

Walter Cardoso de Freitas Júnior

**Projeto de antenas Moxon-Yagi para  
comunicação com satélites de órbita baixa  
(LEO)**

São José - SC

julho/2018



Walter Cardoso de Freitas Júnior

## **Projeto de antenas Moxon-Yagi para comunicação com satélites de órbita baixa (LEO)**

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Campus São José

Engenharia de Telecomunicações

Orientador: Ramon Mayor Martins, MSc.

Coorientador: Rubem Toledo Bergamo, MSc.

São José - SC

julho/2018

Walter Cardoso de Freitas Júnior

Projeto de antenas Moxon-Yagi para comunicação com satélites de órbita baixa (LEO)/ Walter Cardoso de Freitas Júnior. – São José - SC, julho/2018-

72 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Ramon Mayor Martins, MSc.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Campus São José

Engenharia de Telecomunicações, julho/2018.

1. Órbita LEO. 2. Antenas. 3. Comunicação satelital. I. Orientador. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Campus São José. IV. Título



Walter Cardoso de Freitas Júnior

## **Projeto de antenas Moxon-Yagi para comunicação com satélites de órbita baixa (LEO)**

Monografia apresentada à Coordenação de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Trabalho aprovado. São José - SC, 4 de julho de 2018:

---

**Ramon Mayor Martins, MSc.**  
Orientador

---

**Rubem Toledo Bergamo, MSc.**  
Coorientador

---

**Roberto Wanderley da Nóbrega, PhD.**  
Convidado 1

---

**Evanaska Maria Barbosa Nogueira,  
PhD.**  
Convidado 2

São José - SC  
julho/2018



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, que incentivaram os meus estudos e cujo apoio foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também ao meu orientador, cuja ajuda foi inestimável para a conclusão deste trabalho.



*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,  
mas transformai-vos pela renovação da mente,  
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:  
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.  
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*



# Resumo

A comunicação via satélites é essencial nas mais variadas aplicações. Em especial, a órbita LEO (*Low Earth Orbit*) é amplamente usada para comunicações ponto-a-ponto pela altitude reduzida, o que reduz a latência. Para tal, a modelagem correta de uma antena para a comunicação com estes satélites é fundamental. Com este enfoque, o presente trabalho visou especificar, projetar, simular (com o auxílio do *software* MMANA-GAL), construir, analisar e experimentar três tipos de antenas Moxon-Yagi, muito utilizadas para comunicação com satélites LEO. Foram comparadas as antenas na comunicação com o satélite saudita SO-50, em testes divididos por grupos de ângulos de elevação do satélite. Algumas métricas foram usadas, como a potência do sinal recebido e a qualidade percebida do áudio. Notou-se que a antena Moxon-Yagi com menor diretividade teve melhor desempenho em ângulos de elevação menores, enquanto que a MoxonZBZ+, com maior ganho, foi superior em elevações maiores. Os resultados demonstram que o ganho não é o único fator na comunicação com estes satélites, e outros parâmetros, como a diretividade, devem ser observados para um contato bem-sucedido. A facilidade de apontamento das antenas com menor diretividade foi mais importante para comunicação em elevações baixas. Todas as antenas desenvolvidas obtiveram bons resultados e conseguiram contactar radio operadores nas regiões de cobertura do satélite.

**Palavras-chave:** Órbita LEO. Antenas. Comunicação Satelital.





# Abstract

Satellite communication is essential throughout the most varied applications. Notably, the LEO orbit is widely used for point-to-point communications due to its reduced altitude, decreasing latency. For such, the correct modeling of an antenna for communication with these satellites is crucial. This monograph aims to model, with the aid of the software MMANA-GAL, simulate, build, measure and experiment three types of Moxon-Yagi antennas, much used for communication with LEO satellites. The antennas were compared communicating with the SO-50 satellite, in tests dividing them in groups of satellite elevation angles. Some metrics were used, such as received signal power and perceived audio quality. It was noticed that the Moxon-Yagi antenna had the best performance in smaller elevations, while the MoxonZBZ+, with highest gain, performed better in higher elevations. The results indicate that gain is not the only factor when communicating with these satellites, and others parameters must be observed for a successful contact. The ease when pointing with the lowest directivity antennas was more important for communication in lower elevation angles. All of the developed antennas achieved good results, being able to contact radio operators in the satellite coverage regions.

**Keywords:** LEO orbit. Antennas. Satellite Communication.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Especificação de CubeSat 1U . . . . .	26
Figura 2 – Pilha interna de placas de circuitos em um CubeSat 1U . . . . .	26
Figura 3 – Parâmetros orbitais para um satélite em órbita LEO . . . . .	27
Figura 4 – Satélite SO-50 com antena destacada . . . . .	29
Figura 5 – Frequência Ressonante . . . . .	31
Figura 6 – Antena dipolo de meia onda com seu planos de radiação e modelo 3D .	32
Figura 7 – Diagrama linear do perfil de radiação com seus lobos e feixes principais	34
Figura 8 – Polarizações lineares da onda . . . . .	36
Figura 9 – Antena Yagi-Uda com 4 elementos diretores (a) e seu diagrama de radiação (b) . . . . .	38
Figura 10 – Transceptor Portátil Yaesu FT-60R . . . . .	40
Figura 11 – Analisador de impedância Zamin SWR 170 . . . . .	41
Figura 12 – Gerador de funções . . . . .	41
Figura 13 – Analisador de espectro Rohde-Schwartz FSH4 . . . . .	42
Figura 14 – Telas com o horário das passagens do SO-50 e modo de apontamento .	42
Figura 15 – Perdas devido a cintilação e nuvens em 146 MHz e 438 MHz . . . . .	45
Figura 16 – Modelo da Moxon com elementos dobrados . . . . .	47
Figura 17 – Dimensionamento da antena Moxon com Yagi acoplada . . . . .	48
Figura 18 – Dimensionamento da antena MoxonZBZ . . . . .	49
Figura 19 – Dimensionamento da antena MoxonZBZ+ . . . . .	49
Figura 20 – Coordenadas no MMana-Gal para <i>design</i> da Moxon-Yagi . . . . .	50
Figura 21 – Impedância da Moxon-Yagi simulada em 146 MHz . . . . .	50
Figura 22 – SWR x Frequência da Moxon-Yagi simulada na faixa de 146 MHz . . .	51
Figura 23 – Diagrama de irradiação da Moxon-Yagi simulada em 146 MHz . . . . .	51
Figura 24 – Impedância da Moxon-Yagi simulada em 436 MHz . . . . .	51
Figura 25 – SWR x Frequência da Moxon-Yagi simulada na faixa de 436 MHz . . .	52
Figura 26 – Diagrama de irradiação da Moxon-Yagi simulada em 436 MHz . . . . .	52
Figura 27 – Impedância da MoxonZBZ simulada em 436 MHz . . . . .	52
Figura 28 – Impedância da MoxonZBZ+ simulada em 436 MHz . . . . .	53
Figura 29 – SWR x Frequência da MoxonZBZ simulada na faixa de 436 MHz . . .	53
Figura 30 – SWR x Frequência da MoxonZBZ+ simulada na faixa de 436 MHz . . .	53
Figura 31 – Diagrama de irradiação da MoxonZBZ simulada em 436 MHz . . . . .	54
Figura 32 – Diagrama de irradiação da MoxonZBZ+ simulada em 436 MHz . . . . .	54
Figura 33 – Moxon-Yagi construída . . . . .	55
Figura 34 – MoxonZBZ construída . . . . .	56
Figura 35 – MoxonZBZ+ construída . . . . .	56

Figura 36 – Diagrama de Radiação da Moxon-Yagi . . . . .	58
Figura 37 – Diagrama de Radiação da MoxonZBZ . . . . .	58
Figura 38 – Diagrama de Radiação da MoxonZBZ+ . . . . .	58
Figura 39 – Configuração do rádio Yaesu FT-60R . . . . .	63
Figura 40 – Passagem do satélite com as frequências configuradas . . . . .	63

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Características de sistemas de satélite por órbita . . . . .	28
Tabela 2 – Impedância de antenas dipolo e monopolo . . . . .	32
Tabela 3 – Valores típicos de ganhos . . . . .	35
Tabela 4 – Valores de VSWR para diferentes percentuais de potência transmitida . . . . .	36
Tabela 5 – Perdas passivas no receptor do satélite . . . . .	44
Tabela 6 – Perdas passivas no receptor terrestre . . . . .	44
Tabela 7 – Perdas atmosféricas empíricas para frequências abaixo de 2 GHz . . . . .	44
Tabela 8 – Perdas ionosféricas em 146 MHz e 438 MHz . . . . .	45
Tabela 9 – Valores de SWR para as antenas construídas . . . . .	57
Tabela 10 – S-points para frequências acima de 30 MHz . . . . .	62
Tabela 11 – Valores de MOS em testes com repetidoras terrestres . . . . .	62
Tabela 12 – Contatos com o satélite SO-50 . . . . .	64



# Lista de abreviaturas e siglas

<b>LEO</b> órbita baixa terrestre.....	21
<b>GEO</b> órbita geostacionária.....	21
<b>QHA</b> <i>Quadrifilar Helical Antenna</i> .....	21
<b>ESA</b> Agência Espacial Europeia .....	25
<b>IAA</b> Academia Internacional de Astronáutica .....	25
<b>Cal Poly</b> Universidade Estadual Politécnica da Califórnia.....	25
<b>COTS</b> <i>Commercial Off-The-Shelf</i> .....	25
<b>PDU</b> <i>Power Distribution Unit</i> .....	27
<b>OBDH</b> <i>On-Board Data Handling</i> .....	27
<b>HPBW</b> <i>Half Power Beamwidth</i> .....	33
<b>FNBW</b> <i>First-Null Beamwidth</i> .....	34
<b>VSWR</b> <i>Voltage Standing Wave Ratio</i> .....	35
<b>FBR</b> <i>Front-to-back Ratio</i> .....	37
<b>TEC</b> <i>Total Electron Content</i> .....	30

<b>OEM</b> ondas eletromagnéticas.....	30
<b>GISM</b> Global Ionospheric Scintillation Model.....	30
<b>MOS</b> <i>Mean Opinion Score</i> .....	61
<b>ISS</b> Estação Espacial Internacional.....	42
<b>BER</b> <i>Bit Error Rate</i> .....	67



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Nanossatélites (CubeSats)</b>	<b>25</b>
2.1.1	Histórico e Definições	25
2.1.2	Funcionamento	25
2.1.3	Órbita LEO	27
2.1.4	Efeito Doppler	28
2.1.5	Subsistema de Telecomunicações	29
<b>2.2</b>	<b>Teoria de Propagação em Órbita Baixa</b>	<b>29</b>
2.2.1	Efeitos Ionosféricos	30
2.2.2	Rotação de Faraday	30
2.2.3	Cintilação Ionosférica	30
<b>2.3</b>	<b>Funcionamento Básico de Antenas</b>	<b>31</b>
2.3.1	Ressonância da Antena	31
2.3.2	Perfil de Radiação	32
2.3.3	Parâmetros das Antenas	33
2.3.3.1	Impedância de Entrada	33
2.3.3.2	Largura de Feixe	33
2.3.3.3	Diretividade	34
2.3.3.4	Ganho	34
2.3.3.5	VSWR e Energia Refletida	35
2.3.3.6	Polarização	36
2.3.4	Relação Frente-Costas	37
2.3.5	Arranjo Parasita	37
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Aparato Técnico</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Satélite para experimentação (SO-50/Saudisat-1C)</b>	<b>43</b>
3.2.1	Orçamento de Potência	43
3.2.2	Cálculos Assumidos	43
<b>3.3</b>	<b>Antena Elencadas</b>	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>Projeto e Dimensionamento dos Modelos de Antenas Elencadas</b>	<b>48</b>
3.4.1	Moxon-Yagi	48
3.4.2	MoxonZBZ e ZBZ+	49

<b>3.5</b>	<b>Simulações</b> . . . . .	<b>50</b>
3.5.1	Simulação da Moxon-Yagi . . . . .	50
3.5.2	Simulação da antena MoxonZBZ e ZBZ+ . . . . .	52
<b>3.6</b>	<b>Considerações Físicas da Construção das Antenas</b> . . . . .	<b>55</b>
<b>3.7</b>	<b>Medições e Análises</b> . . . . .	<b>57</b>
<b>4</b>	<b>TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> . . . . .	<b>61</b>
4.1	Resultados e análises dos testes de utilização de Repetidoras Terrestres . . . . .	61
4.2	Resultados e análises dos testes de utilização do Satélite SO-50 . . . . .	63
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>69</b>

# 1 Introdução

Atualmente, comunicações satelitais são essenciais no desenvolvimento das mais variadas aplicações. Existem em torno de 4700 satélites orbitando a Terra, sendo que mais de 1700 estão funcionais (UNOOSA, 2018; UNION OF CONCERNED SCIENTISTS, 2018). Dentre estes, mais da metade estão compreendidos na órbita baixa terrestre (LEO). Esta órbita se mostra interessante para comunicações devido a baixa latência e custos reduzidos para lançamento de objetos (AKSOY; DENARDIS, 2007; BANSAL, 2012).

Satélites LEO apresentam vantagens quando os confrontamos com os tradicionais satélites de órbita geostacionária (GEO). Notavelmente, devido à menor distância em relação à superfície terrestre, estes satélites não necessitam transmitir com uma grande potência para terem seus sinais captados (NOGUEIRA, 1998). A perda por propagação também é reduzida e, devido ao seu menor *footprint*<sup>1</sup>, o reuso de frequências é possível (KUMAR, 2015). Entretanto, quanto menor a altitude, maior a velocidade necessária para se manter em órbita, o que restringe sua visibilidade a poucos minutos, além de também limitar a cobertura de cada satélite (ANDREADIS; GIAMBENE, 2002).

Em meio a estes satélites, os nanossatélites, também conhecidos por CubeSats, estão ganhando mercado. A empresa de transporte aeroespacial SpaceX pretende lançar uma vasta constelação de 4425 nanossatélites até 2019 em órbitas baixas para prover um sistema de baixa latência e alta largura de banda, cobrindo todo o globo terrestre com conexões na casa dos gigabits. Empresas como Google e Fidelity Investments estão financiando o projeto (BRODKIN, 2016).

Para a comunicação com estes satélites, a escolha correta da antena para a captação dos sinais é fundamental. Antenas com um alto ganho tendem a ser contraproducentes, pois sua diretividade maior pode dificultar o rastreamento do satélite (CHARTRAND, 2004). Precisa-se observar também o efeito Doppler, que em certos casos pode fazer a frequência recebida variar em dezenas de kHz, obrigando o usuário a realizar os ajustes necessários (FUJIMOTO, 2008; GRANASTEIN, 2012).

Okamoto (2002) comenta que a primeira geração de *handsets* usados para comunicação com a rede de telefones via satélite Iridium<sup>2</sup>, operados na órbita LEO, era produzida com antenas omnidirecionais. Estas antenas recebiam os sinais por visada direta, além dos sinais multipercursos gerados por reflexões e difrações. Em sua segunda geração, um elemento *Quadrifilar Helical Antenna* (QHA) foi adicionado, já que eles têm uma estrutura de radiação superior (FUJIMOTO, 2008).

---

<sup>1</sup> Área de terreno onde o satélite fornece cobertura

<sup>2</sup> <https://www.iridium.com>

Arranjos de várias antenas em fase (*phased array*) para rastreamento de satélites LEO também são sugeridos em alguns artigos (RONDINEAU et al., 2006; INGRAM et al., 2006; KYUN et al., 2002). Porém, estas antenas fazem uso de sofisticados recursos mecânicos para apontamentos automáticos, e sua construção pode chegar na casa dos milhões de reais (RONDINEAU et al., 2006).

Além das aplicações comerciais, no ramo do radioamadorismo é comum a construção de antenas para simples testes de transmissão e recepção dos sinais de satélites presentes na LEO pequena (*little LEO* ou *small LEO*), uma subdivisão da órbita LEO, destinada a satélites de menor porte, custo e capacidade (RICHHARIA, 2014). Em especial, a antena Yagi-Uda e suas variações são muito empregadas por radioamadores para este fim, e alguns projetos são disponibilizados online por *hobbistas* e entusiastas (BRITAIN; ARSATC, 2016). Portanto, antenas terrestres para sistemas *little LEO* tendem a ser Yagis ou helicoidais, devido às frequências frequentemente utilizadas nos nanosatélites LEO e maior facilidade na construção (MARAL; BOSQUET, 2010) .

Partindo desta base, este trabalho visa projetar e testar antenas para a comunicação com o satélite SO-50, presente na órbita LEO. Este satélite foi escolhido devido ao fato de possuir um repetidor de FM livre para uso, facilitando os testes de transmissão e recepção. Serão construídas três antenas distintas para este trabalho: a antena Moxon, a MoxonZBZ e a ZBZ+. As antenas serão especificadas de acordo com as frequências usadas pelo satélite. Cálculos de enlace serão realizados, e então elas serão simuladas com o uso do *software* MMANA-GAL, onde poderá se verificar seu diagrama de radiação, ganho e impedância. Feito isto, as antenas serão construídas e o seu diagrama de radiação real será desenhado, bem como sua impedância medida, a fim de comparar com a simulada. Na sequência, partem-se para os testes em campo, onde será medida a qualidade de recepção e transmissão a partir de reporte dos radio operadores conectados em repetidoras terrestres. Por fim, as antenas serão usadas para contatos no nanosatélite Saudisat-1C (SO-50) elencado para o teste, a fim de traçar comparativos sobre as mesmas.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é projetar antenas para comunicação com um nanosatélite em órbita LEO. Para que seja possível atingir este objetivo, foram definidos objetivos específicos, dentre os quais:

- Estudar e especificar antenas propostas neste trabalho;
- Realizar os cálculos de enlace para comunicação com satélite;
- Simular com o auxílio de *softwares* as antenas a serem construídas;

- Construir as antenas especificadas;
- Comparar antenas de acordo com reportes de radioamadores via repetidoras terrestres e via nanossatélite SO-50;
- Comparar antenas de acordo com algumas métricas, como a potência do sinal recebido e transmitido, e a qualidade de áudio reportada por radioamadores.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Nanossatélites (CubeSats)

A definição de satélites miniaturizados, de acordo com [Sandau \(2006\)](#), apresenta variadas classificações, como da Agência Espacial Europeia ([ESA](#)) e da Academia Internacional de Astronáutica ([IAA](#)), que os define por massa. A definição mais comum aceita é a apresentada pelo estudo do [IAA](#) de satélites de observação da Terra. Nesta divisão, temos os nanossatélites, que abrangem a faixa de 1 a 10 kg. Dentre estes, temos os CubeSats, foco desta seção.

#### 2.1.1 Histórico e Definições

Com o objetivo de criar satélites de baixo custo para exploração aeroespacial com fins educativos e científicos, a Universidade Estadual Politécnica da Califórnia ([Cal Poly](#)), em conjunto com a Universidade de Stanford, desenvolveu um satélite em formato de cubo, com suas faces revestidas em painéis solares ([HEIDT et al., 2000](#)). Estes satélites foram denominados CubeSats.

Um CubeSat padrão tem dimensões de 10x10x10 cm (1U), projetados para fornecerem 1 litro de volume útil, com peso não maior que 1,33 kg. A maioria dos CubeSats possuem dimensões de 1U ou 3U, apesar de vários outros formatos serem fabricados ([KREBS, 2016](#)).

Diversos institutos de pesquisa, universidades e empresas oferecem oportunidades de lançamento de forma regular em grupos de vários CubeSats.

#### 2.1.2 Funcionamento

CubeSats foram criados tendo em vista o uso de itens comerciais, ou componentes *Commercial Off-The-Shelf* ([COTS](#)), diminuindo o custo de projetos e facilitando sua viabilidade. A especificação de um CubeSat 1U pode ser vista na [Figura 1](#).

Na concepção básica do CubeSat, dentro de sua estrutura de cubo, temos uma pilha interna de placas de circuitos, vistas na [Figura 2](#). Nelas, estão presentes os principais subsistemas de um nanossatélite, como os subsistemas de energia, processamento, modulação, RF<sup>1</sup> e experimentos ([MARTINEZ et al., 2000](#)).

---

<sup>1</sup> radiofrequência

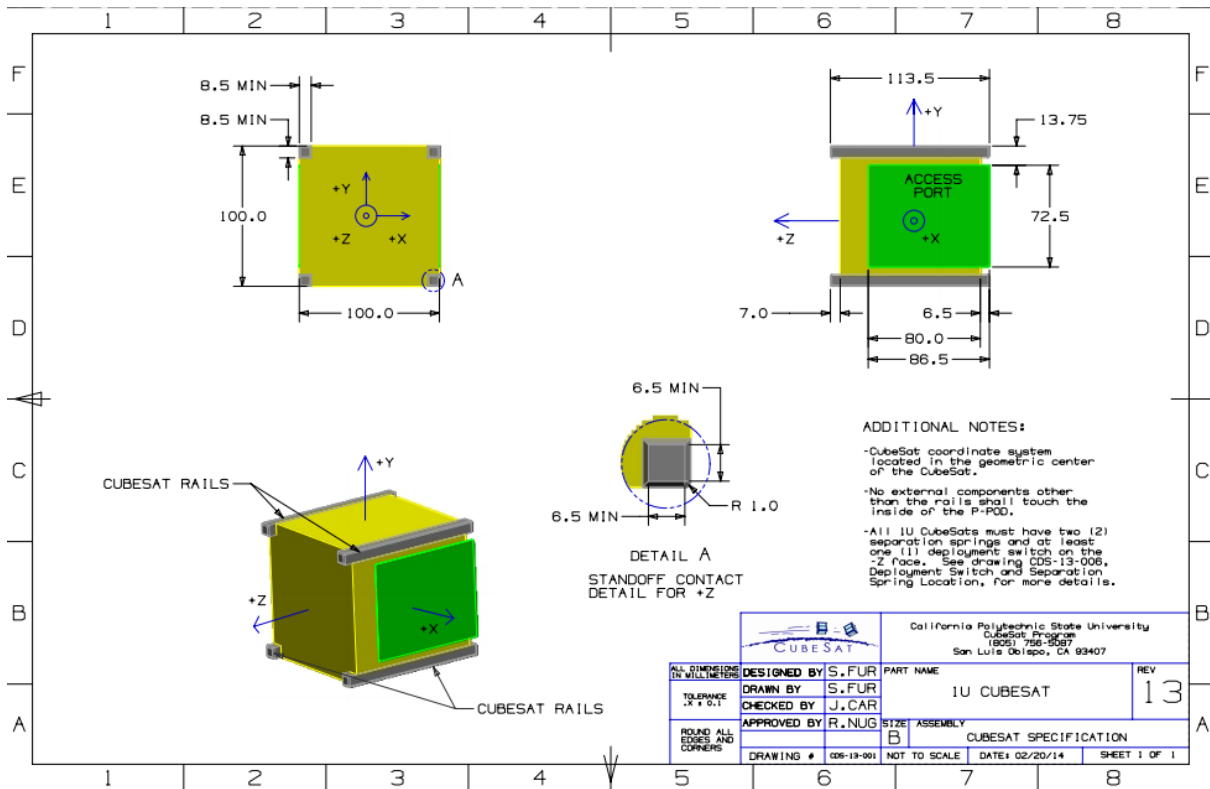


Figura 1 – Especificação de CubeSat 1U (CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY, 2017)

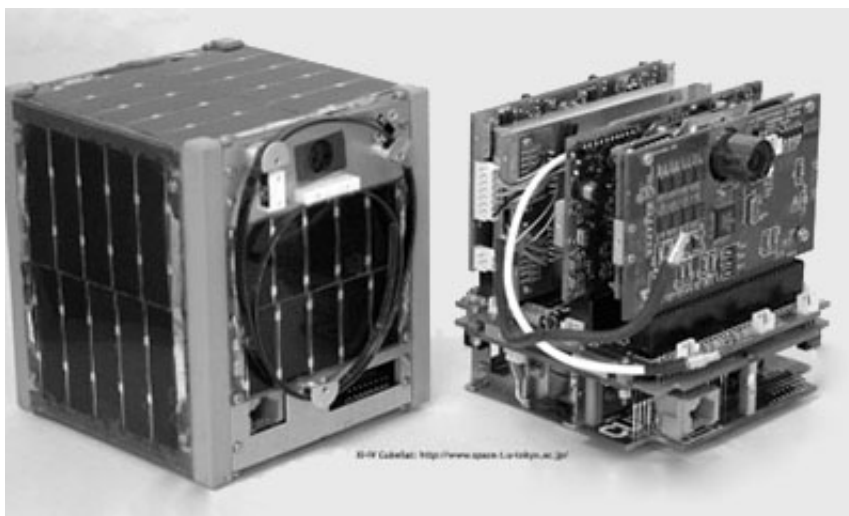


Figura 2 – Pilha interna de placas de circuitos em um CubeSat 1U (ISIS SPACE, 2017)



O subsistema de energia, definido como *Power Distribution Unit* (PDU) ou Unidade de Distribuição de Energia, cuida das células solares e baterias, de modo a distribuir energia suficiente para o satélite.

A unidade de processamento, *On-Board Data Handling* (OBDH), implementa protocolos de comunicação e armazena dados a partir de subsistemas de comunicação, de sensores solares e magnéticos e da PDU.

O subsistema de experimentos varia conforme a missão do nanosatélite. Geralmente, contém sensores magnéticos e solares colocados na face do satélite. Estes sensores comunicam-se com o OBDH através de portas seriais e analógicas, onde conversores analógico-digital processam os dados recebidos (MARTINEZ et al., 2000).

O subsistema de RF e antenas, ou subsistema de telecomunicações, será descrito na seção [subseção 2.1.5](#).

### 2.1.3 Órbita LEO

A maior parte dos CubeSats opera na órbita LEO. A órbita LEO corresponde a faixa de 100 a 2000 km de altitude sobre a superfície terrestre. Devido ao arrasto atmosférico, os satélites geralmente não orbitam abaixo de 300 km. A [Figura 3](#) apresenta a velocidade e o período orbital de um satélite em órbita LEO em relação a sua altura orbital.

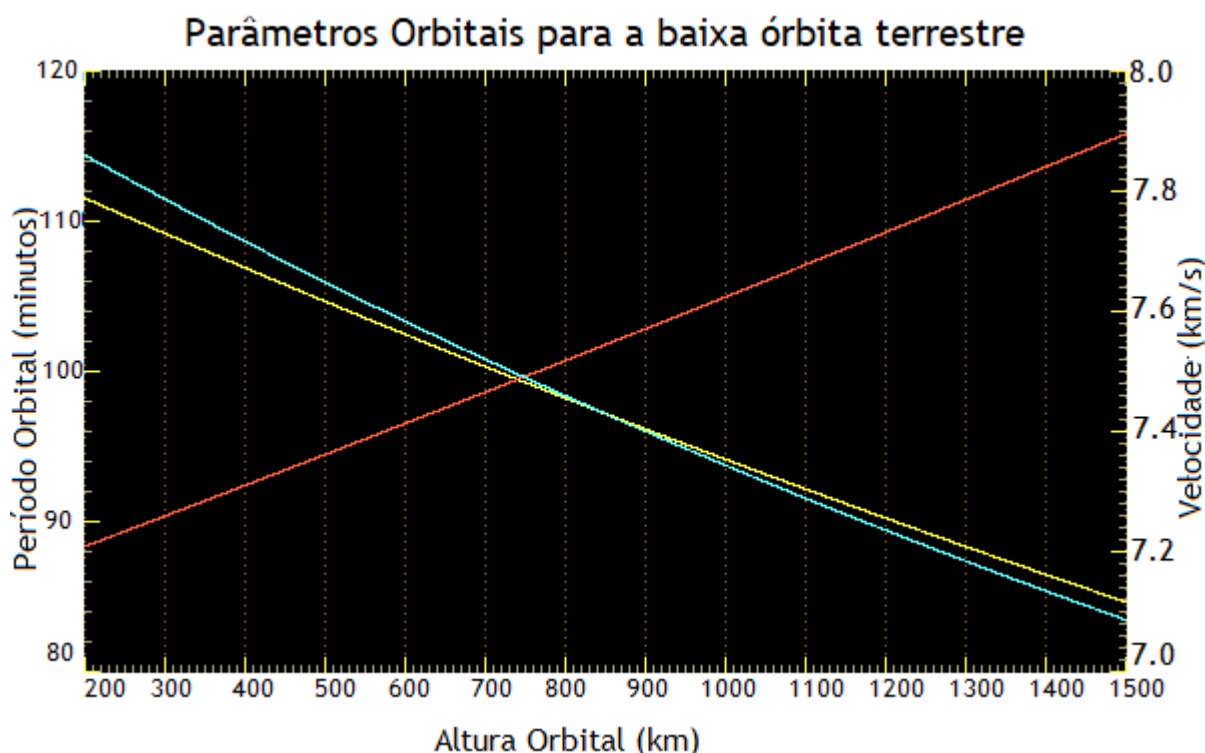


Figura 3 – Parâmetros orbitais para um satélite em órbita LEO (AUSTRALIAN SPACE ACADEMY, 2017)

Tabela 1 – Características de sistemas de satélite por órbita

Característica	LEO	MEO	GEO
Altura do Satélite (km)	100-2000	9000-11000	36000
Período Orbital (hr)	1-2	6-8	24
Atraso de propagação (ms)	10-15	150-250	480-540
Tempo de vida do satélite (anos)	3-7	10-15	10-15
Visibilidade do Satélite	Curta	Média	Permanente
Ângulo de elevação	Médio	Melhor	Bom
Custo do Satélite	Baixo	Médio	Alto
Potência de saída do rádio	Baixa	Média	Alta
Perda de propagação	Baixa	Média	Alta

Adaptado de Godara (2001)

De acordo com a [Tabela 1](#), vemos características de um sistema satelital em órbita [LEO](#) em contraste a outras órbitas.

Em virtude da velocidade necessária para manter órbita, redes [LEO](#) tem uma topologia altamente dinâmica. Isto se deve ao fato dos satélite nesta órbita não conseguirem prover um *link* de comunicação por mais que alguns minutos ([MURI et al., 2011](#)).

#### 2.1.4 Efeito Doppler

É importante se considerar o efeito Doppler em comunicações com nanosatélites em órbita [LEO](#), devido a alta velocidade com a qual os satélites viajam. O efeito Doppler corresponde a uma alteração na frequência da onda percebida por um observador, dependente do movimento relativo entre a fonte emissora e o observador. Este efeito é claramente observado quando ouvimos a sirene de um veículo se aproximando e depois se distanciando de um observador. A frequência percebida é maior (em comparação com a emitida) quando a sirene se aproxima, idêntica no instante de passagem, e menor durante o afastamento da sirene ([CARR; HIPPISEY, 2012](#)).

Quando a velocidade do receptor e do transmissor é pequena em relação a velocidade da onda, o sistema de equações que calcula a frequência percebida com o efeito Doppler é dado por:

$$f = \left(1 + \frac{\Delta v}{c}\right) \times f_0 \quad (2.1)$$

$$\Delta v = v_r - v_s \quad (2.2)$$

onde  $f$  = frequência observada;  $f_0$  = frequência emitida pela fonte;  $\Delta v$  é a velocidade do receptor em relação a fonte (positiva caso a fonte e o transmissor estejam se aproximando e negativa caso estejam se distanciando);  $c$  = velocidade da onda no meio. Como a maioria

dos CubeSats utiliza a faixa de UHF<sup>2</sup> no *downlink* (WEGGELAAR; SPERETTA, 2012), normalmente computa-se uma variação de  $\pm 10$  kHz na recepção. No *uplink*, pela frequência de transmissão ser menor, estando na faixa de VHF<sup>3</sup>, a variação pelo efeito Doppler é desprezível e geralmente ignorada.

### 2.1.5 Subsistema de Telecomunicações

O objetivo principal do subsistema de telecomunicações é modular e demodular sinais, de modo que sejam tratados pela unidade de processamento, possuindo osciladores para converter o sinal em sua frequência final. Para tal, a comunicação com as estações na Terra é fundamental e a escolha da antena é parte importante neste subsistema. Bolton, Doty e Rivera (2015) apresentam um excelente trabalho com diversos projetos de antenas para CubeSats. Todas elas partilham uma característica: são antenas destacáveis, ou antenas desdobráveis. A necessidade delas parte do fato de que, no lançamento das unidades, elas devem estar contidas dentro do satélite, para depois serem destacadas e utilizadas. Muri, Challa e McNair (2010), em seu artigo comparativo de *design* de antenas para CubeSats, observa que a maioria das antenas usadas em CubeSats são dipolos. O satélite SO-50, usado neste trabalho, apresenta uma antena monopolo de quarto de onda para transmissão e recepção. Essa antena pode ser observada na Figura 4.



Figura 4 – Satélite SO-50 com antena destacada

## 2.2 Teoria de Propagação em Órbita Baixa

Existem múltiplas variáveis que afetam a performance de um *link* satelital, o que acarreta uma análise complexa que envolve o meio e os equipamentos de transmissão e recepção. Dentre os fatores do meio, podemos destacar:

- Efeitos Ionosféricos

<sup>2</sup> *Ultra High Frequency*, faixa entre 300MHz e 3GHz

<sup>3</sup> *Very High Frequency*, faixa de frequências entre 30 e 300MHz

- Chuva, nuvens e gases atmosféricos
- Cintilação Ionosférica

Além destes fatores, temos os relativos aos parâmetros da antena, como o ganho, sua polarização, seu padrão de radiação, perda de polarização, ruído térmico, figuras de ruído e temperatura.

A seguir, apresentam-se brevemente alguns parâmetros que norteiam a propagação em órbita baixa.

### 2.2.1 Efeitos Ionosféricos

No caminho percorrido por um sinal até encontrar um satélite em órbita **LEO**, temos a ionosfera, uma zona composta por uma grande quantidade de íons e plasma. Esta zona ocasiona uma série de mudanças nas características das ondas eletromagnéticas (**OEM**), como sua amplitude, fase ou polarização.

A ionosfera é dividida em 3 camadas, D, E e F. Quanto maior a altitude, maior a concentração de elétrons, expressado por seu *Total Electron Content* (**TEC**). Em especial, na camada F, disposta entre 150 e 800 km da superfície, a passagem das ondas altera a velocidade e o caminho da mesma (**ESCOBAR MENDEZ, 2013**).

### 2.2.2 Rotação de Faraday

A ionosfera contribui para a rotação da polarização da onda devido a grande quantidade de elétrons livres presentes nela. Isto se dá em conjunto com o campo magnético da Terra. Pelo fato da densidade de elétrons na ionosfera variar em grande quantidade baseada em efeitos diários e sazonais, este fenômeno é altamente imprevisível e pode ocasionar até rotações completas na polarização de uma onda. Tal efeito tem influência maior em frequências menores e é proporcional ao quadrado do comprimento de onda.

### 2.2.3 Cintilação Ionosférica

A cintilação ionosférica corresponde a irregularidades na densidade de ionização do meio, o que pode causar a rápida variação da amplitude e fase do sinal, por vezes na casa dos 20 dB ou mais. Regiões próximas ao equador magnético e em altas latitudes são mais susceptíveis a cintilação ionosférica. A cintilação também é mais severa em frequências maiores, na casa dos GHz (**ESCOBAR MENDEZ, 2013**). O Global Ionospheric Scintillation Model (**GISM**)<sup>4</sup> é o modelo recomendado pela ITU<sup>5</sup> para prever o índice de cintilação.

<sup>4</sup> Disponível em: <http://www.itu.int/pub/R-REP-P.2097-2007>

<sup>5</sup> *International Telecommunications Union* ou União Internacional de Telecomunicações

## 2.3 Funcionamento Básico de Antenas

O [IEEE \(2014\)](#) define uma antena como "parte de um sistema de transmissão ou recepção que é projetada para irradiar ou receber ondas eletromagnéticas". São estruturas que fazem a transição entre o espaço livre e um meio guiado e vice-versa, ou seja, elementos que realizam a conversão de um sinal elétrico em uma onda eletromagnética. Para que haja radiação eletromagnética, é necessária uma corrente variante no tempo ou uma aceleração (ou desaceleração) de cargas ([BALANIS, 2016](#)). As antenas mais simples, como monopolos e dipolos, são constituídas de materiais metálicos, como hastes e fios.

Para a construção de antenas, geralmente partimos de parâmetros básicos, tais como a frequência de interesse do sinal, seu ganho, perfil de radiação, dentre outros. Indo ao encontro do objetivo deste trabalho, conhecer os parâmetros de uma antena é fundamental para que seja possível compará-las e testá-las. Estes parâmetros baseiam-se em um dos princípios mais importantes das antenas, a reciprocidade. Significa que as propriedades de uma antena como transmissora são idênticas às como receptora. Para que isto se aplique, o meio entre as antenas deve ser linear, passivo e isotrópico, o que geralmente é o caso para sistemas de comunicações ([MAZDA, 1998](#)).

### 2.3.1 Ressonância da Antena

Na física, ressonância é a tendência de um sistema em oscilar com maior amplitude em frequências específicas ([ROSCH, 2015](#)). No caso das antenas, a frequência ressonante é aquela onde a impedância da antena é puramente resistiva. A [Figura 5](#) apresenta o instante onde a impedância converge para a frequência ressonante.

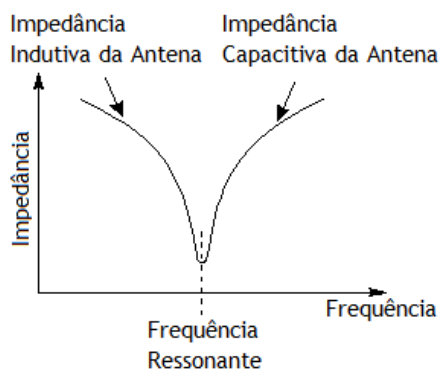


Figura 5 – Frequência Ressonante  
Baseado em [Poole \(2010\)](#)

É desejável operar com este requisito para que seja facilmente feito o casamento de impedâncias com uma linha de transmissão ([CHEN, 2004](#)). A [Tabela 2](#) apresenta a impedância característica de algumas antenas.

Tabela 2 – Impedância de antenas dipolo e monopolo

Tipo de Antena		Resistência de Radiação ( $\Omega$ )
Antenas Dipolo	Dipolo Curto (comprimento = $l$ )	$80\pi^2\left(\frac{l}{\lambda_0^2}\right)$
	Dipolo de meia-onda	73
	Dipolo de meia onda dobrado	292
Antenas Monopolo	Monopolo Curto (comprimento = $l$ )	$160\pi^2\left(\frac{l}{\lambda_0^2}\right)$
	Monopolo de meia-onda	36.5

(CHEN, 2004)

### 2.3.2 Perfil de Radiação

O perfil de radiação, padrão de radiação ou diagrama de radiação de uma antena, conforme definido pelo IEEE, é a "distribuição espacial de uma quantidade de energia que caracteriza o campo eletromagnético gerado por uma antena" (IEEE, 2014). Esta distribuição espacial é representada por uma função matemática ou representação gráfica com o uso de coordenadas espaciais. Na maioria dos casos, o padrão de radiação é determinado pelo campo distante<sup>6</sup> (também conhecido como campo de Fraunhofer). Um padrão conhecido de radiação é apresentado pelo dipolo de meia-onda, na Figura 6. Nesta figura, observamos o perfil tridimensional (b) e em coordenadas polares, contendo os planos azimutal (c) e de elevação (d). Para antenas com polarização linear, tais planos geralmente correspondem ao vetor campo magnético (plano H) e o vetor campo elétrico (plano E).

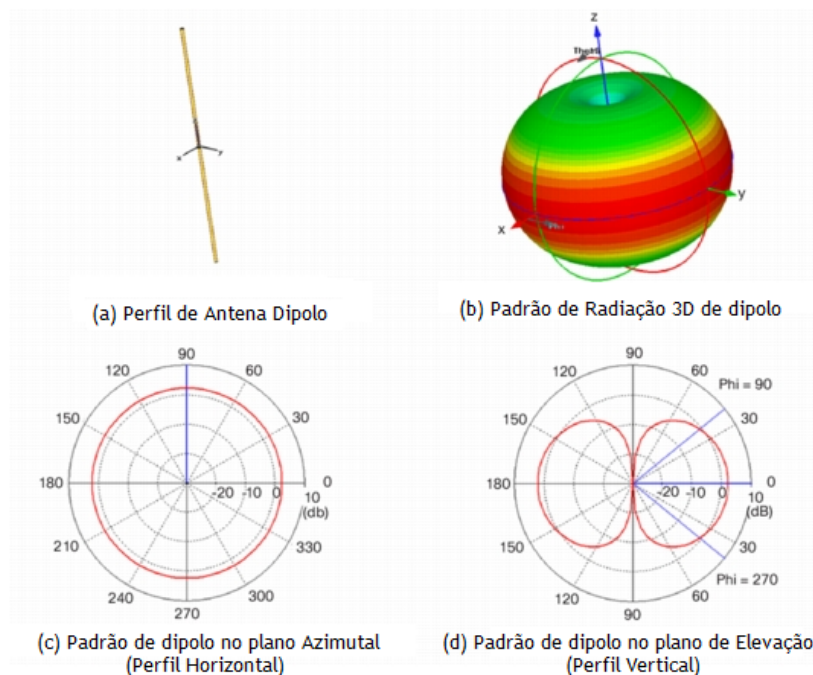


Figura 6 – Antena dipolo de meia onda com seu planos de radiação e modelo 3D (CISCO, 2007)

<sup>6</sup> Região onde o campo elétrico e magnético são perpendiculares

Frequentemente, os valores dos planos de radiação são normalizados em relação ao seu máximo valor. Estes valores também são desenhados em uma escala logarítmica, dada em decibéis (dB). Esta escala é apreciada porque uma escala logarítmica pode acentuar com mais detalhes as partes do perfil que contêm valores muito pequenos. Também é comum localizar os ângulos aonde o perfil alcança metade da potência (-3 dB) relativas ao máximo valor do perfil. Esta abertura angular é conhecida como *Half Power Beamwidth* (HPBW) e será definida com mais detalhes na [subseção 2.3.3.2](#).

### 2.3.3 Parâmetros das Antenas

#### 2.3.3.1 Impedância de Entrada

A impedância de entrada é definida como a impedância presente nos terminais da antena. Geralmente, expressamos a impedância como:

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.3)$$

onde  $R_A$  é a resistência da antena e  $X_A$  é a reatância. A resistência  $R_A$  consiste na soma de duas resistências: a resistência de radiação ( $R_R$ ) e a resistência de perdas ( $R_L$ ). Se considerarmos a impedância equivalente do gerador com a linha de transmissão como  $Z_S = R_S + jX_S$ , então, para que ocorra o casamento correto, temos que:

$$R_A = R_R + R_L = R_S \quad (2.4)$$

$$X_A = -X_S \quad (2.5)$$

Existem várias técnicas para o casamento de impedâncias, como o *Gamma Match*, *Stub* e sintonizadores de antenas, que são utilizadas quando necessárias.

A impedância de entrada de uma antena é geralmente uma função de sua frequência. Além disso, a impedância de entrada de uma antena depende de muitos fatores, incluindo sua geometria, seu método de excitação, e sua proximidade a objetos circundantes.

Pelo fato de existirem variadas geometrias complexas de antenas, somente um número limitado de antenas práticas foram investigadas analiticamente. Para outras, sua impedância de entrada foi determinada experimentalmente (BALANIS, 2016).

#### 2.3.3.2 Largura de Feixe

Um dos principais parâmetros de uma antena é a largura de feixe, definida como a separação angular entre dois pontos idênticos em lados opostos ao máximo valor do perfil (BALANIS, 2016). Existem várias larguras de feixes utilizadas na caracterização de antenas. Uma das mais usadas é a largura de feixe de meia potência, ou HPBW, definida como "em

um perfil de radiação contendo a direção de máximo de um lóbulo, o ângulo entre duas direções onde a intensidade de radiação é metade do valor máximo" (IEEE, 2014). Além desta, temos a largura de feixe dos primeiros nulos ou *First-Null Beamwidth (FNBW)*, correspondendo a separação angular entre os primeiros nulos do perfil. Ambas as larguras de feixe estão ilustradas na Figura 7.

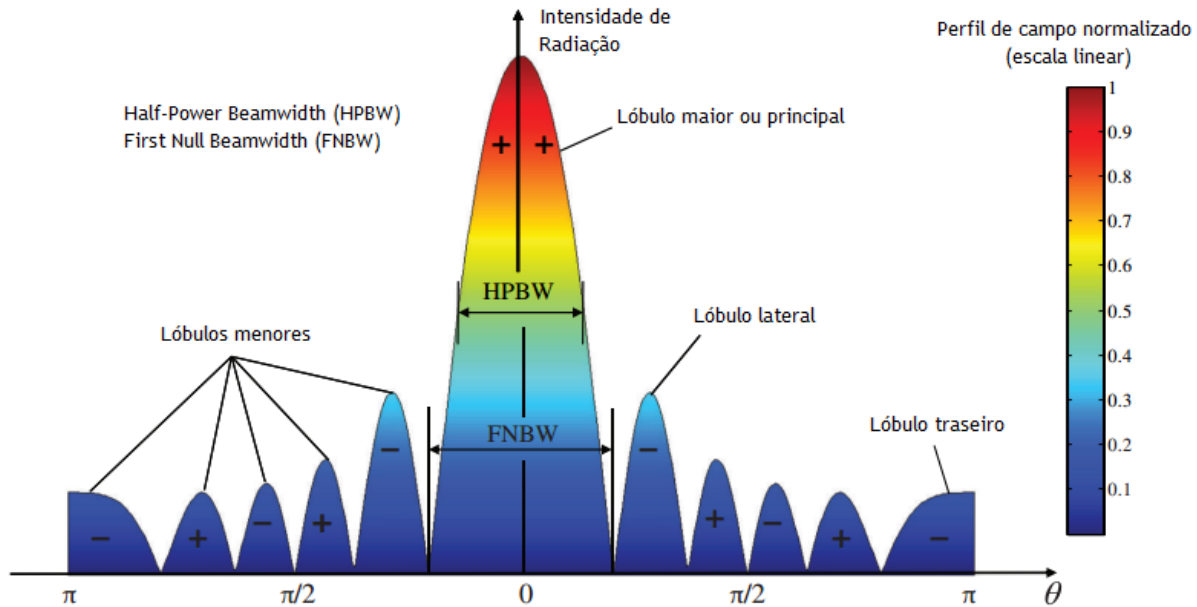


Figura 7 – Diagrama linear do perfil de radiação com seus lobos e feixes principais (BALANIS, 2016)

### 2.3.3.3 Diretividade

Uma importante medida de uma antena é o quanto ela concentra de energia em uma dada direção. Seguindo as definições do IEEE para os termos básicos de antenas, temos que a diretividade corresponde a "razão da intensidade de radiação em uma dada direção sobre a intensidade média de radiação em todas as outras direções". A diretividade pode ser descrita como:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.6)$$

onde  $D$  = Diretividade (adimensional),  $U$  = intensidade de radiação,  $U_0$  = Intensidade de radiação de fonte isotrópica e  $P_{rad}$  = Total de potência irradiada. Nota-se que, para uma fonte isotrópica, a diretividade é unitária, pois  $U$  e  $U_0$  são iguais em todas as direções. Quanto maior o valor de  $D$ , mais diretiva é a antena.

### 2.3.3.4 Ganho

As medidas de diretividade e ganho são intrinsecamente ligadas, e portanto muitas vezes se confundem. Definida pelo IEEE como "a razão da intensidade em uma dada



direção pela intensidade de radiação que seria obtida caso a potência aceita pela antena fosse isotropicamente radiada", o ganho leva em conta a eficiência da antena. O ganho é dado por:

$$G = \eta \times D_{max} \quad (2.7)$$

onde  $G$  = Ganho da antena,  $\eta$  = eficiência da antena e  $D_{max}$  = diretividade máxima da antena.

Quando uma antena apresenta 100% de eficiência, o ganho e a diretividade têm o mesmo valor. A [Tabela 3](#) apresenta alguns ganhos típicos de elementos convencionais de antenas. É importante notar que os valores da tabela podem variar bastante até mesmo em relação a antenas do mesmo tipo, dado que o ganho da antena é dependente de vários fatores, tais como: a largura de banda, a eficiência de condução do dielétrico, dentre outros.

Tabela 3 – Valores típicos de ganhos

Antena	Ganho típico (dB)	Antena	Ganho típico (dB)
Omnidirecional	2 - 12	Horn/Corneta	7 - 18
Dipolo de meia onda	2,15	Painel ( <i>Patch Array</i> )	7 - 22
Patch	5 - 17	Yagi-Uda	5 - 20
Parabólica	12 - 36	Setorial	14 - 20

### 2.3.3.5 VSWR e Energia Refletida

*Voltage Standing Wave Ratio* (**VSWR**), SWR ou ROE (Relação Onda Estacionária) é uma medida que indica a qualidade do casamento de impedâncias em um circuito, dando a noção da energia refletida em uma linha de transmissão. Seus valores encontram-se entre 1 e  $\infty$ , sendo 1 o melhor **VSWR** possível (0% de energia refletida). Valores altos indicam que grande parte do sinal está sendo refletido, e um elemento casador de impedância se faz necessário. Esta medida é muito importante no projeto de antenas, pois uma **VSWR** alta pode resultar numa tensão de ruptura, ocasionando arcos voltaicos ou danificando os amplificadores de saída do circuito ([STUTZMAN; THIELE, 2013](#)). Por exemplo, na [Tabela 4](#), uma **VSWR** de 1.5:1 representa uma transmissão de 96% de potência do sinal. A razão de 1,5:1 provém da caracterização de SWR, definida como a razão entre a máxima amplitude de tensão ou corrente da onda estacionária pela menor amplitude da mesma ([BAKSHI; BAKSHI, 2008](#)). Uma **VSWR** de valor 1,5:1 representa uma máxima amplitude da onda estacionária 1,5 vezes maior que o valor do mínimo da onda estacionária.

Na [Tabela 4](#), ainda é possível observar a perda por retorno ou *return loss*. Trata da perda de energia no sinal refletido devido a uma descontinuidade, o que ocorre no descasamento de impedâncias. Um valor alto significa que há um bom casamento entre a antena e a linha de transmissão.

Tabela 4 – Valores de VSWR para diferentes percentuais de potência transmitida

VSWR	Porcentagem de Potência Refletida $= \left(\frac{VSWR-1}{VSWR+1}\right)^2 \times 100$ $=  \Gamma ^2 \times 100$	Porcentagem de Potência Transmitida $= q \times 100$ $= (1 -  \Gamma ^2) \times 100$	Tensão Máxima na Linha de Transmissão $= (1 +  \Gamma )V_0$	Perda por Retorno $= -20\log( \Gamma )$
1,0	0,0	100,0	1,00 $V_0$	$\infty$ dB
1,1	0,2	99,8	1,09 $V_0$	26,4 dB
1,2	0,8	99,2	1,17 $V_0$	20,9 dB
1,5	4,0	96,0	1,20 $V_0$	14,0 dB
2,0	11,1	88,9	1,33 $V_0$	9,54 dB
3,0	25,0	75,0	1,50 $V_0$	6,02 dB
4,0	36,0	64,0	1,60 $V_0$	4,47 dB
5,0	44,4	55,6	1,67 $V_0$	3,52 dB
5,83	50,0	50,0	1,71 $V_0$	3,01 dB
10,0	66,9	33,1	1,82 $V_0$	1,74 dB

Fonte: Stutzman e Thiele (2013)

### 2.3.3.6 Polarização

A polarização de uma onda eletromagnética é definida pela orientação do vetor campo elétrico de uma onda relativo à direção de propagação da onda (YADAVA, 2011). A polarização inicial é geralmente conhecida pela orientação da antena. Polarizações são classificadas como linear, elíptica e circular. Entre as lineares, uma antena é dita como polarizada horizontalmente, se o seu campo elétrico é paralelo à superfície da terra (Figura 8 (a)). Caso o campo elétrico esteja perpendicular à superfície, temos uma polarização vertical (Figura 8 (b)).

Conhecer a polarização da onda é importante para uma boa captação de um sinal. Por exemplo, em um sistema polarizado linearmente, um desalinhamento na polarização de 45 graus, degradará o sinal em 3 dB, e caso esteja desalinhado por 90 graus, a atenuação pode ser de 20 dB ou mais.

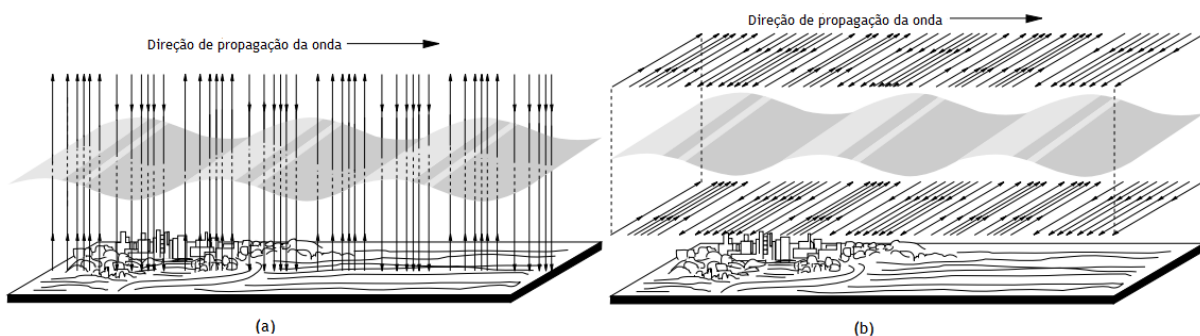


Figura 8 – Polarizações lineares da onda (CARR; HIPPISEY, 2012)

### 2.3.4 Relação Frente-Costas

A relação frente-costas ou *Front-to-back Ratio* (**FBR**) é definida como a razão da maior diretividade de uma antena para sua diretividade em uma direção oposta específica (**IEEE, 2014**). A **FBR** é dependente de alguns fatores, como a frequência de operação, o espaçamento dos elementos e o comprimento de elementos parasitas. Ou seja, quando a frequência de uma antena ou espaçamento de seus elementos muda, a **FBR** também se altera (**BAKSHI; BAKSHI, 2009**).

O ganho de uma antena direcional é inversamente associado ao seu **FBR**. Portanto, um maior valor de **FBR** é obtido ao custo de ganho na antena, já que desviar radiação na direção oposta reduz o ganho da antena (**YADAVA, 2011**). A **FBR** é dada pela fórmula:

$$FBR = 10 \times \log\left(\frac{A}{B}\right) \quad (2.8)$$

onde A é a energia no ponto de maior diretividade da antena e B a energia na direção oposta. Em um sistema com reuso de frequências, a **FBR** é particularmente importante, pois, devido a localização lado-a-lado das antenas, pode ocorrer a interferência e saturação dos sinais adjacentes (**CAMARCHIA; QUAGLIA; PIROLA, 2016**).

### 2.3.5 Arranjo Parasita

Entre os muitos *designs* de antenas, destaca-se a antena Yagi-Uda, amplamente usada para a faixa de HF<sup>7</sup>, VHF e UHF. Este modelo de antena é conhecido por ser de fácil construção, baixo custo e ter bom ganho. Ela faz uso de elementos refletores e diretores, no que é conhecido como arranjo parasita. Chama-se parasita porque somente um elemento é excitado, enquanto os outros são radiadores.

A configuração mais comum tem um elemento refletor, disposto atrás do elemento excitado, com tamanho aproximadamente 5% maior, e vários elementos diretores, por volta de 5% menores. Um arranjo parasita projetado corretamente, com espaçamento de 0.1 a 0.15λ entre elementos e 1 elemento diretor, provê um ganho em torno de 8 dB e uma **FBR** de 20 dB (**YADAVA, 2011**). A **Figura 9** mostra um diagrama de uma antena Yagi com seu perfil de radiação.

Nesta seção, foram elencadas as principais características que diferenciam cada antena, além de parâmetros para garantir sua melhor usabilidade. Muitas vezes dá-se preferência ao ganho em detrimento de outros parâmetros, mas uma boa antena deve ser confeccionada observando a aplicação específica para qual será usada. Em redes sem fio, geralmente cobre-se uma área, e antenas omnidirecionais são comuns. Em comunicações ponto-a-ponto, a diretividade é mais observada, pois não há necessidade de se cobrir uma

<sup>7</sup> *High Frequency*, faixa entre 3 e 30MHz

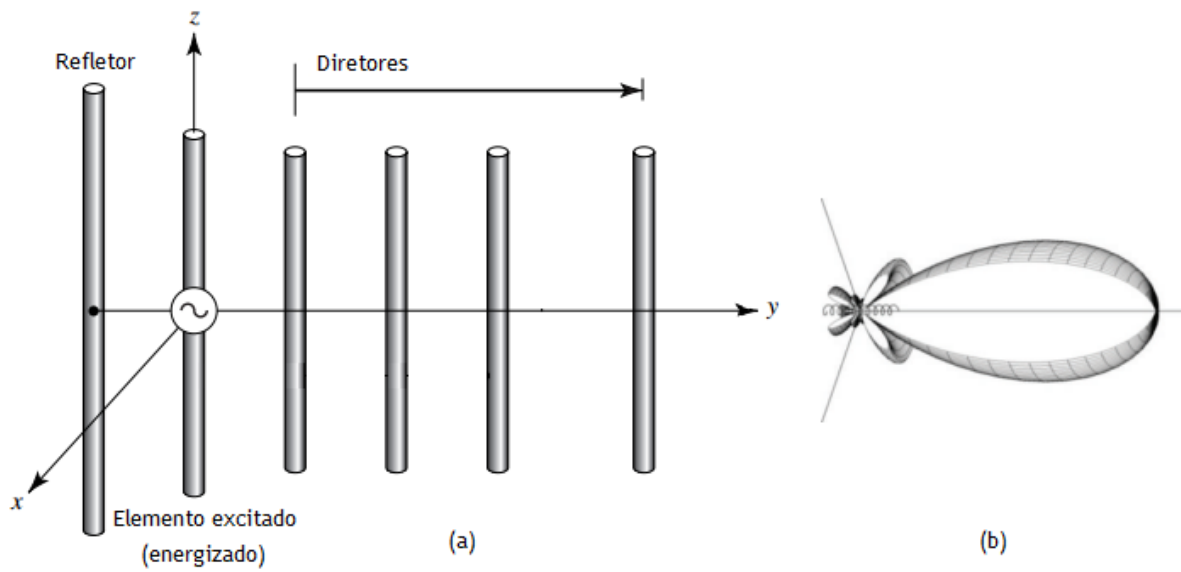


Figura 9 – Antena Yagi-Uda com 4 elementos diretores (a) e seu diagrama de radiação (b) (BALANIS, 2016)

grande área e sim direcionar a energia em um determinado ponto. Para comunicações via satélite, especificamente em órbita LEO, é necessário um bom ganho agregado a uma antena não tão diretiva, pois a captação do sinal de um satélite se movendo rapidamente no horizonte se torna mais difícil com um lóbulo estreito.

## 3 Desenvolvimento

Para realizar os testes em campo, foram especificadas as antenas Moxon-Yagi, MoxonZBZ e MoxonZBZ+, projetadas e simuladas com o uso do *software* MMANA-GAL. As antenas estabelecidas neste trabalho para construção foram escolhidas pela facilidade de construção e pela grande quantidade de projetos disponibilizados na *web* por engenheiros, técnicos, radioamadores e *hobbistas*. A contraprova das antenas utiliza cálculos que serão vistos na seção de cálculos assumidos. Também foram realizadas medições e traçados os perfis de radiação (de forma não ideal, mas aproximada). Na etapa de experimentação, inicialmente, foi feito um experimento em solo utilizando repetidoras terrestres localizadas em Florianópolis. A frequência das repetidoras é muito próxima da usada pelo nanossatélite a ser contactado, servindo como teste inicial. Posteriormente, contactou-se o nanossatélite SO-50, também conhecido por Saudi-OSCAR 50 ou Saudisat 1C. Este nanossatélite foi escolhido por carregar um repetidor de rádio-amador e estar disponível livremente para comunicações, possibilitando os testes.

O projeto está dividido nas seguintes etapas: descrição do aparato técnico, apresentação do satélite e considerações sobre propagação e orçamento de potência em órbita LEO, cálculos assumidos, projetos das antenas especificadas, simulações das antenas no *software* MMANA-GAL, construção das antenas, medição dos parâmetros das antenas e experimentação das mesmas, com testes de campo para comunicação com o satélite.

### 3.1 Aparato Técnico

Foram usados os seguintes equipamentos para a medição e realização dos testes:

- Rádio HT Yaesu FT-60R
- Analisador de impedância Zamin SWR 170
- Gerador de funções Rohde-Schwartz SMB 100A
- Analisador de Espectro Rohde-Schwartz FSH4
- *Software* MMANA-GAL
- *App* ISS Detector

O rádio Yaesu FT-60R tem 5W de potência de saída, faixa de recepção entre 108 e 999 MHz, *dual band*, *offset* automático, teclas programáveis, dentre outras funções. Também possui um modo *split*, que permite que receba em uma frequência e transmita em

outra, sendo capaz de estar em operação nos canais de *uplink* e *downlink* do nanossatélite. Ele foi utilizado em conjunto com as antenas construídas para transmissão e recepção dos sinais. Possui um botão PTT<sup>1</sup> na lateral, que pressionado habilita a transmissão, e solto habilita a recepção. Pode ser visto na [Figura 10](#):



Figura 10 – Transceptor Portátil Yaesu FT-60R

O analisador de impedância é um instrumento de teste que permite a medição do SWR referenciado para 50 ohms de qualquer carga conectada ao conector da antena, para as frequências de 1,9 a 170 MHz. Pode ser visto na [Figura 11](#):

O gerador de funções Rohde-Schwartz SMB 100A é um instrumento compacto que gera sinais para frequências entre 9 kHz e 6 GHz ou 100 kHz a 40 GHz. Foi usado em conjunto com uma antena dipolo para transmitir o sinal que será captado pelas antenas construídas, de modo a desenhar o diagrama de radiação das mesmas (estes passos podem ser vistos na [seção 3.7](#)). A [Figura 12](#) apresenta o equipamento:

O analisador de espectro FSH4 da Rohde-Schwartz é um instrumento de medição usado para realizar uma série de testes e medições em equipamentos como antenas, cabos e sistemas de transmissão em geral. Verifica a potência recebida, demodula sinais, analisa redes celulares, dentre outros. Opera em uma faixa de 9 kHz a 6 GHz. Foi conectado com as antenas construídas para se verificar a potência recebida, possibilitando o desenho do diagrama de radiação após os valores obtidos serem inseridos em uma planilha de dados. Sua tela frontal pode ser vista na [Figura 13](#):

<sup>1</sup> *Push-To-Talk*



Figura 11 – Analisador de impedância Zamin SWR 170



Figura 12 – Gerador de funções

O *software* MMANA-GAL é uma ferramenta de análise e desenvolvimento de antenas baseado no método dos momentos, uma modelagem estatística que estima valores de uma população através de equações de amostras. O programa faz uso da engine MININEC-3 modificada por Alexandre Schewelew, e foi desenvolvido em C++. O aplicativo MMANA-GAL apresenta várias características da antena projetada, além de ter uma ferramenta que permite otimizar a antena por parâmetro específico, como impedância, ganho, ou relação frente-costas.

No *software*, existem duas maneiras de definir a antena a ser modelada. A maneira usada neste projeto será a de inserção das coordenadas da antena na forma de uma tabela. Feita a modelagem das dimensões das antenas no *software*, observa-se seu diagrama de radiação. Parâmetros importantes que definem uma antena, como seu ganho, sua relação frente-costas, seu SWR e sua impedância característica, também são verificados. Para os testes de campo com o satélite SO-50, foi usado o aplicativo *ISS Detector*, disponível para Android. Ele conta com uma interface que apresenta a orientação correta para apontamento (em termos de elevação e azimute) ao satélite dada a localização do usuário, facilitando os



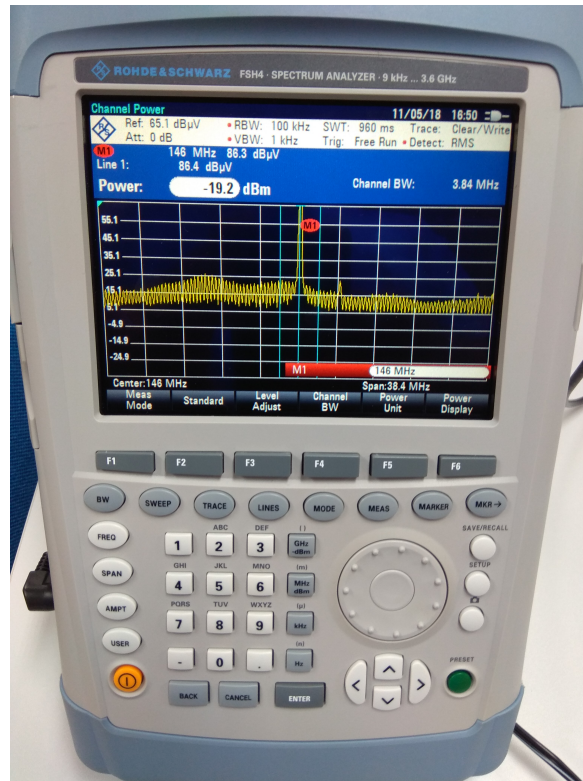


Figura 13 – Analisador de espectro Rohde-Schwartz FSH4

testes de recepção e transmissão. Também é possível verificar em quais horários o satélite estará visível na região. Pela Figura 14 é possível ver telas que mostram o funcionamento do aplicativo. O aplicativo livre possui acesso somente a Estação Espacial Internacional (ISS) e aos satélites Iridium. A versão paga apresenta filtros para selecionar diversos satélites, dentre eles o SO-50.

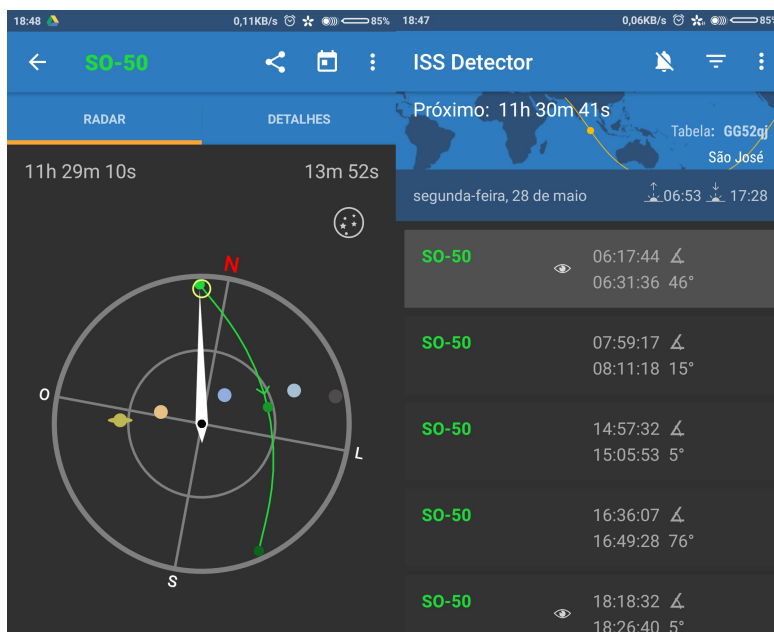


Figura 14 – Telas com o horário das passagens do SO-50 e modo de apontamento  
Elaborado pelo autor



## 3.2 Satélite para experimentação (SO-50/Saudisat-1C)

O SO-50 é um satélite lançado em 2002 pela KACST<sup>2</sup>. Apesar de não se encaixar rigorosamente nas especificações de um CubeSat, por ter peso e dimensões um pouco superiores ao normatizado, geralmente associa-se como tal. Seu *payload*<sup>3</sup> carrega um repetidor NBFM<sup>4</sup> amador que opera na frequência de 145.850 MHz no *uplink* e 436.795 MHz no *downlink*. O repetidor está disponível para amadores no mundo inteiro através de um subtom de 67 Hz no *uplink*, para ativação do repetidor sob demanda.

O repetidor consiste em um receptor VHF com sensibilidade de -124 dBm, tendo uma antena de recepção vertical de um quarto de onda montada no canto superior do satélite. O áudio recebido é filtrado pelos circuitos eletrônicos até alimentar o transmissor UHF de 250 mW. A antena de transmissão UHF também é uma vertical de quarto de onda montada embaixo do satélite e inclinada em 45 graus para dentro (AMSAT-UK, 2013). O satélite pode ser visto na Figura 4.

### 3.2.1 Orçamento de Potência

O orçamento de potência é um cálculo usado para avaliar a potência recebida num *link* de rádio e corresponde ao resumo de todos os ganhos e perdas que afetam um sinal ao longo de seu caminho. Uma equação básica de orçamento é determinada por vários fatores, e depende dos meios pelos quais a onda percorrerá. A equação 3.1 descreve o orçamento por:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - FSL - L_a - L_i - L_{pol} - L_{pt} - L_{ta} - L_{ra} \quad (3.1)$$

onde  $P_r$  = potência recebida;  $P_t$  = potência transmitida;  $G_t$  = ganho de transmissão;  $G_r$  = ganho de recepção;  $FSL$  = perda no espaço livre;  $L_a$  = perdas atmosféricas;  $L_i$  = perdas ionosféricas;  $L_{pol}$  = perdas de polarização;  $L_{pt}$  = perdas de apontamento;  $L_{ta}$  e  $L_{ra}$  = perdas devido ao equipamento transmissor e receptor.

### 3.2.2 Cálculos Assumidos

Para que seja possível estabelecer uma comunicação com o satélite, especificaram-se alguns parâmetros básicos elencados na seção de orçamento de potência. Esta seção se baseia na dissertação de mestrado de ESCOBAR MENDEZ (2013), que descreve os fatores destacados nos cálculos para que seja possível fazer o orçamento de potência. Alguns dos valores foram obtidos empiricamente e através de modelos numéricos, pois dependem de

<sup>2</sup> <https://www.kacst.edu.sa/eng/about/Pages/About.aspx>

<sup>3</sup> Carga útil do satélite, como repetidores, transponders, etc

<sup>4</sup> *Narrowband FM* ou *FM Faixa Estreita*

condições climáticas, sazonais, da quantidade de elétrons presentes no caminho, dentre outros.

Para perdas passivas no receptor e transmissor, ESCOBAR MENDEZ (2013) chegou aos resultados das Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 – Perdas passivas no receptor do satélite

Perdas	VHF (dB)	UHF (dB)
Perda por Descasamento	0,2	1,0
Perda Assumida do Cabo	0,2	0,2
Perda de Inserção	2,0	2,0
Perda de Polarização	0,5	0,5
Perdas Adicionais	3,0	3,0
Total	5,9	6,7

(ESCOBAR MENDEZ, 2013)

Tabela 6 – Perdas passivas no receptor terrestre

Perdas	VHF (dB)	UHF (dB)
Perda de Conexão	2,0	2,0
Perda Assumida do Cabo	2,76	4,98
Perda de Inserção	1,0	1,0
Perda de Polarização	0,5	0,5
Total	6,26	8,48

(ESCOBAR MENDEZ, 2013)

Para o satélite, o total de perdas passivas é de 5,9 dB na faixa de VHF e 6,7 dB na faixa de UHF. Para o receptor terrestre, o total de perdas passivas é de 12,16 dB em VHF e 15,18 dB em UHF.

Em relação às perdas atmosféricas, apresentam-se os seguintes valores para distintas elevações, descritos na Tabela 7:

Tabela 7 – Perdas atmosféricas empíricas para frequências abaixo de 2 GHz

Elevação (graus)	$L_{atm}$ (dB)
0	10,2
2,5	4,6
5	2,1
10	1,1
30	0,4
45	0,3
90	0

(ESCOBAR MENDEZ, 2013)

Para as perdas ionosféricas, a recomendação ITU-R P.618-13 unifica vários modelos e apresenta os seguintes valores, vistos na Tabela 8:

Tabela 8 – Perdas ionosféricas em 146 MHz e 438 MHz

Elevação (graus)	$L_{VHF}$ (dB)	$L_{UHF}$ (dB)
2,12	11,17	15,05
4,12	0,90	1,72
7,98	1,52	1,17
10,13	2,01	0,93
20,14	1,36	1,26
29,68	1,23	0,95
49,70	1,04	1,56
70,87	1,01	1,30
90	1,01	1,30

Em relação às perdas inerentes a cintilação ionosférica e a condições climáticas adversas como nuvens e neblina, a [Figura 15](#) apresenta diversos valores de acordo com a elevação:

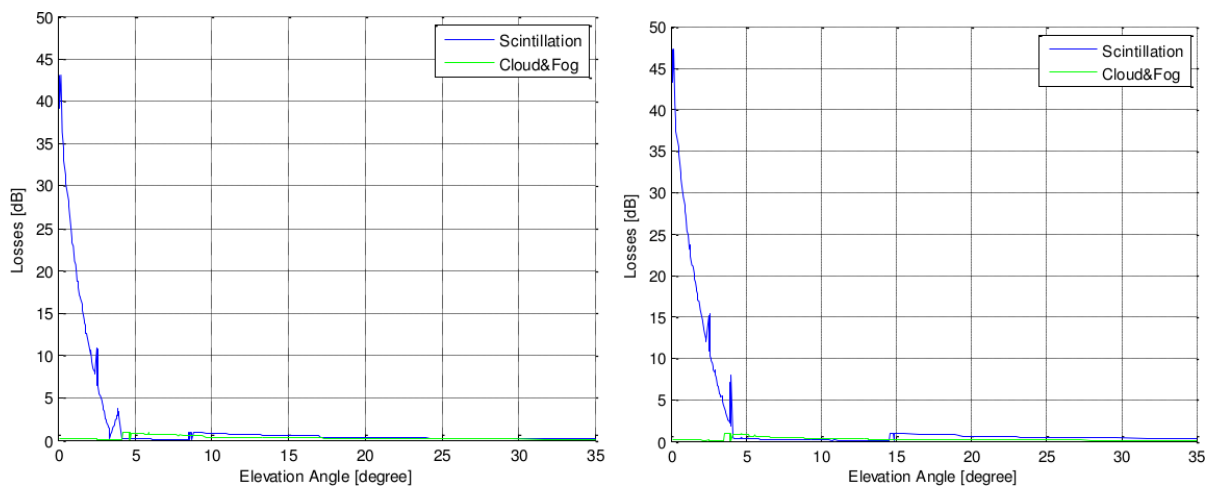


Figura 15 – Perdas devido a cintilação e nuvens em 146 MHz e 438 MHz  
(ESCOBAR MENDEZ, 2013)

Em consonância com as perdas atmosféricas, nota-se que, a partir de 5 graus, elas começam a se tornar desprezíveis. Portanto, decidiu-se neste trabalho calcular o orçamento de potência tendo como base a elevação de 5 graus para o pior caso.

O satélite SO-50 transmite a uma potência de 250 mW (aproximadamente 23,98 dBm), dispondo de uma antena de quarto de onda com ganho de 5,15 dB. Em uma elevação de 5 graus, o satélite está a aproximadamente 2400 km do receptor. Para a frequência de 436,8 MHz no *downlink*, tem-se a perda no espaço livre em 152,85 dB. Nesta elevação, as perdas atmosféricas, ionosféricas, de polarização e apontamento descritas no trabalho de ESCOBAR MENDEZ (2013) são de 2,1, 1,7, 3 e 3,8 dB, respectivamente. O receptor a ser usado para captar o sinal é um HT Yaesu FT-60R, com sensibilidade de -122,9 dBm. Com os dados apresentados, e fazendo uso da [Equação 3.2](#), tem-se que o ganho aproximado necessário pela antena receptora no pior caso é de:

$$G_r = -122,9 - 23,98 - 5,15 + 152,8 + 2,1 + 1,7 + 3 + 3,8 + 6,7 + 8,48 = 26,55 \text{ dB} \quad (3.2)$$

Para conseguir este ganho, necessitaríamos de uma antena Yagi-Uda ou similar com mais de 20 elementos, o que inviabilizaria seu manuseio e recepção (VOLAKIS, 2007).

Calculou-se também o valor do ganho necessário para a antena em uma elevação de 30 graus. Nesta inclinação, o satélite está a aproximadamente 1200 km do receptor. Os valores das perdas foram ajustados de acordo. Pela Equação 3.4, temos o seguinte ganho:

$$G_r = -122,9 - 23,98 - 5,15 + 146,8 + 0,4 + 0,95 + 3 + 3,8 + 6,7 + 8,48 = 18,09 \text{ dB} \quad (3.3)$$

Mesmo ignorando as perdas de apontamento e polarização, ainda sim é um ganho relativamente alto, de 11,29 dB, tornando a recepção complexa.

Em uma situação próxima da ideal, a 70 graus de elevação, o ganho necessário se torna menor e contatos são mais comuns. Pela equação:

$$G_r = -122,9 - 23,98 - 5,15 + 142 + 0 + 1,3 + 3 + 3,8 + 6,7 + 8,48 = 13,25 \text{ dB} \quad (3.4)$$

Note que estes valores acomodam perdas passivas grandes, e o uso de cabos curtos com a correção manual do apontamento tendem a diminuir estas perdas passivas.

Para o caminho inverso, no *uplink*, é usado um transmissor com potência de 5 W (36,99 dBm). O satélite apresenta sensibilidade de -124 dBm. Novamente, recorre-se aos valores encontrados nas tabelas anteriores para calcular o ganho necessário da antena, agora de transmissão. Estes estão descritos na Equação 3.5, para uma elevação de 5 graus:

$$G_t = -124 - 36,99 - 5,15 + 143,3 + 2,1 + 1 + 3 + 3,8 + 6,7 + 8,48 = 2,24 \text{ dB} \quad (3.5)$$

Observamos que, na transmissão, a alta potência em comparação com o nanossatélite faz com que a comunicação para transmissão seja mais trivial do que na recepção.

### 3.3 Antena Elencadas

O primeiro critério no projeto de uma antena é a frequência a ser utilizada. Ela define os parâmetros físicos de uma antena, como o número de elementos, o espaçamento entre elementos, dentre outros aspectos. Para a comunicação com o satélite, é necessário

montar uma antena que receba um sinal na frequência de aproximadamente 436,795 MHz e transmita um sinal na frequência em torno de 145,850 MHz. As antenas a serem montadas são:

- Antena Moxon-Yagi
- Antena MoxonZBZ
- Antena MoxonZBZ+

As três antenas podem ser vistas como um conjunto de dois *designs* de antenas: uma antena Moxon para transmissão e uma Yagi para transmissão. A Moxon foi desenvolvida e descrita por Leslie A. Moxon em seu livro "HF Antennas for All Locations", a partir de uma variação da antena Yagi-Uda. Teve o *design* pensado empiricamente, com o objetivo de diminuir a área ocupada da Yagi.

Seu *design* constituiu em dobrar o elemento energizado e o elemento refletor da Yagi em direção um ao outro, no mesmo plano. Ao invés de ser quadrada, o esboço da antena é visto como retangular, já que o centro dos dois elementos dobrados está espaçado em menos de  $\lambda/4$  para otimizar a performance da antena como arranjo parasita, tendo somente um elemento excitado e outro refletor. Portanto, cada uma das dobras dos elementos deve ter comprimento inferior a  $\lambda/8$  (CARR; HIPPISELY, 2012).

As pontas são separadas por um isolador, criando um espaço que é responsável pelo padrão único de diretividade da Moxon. A Figura 16 apresenta um exemplo de *design* para fins de ilustração de valores para a faixa de 20 metros (15 MHz). O projeto com as frequências do satélite estão na seção seguinte.

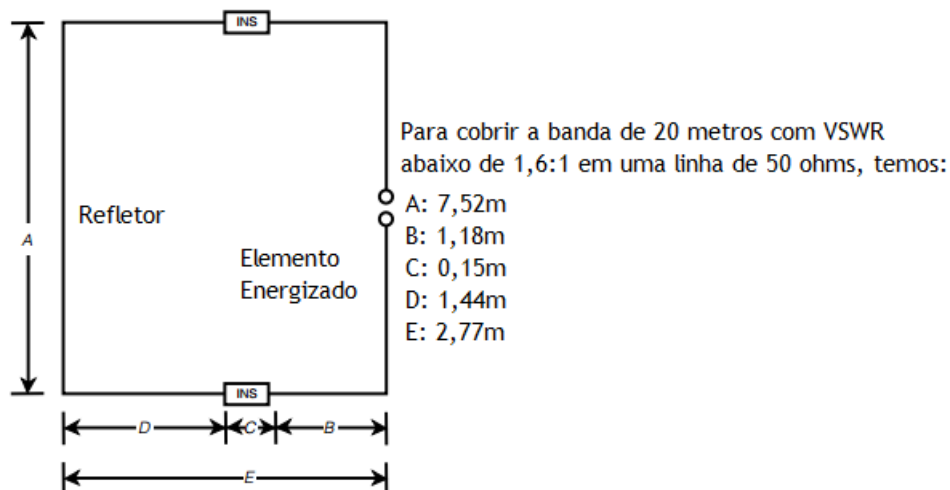


Figura 16 – Modelo da Moxon com elementos dobrados (CARR; HIPPISELY, 2012)

A Moxon neste trabalho é utilizada para transmissão, e a estrutura de recepção é uma Yagi, sendo que seu funcionamento pode ser visto na [subseção 2.3.5](#).

## 3.4 Projeto e Dimensionamento dos Modelos de Antenas Elenca- das

### 3.4.1 Moxon-Yagi

Conforme mencionado na [seção 3.3](#), esta antena pode ser subdividida em duas: Uma Moxon e uma Yagi. Por ser de transmissão, a Moxon deve ser dimensionada para captação na faixa de 2 metros de onda, mais especificamente na frequência de 145,85 MHz.

Para este dimensionamento, recorrem-se às dimensões disponibilizadas pelo radioamador Zilvinas Atkociunas (LY2SS)<sup>5</sup>. Este projeto foi desenvolvido tendo em mente as especificações do satélite SO-50. As dimensões podem ser vistas na [Figura 17](#). Os valores estão em milímetros e os elementos são feitos de alumínio de 3,2 mm de diâmetro.

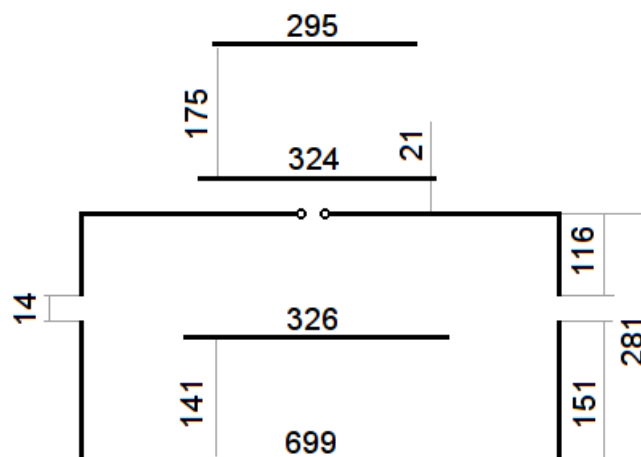


Figura 17 – Dimensionamento da antena Moxon com Yagi acoplada  
(ZURMELY, 2017)

Salienta-se que só é necessário um cabo para esta antena. O dipolo radiador da Yagi é alimentado por indução. O ganho apresentado neste projeto é de aproximadamente 8,65 dBi<sup>6</sup> na faixa UHF.

<sup>5</sup> Disponível em: <https://goo.gl/B6m7wS>

<sup>6</sup> Ganho relativo a um radiador isotrópico

### 3.4.2 MoxonZBZ e ZBZ+

De modo a incrementar o ganho da Moxon original, projetos como a MoxonZBZ<sup>7</sup> foram desenvolvidos, com foco no acréscimo do número de diretores para aumentar o ganho da Yagi e possibilitar uma recepção mais robusta do sinal. O nome ZBZ remete ao seu criador, Roland Zurmely, cujo prefixo é PY4ZBZ. A Figura 18 apresenta o dimensionamento da antena.

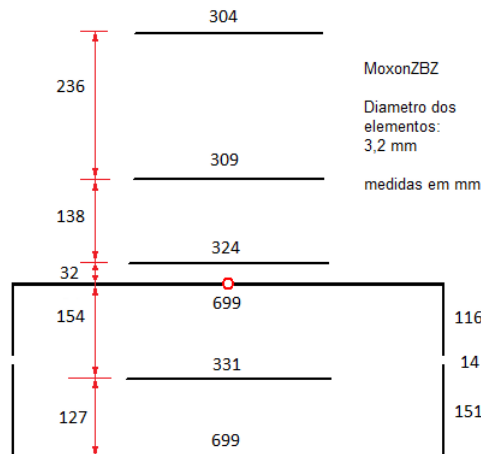


Figura 18 – Dimensionamento da antena MoxonZBZ (ZURMELY, 2017)

Neste projeto, o ganho de recepção sobe para aproximadamente 10,43 dBi, o que em tese possibilita recepções em elevações menores que a Moxon anterior.

É possível observar como o aumento da quantidade de elementos incrementa o ganho da antena. A ZBZ+, retratada na Figura 19, adiciona mais um elemento a ZBZ, introduzindo um ganho em torno de 11,5 dB. A partir de 5 elementos, o aumento no ganho começa a se tornar muito pequeno e o manuseio da antena, complexo.

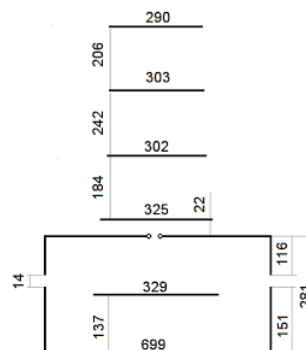


Figura 19 – Dimensionamento da antena MoxonZBZ+ (ZURMELY, 2017)

<sup>7</sup> Disponível em: <http://www.qsl.net/py4zbx/antenas/ms.htm>

## 3.5 Simulações

### 3.5.1 Simulação da Moxon-Yagi

Para a simulação da Moxon-Yagi, os valores observados na [Figura 17](#) foram inseridos no *software* MMANA-GAL em formato de coordenadas. O modo de inserção pode ser visto na figura [Figura 20](#). É necessário incluir qual elemento será alimentado, o que é feito adicionando o valor **w2c** (*wire 2 center*) na seção *Sources*. As [Figura 21](#) a [Figura 26](#) apresentam os diversos parâmetros obtidos após simulação da antena, tais como: sua impedância, diagrama de irradiação (com valores de ganho e **FBR**) e medidas de SWR perante dada faixa de frequência. Os dados estão descritos para as frequências de *downlink* e *uplink*:

No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	0.0	-0.3495	0.0	0.0	0.3495	0.0	1.6	-1
2	0.281	-0.3495	0.0	0.281	0.3495	0.0	1.6	-1
3	0.0	0.3495	0.0	0.151	0.3495	0.0	1.6	-1
4	0.0	-0.3495	0.0	0.151	-0.3495	0.0	1.6	-1
5	0.165	-0.3495	0.0	0.281	-0.3495	0.0	1.6	-1
6	0.165	0.3495	0.0	0.281	0.3495	0.0	1.6	-1
7	0.302	0.162	0.0	0.302	-0.162	0.0	1.6	-1
8	0.141	0.163	0.0	0.141	-0.163	0.0	1.6	-1
9	0.477	0.1475	0.0	0.451	-0.1475	0.0	1.6	-1

Sources 1				Loads 0 (L - uH; C - pF; R/jX - Ohm)				<input checked="" type="checkbox"/> Use loads		
No.	PULSE	Volt. V	Phase dg	No.	PULSE	Type	L/R/A0	C/jX/B0	Q/A1	F/B1
1	w2c	1.0	0.0	next						
next										

Figura 20 – Coordenadas no MMana-Gal para *design* da Moxon-Yagi  
Elaborada pelo autor

F (MHz)	R (Ohm)	jX (Ohm)	SWR 50	Gh dBd	Ga dBi	F/B dB	Elev.	Ground	Add H.	Polar.
146.0	50.5	1.453	1.03	4.0	6.15	13.92	---	Free	---	hori.

Figura 21 – Impedância da Moxon-Yagi simulada em 146 MHz  
Elaborada pelo autor

A [Figura 22](#) nos mostra que a SWR se aproxima de 1 a medida que a frequência se aproxima de 146 MHz, o que desejável para que haja a máxima transferência de energia. Pelas [Figura 23](#) e [Figura 26](#), nota-se que a antena não necessita de casadores de impedância, por ter uma impedância próxima a  $50 \Omega$  (a mesma da linha de transmissão). Pela [Figura 24](#), verifica-se que o ganho da antena na recepção é de 8,8 dBi. Esta medida de ganho está muito abaixo do calculado na [subseção 3.2.2](#), mesmo para elevações próximas da ideal. Isto nos levou a construção de antenas com melhor ganho na recepção.



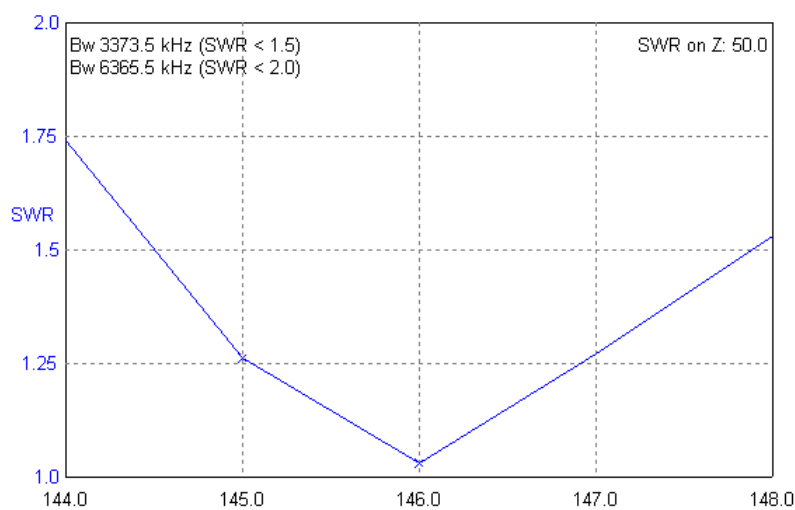


Figura 22 – SWR x Frequência da Moxon-Yagi simulada na faixa de 146 MHz  
Elaborada pelo autor

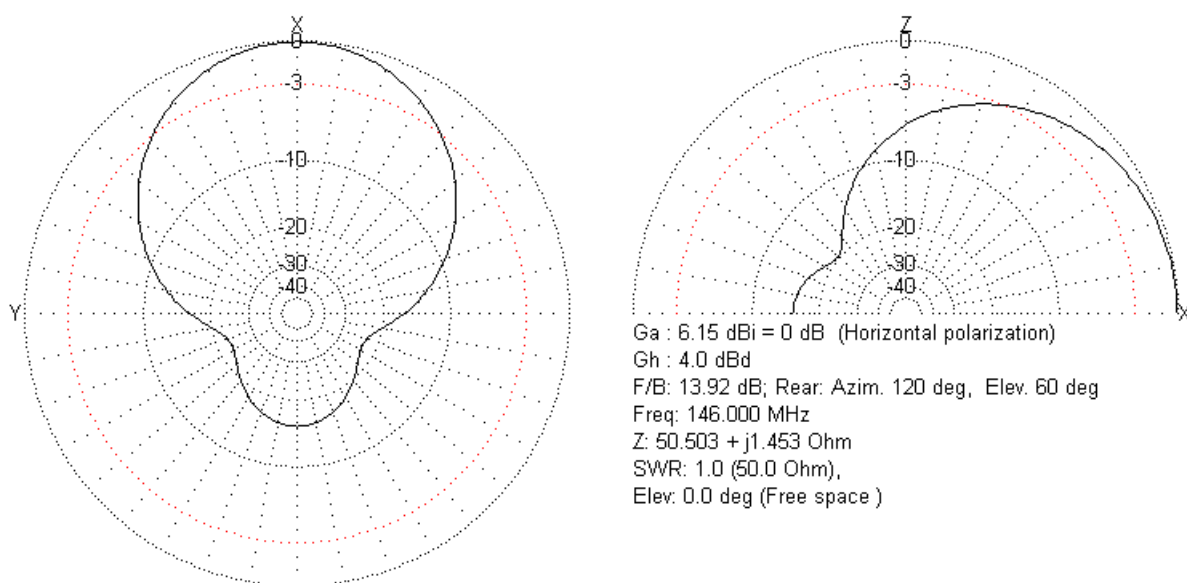


Figura 23 – Diagrama de irradiação da Moxon-Yagi simulada em 146 MHz  
Elaborada pelo autor

No.	F (MHz)	R (Ohm)	jX (Ohm)	SWR 50	Gh dBd	Ga dBi	F/B dB	Elev.	Ground	Add H.	Polar.
	436.0	51.19	2.358	1.05	6.65	8.8	13.07	---	Free	---	hori.

Figura 24 – Impedância da Moxon-Yagi simulada em 436 MHz  
Elaborada pelo autor

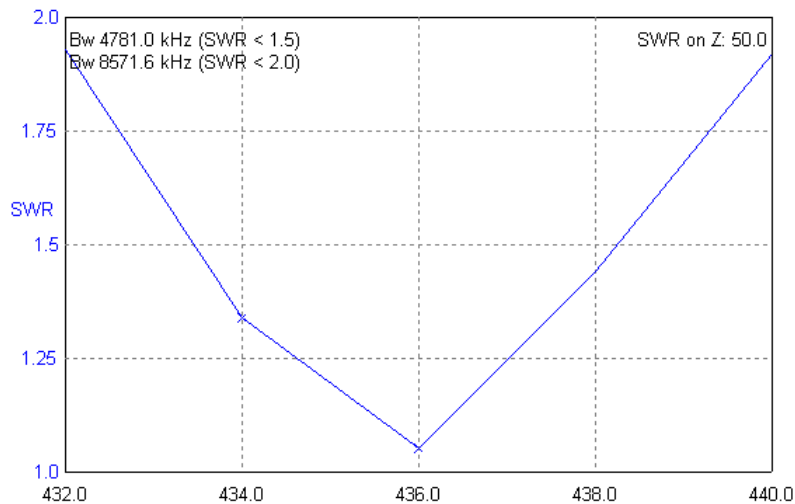


Figura 25 – SWR x Frequência da Moxon-Yagi simulada na faixa de 436 MHz  
Elaborada pelo autor

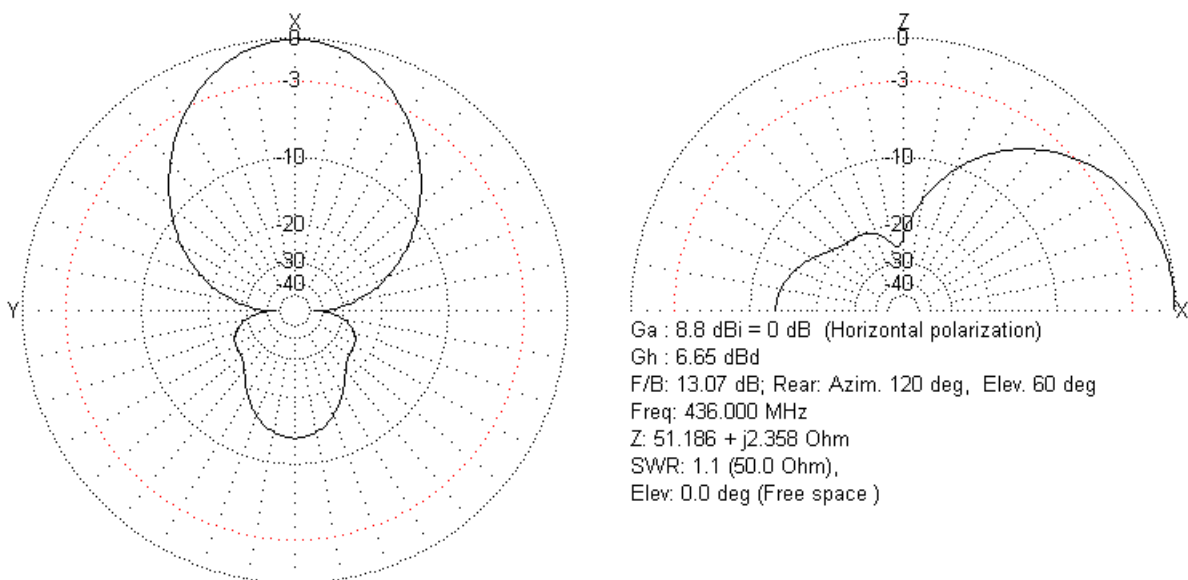


Figura 26 – Diagrama de irradiação da Moxon-Yagi simulada em 436 MHz  
Elaborada pelo autor

### 3.5.2 Simulação da antena MoxonZBZ e ZBZ+

Com os dimensionamentos colocados na [Figura 18](#) e [Figura 19](#), são simuladas as antenas MoxonZBZ e ZBZ+. Como os parâmetros de recepção são mais críticos que os parâmetros de transmissão, e também pelo fato destes serem muito similares à Moxon original, optou-se por inserir somente as imagens relativas à recepção. Estas podem ser vistas da [Figura 27](#) a [Figura 32](#):

No.	F (MHz)	R (Ohm)	jX (Ohm)	SWR 50	Gh dBd	Ga dBi	F/B dB	Elev.	Ground	Add H.	Polar.
1	436.0	49.09	-4.736	1.1	8.28	10.43	9.71	---	Free	---	hori.

Figura 27 – Impedância da MoxonZBZ simulada em 436 MHz  
Elaborada pelo autor

No.	F (MHz)	R (Ohm)	$jX$ (Ohm)	SWR 50	Gh dBd	Ga dBi	F/B dB	Elev.	Ground	Add H.	Polar.
5	436.0	50.68	-2.752	1.06	9.2	11.35	20.29	---	Free	---	hori.

Figura 28 – Impedância da MoxonZBZ+ simulada em 436 MHz  
Elaborada pelo autor

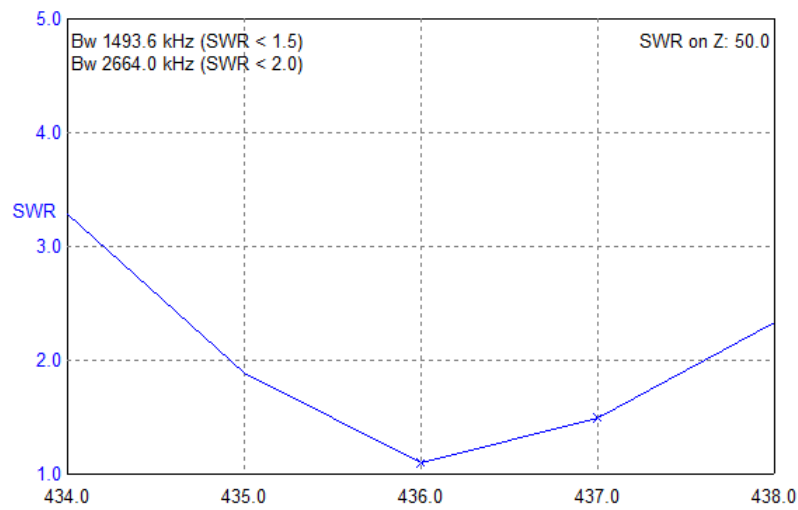


Figura 29 – SWR x Frequência da MoxonZBZ simulada na faixa de 436 MHz  
Elaborada pelo autor

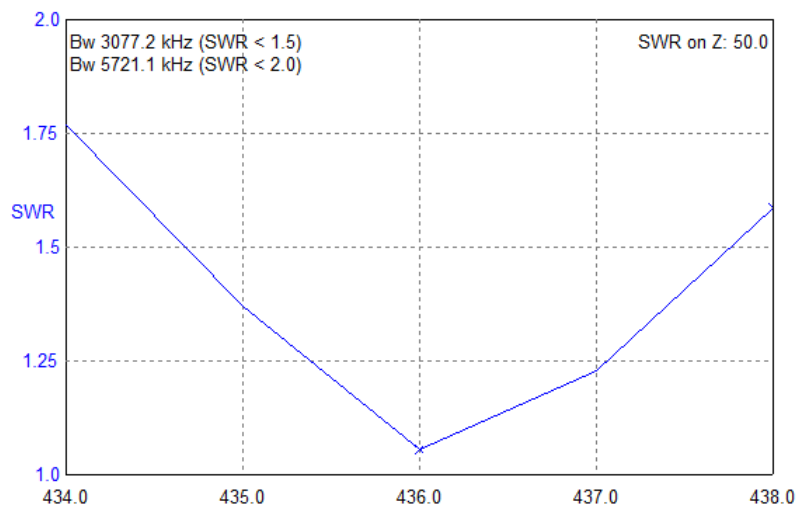


Figura 30 – SWR x Frequência da MoxonZBZ+ simulada na faixa de 436 MHz  
Elaborada pelo autor

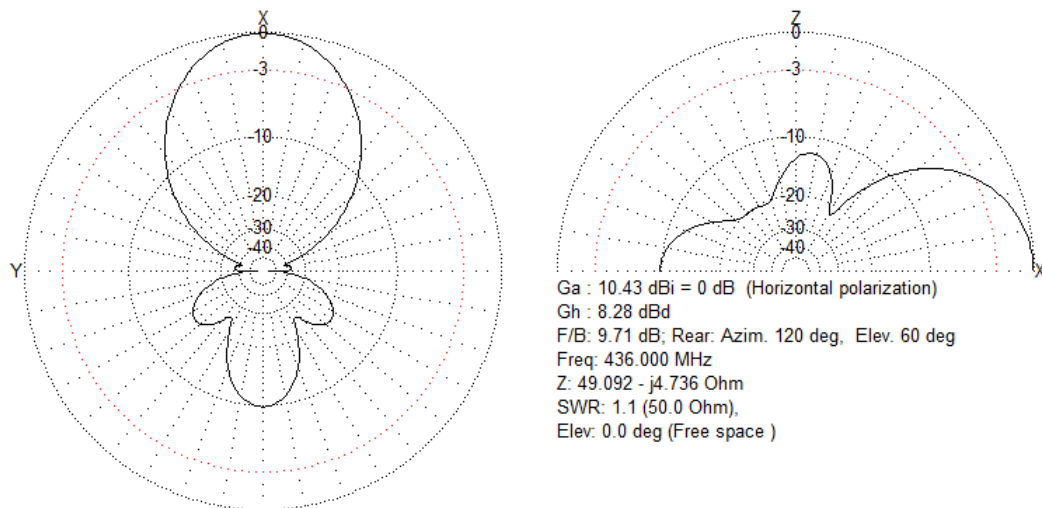


Figura 31 – Diagrama de irradiação da MoxonZBZ simulada em 436 MHz  
Elaborada pelo autor

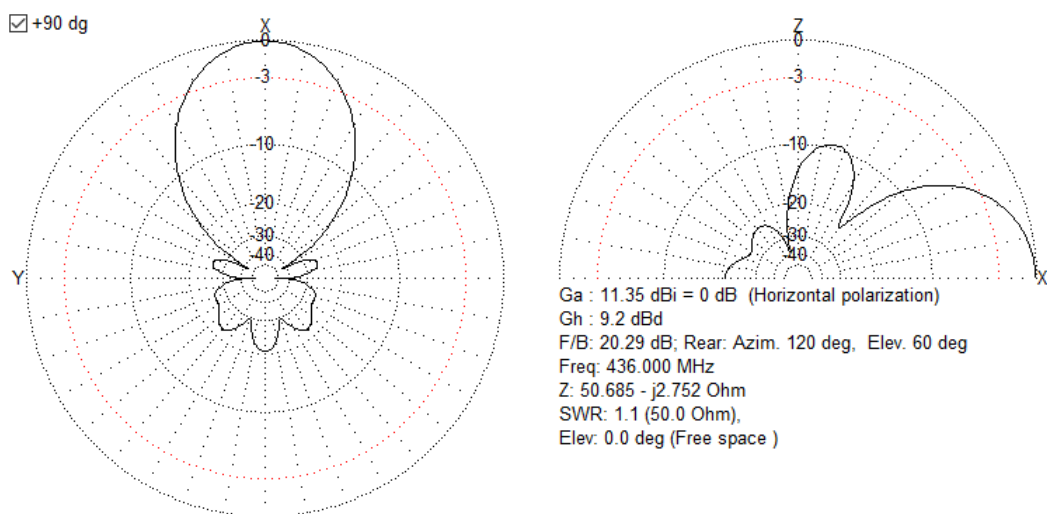


Figura 32 – Diagrama de irradiação da MoxonZBZ+ simulada em 436 MHz  
Elaborada pelo autor

Cabem algumas considerações entre a MoxonZBZ e ZBZ+ em relação a Moxon-Yagi. Por exemplo, ao se aumentar a quantidade de diretores da antena, a sua banda começa a estreitar e o ajuste fino do melhor SWR torna-se mais difícil. A Moxon original é mais tolerante à desvios de frequência. Ressalta-se também que este aumento faz com que surjam mais lóbulos secundários/laterais. O aumento de ganho entre a Moxon-Yagi e a MoxonZBZ é de 1,63 dB (de 8,8 para 10,43), mas o aumento entre a ZBZ e a ZBZ+ é menor do que 1 dB.

## 3.6 Considerações Físicas da Construção das Antenas

Após simulação das antenas, a próxima etapa foi a construção física das mesmas, seguindo as dimensões obtidas no *software*. Para a elaboração das antenas, os materiais usados foram os seguintes:

- Canos de PVC de tamanhos variáveis, servindo como *boom*
- Tubos de alumínio ocos<sup>8</sup> para elementos diretores, refletores e o irradiante
- Cabo coaxial RG-58 (50 ohms)
- Cola quente/Durepoxi e fita isolante para firmamento do alumínio no cano

Foram feitos cortes em todos os elementos que compõem os dipolos de acordo com as dimensões projetadas. Após os cortes, foram demarcada no *boom* as posições dos dipolos e elementos parasitas, de acordo com o espaçamento previsto.

Com a fixação dos dipolos no *boom*, conecta-se o cabo coaxial nos elementos excitados de cada antena. As figuras [Figura 33](#), [Figura 34](#) e [Figura 35](#) apresentam as antenas construídas.

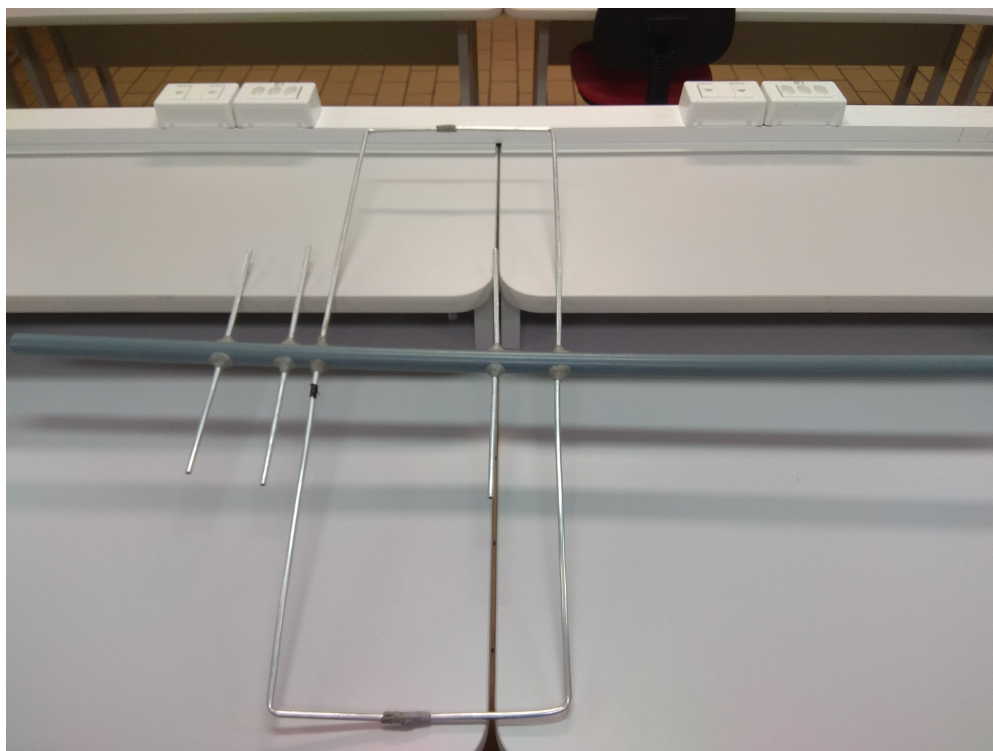


Figura 33 – Moxon-Yagi construída  
Elaborada pelo autor

<sup>8</sup> Favorece efeito pelicular (efeito *skin*), que leva a corrente a fluir na superfície do condutor



Figura 34 – MoxonZBZ construída  
Elaborada pelo autor



Figura 35 – MoxonZBZ+ construída  
Elaborada pelo autor



Terminada a construção das antenas, partiu-se para a verificação do SWR relativo a uma determinada faixa de frequências. Estas medições serão detalhadas na seção 3.7.

### 3.7 Medições e Análises

Com a antena construída, verificam-se suas características, como SWR, impedância e diagrama de irradiação. Para a medição do SWR, foi utilizado o analisador de impedância Zamin SWR 170, já descrito na seção 3.1. O cabo coaxial é conectado no aparelho e é possível medir o SWR para diversos valores de frequência. Devido às especificações do aparelho, somente foi possível medir a antena na faixa de VHF.

Para as antenas Moxon-Yagi, MoxonZBZ e ZBZ+, chegaram-se aos seguintes valores de SWR, descrito nas tabela 9:

Tabela 9 – Valores de SWR para as antenas construídas

Moxon-Yagi	MoxonZBZ	MoxonZBZ+	Frequência (MHz)
SWR	SWR	SWR	
1,8	3	1,8	144,0
1,8	3	1,8	144,5
1,6	3	1,8	145,0
1,6	3	1,6	145,5
1,6	3	1,7	146,0
1,6	3	1,7	146,5
1,6	3	1,7	147,0
1,6	2,8	1,7	147,5
1,7	2,8	1,7	148,0
1,7	2,8	1,6	148,5
1,8	2,8	1,6	149,0
1,8	2,5	1,6	149,5
1,8	2,5	1,6	150,0

As antenas Moxon-Yagi e MoxonZBZ+ apresentaram um bom SWR. Os valores de SWR para a MoxonZBZ foram relativamente altos, e os mesmos podem ser corrigidos com a aplicação de um *gamma match* ou acoplador de antena.

Para o desenho do diagrama de radiação, foi utilizado um rotor com passo configurado em 30 graus, uma antena dipolo, um gerador de funções e um analisador de espectro. Primeiramente, fixou-se a antena no rotor de modo que fosse possível deslocá-la em 30 graus sempre que acionada.

Utilizou-se o gerador de funções SMB 100A, o qual foi conectado na antena dipolo meia onda em polarização horizontal, projetado para a frequência de 146 MHz. A partir dele, são geradas ondas nesta frequência, para que a antena dipolo possa irradiá-las e

serem detectadas pelas antenas construídas. As antenas construídas são conectadas ao analisador de espectro FSH4, que verifica a potência, em dBm, de recepção das antenas.

As antenas são posicionadas de frente a antena transmissora, na mesma altura. Inicialmente, a antena é rotacionada a cada 30 graus e os valores de potência indicados no analisador são registrados. Este procedimento é repetido até completar-se 360 graus. Os resultados obtidos e o diagrama de radiação podem ser vistos nas figuras 36, 37 e 38.

**Diagrama de Radiação - Moxon-Yagi**

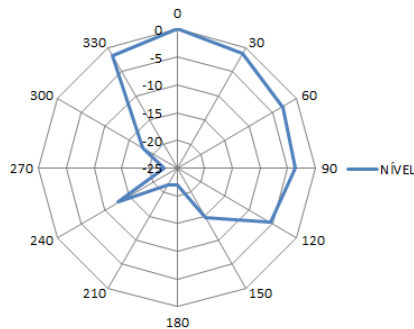


Figura 36 – Diagrama de Radiação da Moxon-Yagi  
Elaborada pelo autor

**Diagrama de Radiação - MoxonZBZ**

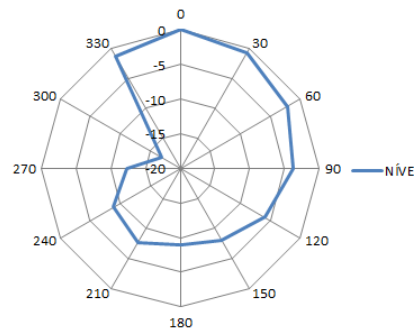


Figura 37 – Diagrama de Radiação da MoxonZBZ  
Elaborada pelo autor

**Diagrama de Radiação - MoxonZBZ+**

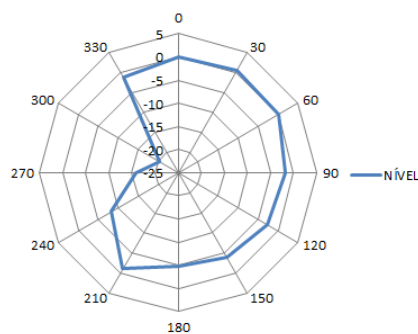


Figura 38 – Diagrama de Radiação da MoxonZBZ+  
Elaborada pelo autor



Salienta-se que, idealmente, o diagrama de radiação deve ser realizado em um ambiente projetado para reduzir reflexões e interferências, como uma câmara anecóica. Como não foi possível a alocação de um ambiente deste tipo, este diagrama foi realizado em uma sala comum, o que torna as medições imprecisas. Apesar disto, é possível observar como há uma certa direcionalidade no caso da Moxon-Yagi.

A deformação dos diagramas está relacionada às reflexões sofridas na sala, decorrentes da quantidade de paredes e dispositivos metálicos no ambiente. Por fim, o nível de sinal foi normalizado em 0 graus, por isso alguns valores estão acima de 0 dBm.



## 4 Testes e Resultados Experimentais

Neste capítulo serão apresentados os testes e resultados dos experimentos realizados com as antenas projetadas. Para realizar o envio e recepção dos sinais de rádio, em todos os experimentos foi utilizado um transceptor portátil Yaesu HT-60 FM de banda dupla (VHF e UHF) com modo *split*, ou seja, com transmissão em uma frequência e recepção em outra.

### 4.1 Resultados e análises dos testes de utilização de Repetidoras Terrestres

Com as antenas construídas, os testes iniciais se focaram nas repetidoras terrestres em Florianópolis. As frequências ds repetidoras são muito parecidas com as do *uplink* no satélite. Portanto, os testes visam validar a construção das mesmas e verificar que estão aptas para receber e transmitir sinais nas frequências estabelecidas pelo satélite SO-50.

Três repetidoras foram utilizadas. Das repetidoras escolhidas, duas encontram-se no Morro das Almas e uma no Morro da Cruz, na região central de Florianópolis. A repetidora 1 é registrada com o indicativo<sup>1</sup> PP5URP, tem uma frequência de recepção de 434,100 MHz e frequência de transmissão de 439,100 MHz, com potência de saída de 30W e subtom de 88,5 Hz para ativação da repetidora. A repetidora 2 tem o indicativo PP5CAP, com frequência de recepção e transmissão em 144,750 MHz e 145,350 MHz, respectivamente. A potência de saída é 4W e o subtom de ativação, 88,5 Hz. Por fim, a repetidora 3 apresenta indicativo PP5FNS, com frequência de recepção em 146.270 MHz e transmissão em 146.870 MHz, potência de saída em 5W e subtom para ativação em 88,5 Hz.

Foram usadas duas métricas para estes testes. Contactam-se as repetidoras, e com a ajuda de radioamadores, avaliações da qualidade de áudio são recebidas de acordo com o *Mean Opinion Score* (**MOS**). O MOS é uma medida numérica subjetiva, julgada por humanos, sobre a qualidade de um evento ou experiência. O **MOS** é amplamente usado em comunicações para se medir a qualidade de áudio ou vídeo recebida. Sua escala vai de 1 a 5, com 1 sendo a pior avaliação, e 5 a melhor.

Além do **MOS**, foi utilizado o *S-meter* (*Signal Strength Meter*) como comparativo entre os sinais recebidos. O *S-meter* é um instrumento presente na maioria dos receptores de rádio que mede a potência do sinal recebido de acordo com uma unidade especial, os *S-points*. Os *S-points* são comumente usados em reportes de radioamadores. Vão de S1 a

<sup>1</sup> Código registrado pela ANATEL que identifica estações

S9, sendo que cada *S-point* define uma mudança de 6 dB na potência do sinal. Ou seja, cada vez que a tensão cai pela metade (-6 dB), a potência do sinal diminui em um ponto. Para se descrever sinais mais fortes que S9, usam-se passos de 10 dB. Por exemplo, a notação S9+20 indica 20 dB acima do S9.

Existem dois valores de referência para os *S-points*: Para frequência acima de 30 MHz, o S9 é definido como uma tensão de 50  $\mu\text{V}$  sobre 50  $\Omega$  no receptor; para frequências abaixo de 30 MHz, o S9 é definido como uma tensão de 5  $\mu\text{V}$  sobre 50  $\Omega$  no receptor. A tabela 10 apresenta os valores:

Tabela 10 – S-points para frequências acima de 30 MHz

S-points	Intensidade Relativa	Tensão Recebida		Potência Recebida $Z_c = 50 \text{ ohm}$	
S1	-48 dB	20 nV	-34 dBuV	7,9 aW	-141 dBm
S2	-42 dB	40 nV	-28 dBuV	32 aW	-135 dBm
S3	-36 dB	79 nV	-22 dBuV	130 aW	-129 dBm
S4	-30 dB	160 nV	-16 dBuV	500 aW	-123 dBm
S5	-24 dB	320 nV	-10 dBuV	2,0 fW	-117 dBm
S6	-18 dB	630 nV	-4 dBuV	7,9 fW	-111 dBm
S7	-12 dB	1,3 $\mu\text{V}$	2 dBuV	32 fW	-105 dBm
S8	-6 dB	2,5 $\mu\text{V}$	8 dBuV	130 fW	-99 dBm
S9	0 dB	5,0 $\mu\text{V}$	14 dBuV	500 fW	-93 dBm
S9+10	10 dB	16 $\mu\text{V}$	24 dBuV	5,0 pW	-83 dBm
S9+20	20 dB	50 $\mu\text{V}$	34 dBuV	50 pW	-73 dBm

Todas as antenas foram testadas com as 3 repetidoras. Com a resposta de radioamadores, os seguintes valores de MOS foram obtidos:

Tabela 11 – Valores de MOS em testes com repetidoras terrestres

Repetidora	Antena	MOS (Tx)	MOS (Rx)	S-Signal recebido da operadora
1	Moxon-Yagi	5	5	S5
2	Moxon-Yagi	5	5	S5
3	Moxon-Yagi	5	5	S9
1	MoxonZBZ	5	5	S5
2	MoxonZBZ	5	5	S5
3	MoxonZBZ	5	5	S5
1	MoxonZBZ+	5	5	S9
2	MoxonZBZ+	5	5	S9
3	MoxonZBZ+	5	5	S9

Estes testes validam a construção física das antenas. Todas elas contactaram com sucesso a repetidora terrestre e a qualidade de áudio recebida foi considerada ótima pelos radioamadores. Porém, nem todas receberam o sinal na mesma potência. Somente a MoxonZBZ+ recebeu um sinal S9 de todas as repetidoras terrestres, o que vai de encontro com as simulações sobre o ganho das antenas.

## 4.2 Resultados e análises dos testes de utilização do Satélite SO-50

A cada passagem do satélite, temos uma visibilidade (ou seja, cobertura de *footprint*) de em média 10 minutos. Neste tempo, o rádio tem que atualizar a frequência em razão do efeito *Doppler*, explicado na [subseção 2.1.4](#). O rádio HT foi pré-configurado com saltos de 5 Hz. Ativa-se o satélite com um subtom PL<sup>2</sup> de 74,4 Hz, e após isto, usa-se um subtom de 67 Hz para a repetidora. A [Figura 39](#) mostra a configuração:

CH	TX VHF	CTCS	RX UHF	CTCS
01	145.850	67.0	436.805	-----
02	145.850	67.0	436.800	-----
03	145.850	67.0	436.795	-----
04	145.850	67.0	436.790	-----
05	145.850	67.0	436.785	-----
06	145.850	74.4	Ativar o Satélite	

Figura 39 – Configuração do rádio Yaesu FT-60R  
(ARSATC, 2016)

Para tratar o efeito *doppler*, começa-se escutando o satélite 10 kHz acima da frequência central. A medida que o satélite se aproxima, diminui-se a frequência em passos de 5 kHz, de modo a melhorar a recepção. No final da passagem, a frequência deve terminar a 10 kHz abaixo da frequência central da passagem. A [Figura 40](#) exemplifica uma conexão:

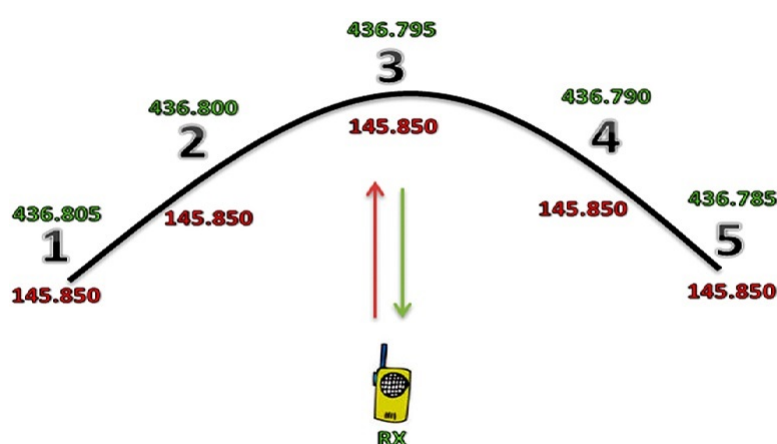


Figura 40 – Passagem do satélite com as frequências configuradas  
(ARSATC, 2016)

Os testes foram feitos com as antenas construídas e separados em grupos comparativos. Os resultados podem ser vistos na [tabela 12](#):

<sup>2</sup> Private Line

Tabela 12 – Contatos com o satélite SO-50

Data da Passagem	Hora da Passagem	Ângulo de Elevação	Qualidade de Audio (MOS) T_x	Qualidade de Audio (MOS) R_x	S-Signal Recebido	S-Signal Transmitido	Antena Utilizada	Grupo de Teste
22/04/18	16:23	86	3	3	S3	S3	Moxon-Yagi	80
23/04/18	13:49	34	3	3	S3	S2	Moxon-Yagi	30
24/04/18	15:26	54	5	5	S9	S5	MoxonZBZ+	60
25/04/18	15:50	53	3	3	S5	S5	MoxonZBZ	50
27/04/18	15:09	61	5	5	S9	S9	MoxonZBZ	60
28/04/18	13:54	21	1	1	S3	S2	MoxonZBZ+	20
28/04/18	15:34	49	3	3	S3	S5	MoxonZBZ+	50
29/04/18	14:14	52	3	3	S5	S5	Moxon-Yagi	50
30/04/18	14:44	42	3	3	S5	S3	MoxonZBZ	40
01/05/18	13:29	45	3	3	S5	S5	Moxon-Yagi	40
02/05/18	13:54	61	5	5	S9	S5	Moxon-Yagi	60
02/05/18	15:33	40	3	3	S5	S5	MoxonZBZ+	40
03/05/18	12:39	23	3	3	S2	S2	MoxonZBZ	20
03/05/18	14:15	26	3	3	S2	S2	Moxon-Yagi	20
09/05/18	11:42	80	5	5	S3	S3	MoxonZBZ	80
10/05/18	12:07	36	2	2	S3	S2	MoxonZBZ	30
10/05/18	20:45	27	2	2	S3	S3	MoxonZBZ+	30
11/05/18	21:10	82	5	5	S9	S9	MoxonZBZ+	80

Antes de comentar os resultados individuais apresentados na tabela 12, é possível verificar que, contatos em elevações tão baixas quanto 21° foram possíveis, apesar da seção dos cálculos assumidos demandar altos ganhos para baixas elevações. Muito disto se deve ao fato de que correções manuais de apontamento diminuem em muito as perdas passivas, viabilizando os contatos.

A fim de comparar o desempenho das antenas nos diversos cenários de contatos, foram realizados 18 contatos com o nanossatélite. Estes foram divididos em 6 grupos, de acordo com o ângulo de elevação. Como se pode observar na Tabela 12, cada antena foi testada em cada grupo, de modo que as comparações pudessem ser feitas para elevações similares. Deste modo, chegaram-se aos grupos de elevação de 20, 30, 40, 50, 60 e 80 graus. O *S-Signal* transmitido e a qualidade de áudio foi obtida com reportes de radioamadores.

A antena MoxonZBZ+ foi a que obteve os melhores resultados gerais de recepção dos *S-Signals*, devido ao ganho superior da antena. Nos grupos 20, 30, 40 e 80, o sinal recebido foi superior ou igual às outras antenas. Porém, esta diferença na recepção dos sinais não foi tão evidente. Os *S-Signals* transmitidos foram iguais ou inferiores aos recebidos, dado que a antena de transmissão tem ganho inferior. Para a qualidade de áudio reportada pelos radioamadores, somente no grupo de teste 80, houve uma clara diferenciação entre as outras antenas. No caso do grupo 20, a qualidade foi considerada inferior às outras antenas, sendo a única antena a ter um MOS igual a 1.

A antena Moxon-Yagi apresentou bons resultados para ângulos de elevação baixos. Em relação à qualidade de áudio, nos grupo 20, 40, 50 e 60, sua qualidade foi considerada tão boa quanto das outras antenas, e no grupo 30 foi considerada superior. A transmissão e recepção dos *S-Signals* também foi similar à MoxonZBZ e a MoxonZBZ+, com exceção do grupo de 80, onde a MoxonZBZ+ obteve melhores resultados em todos os aspectos. Surpreendentemente, em nenhum grupo seu MOS foi considerado inferior a 3. Ou seja, a qualidade de áudio foi considerada razoável ou maior em todos os grupos de teste.

Já a antena MoxonZBZ mostrou resultados diversos. Fora o grupo 30, em todos os testes, a sua qualidade de áudio foi considerada razoável (MOS igual a 3). A potência do sinal recebido foi idêntica à Moxon-Yagi em todos os cenários, apesar do ganho superior da antena. Destacou-se no grupo de 60, com *S-Signal* transmitido de S9. Porém, teve desempenho notadamente inferior no grupo de 80.

Podem-se observar tendências interessantes nos resultados obtidos. Para ângulos de elevação baixos, o padrão de radiação menos diretivo da Moxon-Yagi foi benéfico para os contatos, sendo que o ganho das antenas se torna menos relevante nestes casos. Para ângulos de elevação maiores, o ganho passa a se tornar mais importante e o sinal recebido das antenas com maior ganho se destaca em relação às antenas com menor ganho.





## 5 Conclusões

Este trabalho procurou mostrar como as antenas Moxon-Yagi e suas variações se comportam em comunicação satelitais na órbita LEO. No [Capítulo 1](#) foi feita uma pequena introdução sobre o trabalho, motivações e objetivos. No [Capítulo 2](#) foram apresentadas as bases teóricas da propagação de ondas, das antenas e de suas características primárias. No [Capítulo 3](#) foi apresentado o projeto e o desenvolvimento das antenas, levando a simulações e medições das antenas construídas. Por fim, no [Capítulo 4](#) foram feitos os testes de campo, com avaliações comparativas de desempenho das antenas em diversos cenários.

Na construção das antenas, alguns parâmetros simulados não puderam ser comparados satisfatoriamente com os medidos. Muito disto se deve do fato do desenho do diagrama ter sido feito em condições não-ideais. Porém, nos testes de campo, foi possível notar o ganho superior de certas antenas através dos *S-Signals*. Observou-se também que o ganho não foi um fator fundamental que determinou a superioridade de desempenho de uma antena. A diretividade foi mais importante em elevações menores. Portanto, não há uma fórmula garantida que aponte uma antena como ideal para todas as situações. Antenas muito diretivas podem acabar atrapalhando mais do que ajudando nos contatos com satélites, em especial quando o apontamento é complexo, como no caso da órbita LEO. Deve-se avaliar o cenário e escolher a melhor antena através de parâmetros que sejam considerados os mais fundamentais no sistema de comunicação utilizado. Em especial, as antenas Moxon foram vantajosas por serem *dual band* na mesma polarização, e também pelo fato de utilizarem somente um cabo coaxial, se aproveitando da indução.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Teste das antenas desenvolvidas em outros satélites com módulo de repetidora NBFM embarcado, tais como: AO-92, Lilacsat 2 e a [ISS](#).
- Projetar, desenvolver e analisar antenas omnidirecionais para contato com satélites, como por exemplo a antena Lindenblad, projetada pelo radioamador W6SHP, Howard Sodja. Essas antenas não requerem apontamento.
- Desenvolvimento de um sistema mecânico automático para facilitar o apontamento para satélites LEO.
- Verificação da eficiência em testes de transmissão e recepção de dados, usando protocolos como o X.25, sendo possível a análise da *Bit Error Rate* (BER) na comunicação.



# Referências

- AKSOY, P.; DENARDIS, L. *Information Technology in Theory*. Boston: Cengage Learning, 2007. 432 p. Citado na página 21.
- AMSAT-UK. 11th birthday of ham radio satellite so-50. 2013. Disponível em: <<https://amsat-uk.org/2013/12/19/11th-birthday-of-ham-radio-satellite-so-50/>>. Acesso em: 24 jun. 2017. Citado na página 43.
- ANDREADIS, A.; GIAMBENE, G. *Protocols for High-Efficiency Wireless Networks*. Nova Iorque: Springer, 2002. 284 p. Citado na página 21.
- ARSATC. Antenas direcionais. 2016. Disponível em: <<http://www.arsatc.org/projetos.html>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 63.
- AUSTRALIAN SPACE ACADEMY. Orbital parameters: Low earth circular orbits. 2017. Disponível em: <<http://www.spaceacademy.net.au/watch/track/leopars.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 27.
- BAKSHI, A. V.; BAKSHI, U. A. *Electronic Measurements*. Nova Deli: Technical Publications, 2008. 340 p. Citado na página 35.
- BAKSHI, A. V.; BAKSHI, U. A. *Antennas and Wave Propagation*. 3. ed. Nova Deli: Technical Publications, 2009. 432 p. Citado na página 37.
- BALANIS, C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2016. 1096 p. Citado 4 vezes nas páginas 31, 33, 34 e 38.
- BANSAL, R. *Handbook of Engineering Electromagnetics*. Boca Raton: CRC Press, 2012. 720 p. Citado na página 21.
- BOLTON, S.; DOTY, D.; RIVERA, P. Compact deployable antenna for cubesat units: A senior project sponsored by nasa's jet propulsion laboratory. 2015. Disponível em: <<http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1300&context=mesp>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 29.
- BRITAIN, K. Cheap antennas for the amsat leo's. Disponível em: <<http://www.wa5vjb.com/references/Cheap%20Antennas-LEOs.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 22.
- BRODKIN, J. SpaceX plans worldwide satellite internet with low latency, gigabit speed. 2016. Disponível em: <<https://arstechnica.com/information-technology/2016/11/spacex-plans-worldwide-satellite-internet-with-low-latency-gigabit-speed/>>. Acesso em: 5 jun. 2017. Citado na página 21.
- CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY. Cubesat specification drawings. 2017. Disponível em: <[https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds\\_rev13\\_final2.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 26.

- CAMARCHIA, V.; QUAGLIA, R.; PIROLA, M. *Electronics for Microwave Backhaul*. Norwood: Artech House, 2016. 370 p. Citado na página 37.
- CARR, J. J.; HIPPISEY, G. *Practical Antenna Handbook*. 5. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill/TAB Electronics, 2012. 784 p. Citado 3 vezes nas páginas 28, 36 e 47.
- CHARTRAND, M. R. *Satellite Communications for the Nonspecialist*. Bellingham: SPIE Press, 2004. 456 p. Citado na página 21.
- CHEN, W.-K. *The electrical Engineering Handbook*. 1. ed. Boston: Elsevier Academic Press, 2004. 1018 p. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- CISCO. Antenna patterns and their meaning. 2007. Disponível em: <[http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod\\_white\\_paper0900aecd806a1a3e.html](http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod_white_paper0900aecd806a1a3e.html)>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 32.
- ESCOBAR MENDEZ, B. L. *Link Budget for NTN Test Satellite*. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Tecnologia da Informação) — Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 30, 43, 44 e 45.
- FUJIMOTO, K. *Mobile Antenna Systems Handbook*. 3. ed. Boston: Artech House Publishers, 2008. 769 p. Citado na página 21.
- GODARA, L. C. *Handbook of Antennas in Wireless Communications*. Boca Raton: CRC Press, 2001. 936 p. Citado na página 28.
- GRANASTEIN, V. L. *Physical Principles of Wireless Communications*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 311 p. Citado na página 21.
- HEIDT, H. et al. Cubesat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. 2000. Disponível em: <<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2069&context=smallsat>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 25.
- IEEE. IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas. *IEEE Std 145-2013 (Revision of IEEE Std 145-1993)*, p. 1–50, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 34 e 37.
- INGRAM, M. A. et al. Leo download capacity analysis for a network of adaptive array ground stations. 2006. Disponível em: <[https://www.academia.edu/23835655/LEO\\_Download\\_Capacity\\_Analysis\\_for\\_a\\_Network\\_of\\_Adaptive\\_Array\\_Ground\\_Stations](https://www.academia.edu/23835655/LEO_Download_Capacity_Analysis_for_a_Network_of_Adaptive_Array_Ground_Stations)>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 22.
- ISIS SPACE. Cubesats in brief. 2017. Disponível em: <<https://www.isispace.nl/cubesats/>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 26.
- KREBS, G. D. Cubesat. 2016. Disponível em: <[http://space.skyrocket.de/doc\\_sat/cubesat.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sat/cubesat.htm)>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 25.
- KUMAR, S. *Wireless Communications Fundamental & Advanced Concepts: Design Planning and Applications*. Aalborg: River Publishers, 2015. 790 p. Citado na página 21.
- KYUN, N. C. et al. Modelling and simulation of phased array antenna for leo satellite tracking. 2002. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45801-8\\_35](https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45801-8_35)>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 22.

- MARAL, G.; BOSQUET, M. *Satellite Communications Systems and Technology*. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 742 p. Citado na página 22.
- MARTINEZ, A. et al. Nanosatellites technology demonstration. 2000. Disponível em: <<http://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2047&context=smallsat>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- MAZDA, F. *Telecommunications Engineer's Reference Book*. 2. ed. Oxford Boston: Focal Press, 1998. 1216 p. Citado na página 31.
- MURI, P.; CHALLA, O.; MCNAIR, J. Enhancing small satellite communication through effective antenna system design. In: *2010 - MILCOM 2010 MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 347–352. ISSN 2155-7578. Citado na página 29.
- MURI, P. et al. Topology design and performance analysis for networked earth observing small satellites. In: *2011 - MILCOM 2011 Military Communications Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1940–1945. ISSN 2155-7578. Citado na página 28.
- NOGUEIRA, M. The benefits of low-earth orbiting satellite technology for the international community: Can the potential be realized. *Indiana Journal of Global Legal Studies*, v. 5, n. 2, artigo 16, 1998. Citado na página 21.
- OKAMOTO, G. *Smart Antenna Systems And Wireless Lans*. Nova Iorque: Kluwer Academic Publishers, 2002. 208 p. Citado na página 21.
- POOLE, I. Antenna resonance & bandwidth. 2010. Disponível em: <<http://www.radio-electronics.com/info/antennas/basics/resonance.php>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 31.
- RICHHARIA, M. *Mobile Satellite Communications: Principles and Trends*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. 752 p. Citado na página 22.
- RONDINEAU, S. et al. Ground stations of arrays to increase the leo download capacity. 2006. Disponível em: <<http://ecee.colorado.edu/microwave/docs/publications/2006/EuMC-SRetal-Oct06.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 22.
- ROSCH, P. J. *Bioelectromagnetic and subtle energy medicine*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 672 p. Citado na página 31.
- SANDAU, R. *International study on cost-effective Earth observation missions*. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2006. 160 p. Citado na página 25.
- STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. *Antenna Theory and Design*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2013. 822 p. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- UNION OF CONCERNED SCIENTISTS. Ucs satellite database. 2018. Disponível em: <<http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database>>. Acesso em: 27 fev. 2018. Citado na página 21.
- UNOOSA. Online index of objects launched into outer space. 2018. Disponível em: <<http://www.unoosa.org/ooa/osoindex/search-ng.jsp>>. Acesso em: 27 fev. 2018. Citado na página 21.

VOLAKIS, J. L. *Antenna Engineering Handbook*. 4. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill College, 2007. 1872 p. Citado na página 46.

WEGGELAAR, W.; SPERETTA, S. 3rd qb50 workshop. 2012. Disponível em: [https://www.qb50.eu/download/3rdQB50Workshop\\_presentations/06Weggelaar.pdf](https://www.qb50.eu/download/3rdQB50Workshop_presentations/06Weggelaar.pdf). Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 29.

YADAVA, R. L. *Antenna and wave propagation*. Nova Deli: PHI Learning Privated Limited, 2011. 732 p. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

ZURMELY, R. Antena portátil dual band para satélites tipo moxon-open-sleeve. 2017. Disponível em: <http://www.qsl.net/py4zbz/antenas/ms.htm>. Acesso em: 27 mar. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.