ou propulsores. Sua função é posicionar o satélite em órbita de maneira adequada para o alinhamento de antenas, painéis solares e câmeras presentes na estrutura.

- Controle Térmico

O setor responsável por manter condições de temperatura adequadas para os sistemas de *housekeeping* e cargas úteis é o sistema de controle térmico. Seu projeto deve levar em conta todas as características dos sistemas a bordo da plataforma e é de fundamental importância para o sucesso da missão.

- Carga Útil

As *payloads* de um satélite são os experimentos científicos ou tecnológicos que serão instalados e utilizados em órbita. As plataformas de satélites de pequeno porte podem ser vistas como laboratórios em órbita, fornecendo ambiente favorável para o teste de novos sistemas no espaço.

## **4 PROGRAMA NANOSATC-BR**

A concepção do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de Cubesats iniciou em 2005 com a proposta de desenvolver um programa de capacitação de recursos humanos nas áreas das tecnologias espaciais através do desenvolvimento de uma série de cubesats nacionais. Incluindo estudantes de nível de graduação diretamente no projeto, design e desenvolvimento, a aproximação com a tecnologia tem o objetivo de instigar o interesse de jovens e criar mão de obra especializada no país. Com a primeira missão consolidada, o NCBR1, agora o objetivo do Programa é capacitar novos laboratórios e experimentos científicos e tecnológicos. O primeiro satélite do Programa foi lançado em 19 de Junho de 2014, pelo lançador ucraniano DNEPR, em Yasny, Orsk, Rússia. Sua missão completa, em 2019, 5 anos de operação em órbita e conta com um extenso banco de dados disponível para os pesquisadores envolvidos no Projeto. O segundo satélite, NCBR2, está em fase de finalização e tem previsão de lançamento para o quarto trimestre de 2019.

### **4.1 NANOSATC-BR1**

O NCBR1 segue o padrão internacional 1U, nas dimensões de 10x10x10 cm e pesa 0,965 kg. A missão, pioneira no país, envolveu as universidades UFSM e UFRGS, além de instituições de pesquisa como o INPE e o ITA e diversas empresas que atuaram tanto nas cargas úteis do satélite, a exemplo da SMDH, quanto no desenvolvimento de serviços para o Projeto, caso da EMSISTI, que foi responsável pelo desenvolvimento do software de telecomandos do NCBR1, INPE (2019).

#### **4.1.1 Estrutura**

A estrutura dos satélites NCBR é modular e facilmente adaptável a novas cargas e sistemas, salvo suas limitações de espaço físico. A ISIS fornece estruturas para satélites 1U a 6U e versões personalizadas. Essas estruturas são leves (no caso de 1U pesam aproximadamente 100 gramas) e aguentam pressões estáticas de até +10.8G, de acordo com ISIS (2011).

#### **4.1.2 Cargas Úteis**

O NCBR1 conta com três cargas úteis em seu sistema. São elas: (I) Magnetômetro XEN-12103D, (II) Processador MIPS baseado em FPGA desenvolvido pela UFRGS e (III) chip

ASIC SMDH - RH-DRVTestChip-I. Todas as cargas úteis são alocadas em uma placa específica e são apresentadas brevemente abaixo.

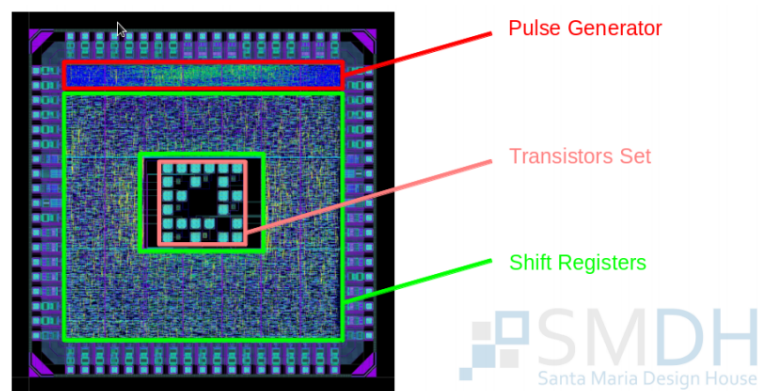
- Magnetômetro XEN-12103D

O objetivo científico da inclusão de um magnetômetro nas cargas úteis do NCBR1 é monitorar e avaliar as condições da AMAS sobre o território brasileiro. Como apresentado por Mânica, 2018, o magnetômetro cumpriu sua missão em órbita e gerou extensivo banco de dados para o Programa NCBR.

- RH-DRVTestChip-I

Circuito integrado resistente à radiação desenvolvido pela SMDH e tem o objetivo de proteger as cargas úteis funcionando como controlador *on/off* para cargas úteis em eventos de radiação. A Figura 4.1 apresenta o *layout* do RH-DRVTestChip.

Figura 4.1 – *Layout* do Circuito Integrado RH-DRVTestChip-I



Fonte: Noval et al. (2016)

- FPGA

O FPGA de modelo PROASIC3 A3PE1500-PQ208 tem um software embarcado tolerante a falhas provenientes de radiação e foi desenvolvido pelo Instituto de Informática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS. O objetivo é qualificar o uso de processadores embarcados em FPGA comercial para uso em aplicações espaciais. As técnicas de proteção utilizadas no software resumem-se na inserção de instruções, cópias de registradores e inserção de comparadores, via software, para detectar falhas transientes como *Single Event Upset (SEU)* e *Event Transient (SET)* que possam acontecer na descrição do processador MIPS embarcado no FPGA em órbita, de acordo com IF-UFRG (2015).

### 4.1.3 Sistema Elétrico de Potência

O Sistema de Potência implementado no NANOSATC-BR1 foi fabricado pela Empresa Dinamarquesa GOMSPACE e é composto pelos seguintes componentes:

- 12 Painéis Solares (*multi junction*) 28% de eficiência distribuídos das 6 faces do CubeSat;
- Conversores CC-CC;
- Baterias Li-ion;
- Sensores de tensão e corrente;
- Microprocessador, responsável pelo controle dos conversores CC-(MPPT) e conexão serial com o Computador de Bordo do CubeSat.

A Tabela 4.1 apresenta as principais cargas do Sistema Elétrico de Potência do NCBR1. É importante ressaltar que os Subsistemas TRUV TX e Cargas Úteis são as únicas cargas variáveis do sistema, podendo o consumo energético ser minimizado ou maximizado ligando ou desligando estes Subsistemas.

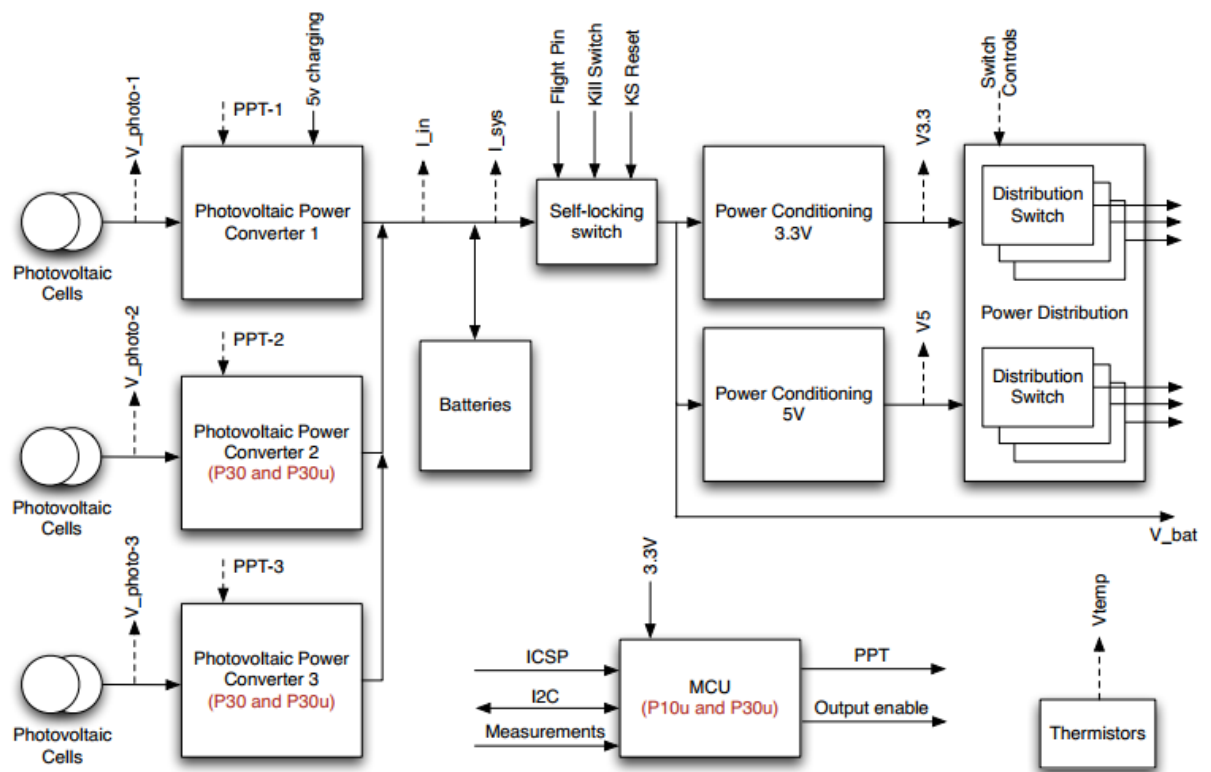
Tabela 4.1 – Cargas Principais do Sistema Elétrico de Potência do NANOSATC-BR1

Subsistema	Corrente (mA)	Potência (mW)	Energia Consumida em 24h (Wh)
EPS	33,30	249,75	5,994
Antenna	5,33	39,98	0,959
OBC	30,80	231,00	5,544
Payload Housekeeping and Magnetometer	20,00	150,00	3,600
Payload MIPS and SMDH	30,90	231,75	5,562
TRXUV RX	30,00	225,00	5,400
TRXUV TX	105,00	787,50	0,056
Total			27,11

Fonte: Adaptado de ISIS (2012)

A geração de energia é outro ponto de atenção para os projetistas, principalmente em missões como o NCBR1, satélites de padrão 1U e, portanto, um com menor área externa disponível para recepção de luz solar. Por fim, a Figura 4.2 apresenta o diagrama de blocos do sistema elétrico de potência do NCBR1. No diagrama de blocos é possível notar que as células e conversores fotovoltaicos são ligados nas baterias e alimentação do satélite simultaneamente, possibilitando a ligação direta à alimentação em estado de bateria cheia. Após, circuitos condicionadores de potência distribuem em saídas de 3,3 V e 5 V a energia elétrica para os subsistemas do satélite.

Figura 4.2 – Diagrama de Blocos - EPS NCBR1

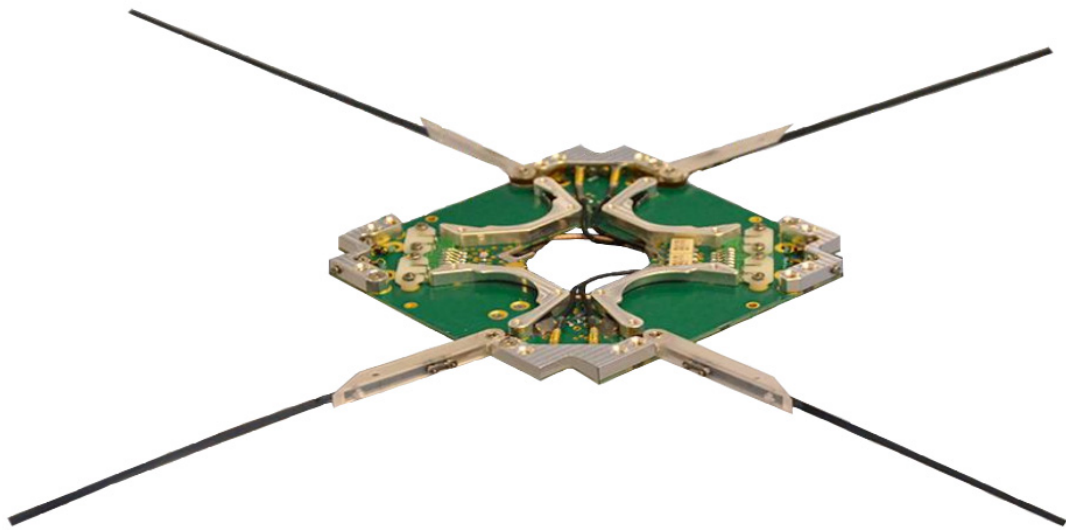


Fonte: ISIS (2011)

#### 4.1.4 Antenas

O satélite NCBR1 conta com um sistema duplo de antenas dipolo para operação em VHF e UHF. O sistema compreende um microcontrolador que monitora condições de *housekeeping*, monitores de temperatura, sistema de abertura redundante para as antenas e dois conjuntos de antenas dipolo flexíveis. A Figura 4.3 apresenta a visualização geral do sistema de antenas.

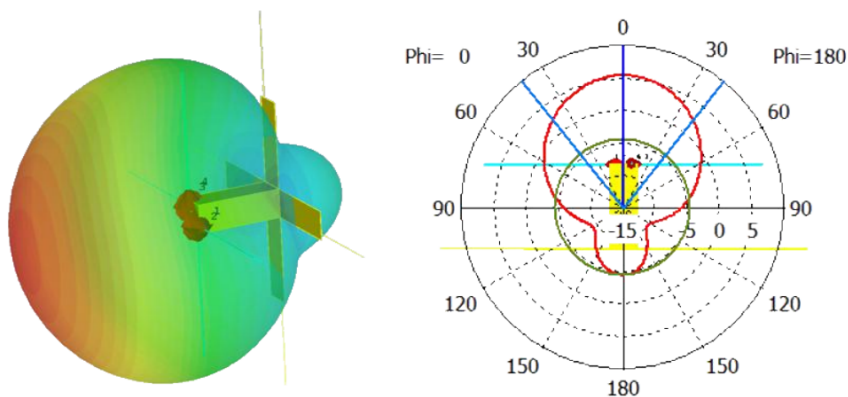
Figura 4.3 – Visão geral do sistema de antenas do NCBR1.



Fonte: ISIS (2011)

O diagrama de irradiação do sistema é fornecido pela ISIS (2011) e é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Diagrama de irradiação das antenas.



Fonte: ISIS (2011)

O preço deste sistema vendido separadamente, de acordo com o site da ISIS, está entre 4.800 e 5.250 euros, dependendo da configuração desejada. Um detalhe importante que deve ser

Tabela 4.2 – Parâmetros técnicos das antenas do NCBR1

<b>PARAMÊTRO ELÉTRICO</b>	<b>VALOR</b>
Intervalo de Frequência VHF	140-150 <i>MHz</i>
Intervalo de Frequência UHF	400-450 <i>MHz</i>
Polarização	Linear
Ganho Feixe Principal - VHF	0 dBi
Ganho Feixe Principal - UHF	0 dBi
Máxima Potência RF	2 W
Perda de Retorno	> 10 dB
VSWR	< 2:1
Consumo Nominal	< 40 mW
Consumo Abertura	< 2 W
Impedância	50 $\Omega$
Tensão de Operação	3.3 V ou 5 V
<b>PARAMÊTRO FÍSICO</b>	<b>VALOR</b>
Comprimento Antena VHF	55 cm
Comprimento Antena UHF	17 cm
Faixa de Temperatura	-20 a 60 C
Massa	85 g
Dimensões de Placa	98 x 98 x 7 mm <sup>3</sup>
Custo	4825 a 5250 Euros

Fonte: ISIS (2011)

ressaltado é a quantidade de elementos mecânicos que este sistema apresenta. A Figura 4.5 é a vista inferior do sistema de antenas com as antenas fechadas. Contando apenas os componentes mecânicos (parafusos, molas, placas de contenção) necessários para a abertura dos elementos de antenas, temos 10 componentes por trecho de antena, totalizando 40 elementos mecânicos.

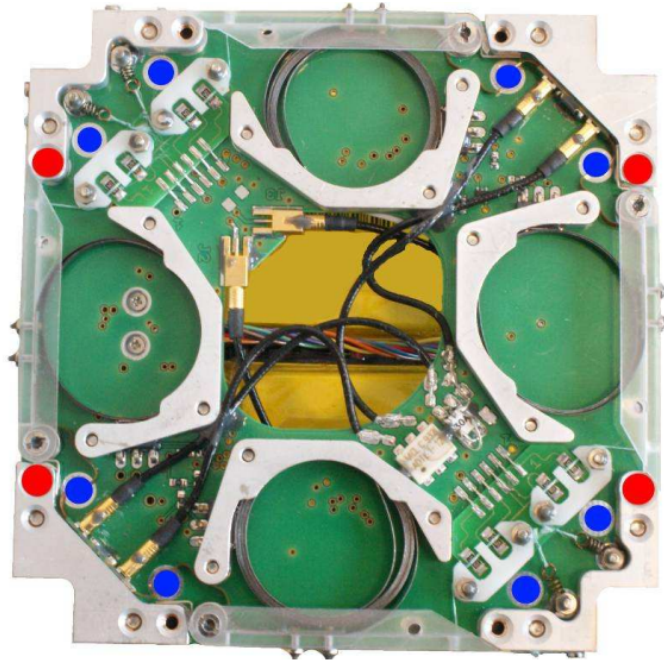
A quantidade de componentes mecânicos em um sistema espacial sempre reserva atenção dos projetistas, que procuram por pontos de fraqueza na estrutura e, portanto, possíveis pontos de falhas. Além de representar pontos de possíveis falhas, ainda temos o acréscimo de massa que essa quantidade de componentes representa para sistemas de pequenos satélites que tem limitações físicas reservadas.

## 4.2 NANOSATC-BR2

O segundo da série NCBR, apresentado na Figura 4.6, é um cubesat 2U que está em fase de finalização e tem previsão de lançamento para o quarto trimestre de 2019. O satélite continua com os experimentos do NCBR1, monitorando a intensidade do campo magnético terrestre, e com um novo experimento da SMDH para detecção de radiação. Para essa missão, uma sonda de Langmuir será adicionada ao conjunto de cargas úteis e um experimento tecnológico inédito



Figura 4.5 – Vista inferior do sistema de antenas do NCBR1 com antenas fechadas.



Fonte: (ISIS, 2011)

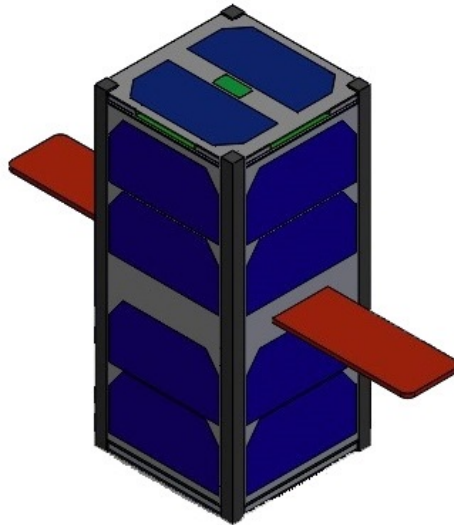
no país: em um projeto liderado pela UFMG, em parceria com UFABC e o INPE, será instalado o primeiro sistema nacional de determinação de atitude com tripla redundância. Novos chips foram produzidos pela SMDH e UFRGS para dar continuidade aos estudos realizados com o NCBR1.

Os *softwares* de voo e controle da plataforma NCBR2 foram desenvolvidos no Brasil, por pesquisadores e engenheiros do INPE / MCTIC. A equipe técnica de desenvolvimento também conta com o apoio de alunos formados no INPE / MCTIC no curso de Engenharia de Sistemas Espaciais (CSE), alunos de graduação e pós-graduação e startups, criadas por ex-alunos de pós-graduação do INPE / MCTIC.

#### 4.3 NANOSATC-BR3 & 4

O Programa NANOSATC-BR tem expectativa a médio prazo de lançar o terceiro e quarto satélites da série. Para o desenvolvimento dessas missões, as plataformas dos Modelos de Engenharia do NCBR1 e NCBR2 serão adaptadas e qualificadas para lançamento e as novas cargas úteis serão instaladas nessas plataformas. A previsão é que, nestas missões, os estudantes participem também do *WBS*, parte de estruturação do satélite, cargas úteis e planejamento de atividades para as missões de ambos os satélites. A proposta é que as experiências obtidas nas missões do NCBR1 e NCBR2 sirvam como base para as novas operações. Atualmente, o ME do NCBR1 está localizado no LITN do CRS e está sendo utilizado para uma série

Figura 4.6 – Vista isométrica do NCBR2



Fonte: Autor

de testes e análises com os estudantes do Programa.

#### 4.4 SEGMENTO SOLO

O segmento solo do Programa NANOSATC-BR é apresentado em uma seção separada, tendo em vista que ele é um sistema fixo e que será utilizado durante o Programa para todos os satélites que forem lançados. O Programa conta com duas estações terrenas (ETs) completas, instaladas estrategicamente em território brasileiro de forma que sua área de aquisição de dados cobre todo o país. As ETs são instaladas em Santa Maria, RS, no prédio do CRS, e em São José dos Campos, SP, no prédio do Curso de Guerra Eletrônica, do ITA. A localização das estações está demonstrada na Figura 4.7.

Ambas as estações são equipadas com três antenas: (I) Yagi-VHF, para operação na faixa de 140 a 150 MHz, (II) Yagi-UHF, para operação na faixa de 400 a 450 MHz e (III) Parabólica - Banda-S, para operação na faixa de 2.400 a 2.402 MHz. Para rastreamento dos satélites, as antenas são acopladas a dois rotores com motores de passo, para Azimute e Elevação, que permitem o rastreamento em todo o horizonte visível. Os rotores possuem precisão de 0,5 graus. A Figura 4.8 apresenta as antenas do Programa instaladas sobre o prédio sede do CRS.

O segmento solo do Programa ainda conta com um rack de controle que reúne os módulos de controle dos rotores, rádio e *switches* para o sistema de antenas. O módulo ainda conta com um sistema de UPS para alimentação contínua de energia elétrica em caso de quedas de tensão. Para o caso da ET instalada no CRS, os operadores têm a disponibilidade de operar o rádio manualmente e realizar verificações visuais e auditivas durante o rastreamento. A ET insta-

Figura 4.7 – Localização das ETs do Programa NANOSATC-BR



Fonte: Google Maps

Figura 4.8 – Antenas do CRS



Fonte: Autor

lada no ITA foi atualizada e não conta com essa possibilidade, visto que tem esses controles automatizados para os operadores.

## 5 SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto por esse trabalho é uma adaptação do padrão de antenas planares para servir como alternativa para o atual sistema de antenas utilizado no Programa. Esse sistema é projetado para ser instalado externamente sobre uma das faces do satélite e considera as limitações de espaço, cobertura de célula solar e parâmetros elétricos.

### 5.1 MOTIVAÇÃO

Os motivos que levaram o autor a desenvolver esse trabalho são:

- Redução da probabilidade de falhas em Cubesats como as citadas no Capítulo 3;
- Desenvolvimento de tecnologias brasileiras para sistemas de antenas aplicáveis em satélites nacionais.

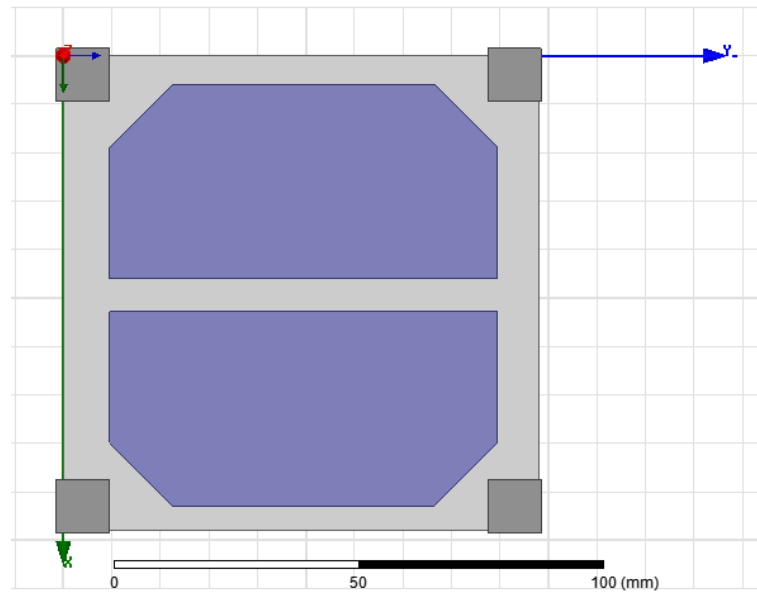
### 5.2 PARÂMETROS

Para o desenvolvimento desta antena, alguns requerimentos de compatibilidade foram observados:

- Dimensões de área compatíveis com a estrutura do satélite: 98 x 98 mm;  
Observar Figura 5.1;
- Altura do substrato de 5mm, equivalente a altura da placa solar somada a seu espaço inferior;
- Mínimo de cobertura sobre as faces solares;
- Impedância de entrada compatível com o *transceiver*: 50  $\Omega$ ;
- Massa da antena não superior a massa atual do sistema: 85 gramas.

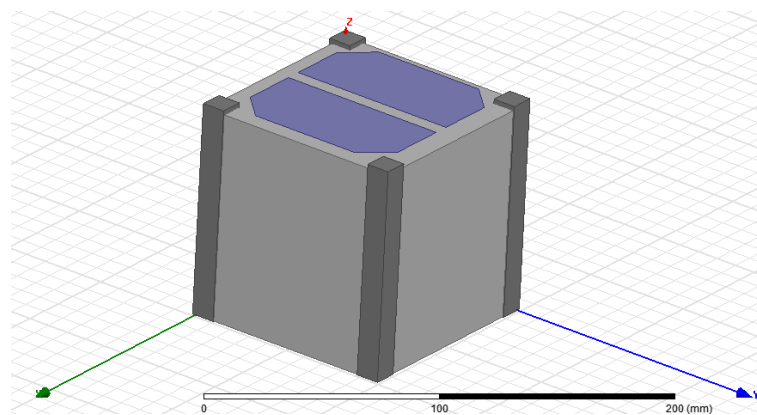
Na Figura 5.1, as células solares são representadas pelos polígonos azuis (centrais), as hastes estruturais do satélite são representadas pelos quadrados cinza-escuro e a área disponível para trabalho é o espaço cinza-claro restante. No eixo X, entre as bordas do satélite e a célula solar, temos 10 mm de espaçamento e, no eixo Y, 6 mm. Em perspectiva, para localização e

Figura 5.1 – Representação gráfica da área disponível para instalação da antena.



Fonte: Autor

Figura 5.2 – Vista em perspectiva de um Cubesat 1U.



Fonte: Autor

considerando apenas a face de interesse com as células solares, a Figura 5.2 apresenta o modelo de um Cubesat 1U.

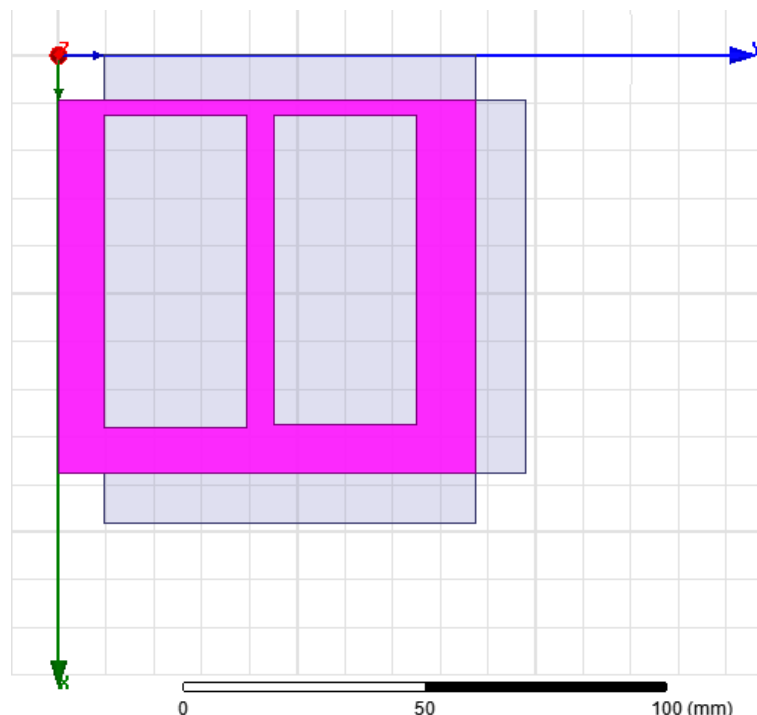
Pela Figura 5.2 é importante notar que as hastes estruturais do satélite exercem maior influência na área total disponível apenas nas placas laterais. Portanto, para melhor aproveitamento de área, o estudo será conduzido considerando a instalação das antenas apenas na face superior ou inferior do satélite.

### 5.3 SIMULAÇÕES

Para as simulações foi utilizado o *software* Ansoft HFSS v13.0. Baseado nos padrões de antenas planares citados em Balanis (1997), Milligan (2005), Alam et al. (2018) e Vieira et al. (2016), foram adaptadas características de antena disponíveis com as estruturas dos satélites da série NCBR. Os dois tipos de antenas analisados, Planar F e Espiral Quadrada, seções 5.3.1 e 5.3.2, foram escolhidos por apresentarem características elétricas similares as do atual sistema de antenas e serem alternativas de estruturas que tem menor cobertura sobre as faces solares do satélite, representando menor influência sobre a alimentação de energia solar.

Para obtenção de um ponto inicial para as simulações, foram definidas as dimensões máximas aceitáveis de cobertura das células solares. Baseado na Figura 5.1, um molde de antena foi feito, apresentado na Figura 5.3. O molde-zero é representado em rosa e tem dimensões internas de 40x80 mm.

Figura 5.3 – Molde-zero para análises.

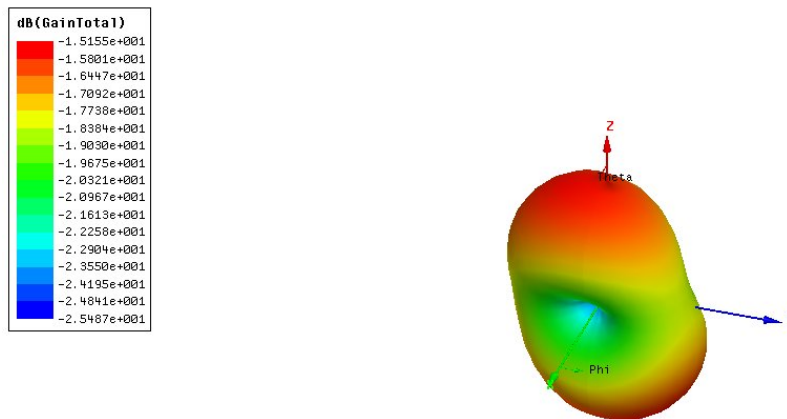


A frequência de ressonância da antena é calculada, de acordo com Alam et al. (2018) pela equação 5.1, em que  $c$  é a velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s),  $W$  e  $L$  são as dimensões de comprimento e largura externa da antena, em metros. Para as dimensões disponíveis, a frequência de ressonância é de 426 MHz.

$$f = \frac{c}{4(W + L)} \quad (5.1)$$

As respostas de ganho, perda de retorno e VSWR do molde-zero são apresentadas nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, respectivamente. Conforme apresentado, o molde-zero opera em 530 MHz, tem ganho de -1,5 dB e diretividade sobre o eixo Z+. A perda de retorno é de -1,5 dB. Nem a perda de retorno nem a VSWR se encaixam nos padrões desejados, para este caso, devido a seus valores.

Figura 5.4 – Ganho para o molde-zero.

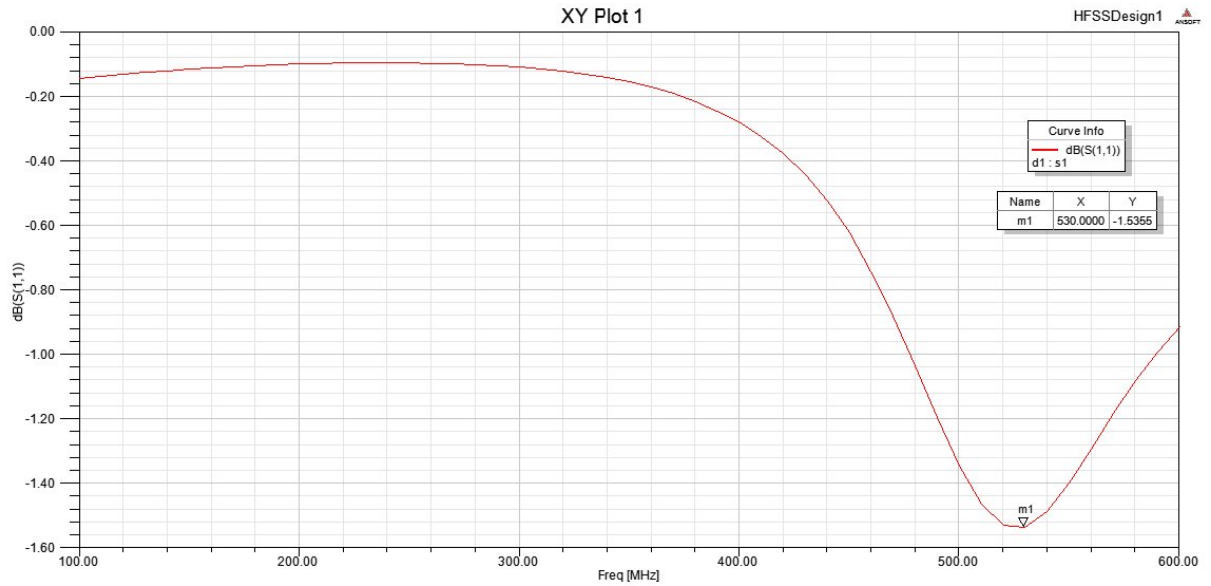


Fonte: Autor

A partir da primeira estrutura, o estudo conduziu uma série de alterações físicas no molde-zero de forma a otimizar os resultados obtidos e alocar a frequência de ressonância da antena entre 430 e 440 MHz, frequências de rastreamento das ET do Programa NANOSATC-BR. Baseado nas estruturas propostas em Alam et al. (2018) e Vieira et al. (2016), cortes foram feitos ao longo dos eixos X e Y e os valores de frequência, potência, VSWR e ganho foram anotados com o objetivo de avaliar os parâmetros elétricos dos modelos e compará-los com o atual sistema de antenas do satélite. Na próxima seção, buscando resultados melhores, a antena planar F é avaliada.

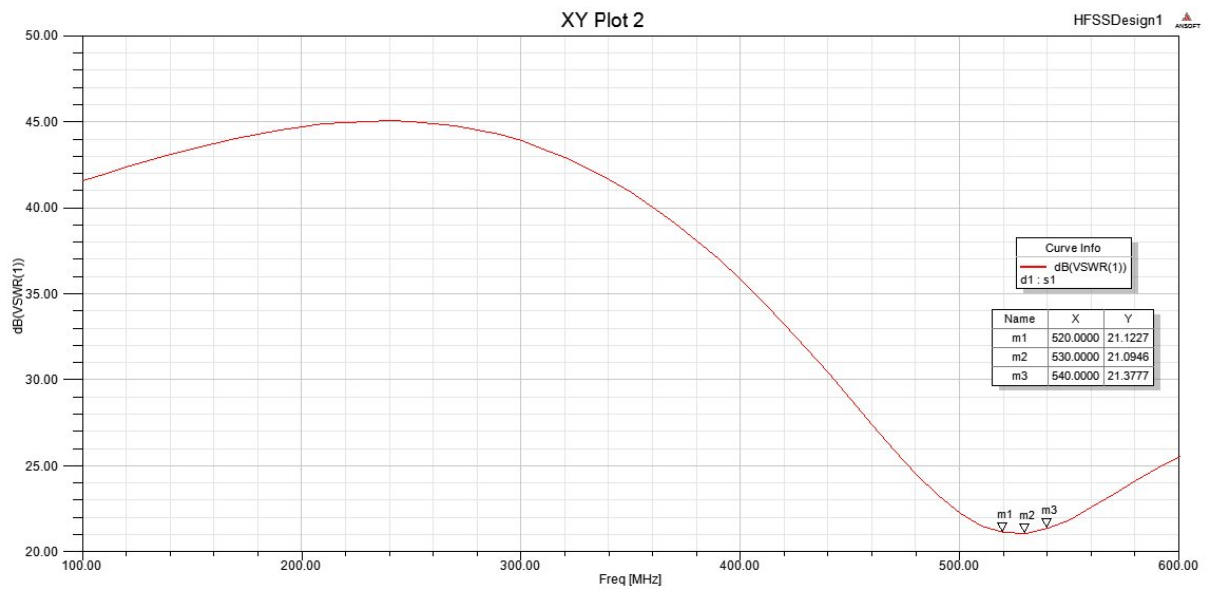


Figura 5.5 – Perda de retorno para o molde-zero.



Fonte: Autor

Figura 5.6 – Relação VSWR para molde-zero.



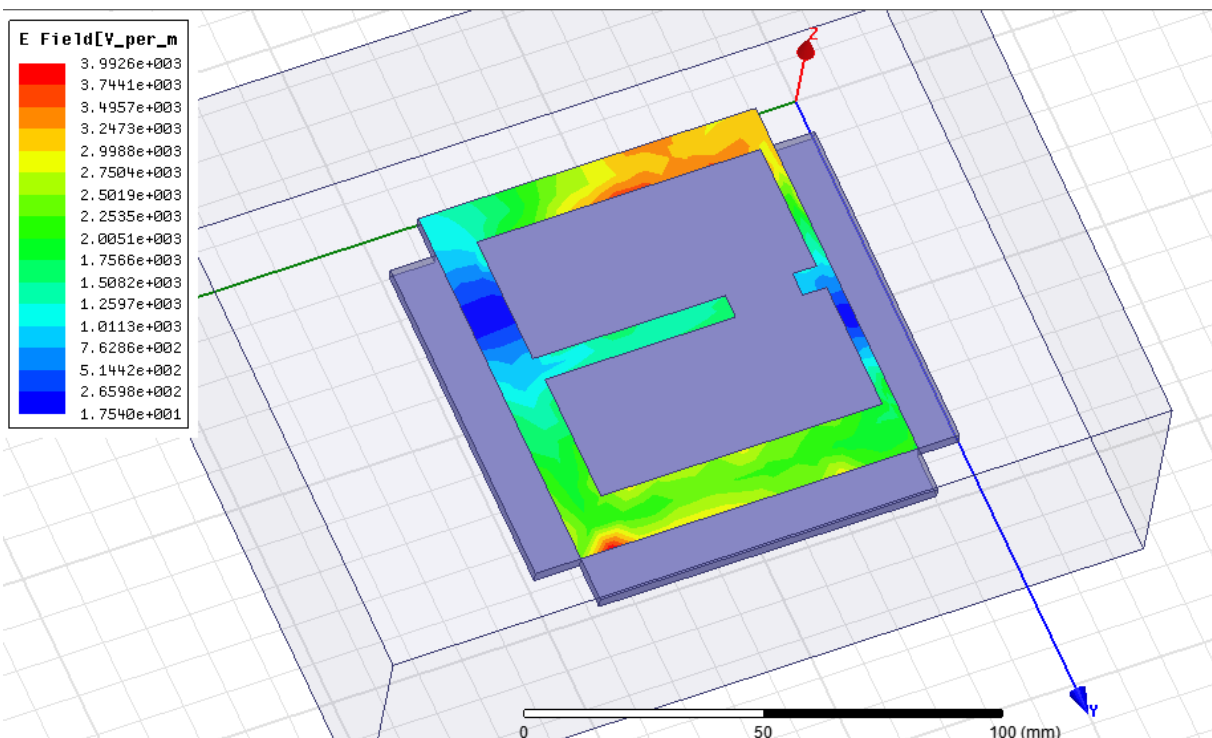
Fonte: Autor

### 5.3.1 Planar F

Esta subseção apresenta as simulações realizadas para modelo de antena planar F. Todas as estruturas dos modelos analisados serão apresentadas juntamente com sua distribuição de campo elétrico. O objetivo é demonstrar como a inclusão de cortes nos braços da antena interferem na frequência de ressonância da mesma. De acordo com Milligan (2005) e como citado no Capítulo 2, os cantos e bordas em antenas planares são pontos de irradiação de energia em antenas planares, portanto, a inclusão de cortes cria elementos ressonantes na antena que interferem sobre sua frequência de operação. Como apresentado por Garzón (2013), a frequência de operação não é alterada pelo aterramento e depende exclusivamente das características geométricas da antenas. Os casos observados nesse trabalho tentam avaliar a melhor posição e tamanho para esses cortes considerando esse fato.

O ponto de alimentação de todos os modelos apresentados é localizado sobre o eixo X, a 39 mm da origem e mede 10 x 5 mm. O modelo projetado é apresentado na Figura 5.7. Os resultados de ganho e VSWR são apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9. Neste modelo, é realizado um corte de 2,5 mm no braço central da antena, em direção do eixo X. A frequência de ressonância para esse modelo é de 520 MHz, 10 MHz abaixo da frequência do molde-zero.

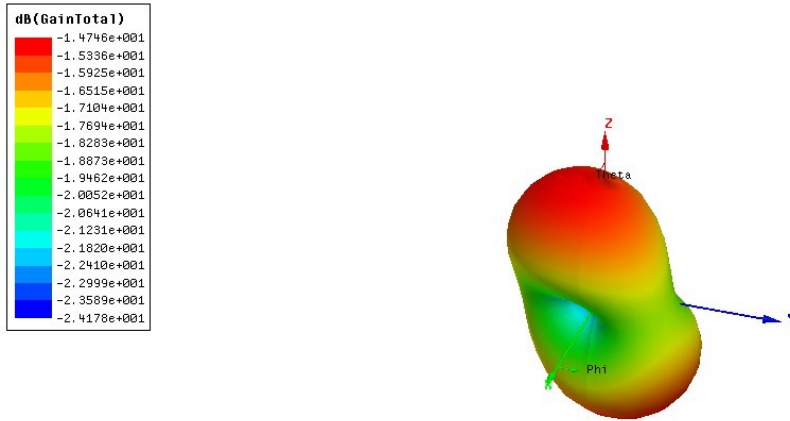
Figura 5.7 – Modelo 1 de antena planar e campo elétrico.



Fonte: Autor

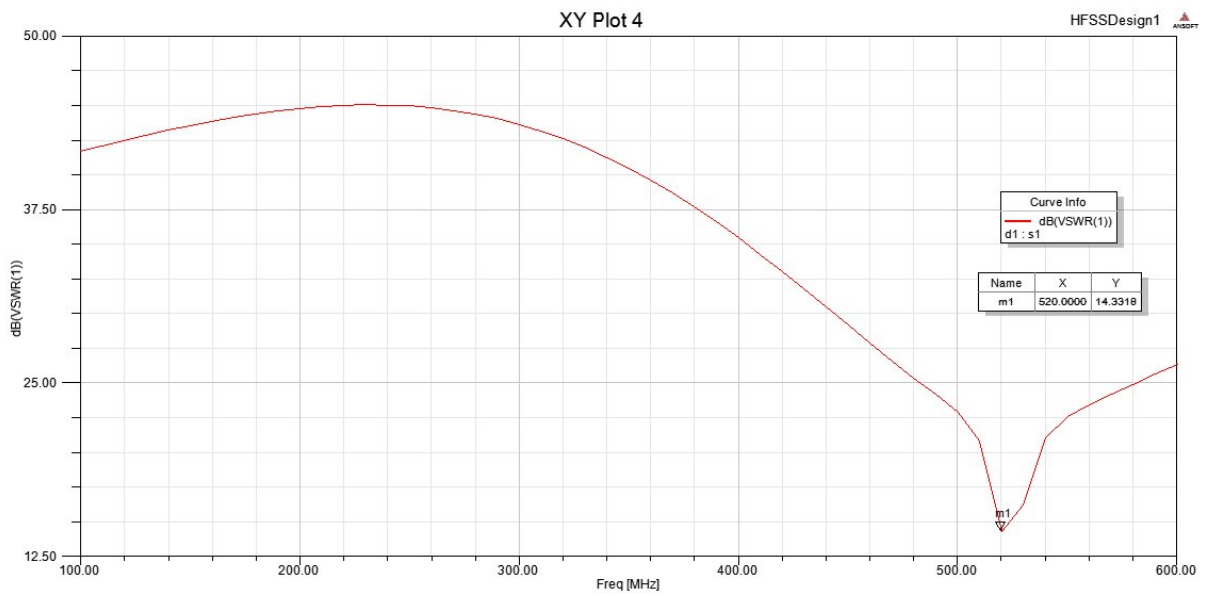
O segundo modelo de antena planar e seu diagrama de irradiação de campo elétrico são apresentados na Figura 5.10. Neste modelo, um corte de 5 mm é inserido no braço central da antena e um corte de 1 mm é inserido no braço esquerdo. O ganho e a perda de retorno para

Figura 5.8 – Ganho para modelo 1.



Fonte: Autor

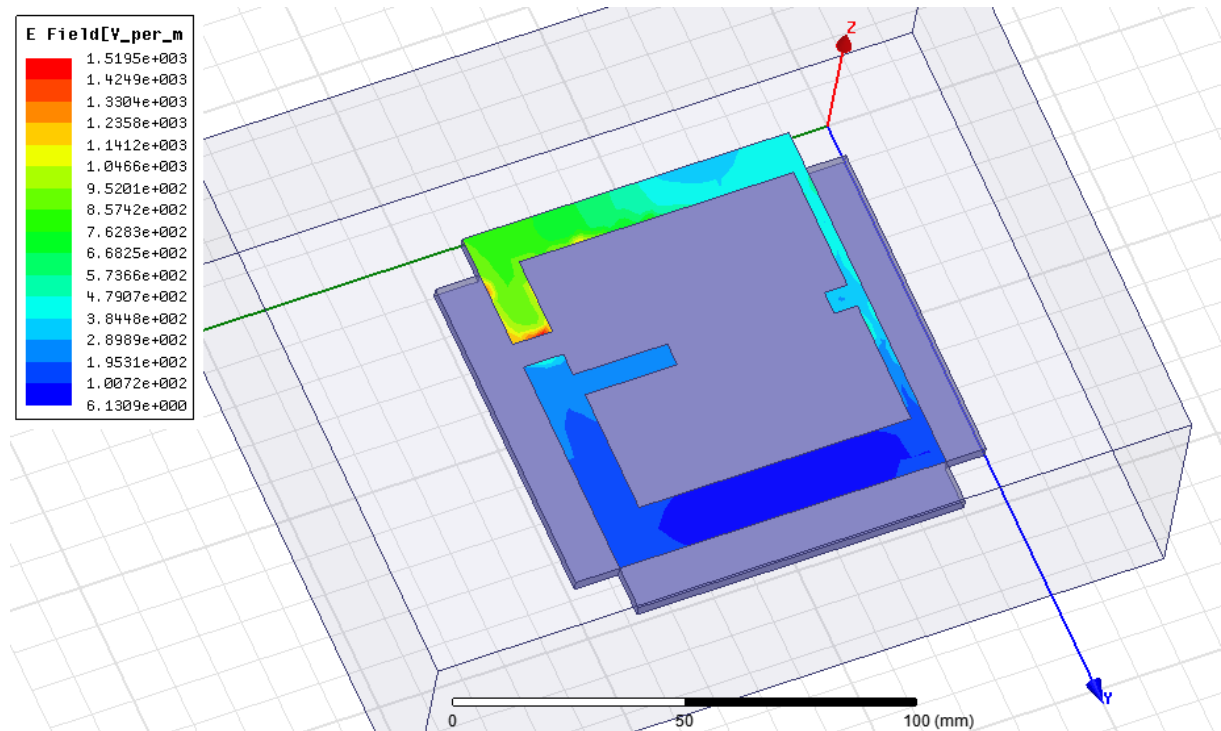
Figura 5.9 – Resposta de VSWR para modelo 1.



Fonte: Autor

esse modelo são apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12. Como pode ser observado, o aumento do comprimento do corte central tem pouca influência sobre o ganho, porém a inclusão de um novo corte no braço esquerdo atua sobre a frequência. Com esse corte, a frequência de ressonância é reduzida para 240 MHz e a diretividade da antena é deslocada para o eixo X.

Figura 5.10 – Modelo 2 de antena planar e campo elétrico.



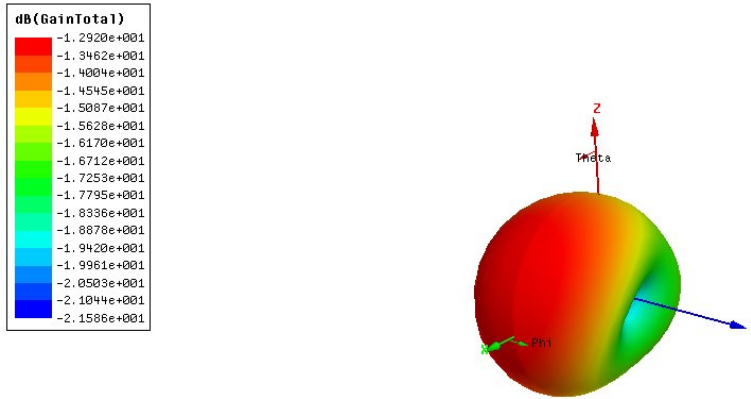
Fonte: Autor

No terceiro modelo, apresentado na Figura 5.13, o corte central da antena é removido e são estudados os efeitos de cortes nos braços sobre o eixo Y. Neste modelo, é incluído um corte de 3 mm no braço sobre o eixo Y da antena. As respostas de ganho e perda de retorno são apresentadas nas Figuras 5.14 e 5.15. O segundo corte no eixo Y manteve a diretividade da antena sobre o eixo X e aumentou a frequência de ressonância para 350 MHz.

Para o quarto modelo, os cortes sobre o eixo Y são removidos e são incluídos dois cortes de 3,5 mm e 1,5 mm sobre os braços no eixo X, conforme apresentado na Figura 5.16. Os resultados de ganho e perda de retorno são apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18. A diretividade da antena, neste caso, volta para o eixo Z e a frequência de ressonância é estabelecida em 320 MHz.

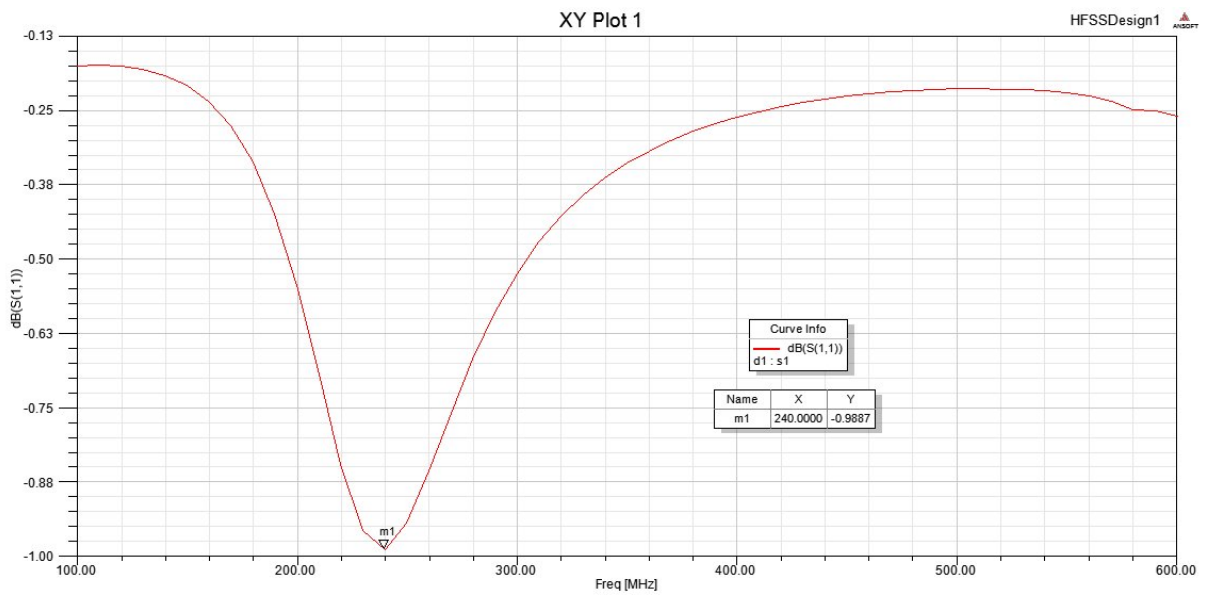
No quinto modelo analisado, o comprimento do braço central está localizado sobre o eixo Y. Neste modelo é incluído um corte sobre o eixo X e adicionado uma área de condutor no braço inferior, como apresentado na Figura 5.19. As respostas de ganho e perda de retorno são apresentadas nas Figuras 5.20 e 5.21. A alteração da localização do braço central atua sobre a frequência de ressonância, criando dois pólos para a antena, um em 320 MHz e outro em 500

Figura 5.11 – Ganho para modelo 2.



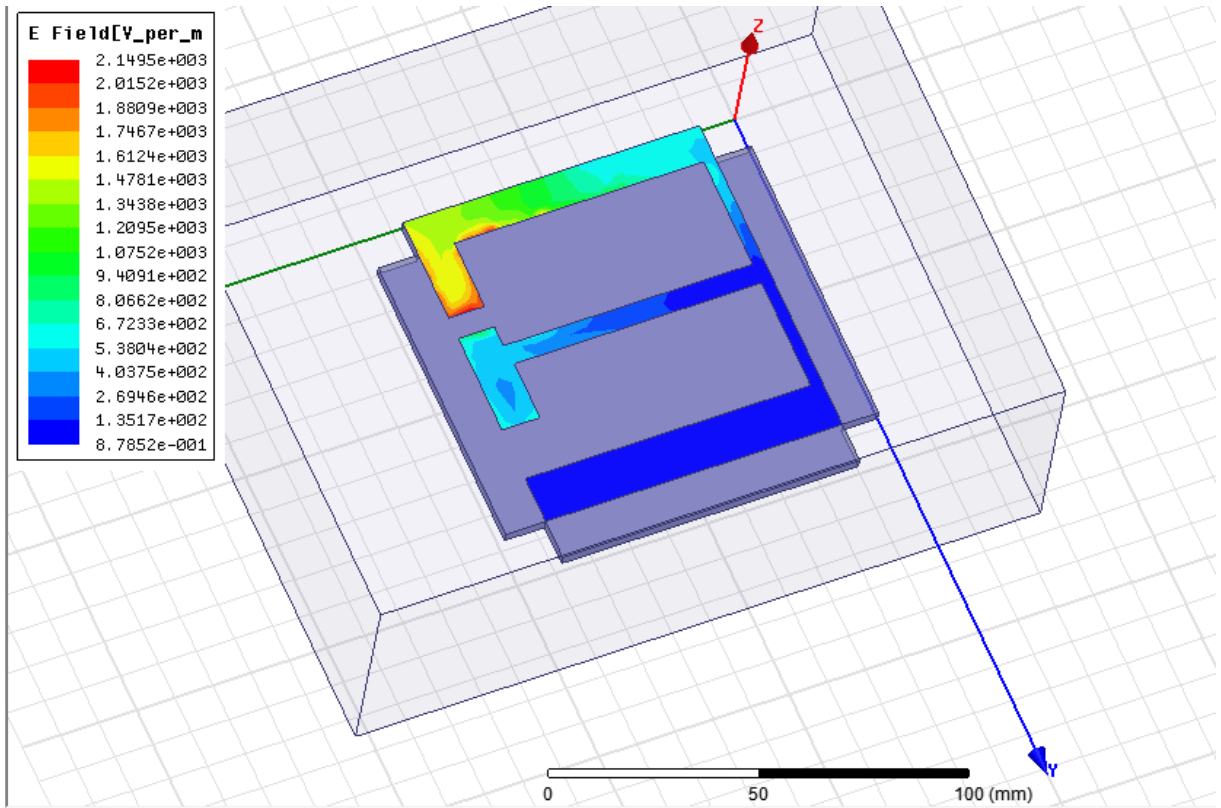
Fonte: Autor

Figura 5.12 – Perda de retorno para modelo 2.



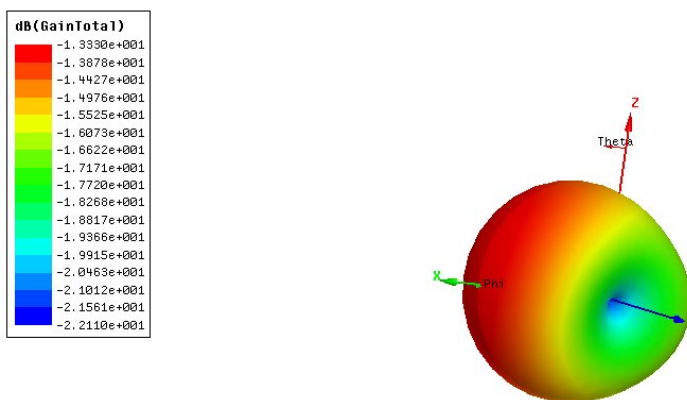
Fonte: Autor

Figura 5.13 – Modelo 3 de antena planar e campo elétrico.



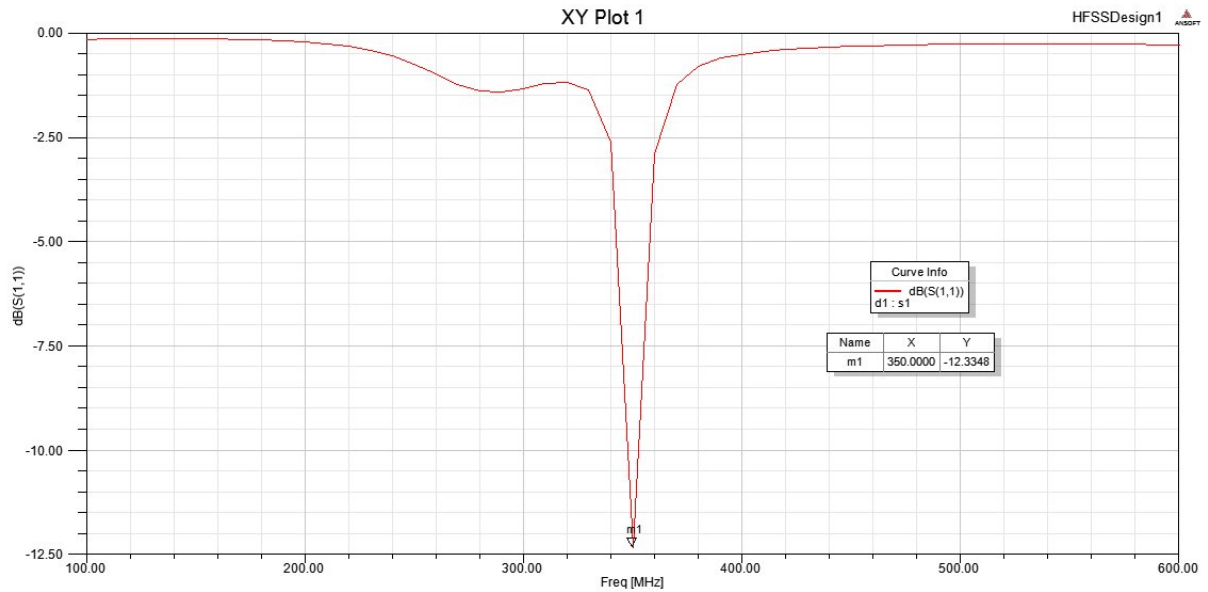
Fonte: Autor

Figura 5.14 – Ganho para modelo 3.



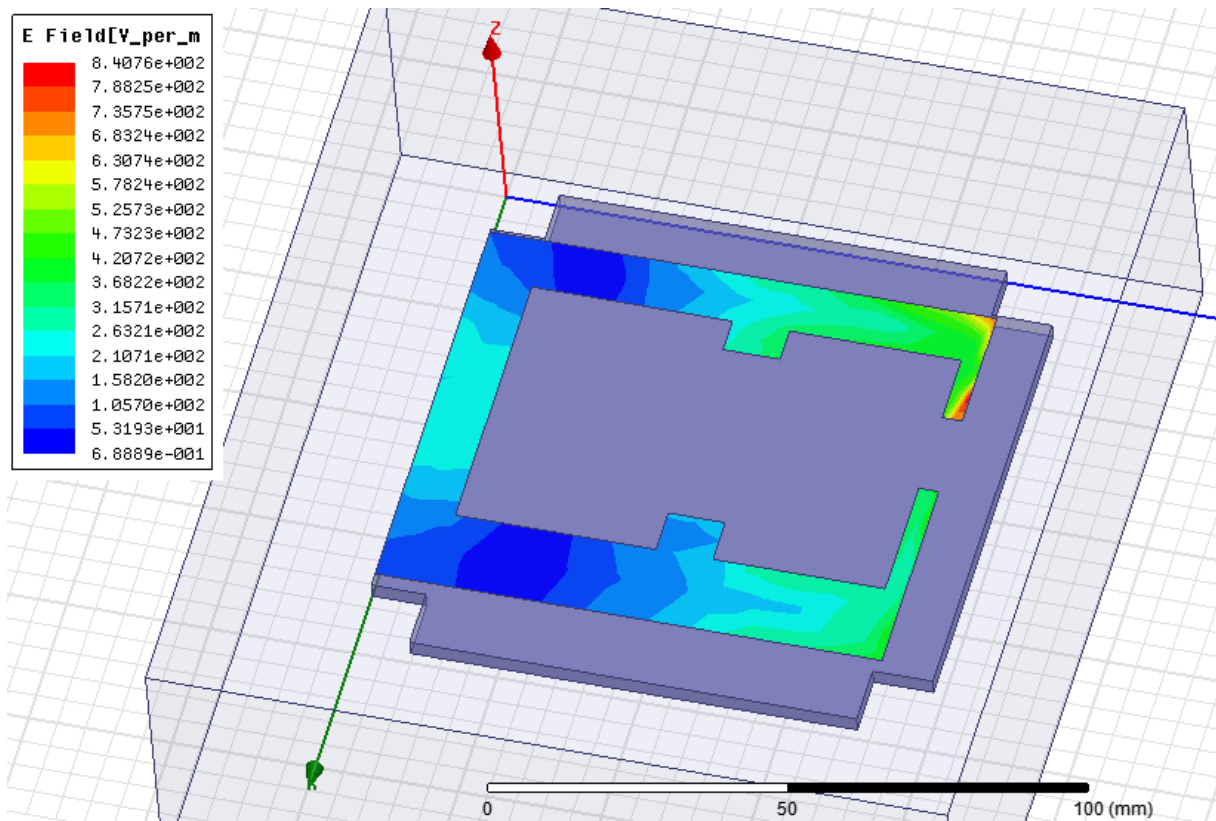
Fonte: Autor

Figura 5.15 – Perda de retorno para modelo 3.



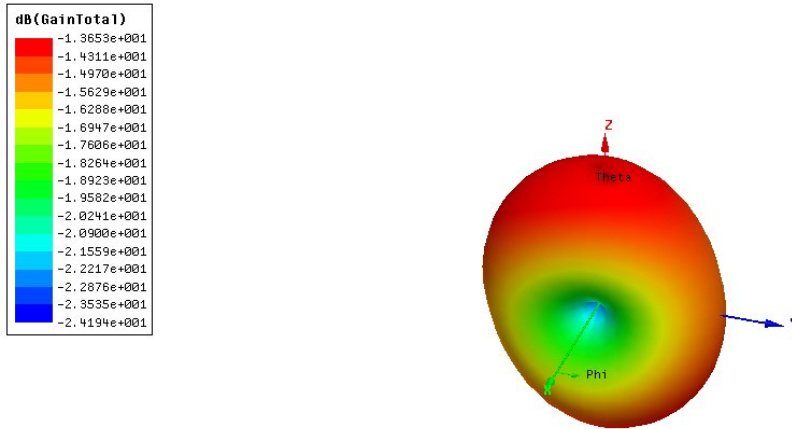
Fonte: Autor

Figura 5.16 – Modelo 4 de antena planar e campo elétrico.



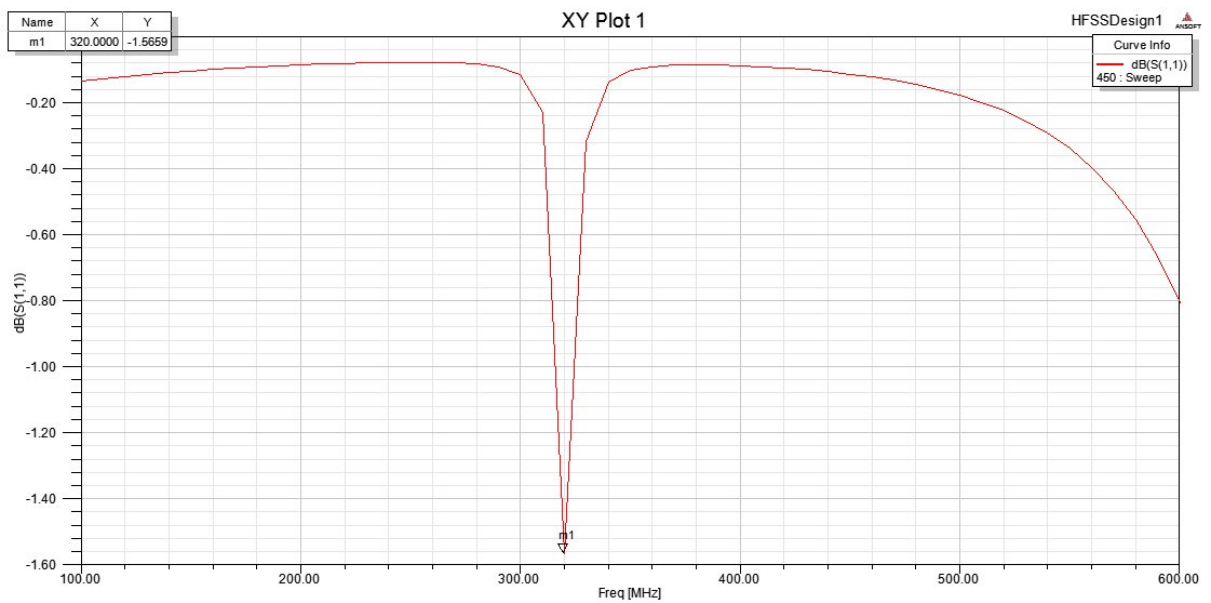
Fonte: Autor

Figura 5.17 – Ganho para modelo 4.



Fonte: Autor

Figura 5.18 – Perda de retorno para modelo 4.

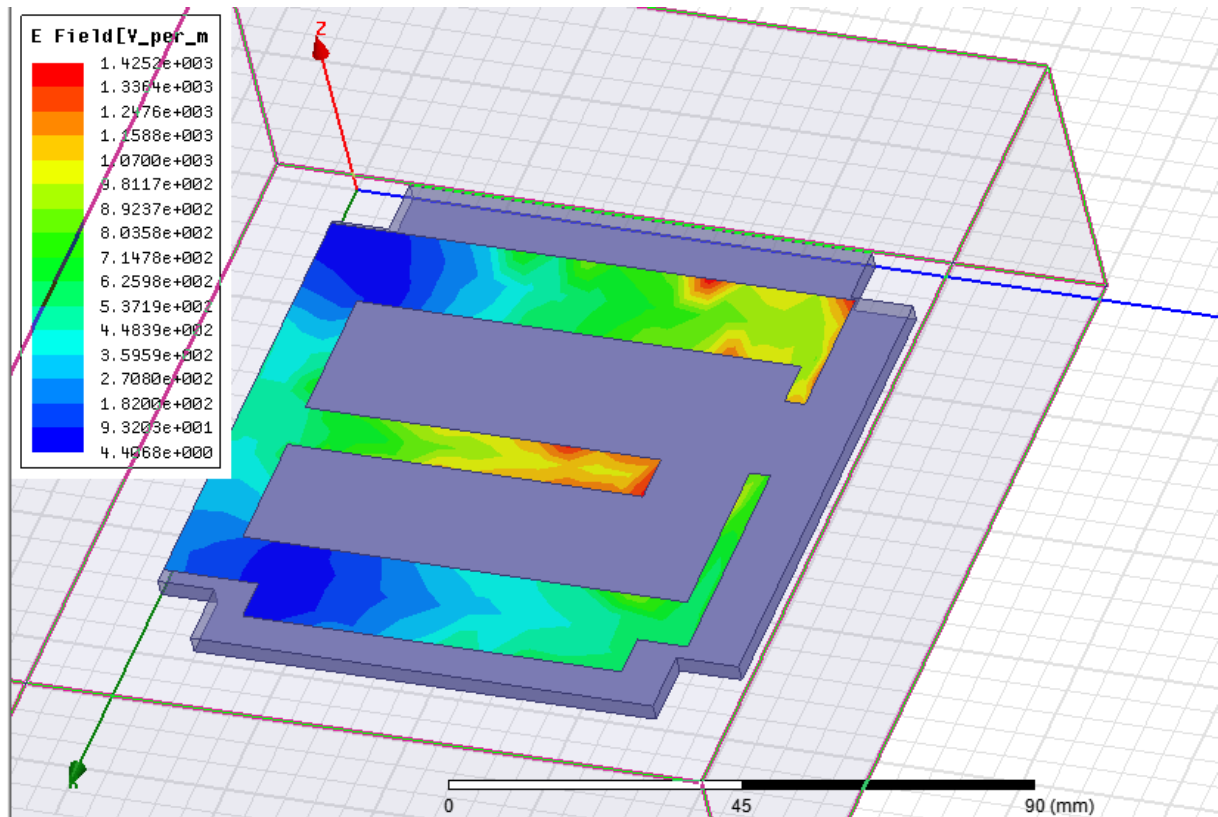


Fonte: Autor



MHz. O ganho da antena reduz para -1,7 dB.

Figura 5.19 – Modelo 5 de antena planar e campo elétrico.



Fonte: Autor

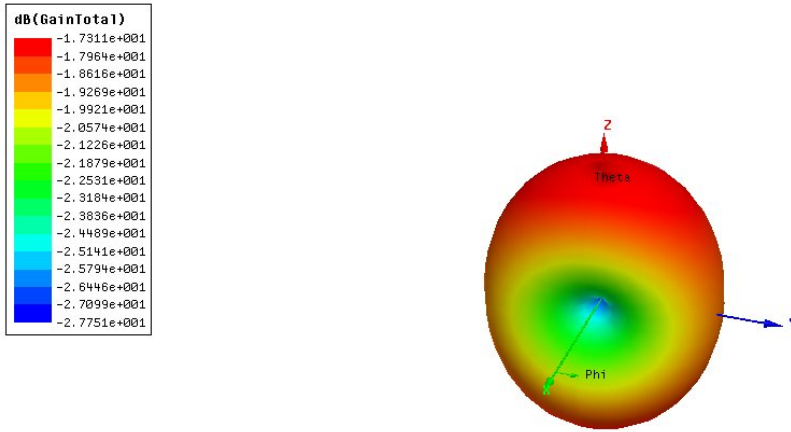
Para análise, aproveitando a área da face disponível, foi adicionada uma nova área sobre o eixo X. A estrutura deste modelo é apresentada na Figura 5.22 e as respostas de ganho e perda de retorno em 5.23 e 5.24, respectivamente. Com esta alteração, não foram observadas alterações no ganho da antena, porém, o pólo inferior localizado em 320 MHz do modelo anterior não é mais observado e o pólo superior da antena é deslocado para 490 MHz.

No modelo 7, é aumentado o corte sobre o eixo X, conforme apresentado na Figura 5.25. As respostas de ganho e perda de retorno são apresentadas em 5.26 e 5.27, respectivamente. Com esta alteração, o ganho da antena é de -1,8 dB, a antena tem diretividade sobre o eixo Z e a perda de retorno é de -10 dB. A frequência de 490 MHz permanece inalterada.

Finalmente, o último modelo considerado para antena planar F foi o apresentado na Figura 5.28. Esse modelo tem apenas um corte de 1,5 mm de comprimento sobre o eixo Y no braço direito da antena. Os resultados de ganho e perda de retorno são apresentados nas Figura 5.29 e 5.30. O padrão de irradiação é deslocado para -Z, tendo um ganho de -1,2 dB, a menor atenuação registrada nos modelos. A frequência de ressonância é de 440 MHz e o modelo tem uma perda de retorno de -4,3 dB.

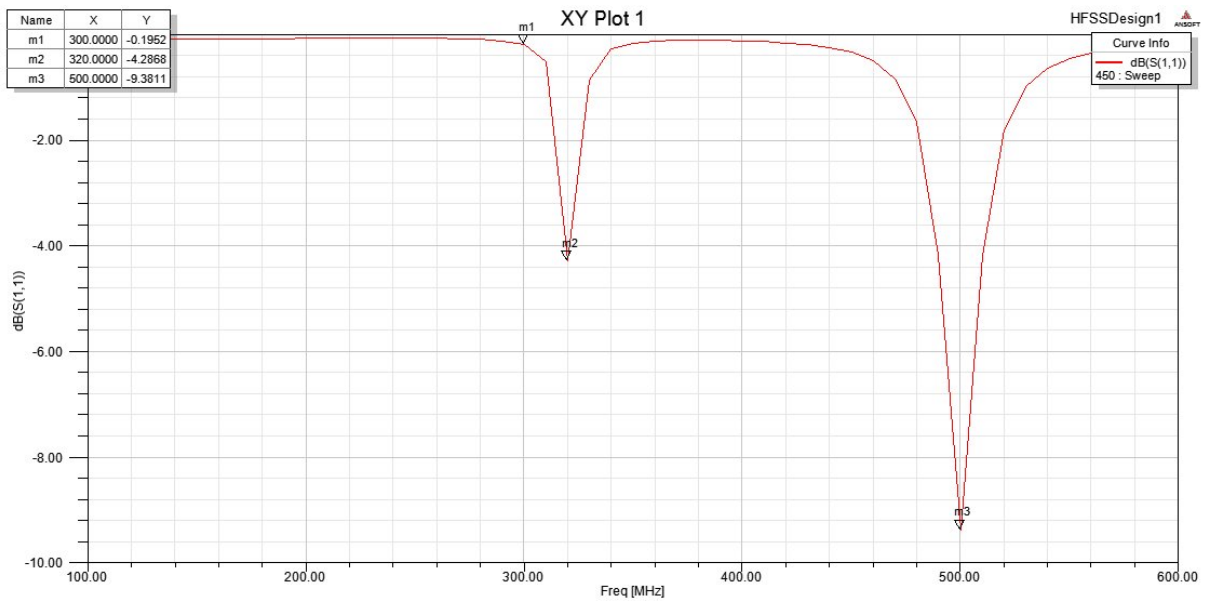
Conforme pode ser observado, todos os modelos apresentados apresentam uma atenuação do sinal de aproximadamente 1 dB. As características mais afetadas com a alteração dos

Figura 5.20 – Ganho para modelo 5.



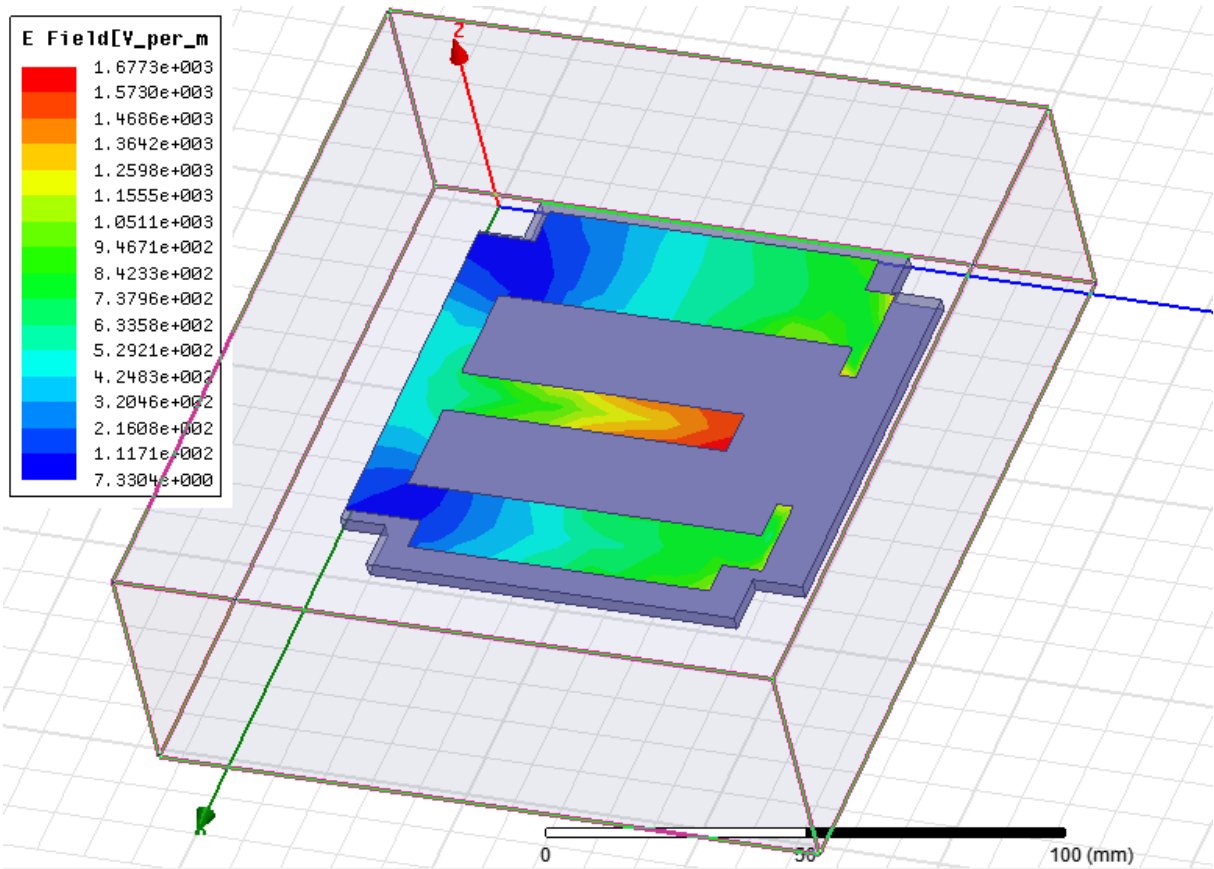
Fonte: Autor

Figura 5.21 – Perda de retorno para modelo 5.



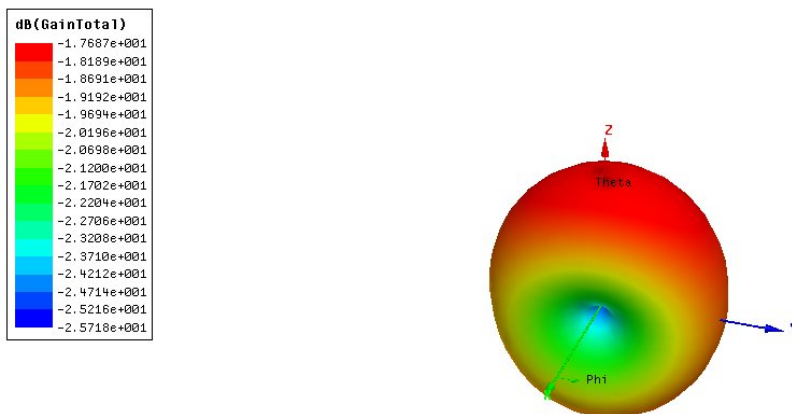
Fonte: Autor

Figura 5.22 – Modelo 6 de antena planar e campo elétrico.



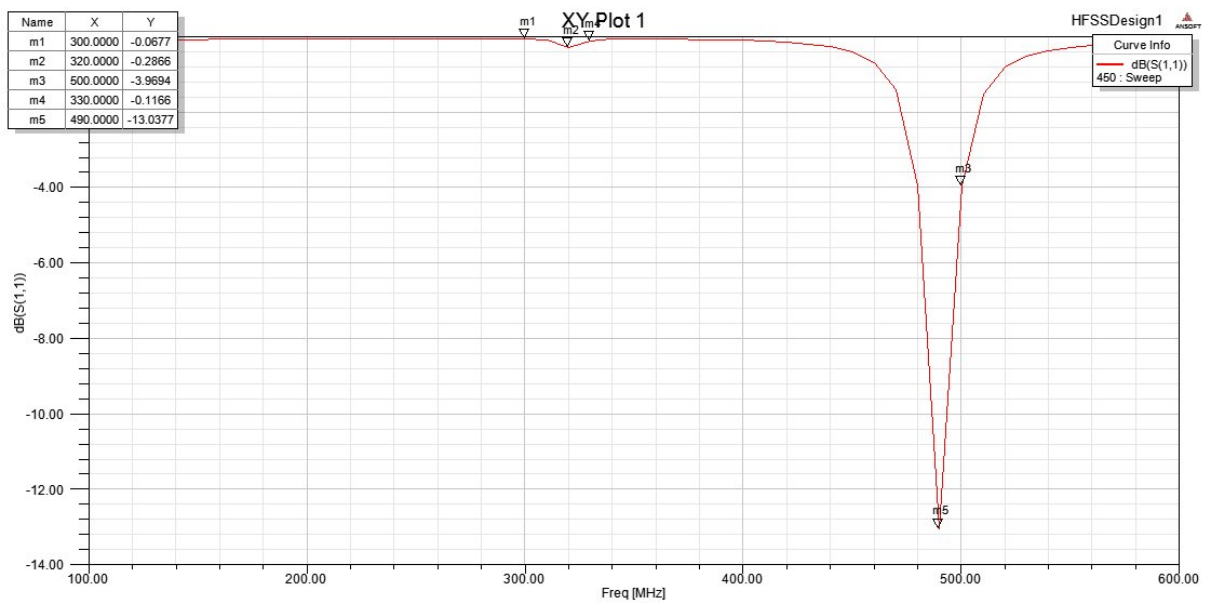
Fonte: Autor

Figura 5.23 – Ganho para modelo 6.



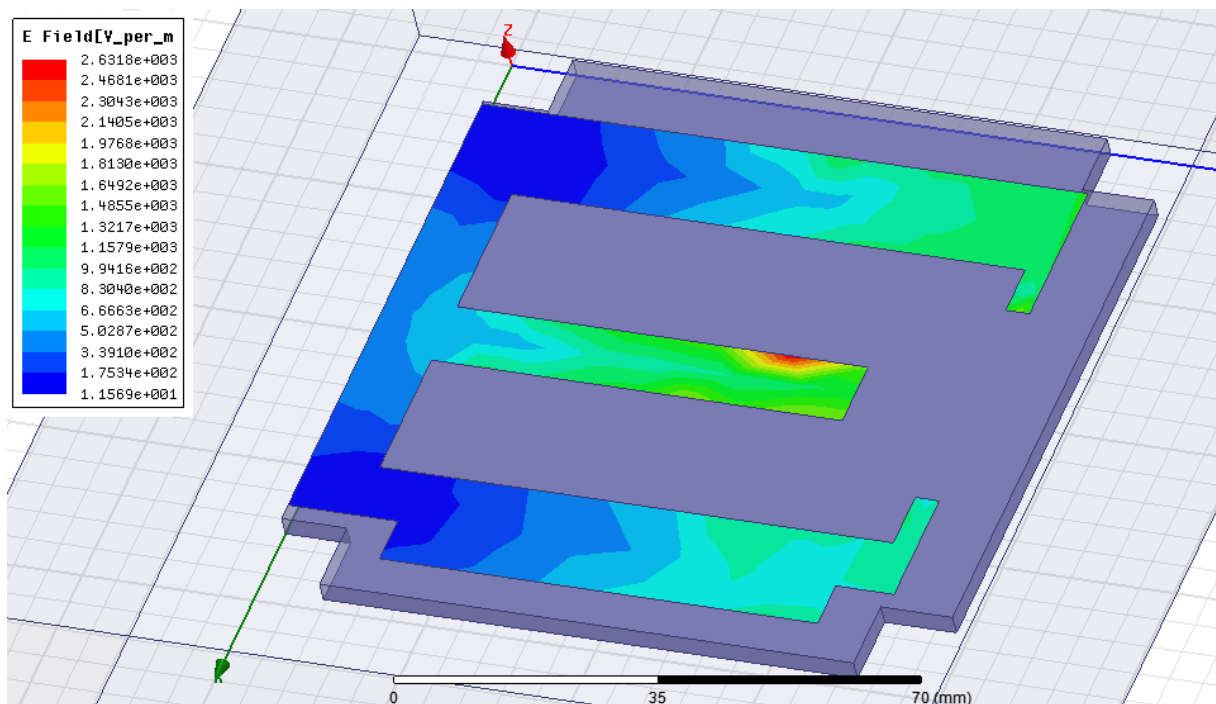
Fonte: Autor

Figura 5.24 – Perda de retorno para modelo 6.



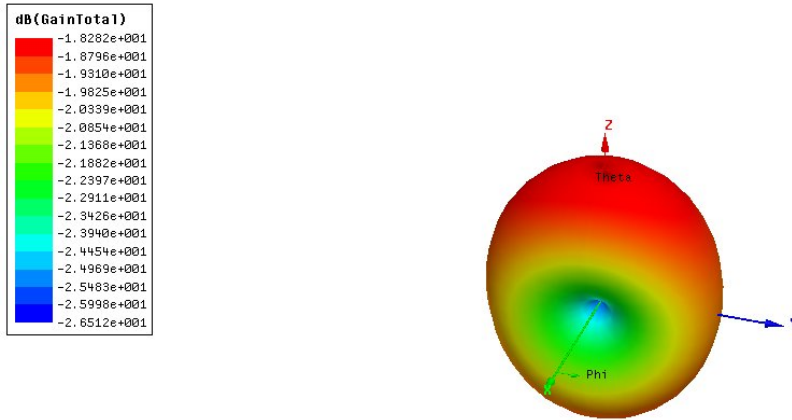
Fonte: Autor

Figura 5.25 – Modelo 7 de antena planar e campo elétrico.



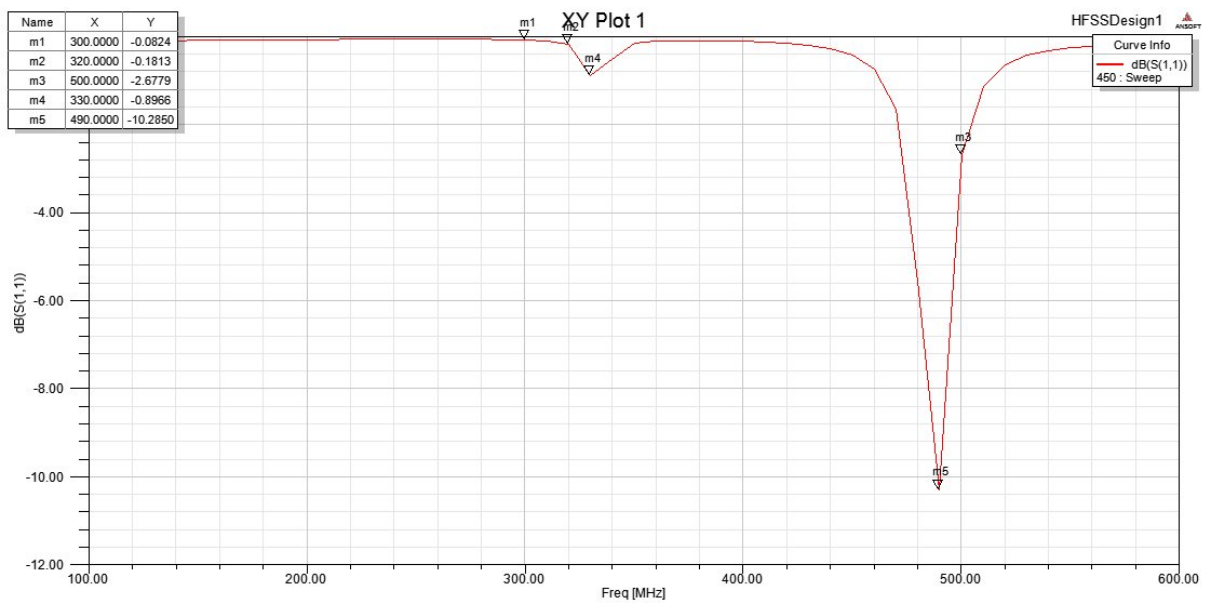
Fonte: Autor

Figura 5.26 – Ganho para modelo 7.



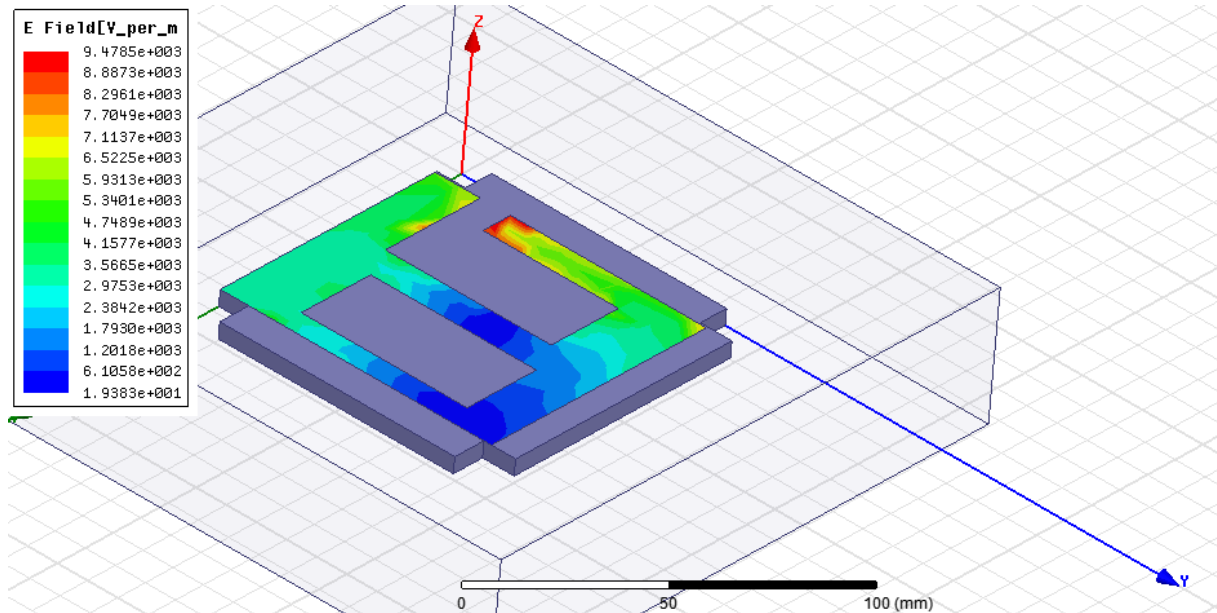
Fonte: Autor

Figura 5.27 – Perda de retorno para modelo 7.



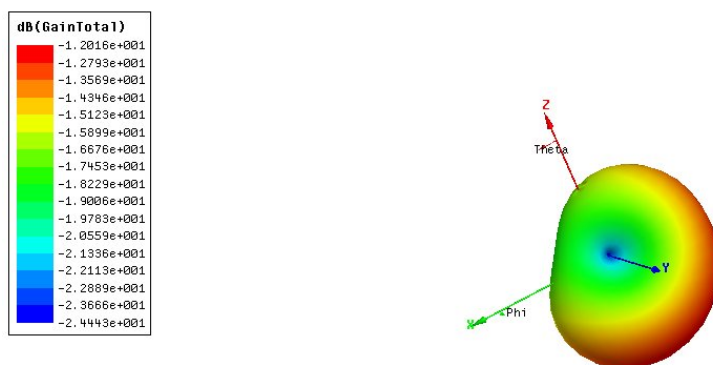
Fonte: Autor

Figura 5.28 – Modelo 8 de antena planar F.



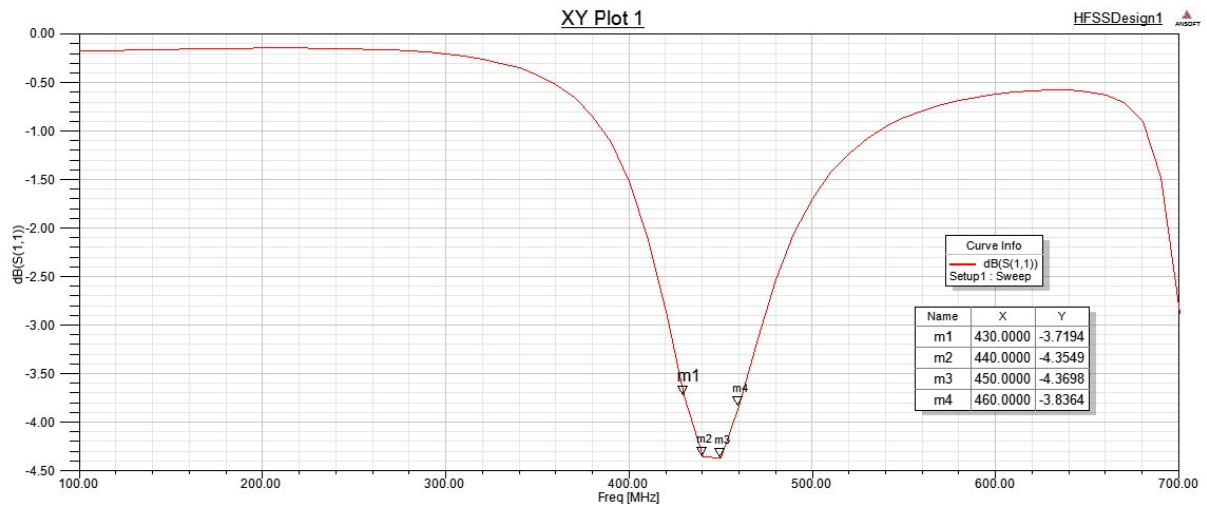
Fonte: Autor

Figura 5.29 – Ganho para modelo 8.



Fonte: Autor

Figura 5.30 – Perda de retorno para modelo 8.



Fonte: Autor

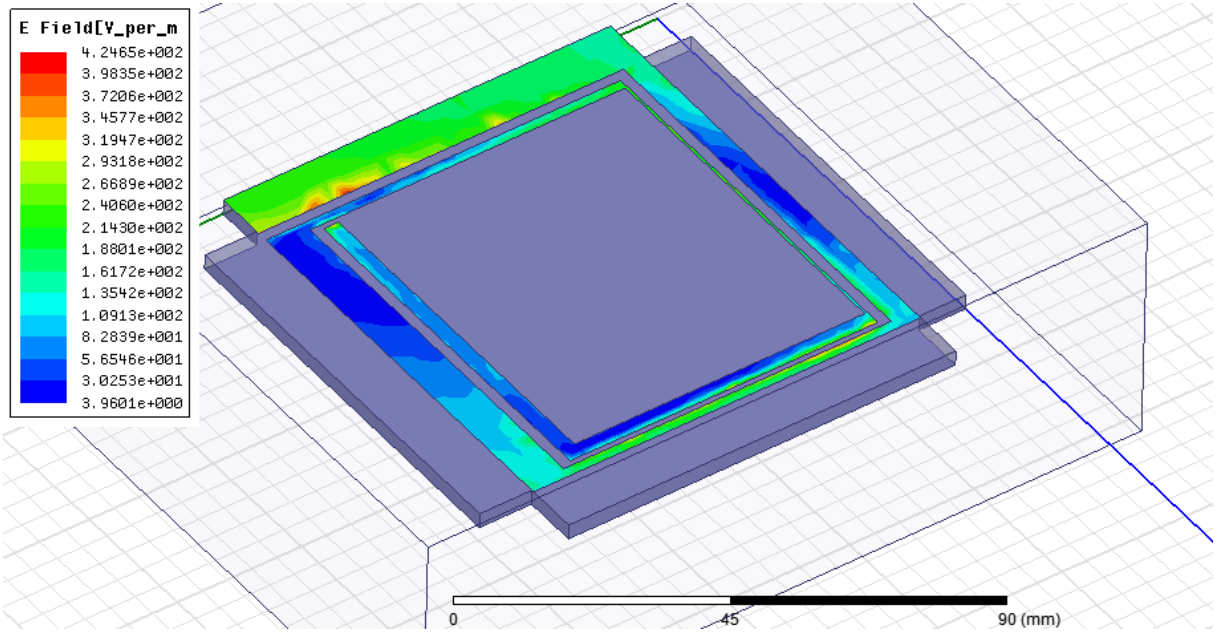
parâmetros são a frequência de ressonância e a perda de retorno. Portanto, visando manter as características elétricas do sistema do NCBR1, para os casos de antena planar F, seria necessário o aumento da potência do transmissor do satélite ou o aumento da sensibilidade das estações terrenas. Esse aumento seria em torno de 10%, visto a atenuação que o sinal sofre na antena planar. Outra possível solução para este caso, como apresentado em Vieira et al. (2016), seria a adição de elementos de antena na parte externa do satélite, de forma a aumentar a área efetiva das antenas. Porém, essa solução não é considerada neste trabalho.

### 5.3.2 Espiral Quadrada

O modelo espiral quadrada é outra alternativa de design considerada neste trabalho. Novamente, a área efetiva da antena é de extrema importância para centralizar a frequência de ressonância desejada. O número de voltas da espira para esses modelos é baseado na área aproximada dos modelos anteriores. A Figura 5.31 apresenta a primeira estrutura analisada e as Figuras 5.32 e 5.33 apresentam, respectivamente, o ganho e perda de retorno do novo modelo. Para este caso, o ganho se mantém em -1,8 dB, com diretividade no eixo Z+, porém, a frequência de ressonância da antena é deslocada para 570 MHz, com -15,9 dB de perda de retorno.

O segundo modelo de antena espiral quadrada e décimo modelo analisado no trabalho é apresentado na Figura 5.34. O ganho e a perda de retorno deste modelo são apresentados nas Figuras 5.35 e 5.36. Neste modelo é aumentada a área lateral das espiras centrais para 0,5 mm. O padrão de irradiação desta antena, conforme apresentado na Figura 5.35 é totalmente alterado. Com pico sobre o eixo Z, o padrão apresenta um estrangulamento maior no plano da

Figura 5.31 – Modelo 9 de antena planar e campo elétrico.



Fonte: Autor

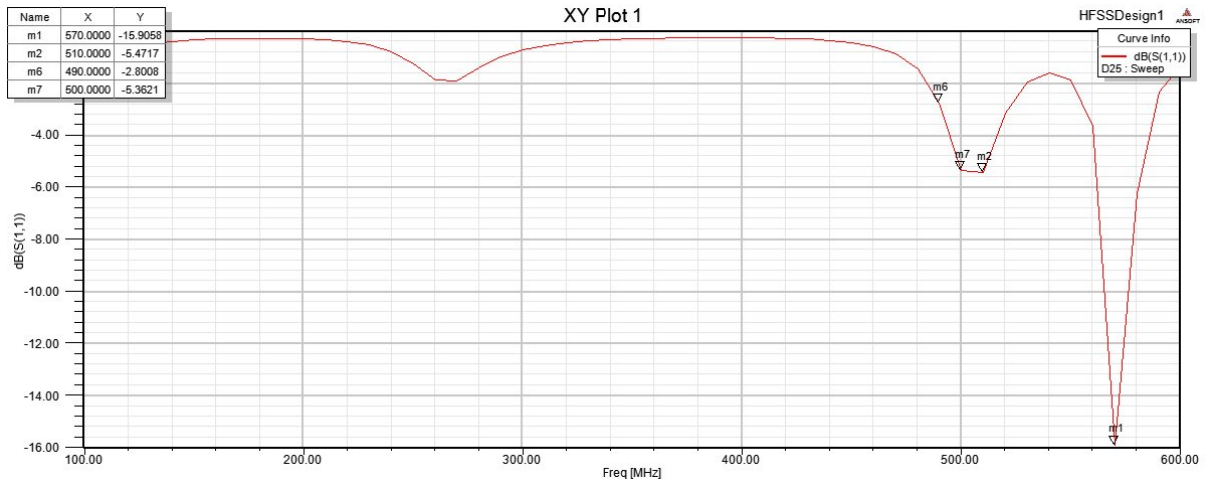
Figura 5.32 – Ganho para modelo 9.



Fonte: Autor



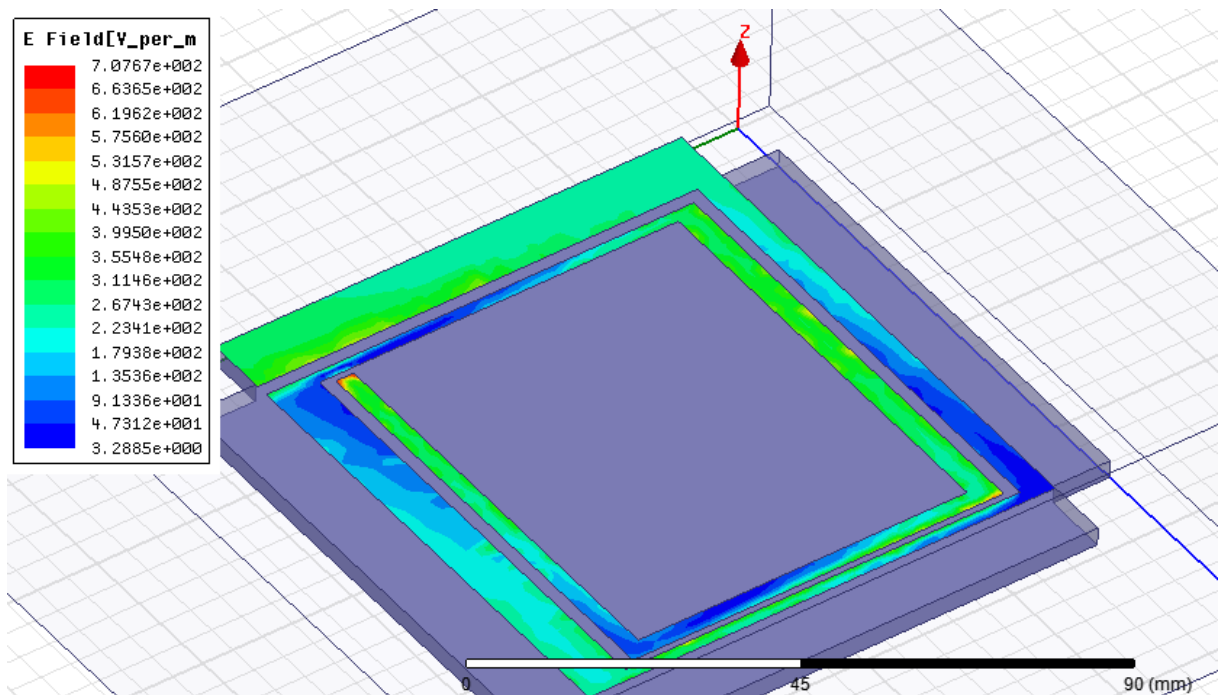
Figura 5.33 – Perda de retorno para modelo 9.



Fonte: Autor

antena. A frequência de ressonância é centrada em 480 MHz e o modelo apresenta perda de retorno de -12 dB.

Figura 5.34 – Modelo 10 de antena planar e campo elétrico.



Fonte: Autor

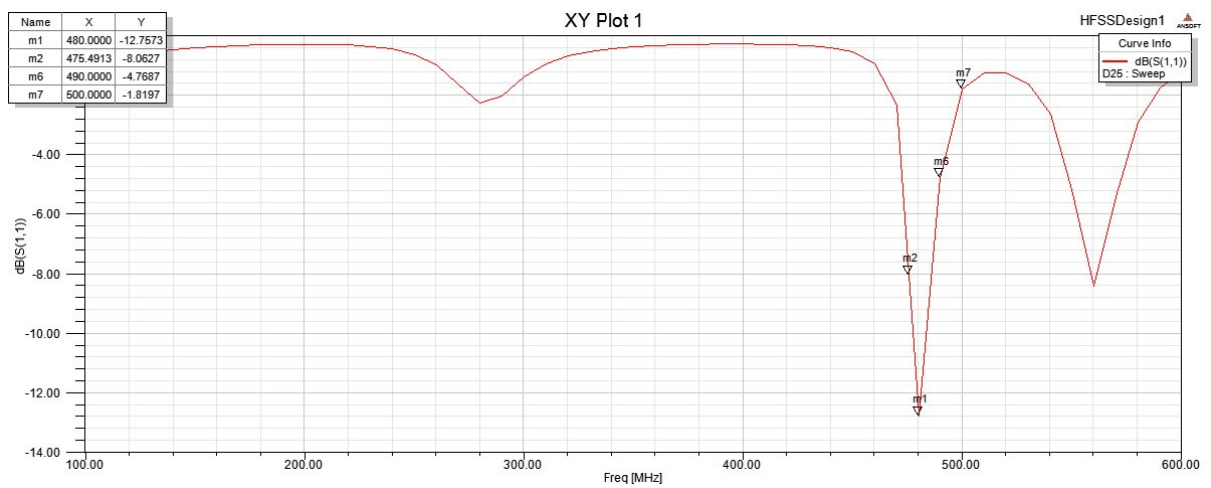
Aumentando a área efetiva da antena, conforme apresentado no modelo da Figura 5.37, observa-se uma redução do estrangulamento do padrão de irradiação. Características de ganho e perda de retorno não são alteradas significativamente, porém, são observados dois pólos de ressonância, em 480 MHz e 560 MHz, como apresentado nas Figuras 5.38 e 5.39.

Figura 5.35 – Ganho para modelo 10.



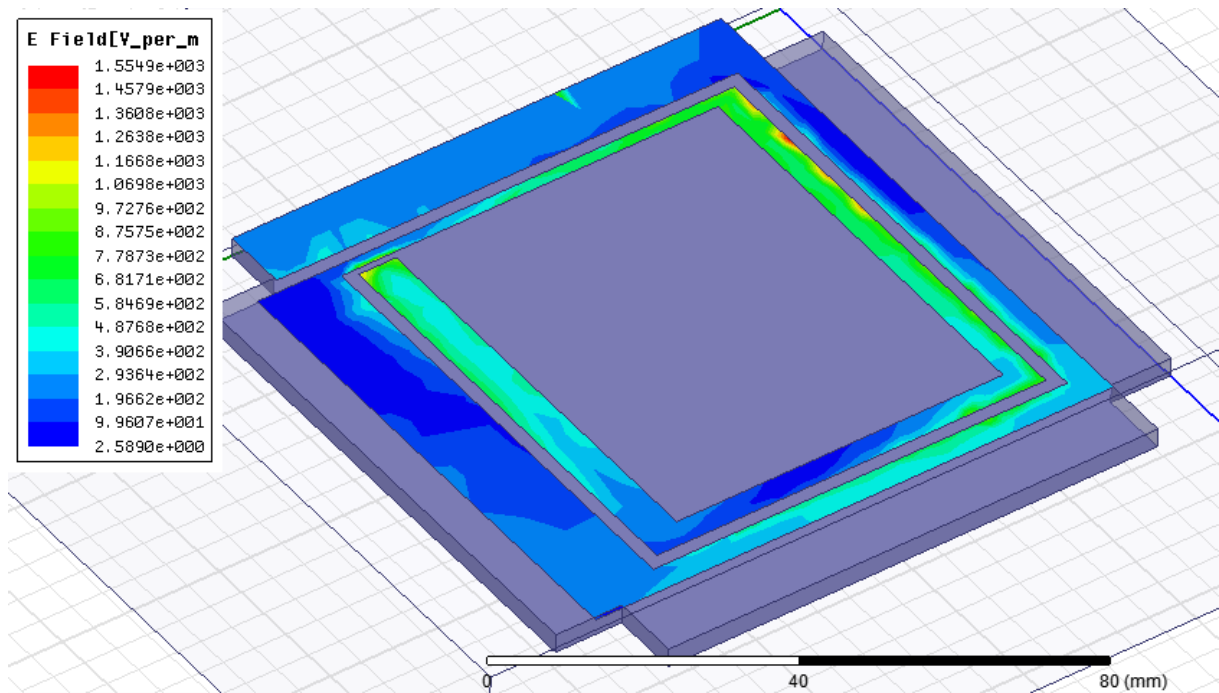
Fonte: Autor

Figura 5.36 – Perda de retorno para modelo 10.



Fonte: Autor

Figura 5.37 – Modelo 11 de antena planar e campo elétrico.



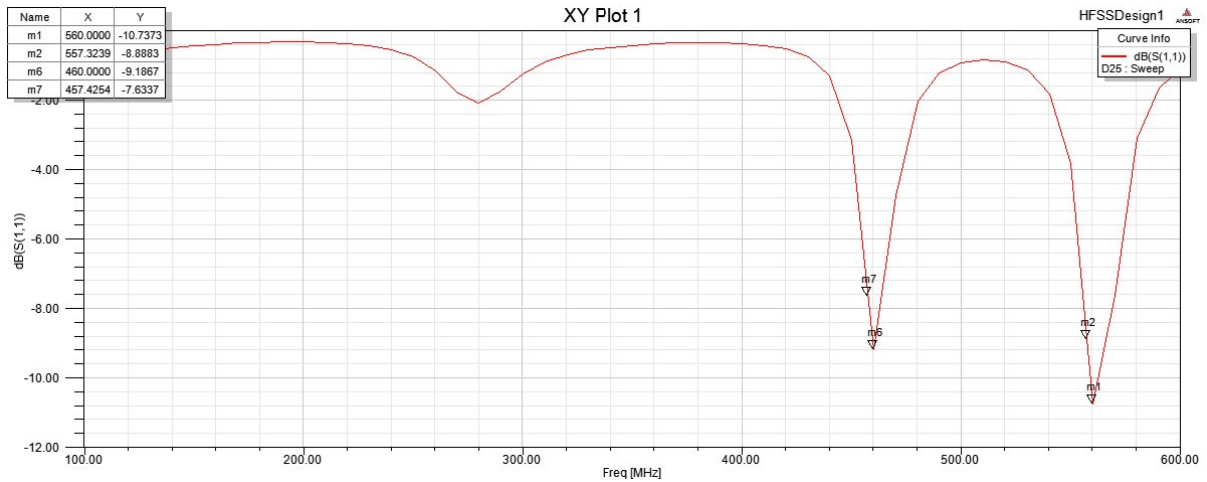
Fonte: Autor

Figura 5.38 – Ganho para modelo 11.



Fonte: Autor

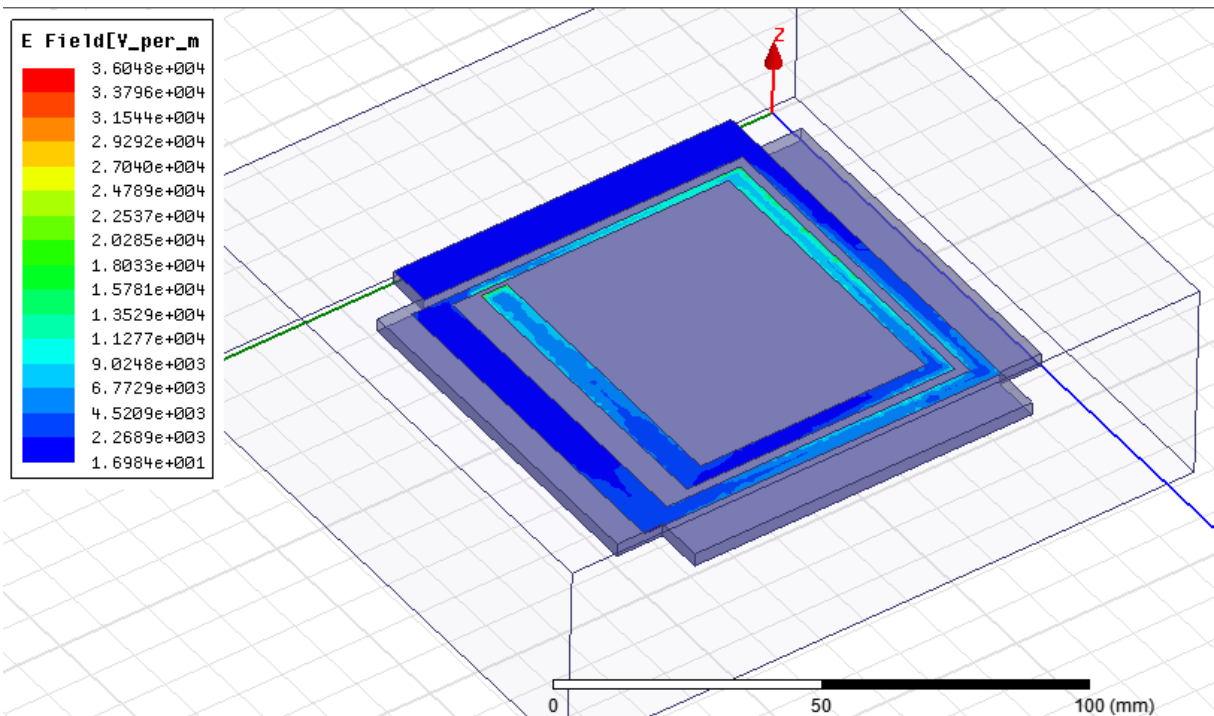
Figura 5.39 – Perda de retorno para modelo 11.



Fonte: Autor

Na estrutura apresentada na Figura 5.40 foi aumentado o espaçamento entre as trilhas da antena do modelo 11. Com esse aumento do espaçamento de 0,5 mm para 0,8 mm obteve-se um ganho de -1,9 dB, deslocando a diretividade da antena para Z-, conforme apresentado na Figura 5.41. A perda de retorno, Figura 5.42, é de -9 dB para o pólo de 460 MHz e -10,7 dB para o pólo em 560 MHz.

Figura 5.40 – Modelo 12 de antena planar e campo elétrico.



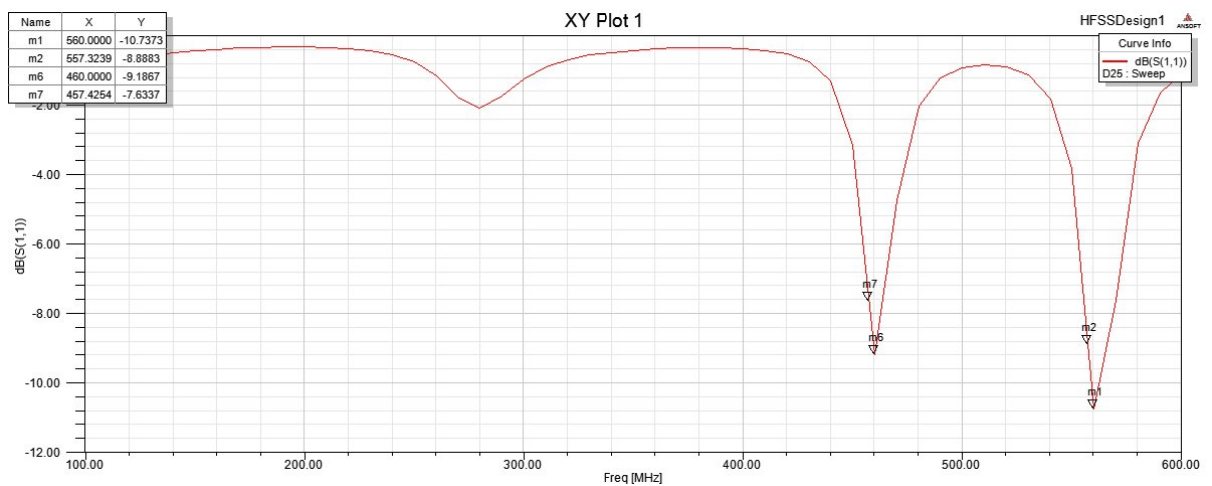
Fonte: Autor

Figura 5.41 – Ganho para modelo 12.



Fonte: Autor

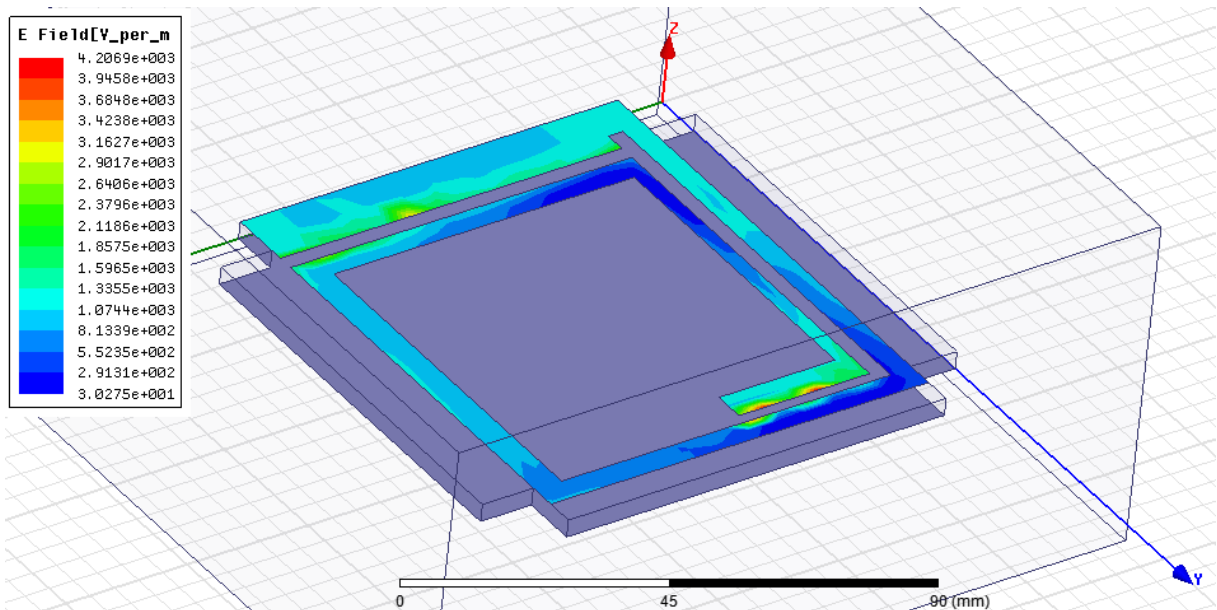
Figura 5.42 – Perda de retorno para modelo 12.



Fonte: Autor

Na estrutura da Figura 5.43 é adicionado um pequeno corte de 0,2 mm próximo a alimentação da antena e é reduzida meia espira para avaliar as alterações de resposta do sistema. Como apresentado na Figura 5.44, o ganho da antena é de -1,5 dB, com diretividade similar à dipolo sobre os eixos Z e X. A perda de retorno é reduzida para -2,4 dB, conforme Figura 5.45 para um pólo de frequência em 350 MHz.

Figura 5.43 – Modelo 13 de antena planar e campo elétrico.



Fonte: Autor

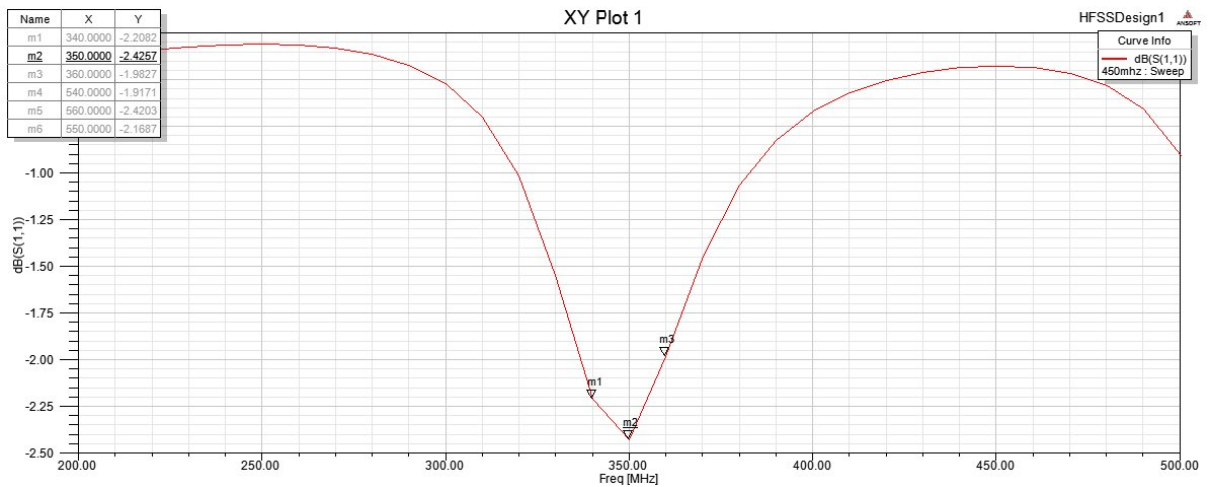
Figura 5.44 – Ganho para modelo 13.



Fonte: Autor

Reduzindo mais um trecho de espira e a área efetiva da antena, através da redução da largura de trilhas centrais, obteve-se o modelo apresentado na Figura 5.46. As características

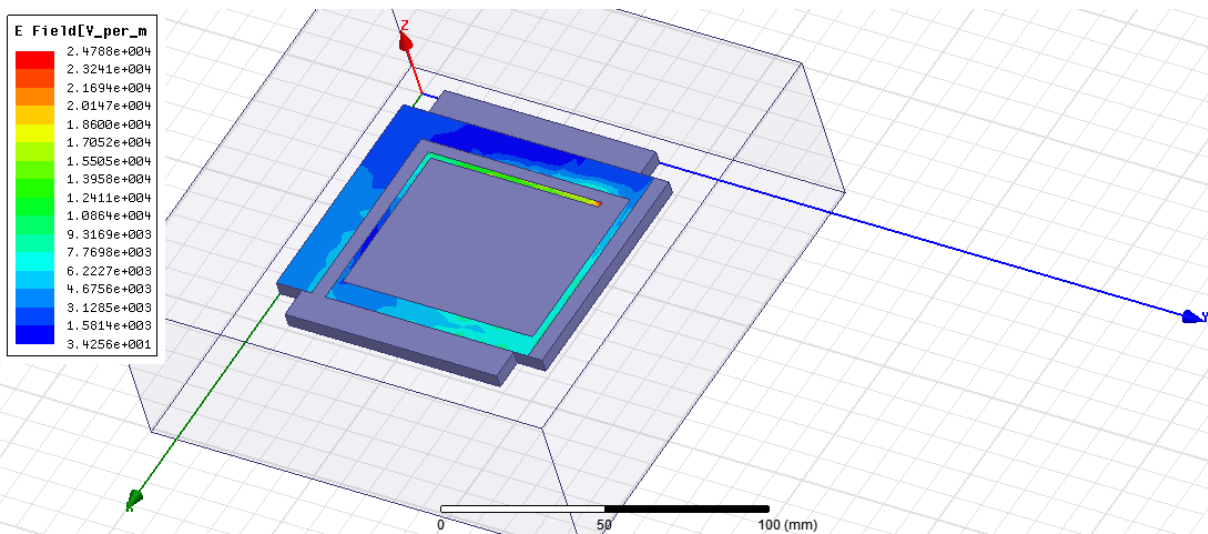
Figura 5.45 – Perda de retorno para modelo 13.



Fonte: Autor

de ganho e perda de retorno são apresentados nas Figuras 5.47 e 5.48. O padrão de irradiação é deslocado para o eixo Z-, com ganho de -1,3 dB e perda de retorno de -3 dB para 440 MHz.

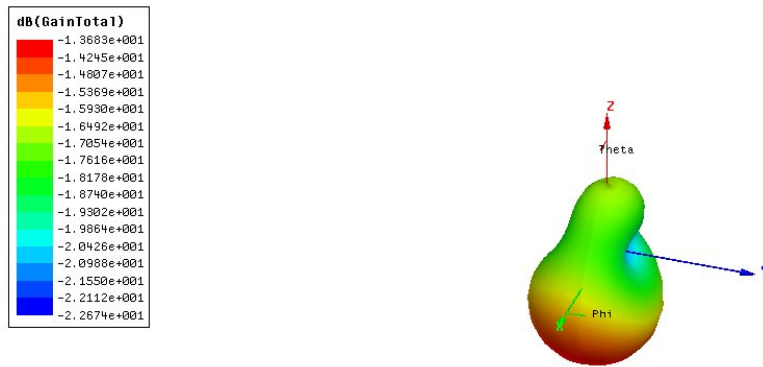
Figura 5.46 – Modelo 14 de antena planar e campo elétrico.



Fonte: Autor

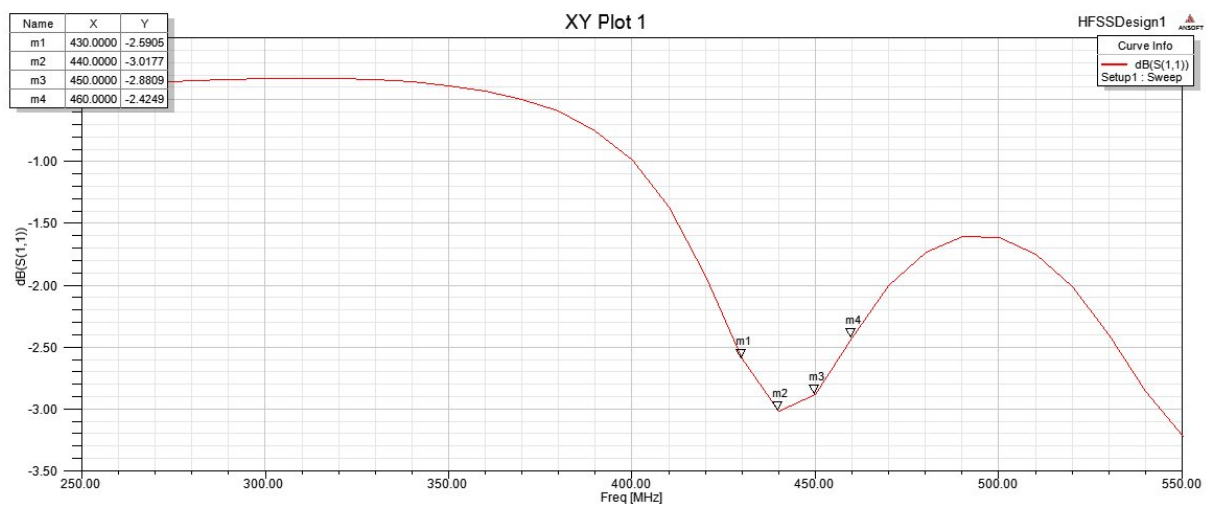
Dos resultados obtidos com a variação de parâmetros das antenas planares pode-se observar que, para antenas planares F, cortes no eixo de alimentação da antena geram alterações no diagrama de irradiação da antena, apontando a diretividade da antena para o eixo X, positivo ou negativo, dependendo da posição do corte. Cortes no eixo transversal, Y, reduzem a perda de retorno e mantêm a diretividade da antena sobre o eixo Z. O principal parâmetro que define a frequência de ressonância das antenas é a área efetiva da mesma. Para melhorias no sistema proposto, alternativas seriam adicionar hastes externas à estrutura do satélite, como apresentado

Figura 5.47 – Ganho para modelo 14.



Fonte: Autor

Figura 5.48 – Perda de retorno para modelo 14.



Fonte: Autor



em Vieira et al. (2016), entretanto, isso não é uma solução desejada neste trabalho e não será considerada.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste último capítulo serão apresentadas as conclusões ao final deste estudo baseadas na análise dos dados em órbita amparadas na revisão de literatura. Posteriormente serão apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

### 6.1 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido propôs uma análise de sistemas de antenas planares para serem considerados como alternativas viáveis de instalação em Cubesats, utilizando os modelos do Programa NANOSATC-BR como base. O sistema proposto tem objetivo de trazer características similares ao atual sistema e apresentar vantagens como atrativos para sua consideração.

Em primeira análise, a parte de características elétricas, uma antena planar nada mais é que uma placa sólida que emite energia em forma de campo elétrico. Essa característica física fornece maior robustez e segurança em comparação com as antenas dipolo atuais dos satélites da série NCBR, tendo em vista que quaisquer dos sistemas propostos dispensa a necessidade de um sistema de abertura e, portanto, dispensa mais de 40 elementos mecânicos (como molas e encaixes). Somado a essa característica física, a massa total do sistema de antenas também é reduzido de 85 gramas para, aproximadamente, 35 gramas (considerando a placa impressa, substrato e parafusos de fixação).

Um dos fatores mais relevantes na análise é a diferença de custo entre os sistemas proposto e atual. Como apresentado no capítulo 4, o custo para aquisição apenas do sistema de antenas dipolo com a empresa ISIS varia de 4.825 a 5.250 euros (dependendo da configuração desejada). O sistema de antenas proposto não leva em sua constituição mais elementos do que um conector para o transmissor, uma camada de substrato e uma trilha condutora, componentes que não somam mais do que 30 reais para produção.

Em consideração aos pontos negativos da proposta, dois são mais relevantes: (I) necessidade de utilização do controle de atitude para manter antenas alinhadas e (II) parâmetros elétricos um pouco inferiores aos atuais. O primeiro ponto leva em conta o padrão de irradiação das antenas propostas que, em sua maioria, são similares às atuais da série NCBR, porém, podem necessitar do sistema de controle de atitude presente nos satélites para melhor confiança do link de comunicação. O segundo ponto, a atenuação aplicada das antenas sobre o sinal, deve ser considerado. Essa atenuação é de cerca de 10%. Esse fator deve ser levado em consideração tendo, como alternativas para correção, o aumento de potência transmitida pelo transmissor ou o aumento da sensibilidade das antenas em solo. Esse estudo deve incluir a carga adicional ao sistema de EPS do satélite e conferir, portanto, sua viabilidade elétrica. O adicional de consumo para transmissão pode ser compensado, nesse caso, com o melhor posicionamento das células

solares do satélite, ocasionado pelo controle de atitude do mesmo.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de complementar e dar continuidade a este estudo, sugere-se as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Avaliação do comportamento dos sistemas propostos sobre o EPS do satélite;
- Otimização, se possível, de um dos 14 modelos apresentados e desenvolvimento do mesmo;
- Testes do sistema desenvolvido com o ME do NCBR1 ou 2 para verificação dos dados;
- Análise do uso prolongado do sistema de controle de atitude e suas influências sobre o satélite;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, T. et al. A solar panel-integrated modified planner inverted f antenna for low earth orbit remote sensing nanosatellite communication system. **Sensors** **2018**, v. 18, n. 8, p. 11, 2018.

BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. 2nd. ed. [S.l.]: Wiley, 1997.

FAPESP. **Um Satélite Brasileiro: Amazônia-i**. FAPESP, 2019. Acessado em 06 jun 2019. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/2016/01/12/um-satelite-brasileiro/>>.

G1. **AESP14 declarado inoperante**. G1, 2015. Acessado em 01 de jun de 2019. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2015/03/nanosatelite-brasileiro-de-r-400-mil-e-declarado-inoperante-apos-falha.html>>.

GAO, S. et al. Advanced antennas for small satellites. **Proceedings of the IEEE**, v. 106, n. 3, p. 13, 2018.

GARZÓN, J. L. T. **Desenvolvimento e Implementação de Antena Planar para Aparelhos Celulares**. 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

Gunters Space Page. **AESP-14**. GSP, 2015. Acessado em 3 jun 2019. Disponível em: <[https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/aesp-14.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/aesp-14.htm)>.

\_\_\_\_\_. **Tancredo 1**. GSP, 2016. Acessado em 3 jun 2019. Disponível em: <[https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/tancredo-1.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/tancredo-1.htm)>.

INNOVATIVE SOLUTIONS IN SPACE. **Antenna Systems**. 1. ed. Delft - NL, 2011. 2 p. Disponível em: <<https://www.isispace.nl/wp-content/uploads/2016/02/ISIS-Antenna-systems-Brochure-v1.pdf>>.

\_\_\_\_\_. **NCBR-1 FSW Technical Overview**: Sis-q12-0602-02. 1. ed. Netherlands, 2012. 12 p. Documento restrito a funcionários da ISIS e membros do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats. Disponível em: <não\_disponível\_online>.

INPE. **Amazonia**: Missão Amazonia 1. INPE, 2019. Acesso em 03 jun 2019. Disponível em: <{[www3.inpe.br/amazonia-1](http://www3.inpe.br/amazonia-1)}>.

\_\_\_\_\_. **NANOSATC-BR**: Home. INPE, 2019. Acessado em 06 jun 2019. Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/nanosat/>>.

INSTITUTO DE INFORMÁTICA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Relatório Técnico**: Avaliação das características multicamada de eventos de neve no sul do Brasil. 1. ed. Porto Alegre, 2015. 7 p. Acesso em 27 ago. 2017.

ISIS. **Operating Manual**: Ground station kit. Delft, NL: ISIS, 2011. v. 1, 49 p.

ITA. **ITASAT-1**. ITA, 2016. Acessado em 3 jun 2019. Disponível em: <<http://www.itasat.ita.br/>>.

KULU, E. **Nanosats Database**. nanosatseu, 2019. Acessado em 3 jun 2019. Disponível em: <<https://www.nanosats.eu/>>.

LOKMAN, A. H. et al. A review of antennas for picosatellite applications. **International Journal of Antennas and Propagation**, v. 2017, n. -, p. 17, 2017.

MANDEEP, J. S.; MUSTAPHA, H. Design and analysis of dipole and monopole antenna for cubesat application. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 6, n. 17, p. 4, 2013.

MILLIGAN, T. A. **Modern Antenna Design**. 2nd. ed. [S.l.]: Wiley, 2005.

NOVAL, J. J. S. et al. Design consideratoins for radiation hardened asic used as technological payload in nanosatc-br1. In: LATIN AMERICAN IAA CUBESAT WORKSHOP, 2., 28 Feb. - 02 Mar., Florianópolis, SC. [S.l.], 2016. Acesso em: 17 nov. 2018.

PAGE, G. S. **ITASAT-1**. GSP, 2018. Acessado em 3 jun 2019. Disponível em: <[https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/itasat-1.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/itasat-1.htm)>.

VIEIRA, J. M. et al. Development of an uhf 2x2 microstrip antenna array for nano-satellites. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 31, n. 1, p. 9, 2016.