



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

IVANA PIRES CRISÓSTOMO

**PROJETO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA  
ESTAÇÃO TERRENA DE RASTREIO DE PICO E  
NANOSATÉLITES DO TIPO “CUBESAT”**

Campina Grande, Paraíba  
Dezembro de 2018

IVANA PIRES CRISÓSTOMO

PROJETO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO  
TERRENA DE RASTREIO DE PICO E NANOSSATÉLITES  
DO TIPO “CUBESAT”

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Telecomunicações.

Orientador:

Professor Rômulo Raimundo Maranhão do Valle, Me. Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Dezembro de 2018

IVANA PIRES CRISÓSTOMO

# PROJETO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA ESTAÇÃO TERRENA DE RASTREIO DE PICO E NANOSSATÉLITES DO TIPO “CUBESAT”

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade  
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da  
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Telecomunicações

Aprovado em 19 de Dezembro de 2018

---

**Professor Bruno Barbosa Albert**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador, UFCG

---

**Professor Rômulo Raimundo Maranhã do Valle**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

“Não tenhamos pressa, mas não percam tempo.”

José Saramago

Aos meus queridos pais, Pedro e Ivonete, que sempre acreditaram no meu esforço e nunca deixaram de me apoiar, seja direta ou indiretamente.

Aos meus amigos feitos durante a graduação: André Miranda (*in memoriam*), Joaquim Nilson, Bianca Porto, Gabriela Marques, Maura Alexandre, Ana Paula Rodrigues, Jozias Rufino, Itaiara Carvalho, Ana Gomes, Welch Martiniano, Hélivio Albuquerque, Ewerton Brasil, Yuri Loia, Adriel Nascimento, Priscila Nascimento, Marylia Barreto, Tamires Oliveira, Laís Fortunato, Alan Soares, Helton Tavares e todos aqueles que não mencionei, mas que foram ajudados e me ajudaram durante o curso.

Aos meus amigos mais antigos: Erika Karla, Lucas Almeida, Michael Carvalho, Jeany Araújo e Fabíola Janiny por serem parceiros em todos os momentos de minha vida.

Às minhas queridas Vera Lúcia, Maria José, Gabrielly Freitas, Fabíola Pires e aos demais familiares.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Rômulo Valle, meu orientador, por permitir que essa pesquisa fosse possível, pela paciência com as adversidades, pelas conversas e dúvidas solucionadas.

Agradeço ao professor Rubem Alves, por ser uma inspiração, pela influência a concluir o curso com ênfase em telecomunicações e pelo auxílio neste trabalho.

Muito obrigada Adriel Nascimento, por me auxiliar em muitas das etapas deste processo.

Agradeço também aos servidores Joaquim e Emanuel, por serem atenciosos e darem algumas ideias para soluções de montagem do sistema irradiante.

Agradeço ainda aos servidores do DEE: Adail, Tchai, professor Mário Araújo e Maria Lúcia.

## RESUMO

Muitas das universidades do mundo, inclusive brasileiras, estão avançando nas pesquisas voltadas para o espaço, principalmente no que se refere aos pico e nanossatélites (*CubeSats*), além da implementação de estações terrenas. Vendo a necessidade de avanço no estudo de satélites na Universidade Federal de Campina Grande, para acompanhar as outras instituições, teve-se a ideia de projetar e implementar uma Estação de Rastreamento de Satélite (ERS) para rastrear inicialmente pico e nanossatélites. A estrutura básica necessária já está disponível na estação de radioamadorismo PR7DEE do Laboratório de Radio Propagação (LARP) do DEE.

Algumas das etapas para conseguir o feito de implementar uma ERS foram estudadas e desenvolvidas durante este Trabalho de Conclusão de Curso e relatadas neste documento. Uma das etapas constava de implementar um sistema irradiante e o mesmo foi feito, as outras etapas deverão ser concluídas em trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** picossatélites, nanossatélites, *CubeSats*, Estação de Rastreamento de Satélite, radioamadorismo.

## ABSTRACT

Many of the universities of the world, including Brazilian ones, are advancing in space-oriented research, particular in the area of CubeSats and the implementation of Earth Stations. The Federal University of Campina Grande need to follow the other institutions, and the ideia of design and implement a Satellite Tracking Station (ERS) to initially trace CubeSats, using radio amateur equipments. The necessary setup is already available on the radio amateur station PR7DEE of the Radio Propagation Laboratory (LARP).

Some of the steps to implementing an ERS were studied and developed during this Course Completion Work and reported in this document. One of the steps was to implement a antenna and it was done, the other steps should be completed in future works.

**Keywords:** CubeSats, satellite tracking station, radio amateur.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Diferentes tamanhos de <i>CubeSats</i> .	5
Figura 2.2: Diagrama de blocos de uma estação terrena para pico e nanossatélites.	8
Figura 2.3: Diagramas vertical e horizontal da irradiação da antena omnidirecional padrão.	9
Figura 2.4: Lóbulos de irradiação e larguras de feixe de um diagrama de antena.	10
Figura 2.5: Curva de ressonância de uma antena, para demonstração da banda passante.	12
Figura 2.6: Polarização de ondas: (a) vertical e (b) horizontal.	12
Figura 2.7: Rotação de uma onda plana eletromagnética e suas possíveis polarizações em $z = 0$ em função do tempo.	13
Figura 2.8: Arranjo de 2 antenas <i>loop</i> em quadratura espacial para satélites de órbita baixa.	16
Figura 2.9: Antena helicoidal quadrifilar omnidirecional.	16
Figura 2.10: Antena Yagi cruzada.	16
Figura 2.11: Elevação e azimuth.	17
Figura 2.12: Deslocamento do Doppler.	19
Figura 3.1: Analisador de ROE.	22
Figura 3.2: Rotor do conjunto G-1000DXA da YAESU.	22
Figura 3.3: Controlador do rotor do conjunto G-1000DXA da YAESU.	22
Figura 3.4: Transceptor IC-7200.	23
Figura 3.5: Transceptor IC-9100.	23
Figura 3.6: Receptor IC-R9500.	23
Figura 5.1: Antena Yagi-Uda cruzada coplanar com $\gamma$ -match.	27
Figura 5.2: Antena Yagi cruzada coplanar, com polarização circular comutável.	28
Figura 5.3: Antena Yagi cruzada deslocada, com polarização circular fixa.	28
Figura 5.4: Imagem da janela do CST e do projeto de uma das antenas.	33
Figura 5.5: Diagrama de irradiação em 3D.	33
Figura 5.6: Diagrama de irradiação em 2D.	34
Figura 5.7: Gráfico do VSWR.	34
Figura 6.1: Processo de corte dos elementos da antena.	35
Figura 6.2: Elementos da antena já cortados.	35
Figura 6.3: Furação do elemento central da antena.	35
Figura 6.4: Elemento central da antena com os furos.	35
Figura 6.5: Elementos de uma das antenas devidamente encaixados.	36
Figura 6.6: Ajuste dos anéis de silicone para fixação.	36
Figura 6.7: Antena Yagi Cruzada sem o elemento ativo.	36
Figura 6.8: Casador de impedância T-Match.	37
Figura 6.9: Furo para alimentação da antena.	37
Figura 6.10: T-Match montado.	38
Figura 6.11: Estrutura física da antena.	38
Figura 6.12: Detalhe de um balun.	39
Figura 6.13: Alimentação das antenas desde o receptor.	40
Figura 6.14: Esquema de ligação do conjunto de antenas, visão traseira.	40
Figura 6.15: Detalhe de ligação dos cabos para alimentação das antenas.	40
Figura 6.16: Soldagem dos cabos.	41
Figura 6.17: Terminais soldados e parafusados.	41
Figura 6.18: Construção da alimentação da antena pronta.	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classificação dos satélites de acordo com a massa.....	5
Tabela 5.1: Comprimentos dos elementos parasitas para antenas Yagi para cinco diferentes tamanhos de antenas. .....	29
Tabela 5.2: Dimensões elementos da antena Yagi-Uda de acordo com a Tabela 5.1.....	30
Tabela 5.3: Dimensões elementos da antena Yagi-Uda depois dos devidos ajustes.....	32
Tabela A. 1: Satélites radioamadores que passam próximo ao céu de Campina Grande na Paraíba, Brasil.....	46

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Pico e Nanossatélites brasileiros.....	7
Quadro 2.2: Bandas de frequências.....	18

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E$	Campo elétrico
$\Gamma$	Coefficiente de reflexão
$\lambda$	Comprimento de onda
$L_{DX}$	Comprimento do diretor de número $x$
$L_A$	Comprimento do elemento ativo da antena
$L_R$	Comprimento do refletor da antena
$d$	Diâmetro dos elementos da antena
$D$	Diretividade
$\eta$	Eficiência de irradiação
$fp$	Fator de propagação
$f$	Frequência
$U$	Intensidade de irradiação
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa
$\epsilon_r$	Permissividade elétrica relativa
$P$	Potência de irradiação
$c$	Velocidade da luz no vácuo
$v_p$	Velocidade de propagação

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
AMSAT	Radio Amateur Satellite Corporation
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BW	Largura de banda ( <i>bandwith</i> )
CCW	Sentido anti-horário ( <i>counterclockwise</i> )
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CW	Sentido horário ( <i>clockwise</i> )
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
EM	Eletromagnético
EMC	Compatibilidade Eletromagnética
EMI	Interferência Eletromagnética
ERS	Estação de Rastreamento de Satélite
ET	Estação Terrena
ETEC	Escola Municipal Tancredo Neves
GENSO	Global Educational Network for Satellite Operations
ICARO	Introdução ao Conhecimento da Atmosfera pelos Rádioamadores
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPMet	Instituto de Pesquisas Meteorológicas
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LABRE	Liga de Amadores Brasileiros de Radio Emissão
LARP	Laboratório de Rádio Propagação
LFEN	Largura de Feixe Entre Nulos
LFMP	Largura de Feixe de Meia Potência
LT	Linha de Transmissão
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NBS	<i>National Bureau of Standards</i>
RHCP	<i>Right Hand Circular Polarization</i>
ROE	Relação de Ondas Estacionárias
SWR	<i>Standing Wave Ratio</i> (Relação de Ondas Estacionárias em inglês)
UFABC	Universidade Federal do ABC
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UnB	Universidade de Brasília
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1	Justificativa .....	2
1.2	Objetivos .....	3
1.2.1	Objetivo Geral.....	3
1.2.2	Objetivo Específico .....	3
1.3	Estrutura do Trabalho de Conclusão de Curso.....	3
2	Fundamentação Teórica .....	4
2.1	Satélites .....	4
2.1.1	CubeSats .....	5
2.1.1.1	CubeSats Brasileiros .....	6
2.2	Estação Terrena e Seus Elementos.....	7
2.2.1	Sistema Irradiante.....	8
2.2.1.1	Parâmetros Fundamentais de Antenas .....	8
2.2.1.2	Antenas para Rastreamento de Satélites .....	15
2.2.2	Controle de Antena.....	17
2.2.2.1	Rotor .....	17
2.2.3	Transceptor de RF .....	17
2.2.3.1	Frequências.....	18
2.2.3.2	Transmissor .....	18
2.2.3.3	Receptor .....	19
2.2.3.4	Efeito Doppler .....	19
2.2.3.5	Tipos de Transceptores .....	19
2.2.4	Modem.....	20
2.2.5	<i>Software</i> e Interface de Usuário .....	20
2.2.6	Estrutura de Suporte da Estação.....	21
3	O Laboratório de Rádio Propagação.....	21
3.1	Equipamentos Disponíveis no LARP .....	21
3.1.1	Transmissores e Receptores de RF .....	23
3.2	Subsistemas a Serem Desenvolvidos.....	23
4	Escolha dos Satélites e Definição das Bandas de Frequência .....	24
4.1	FUNcube-1 (AO-73).....	24
4.2	FOX-1A (AO-85).....	25
5	Projeto do Sistema Irradiante .....	25
5.1	A Antena Yagi-Uda Cruzada .....	26
5.2	Norma Técnica NBS 688.....	29
5.3	Frequência Central e Dimensionamento da Antena .....	30
5.4	O <i>Software</i> CST .....	32
5.5	Resultados da Simulação .....	33

6	Montagem do Sistema Irradiante.....	34
6.1	Testes e Resultados do Sistema Irradiante.....	42
7	Conclusões .....	42
7.1	Objetivos Atendidos .....	42
7.2	Limitações.....	43
7.3	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	43
8	Referências .....	44
9	Apêndices .....	46
9.1	Apêndice A: Alguns satélites que passam próximo ao Céu de Campina Grande.....	46
10	Anexos.....	46
10.1	Anexo A: Gráficos Disponíveis na Norma NBS 688 para Auxílio do Dimensionamento da Antena Yagi-Uda.....	46

# 1 INTRODUÇÃO

Presentemente, muitas universidades brasileiras (por exemplo: UnB, UFMG, UFSM, ITA, UFSC e UFABC) possuem grupos de trabalho compostos de alunos e professores que se dedicam a projetos e/ou rastreamento de satélites do tipo nano (com peso entre 1 e 10 kg) ou pico (com peso entre 0,1 e 1 kg). Esses projetos são, muitas vezes, apoiados por entidades nacionais como a Agência Espacial Brasileira (AEB), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e/ou internacionais como *Centre National d'Études Spatiales* (CNES, Agência Espacial Francesa), e a *Radio Amateur Satellite Corporation* (AMSAT) dentre outras. Em particular, a AMSAT é representada no Brasil pela AMSAT-BR que é um grupo da Liga de Amadores Brasileiros de Rádio Emissão (LABRE) muito atuante em projetos e atividades radioamadorísticas envolvendo comunicações e tecnologias espaciais. Esses núcleos são importantes para o desenvolvimento das atividades espaciais no país, pois atendem a dois objetivos: contribuem para a formação e capacitação de mão de obra especializada e favorecem a aproximação do programa espacial junto às universidades. Dessa forma, ampliam o conhecimento científico e tecnológico nessa área de conhecimento.

Existem, no entanto, ações nessa área, envolvendo alunos do ensino fundamental e médio da Escola Municipal Presidente Tancredo Neves (ETEC), situada em Ubatuba/SP e o UbatubaSat dentro de um programa de fomento ao desenvolvimento de satélites nas universidades brasileiras.

Os radioamadores estão entre os pioneiros das comunicações espaciais. Seu primeiro satélite, o OSCAR 1, foi lançado nos Estados Unidos apenas 4 anos após o Sputnik, em 1961. O primeiro satélite brasileiro também foi radioamador, o Dove OSCAR-17, lançado em 1990 na Guiana Francesa. Desde 2014 a LABRE e AMSAT-BR colaboram com projetos de *CubeSats* do INPE e UFSM (NanosatC-BR1 e NanosatC-BR2), do ITA (ITASAT-1 e AESP-14) e UnB (SERPENS), assim como o projeto ICARO (Introdução ao Conhecimento da Atmosfera pelos Radioamadores) para comunicações através de balões estratosféricos, realizado em parceria com IPMet/UNESP.

Muitas são as aplicações que podem ser providas por esses pequenos satélites: pesquisas sobre o campo de gravidade da Terra, cartografia, fenômenos atmosféricos, a agricultura de precisão, o posicionamento terrestre e aéreo, previsão de tempo e coleta de dados sobre o meio ambiente brasileiro. Para todas elas, um sistema de rastreamento necessita ser



projetado e implementado de forma que, as informações fornecidas pelos satélites (dados e imagens) possam ser utilizadas.

O objetivo desse trabalho é projetar e implementar uma Estação Terrena de Rastreo de Satélites (ERS) do tipo *CubeSats* ligada ao LARP-DEE-UFCG (Laboratório de Rádio Propagação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG), onde atualmente está em operação a estação de radioamador PR7DEE autorizada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) que servirá de referência oficial para a recepção dos sinais.

Na arquitetura básica de uma Estação Terrena (ET) devem ser especificadas as antenas, o rotor e o rádio transceptor com base em equipamentos utilizados por radioamadores. Os equipamentos são caracterizados por apresentarem custo reduzido e facilidade de integração e controle por computador, com diversos aplicativos computacionais com código aberto, disponibilizados gratuitamente por radioamadores, o que possibilita realizar adequações do projeto, quando necessário.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A implementação de uma Estação Terrena para Rastreo de Satélites (ERS) do tipo *CubeSats* na UFCG, objetiva atender:

- A necessidade de enriquecer a formação do aluno do curso de Engenharia Elétrica que estuda Telecomunicações;
- Integração do curso com outros cursos de Engenharia Elétrica em outras instituições que já desenvolvem, ou o próprio satélite ou possuem ERS dentro de programas do tipo *Global Educational Network for Satellite Operations* (GENSO).

Este trabalho foi desenvolvido junto ao LARP-DEE que já possui alguns elementos necessários para a composição de uma ERS, tais como os rádios e o rotor e seu sistema de controle, além da estação oficial PR7DEE. Outros elementos foram ou deverão ser projetados e construídos ao longo do projeto para completar a arquitetura do sistema terreno de rastreo. Entre eles destaca-se a antena que deve possuir polarização circular e operar dentro da banda de uso dos radioamadores para fins de satélite. Outros elementos são os *softwares* computacionais que fornecem a interface com o programa de rastreo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Aprofundar o conhecimento das técnicas de telecomunicações via satélite utilizando o espaço do Laboratório de Rádio Propagação do DEE (LARP), com o objetivo final a implementação de uma Estação de Rastreo de Satélite (ERS).

### 1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Projetar, simular e construir uma ERS para satélites do tipo *CubeSat* em frequências destinadas pela ANATEL para atividades satelitais para radioamadores. Nessa perspectiva:

- Escolha do satélite;
- Definição das bandas de frequência VHF/UHF (*uplink* e *downlink*);
- Projeto do sistema irradiante;
- Escolha dos *softwares* para controle orbital e interfaces diversas;
- Testes do sistema.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

O trabalho é estruturado de acordo com a seguinte divisão de capítulos:

- Capítulo 2 - Fundamentação Teórica: apresenta conceitos teóricos para a fundamentação do trabalho.
- Capítulo 3 - O Laboratório de Radio Propagação: apresenta o Laboratório de Radio Propagação (LARP), seus equipamentos e o que falta para estruturar uma Estação de Rastreo de Satélite (ERS).
- Capítulo 4 - Escolha dos Satélites e Definição das Bandas de Frequência: apresenta os satélites que se tem por objetivo de rastrear e as bandas de frequência que os mesmos atuam.
- Capítulo 5 – Projeto do Sistema Irradiante: apresenta o projeto do sistema irradiante, desde os cálculos usando a norma NBS 688 até a simulação usando o *software* CST e sua análise.

- Capítulo 6 – Montagem do Sistema Irradiante: mostra as etapas de montagem, testes, resultados e análise do sistema irradiante que foi projetado no Capítulo 5.
- Capítulo 7 – Conclusões: apresenta as conclusões do trabalho, indicando objetivos alcançados, limitações do projeto proposto e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Ley et. al. (2009), conforme citado por Rodriguez (2016), o sistema espacial pode ser dividido em três segmentos, sendo eles: (i) segmento espacial, composto pelo satélite e sua carga útil; (ii) segmento de transferência, responsável pelo transporte do veículo espacial do solo ao espaço; e (iii) segmento solo, que é o controle e/ou monitoramento do satélite da Terra.

Neste capítulo serão explorados o segmento espacial, voltando a atenção para *CubeSats* e o segmento solo, focando nas estações terrenas universitárias.

### 2.1 SATÉLITES

De acordo com o dicionário Aurélio (2018) “satélite artificial é o engenho colocado na órbita de um planeta ou de um satélite natural, geralmente destinado a telecomunicações, à recolha de informação ou à investigação científica” e o dicionário Michaelis (2018) vai mais além quando afirma que satélite de comunicações é um “satélite artificial para comunicações eletromagnéticas entre distintos pontos da Terra ou entre uma nave espacial e a Terra”.

Os satélites artificiais podem ser classificados de acordo com a sua massa e essa classificação pode ser vista na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classificação dos satélites de acordo com a massa.

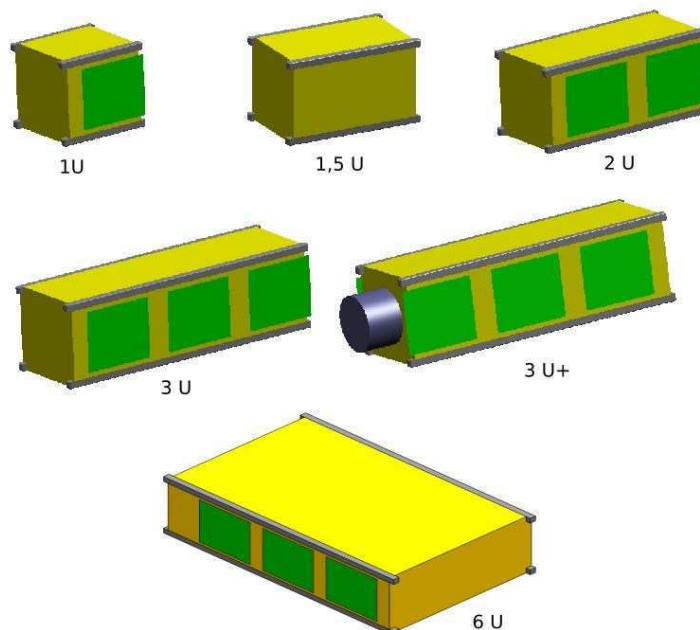
Classificação	Massa (kg)
Grande porte	> 1000
Pequeno porte	500 – 1000
Minissatélite	100 - 500
Microssatélite	10 – 100
Nanossatélite	1 – 10
Picossatélite	0,1 – 1
Femtossatélite	< 0,1

Fontes: Adaptada de Rodriguez (2016); Sweeting (2018); NASA (2015).

### 2.1.1 CUBESATS

*CubeSats*<sup>1</sup> são satélites miniaturizados e em formato cúbico, estão classificados entre os grupos de pico e nanossatélites. O *CubeSat* de 1 U (unidade) equivale a 1000 cm<sup>3</sup> (cubo de aresta de 10 cm) e tem em média 1,33 kg. Os maiores seguem esse padrão (RODRIGUEZ, 2016) que pode ser visualizado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Diferentes tamanhos de *CubeSats*.



Fontes: Adaptada de CubeSat (2015, 2016).

<sup>1</sup> CubeSats, disponível em: <http://www.cubesat.org/>. Acesso em: 22 de maio de 2018.

Os pico e nanossatélites operam usualmente em frequências de radioamadorismo (VHF/UHF). (RODRIGUEZ, 2016)

A priori o desenvolvimento de *CubeSats* foi voltado meramente para projetos acadêmicos como forma de motivar os estudantes a ter sua visão voltada para o setor espacial. Para tanto, os custos de implementação, lançamento e operação deveriam ser baixos. Ao longo do tempo percebeu-se que esses pequenos satélites tinham capacidade de cumprir missões de alguma relevância para o setor espacial. Mais recentemente, *CubeSats* vêm sendo adotados em aplicações espaciais, civis e militares, tais como sensoriamento remoto e desenvolvimento tecnológico, bem como capacitação de profissionais. (VILLELA, et. al., 2016)

#### 2.1.1.1 CUBESATS BRASILEIROS

O primeiro nanossatélite brasileiro lançado, o NanosatC-BR1, foi lançado em 19 de junho de 2014 e o mesmo continua em órbita e enviando telemetrias das cargas úteis e de todos os subsistemas de sua plataforma. Excetuando as baterias do sistema de potência, todos os subsistemas estão em pleno funcionamento, fazendo com que o nanossatélite só consiga transmitir informações quando está ao alcance do Sol. (INPE, 2017)

O AESP-14, segundo *CubeSat* brasileiro enviado ao espaço, foi lançado em fevereiro de 2015 e infelizmente apresentou uma falha no sistema de abertura de uma antena de transmissão, tornando-o inoperante. (VILLELA, et. al., 2016)

Outro *CubeSat* brasileiro, o SERPENS, lançado em agosto de 2015 operou com sucesso até maio de 2016 e teve como objetivo principal qualificar engenheiros, estudantes e pesquisadores do Brasil. (VILLELA, et. al., 2016)

O picossatélite Tancredo-1 foi um satélite desenvolvido por estudantes da escola pública Tancredo de Almeida Neves em Ubatuba (SP) em um projeto chamado de UbatubaSat em parceria com o INPE. Foi lançado em dezembro de 2016 e operou com sucesso durante 4 dias em órbita, seu monitoramento formal foi cessado após 3 semanas. (TIKAMI, et. al., 2017)

O ITASAT-1, desenvolvido pelo ITA, foi lançado recentemente, em 3 dezembro de 2018, levado a bordo pelo veículo lançador Falcon 9 (SpaceX). O mesmo encontra-se em órbita e em operação, alguns radioamadores já conseguiram receber seus sinais. (ITA, 2018)

Além dos *CubeSats* já citados, há outros em desenvolvimento no Brasil como o NanosatC-BR2 e o 14-BISat (VILLELA, et. al., 2016). No Quadro 2.1 pode-se ver o resumo dos estados atuais em que se encontram alguns satélites miniaturizados brasileiros.

Quadro 2.1: Pico e Nanossatélites brasileiros.

Satélite	NanosatC-BR1	AESP-14	Serpens	Tancredo-1	ITASAT-1
Estado	Ativo	Inoperante	Fora de órbita	Fora de órbita	Ativo

Fonte: Produção da autora.

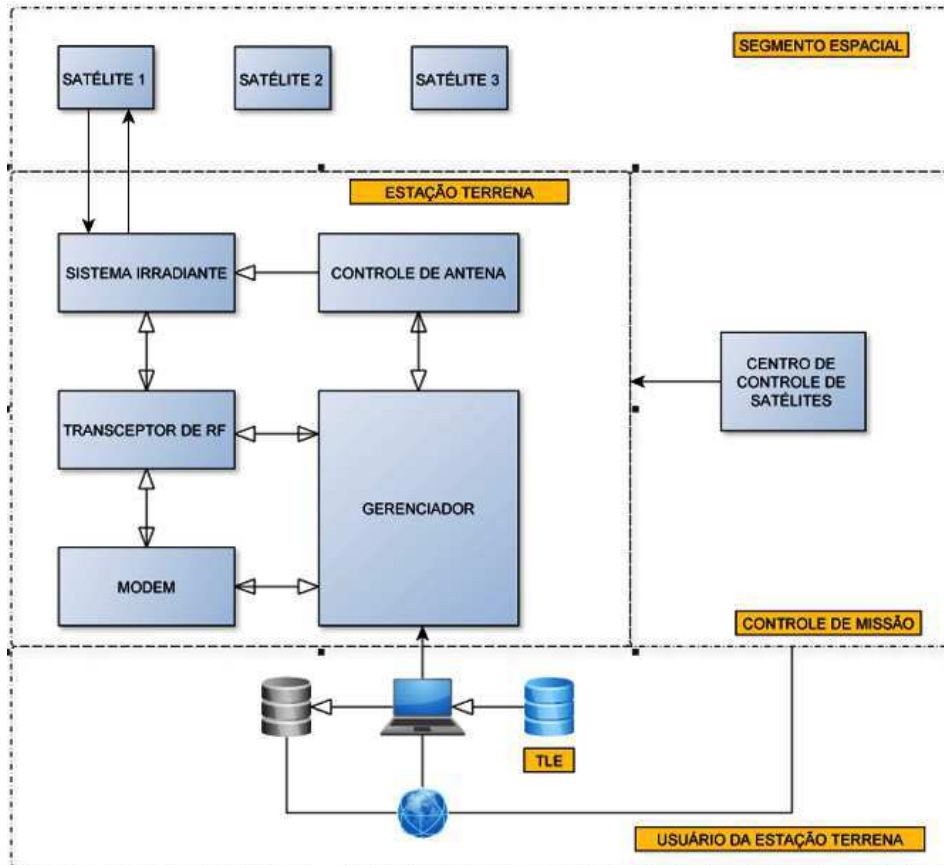
## 2.2 ESTAÇÃO TERRENA E SEUS ELEMENTOS

Uma estação terrena universitária tem como o principal objetivo a comunicação com satélites desenvolvidos por estudantes. Essas estações conseguem receber os dados de funcionamento de todos os subsistemas de bordo e executar as medições de distância e velocidade dos satélites, mas sem modificar as configurações nem o funcionamento dos mesmos. Sendo assim, também podem ser chamadas de Estações de Rastreamento de Satélites (ERS). Um exemplo das ERS são as estações de serviço de radioamador, que implementam comunicação nas bandas UHF e VHF. (RODRIGUEZ, 2016)

Na Figura 2.2 pode-se visualizar um diagrama de blocos para uma ERS que rastreia pico e nanossatélites. Cada bloco representa um subsistema da estação, são eles: sistema irradiante, controle da antena, o transceptor RF, o modem, *software* de gerenciamento e interface com o usuário. Uma ERS típica para pico e nanossatélites, do tipo *CubeSat*, é composta pelos seis subsistemas supracitados, mas de acordo com as necessidades esse número pode aumentar ou diminuir. (RODRIGUEZ, 2016)

Nos tópicos 2.2.1 a 2.2.6 os conceitos e estruturas dos subsistemas são aprofundados.

Figura 2.2: Diagrama de blocos de uma estação terrena para pico e nanossatélites.



Fonte: Rodriguez (2016).

## 2.2.1 SISTEMA IRRADIANTE

### 2.2.1.1 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS

A antena é um dispositivo que tem como objetivo converter ondas eletromagnéticas guiadas em uma LT, em ondas eletromagnéticas de espaço aberto, e também, de fazer a operação inversa. No primeiro caso tem-se uma antena transmissora e no segundo caso uma antena receptora. (BALANIS, 2009)

Para se observar o funcionamento de uma antena precisa-se estar atento às suas propriedades e a análise das mesmas nos permite conhecer o desempenho da antena. A descrição de alguns desses parâmetros pode ser vista nos itens 2.2.1.1.1 a 2.2.1.1.6.

### 2.2.1.1.1 DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO

Diagrama de irradiação é definido em Balanis (2009) como sendo uma função matemática ou a representação gráfica das propriedades de irradiação da antena em função das coordenadas espaciais. Entre as propriedades que podem ser visualizadas por meio do diagrama de irradiação estão: densidade de fluxo de potência, intensidade de irradiação, intensidade de campo, diretividade, fase ou polarização. Os diagramas de irradiação de uma antena omnidirecional podem ser vistos na Figura 2.3.

Os lóbulos que aparecem nos diagramas de irradiação podem ser subclassificados, de acordo com Balanis (2009), como lóbulos principal, secundário, lateral e posterior. Já Medeiros (2007) afirma que o lóbulo principal concentra o maior volume de energia, por isso deve ser direcionado ao local de recepção. Os lóbulos secundários ficam voltados para outras direções e, a depender da aplicação podem ser considerados desperdício de energia.

Largura de feixe é a abertura angular entre dois pontos que têm o mesmo valor de potência em um diagrama de irradiação. A mais usual é a Largura de Feixe de Meia Potência (LFMP). (BALANIS, 2009)

Na Figura 2.4 pode-se ver os lóbulos de irradiação, a LFMP e a Largura de Feixe Entre Nulos (LFEN) de um diagrama de irradiação de uma antena.

Figura 2.3: Diagramas vertical e horizontal da irradiação da antena omnidirecional padrão.

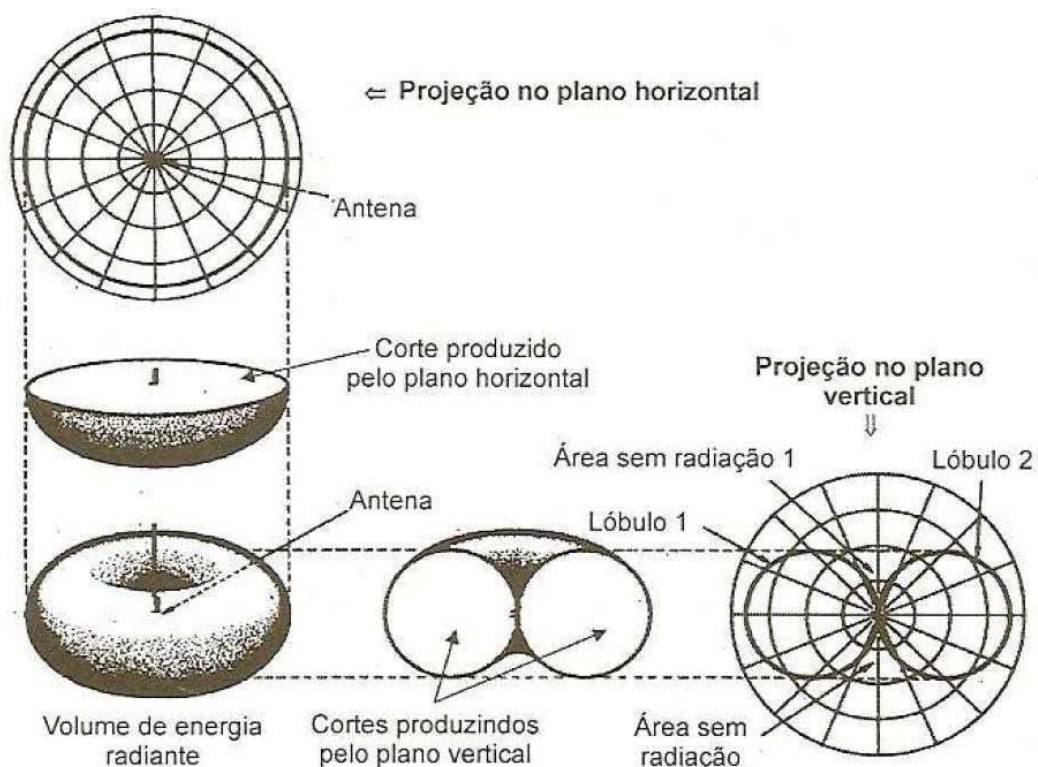
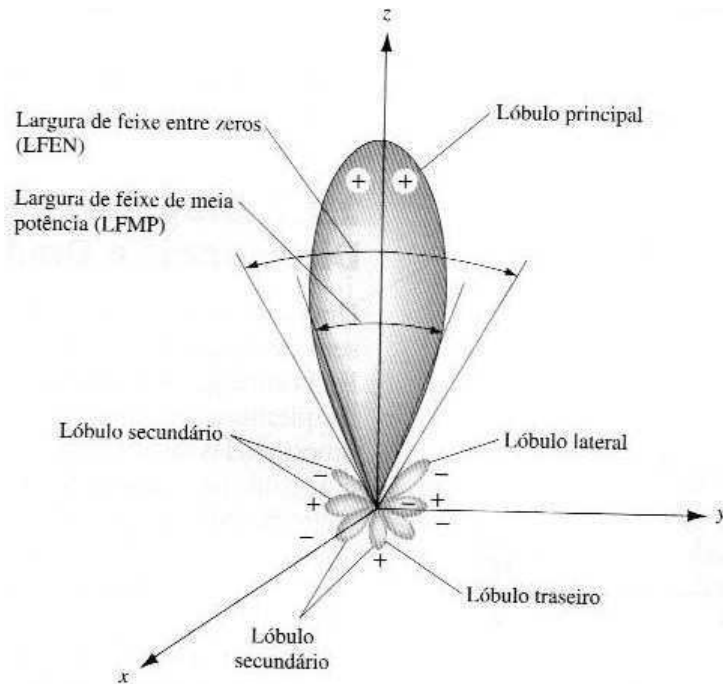




Figura 2.4: Lóbulos de irradiação e larguras de feixe de um diagrama de antena.



Fonte: Balanis (2009).

#### 2.2.1.1.2 DIRETIVIDADE

A diretividade é definida como sendo a razão entre a intensidade de irradiação da antena em uma dada direção e a intensidade de irradiação média, esta sendo definida como a potência total irradiada pela antena dividida por  $4\pi$ . (BALANIS, 2009)

$$D = \frac{U}{U_{méd}} = \frac{4\pi U}{P_T} \quad (2.1)$$

De acordo com Balanis (2009), se a direção analisada não for especificada, fica implícita que é a direção de máxima intensidade de irradiação, assim, a Equação (2.1) torna-se:

$$D_{máx} = \frac{U_{máx}}{U_{méd}} = \frac{4\pi U_{máx}}{P_T} \quad (2.2)$$

Sendo:

$D$  = diretividade (adimensional);

$D_{máx}$  = diretividade na direção de maior intensidade de irradiação (adimensional);

$U$  = intensidade de irradiação (W/und. de ângulo sólido);

$U_{méd}$  = intensidade de irradiação média (W/und. de ângulo sólido);  
 $U_{máx}$  = intensidade de irradiação máxima (W/und. de ângulo sólido);  
 $P_T$  = potência total irradiada (W).

#### 2.2.1.1.3 GANHO

O ganho de uma antena pode ser definido como o produto de sua eficiência pela diretividade. (MEDEIROS, 2007)

$$G = \eta D = \frac{P_T}{P_{ent}} D = \frac{P_T}{P_{ent}} \frac{4\pi U}{P_T} = \frac{4\pi U}{P_{ent}} \quad (2.3)$$

Sendo:

$G$  = ganho (adimensional);  
 $\eta$  = eficiência de irradiação (adimensional);  
 $P_{ent}$  = potência total de entrada (W).

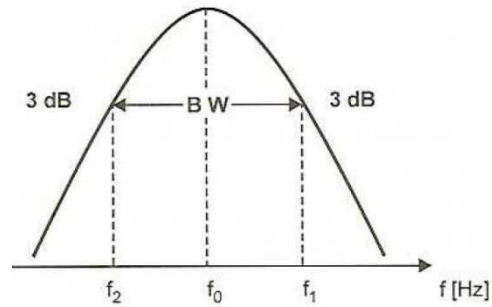
O ganho relativo é a razão entre o ganho de uma antena tendo outra como referência, geralmente usa-se uma antena dipolo, corneta ou qualquer outra cujo ganho possa ser calculado ou conhecido. A potência de entrada deve ser a mesma para ambas antenas. (BALANIS, 2009)

#### 2.2.1.1.4 LARGURA DE BANDA

Largura de banda (BW, do inglês *bandwidth*) ou banda passante é a faixa de frequência aceita pela antena, sem causar prejuízos ao desempenho da transmissão ou recepção. (MEDEIROS, 2007)

Pode-se considerar a largura de banda como sendo uma faixa de frequência, nos dois lados de uma frequência central, na qual as propriedades da antena têm valores aceitáveis dentro de um padrão definido para a frequência central. (BALANIS, 2009) Na Figura 2.5 pode-se observar a largura de banda de um sinal, considerando o ganho aceitável de 3 dB.

Figura 2.5: Curva de ressonância de uma antena, para demonstração da banda passante.



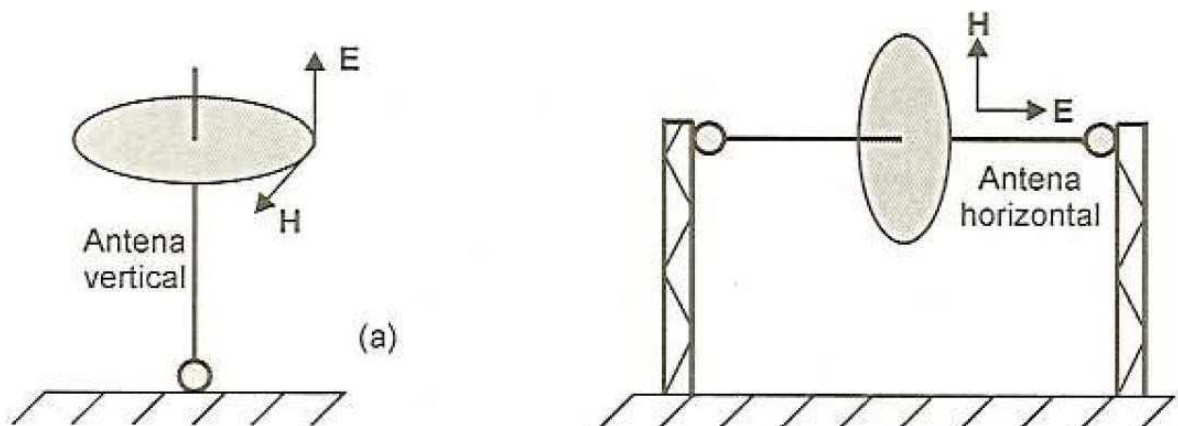
Fonte: Medeiros (2007).

### 2.2.1.1.5 POLARIZAÇÃO

De acordo com Hayt e Buck (2003) polarização de uma onda é definida como a orientação do seu campo vetorial elétrico como uma função do tempo, em uma posição fixa no espaço.

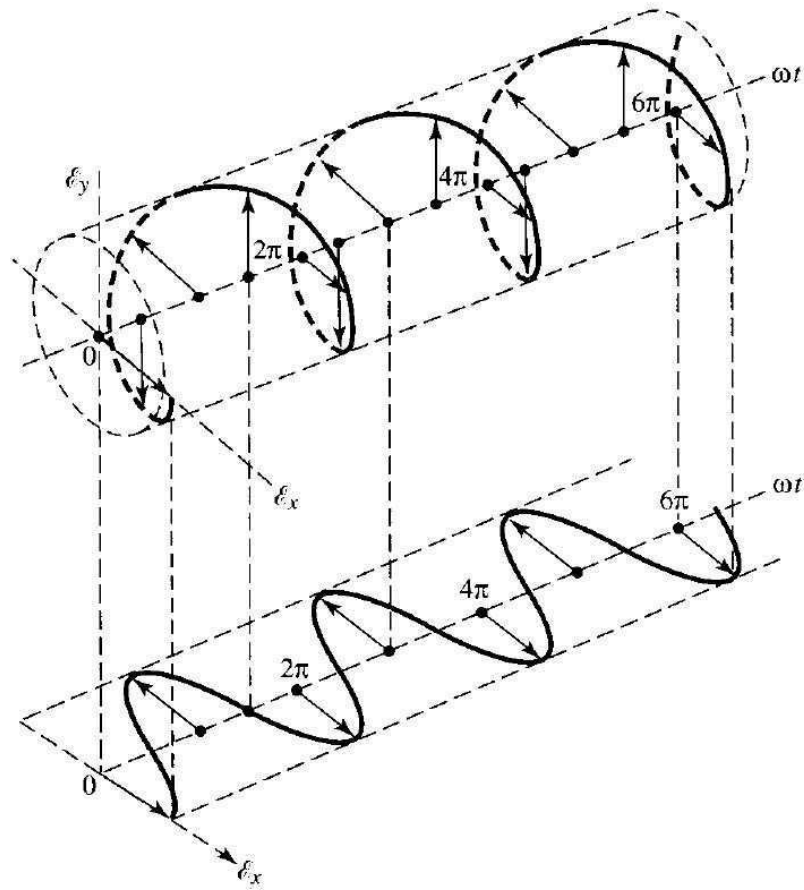
Entre os tipos de polarização estão as polarizações linear, circular e elíptica. Se o vetor do campo elétrico  $\vec{E}$  estiver direcionado ao longo de uma linha reta, então a polarização é linear podendo ser vertical (quando perpendicular ao solo) ou horizontal (quando paralelo ao solo) como pode ser visto na Figura 2.6. Porém, se a imagem descrita pelo campo elétrico  $\vec{E}$  é uma elipse então ele é polarizado elípticamente, se for uma circunferência, então a polarização é circular, ver Figura 2.7 para um melhor entendimento. (BALANIS, 2009; MEDEIROS, 2007)

Figura 2.6: Polarização de ondas: (a) vertical e (b) horizontal.

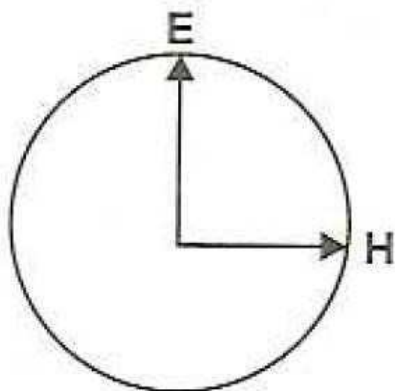


Fonte: Medeiros (2007).

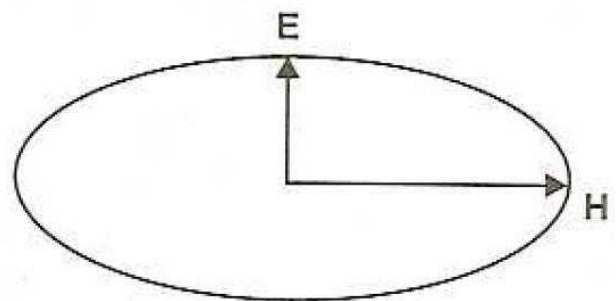
Figura 2.7: Rotação de uma onda plana eletromagnética e suas possíveis polarizações em  $z = 0$  em função do tempo.



(a) Rotação da onda.



(b) Polarização circular.



(c) Polarização elíptica.

Fontes: Medeiros (2007); Balanis (2009).

Comparando as três polarizações Balanis (2009) faz a seguinte afirmação:

Polarizações linear e circular são casos especiais da polarização elíptica, e podem ser obtidas quando a elipse se torna uma linha reta ou um círculo, respectivamente. O campo elétrico pode traçar a curva no sentido horário (CW – *clockwise*) ou no sentido anti-horário (CCW – *counterclockwise*). A rotação do campo elétrico no sentido horário é designada como polarização à direita; a rotação no sentido anti-horário é designada como polarização à esquerda.

### 2.2.1.1.6 IMPEDÂNCIA DE ENTRADA E ROE

Para que seja possível, teoricamente, a total transmissão de potência entre a antena e o transmissor é preciso que haja o total casamento das impedâncias entre a linha de transmissão (LT) e saída do transmissor e entre a LT e a antena. Em uma situação ideal, o transmissor “vê” a antena, por meio da LT, como uma resistência pura. (MEDEIROS, 2007)

Como na prática não é possível o total casamento de impedâncias, então há uma parte da potência incidente que é refletida. Essas ondas refletidas são chamadas de ondas estacionárias (ou *standing waves*, em inglês) e podem acarretar sérios problemas como superaquecimento na saída do transmissor. (MEDEIROS, 2007)

Dois coeficientes que podem ajudar a avaliar a quantidade de ondas estacionárias são o que é definido como coeficiente de reflexão  $\Gamma$  e a razão de onda estacionária (ROE), conhecida também pelo seu termo em inglês *standing wave ration* (SWR) (SADIKU, 2012)

Nas Equações (2.4) e (2.5) pode-se ver a definição do  $\Gamma$ , que nada mais é a relação entre a potência refletida e a potência incidente, e da ROE. (MEDEIROS, 2007; SADIKU, 2012)

$$\Gamma = \frac{P_r}{P_i} \quad (2.4)$$

$$ROE = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2.5)$$

Sendo:

$\Gamma$  = coeficiente de reflexão (adimensional);

$P_r$  = potência refletida (W);

$P_i$  = potência incidente (W)

ROE = relação de ondas estacionárias (adimensional).

Para Medeiros (2007) e Sadiku (2012) há três situações possíveis com relação ao casamento de impedância:

- Quando a linha está em curto:  
É o caso quando a impedância da antena é nula, curto-circuitando a LT.  
Tem-se assim:  $\Gamma = -1$  e  $ROE = \infty$ .
- Quando a linha está aberta:  
É o caso quando a impedância da antena é muito alta ou não há conexão entre a LT e a antena.  
Tem-se assim:  $\Gamma = 1$  e  $ROE = \infty$ .
- Quando a linha está casada:  
É o caso quando a impedância da antena é a mesma que a da LT.  
Tem-se assim:  $\Gamma = 0$  e  $ROE = 1$ .  
É a situação ideal, onde não há reflexão, na prática valores da ROE próximos de 1,06 a, no máximo, 1,5 são aceitáveis.

### 2.2.1.2 ANTENAS PARA RASTREAMENTO DE SATÉLITES

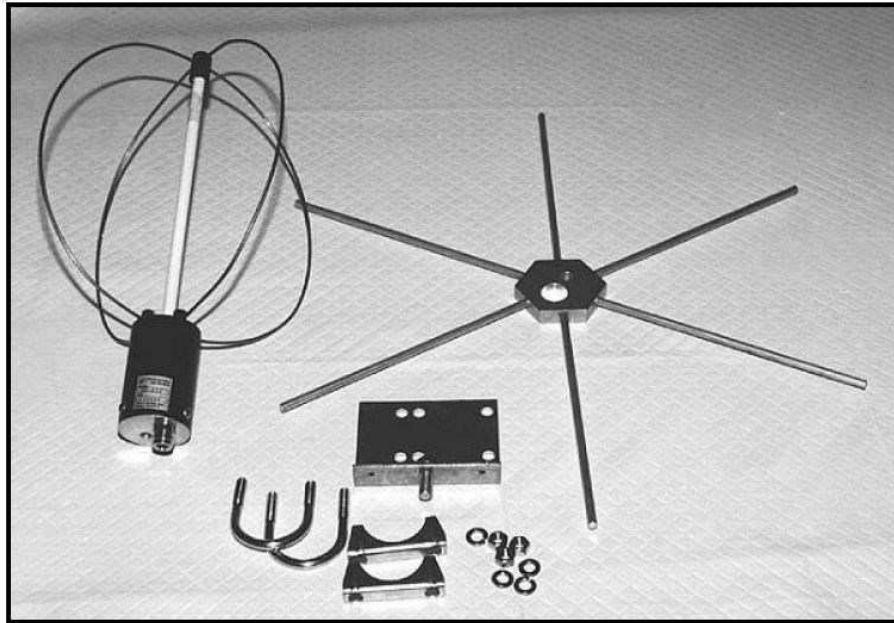
Há uma grande variedade de modelos de antenas para o uso de satélites radioamadores, que vão desde antenas de baixo ganho para satélites de órbita baixa até antenas de alto desempenho para satélites de alta altitude e órbita elíptica. (JANSSON, 2007)

Entre as antenas para satélite de órbita baixa estão o arranjo de dipolos, um arranjo de duas antenas *loop* em quadratura espacial e a Yagi-Uda de baixo ganho. Para satélites que estão em alta altitude a antena deve ter no mínimo um ganho de 12 dBi, uma boa opção para esse caso é o conjunto de antenas Yagi de alto ganho. (JANSSON, 2007)

Para comunicação espacial já está bem consagrado o uso de antenas com polarização circular, pois se um satélite tem uma antena com polarização linear e a estação também, talvez aconteça do sinal não ser recebido por questões de posicionamento. (JANSSON, 2007)

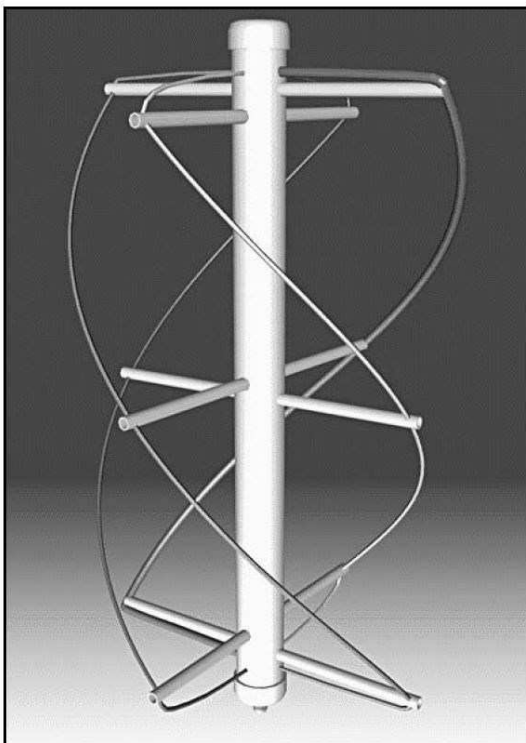
Na Figura 2.8 pode-se ver um arranjo de duas antenas *loop* em quadratura espacial, um dos modelos supracitados para a comunicação com satélites de órbita baixa. Nas Figuras 2.9 e 2.10 podem-se ver duas antenas com polarização circular, as mesmas são sugeridas por Jansson (2007) para a comunicação com satélites de alta altitude.

Figura 2.8: Arranjo de 2 antenas *loop* em quadratura espacial para satélites de órbita baixa.



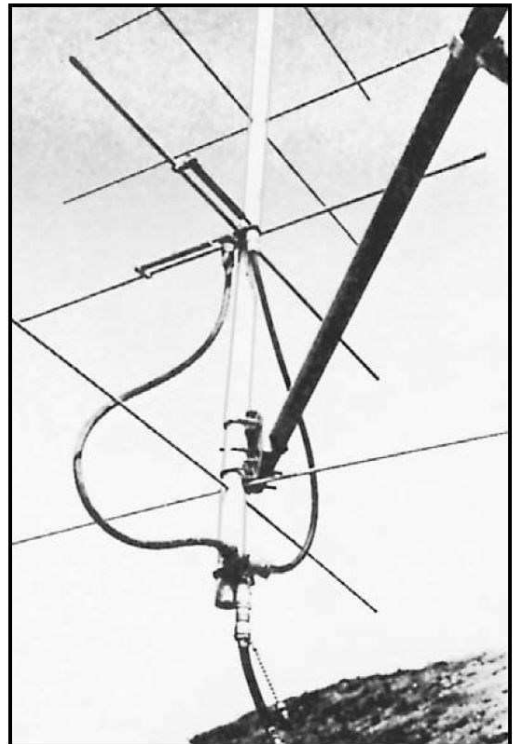
Fonte: Jansson (2007).

Figura 2.9: Antena helicoidal quadrifilar omnidirecional.



Fonte: Jansson (2007).

Figura 2.10: Antena Yagi cruzada.

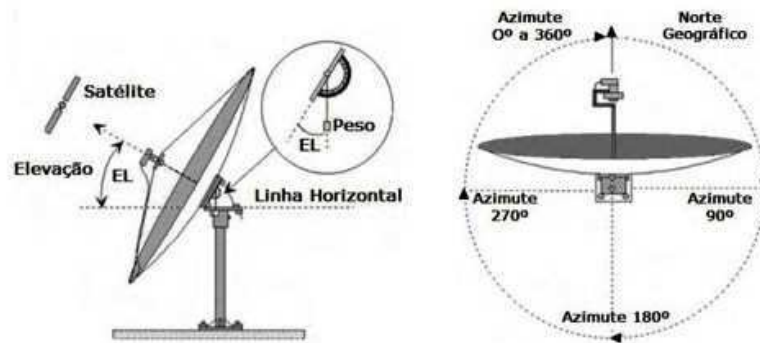


Fonte: Jansson (2007).

## 2.2.2 CONTROLE DE ANTENA

O principal propósito para o controle da antena é fazê-la acompanhar o caminho do satélite, respeitando os ângulos de elevação e azimute. De acordo com Kallas (2011), citado por Rodriguez (2016), o azimute a distância angular medida sobre o plano horizontal e a elevação é o ângulo que deve existir no plano vertical entre a antena e o satélite, essas grandezas podem ser vistas na Figura 2.11.

Figura 2.11: Elevação e azimute.



Fonte: Esteves (1980).

### 2.2.2.1 ROTOR

Para se controlar a posição do sistema irradiante de uma ERS de pico e nanossatélites, frequentemente rotores comerciais são utilizados, preferencialmente os que podem efetuar os dois movimentos. (RODRIGUEZ, 2016)

Utiliza-se o método de rastreamento de satélite por meio de *software* usando elementos keplerianos do satélite para localizá-lo na posição correta. Segundo AMASAT-CT (2002), citado por Rodriguez (2016), os elementos keplerianos ou *keps* são dados numéricos que permitem a determinação das órbitas dos satélites, astros e estrelas.

## 2.2.3 TRANSCÉPTOR DE RF

Transceptor é um equipamento que realiza tanto a transmissão como a recepção do sinal, tem a função de transmitir, via RF, informação desde terra para o satélite, como de receber respostas e informação na banda de frequência atribuída. (RODRIGUEZ, 2016)

Alguns conceitos relevantes quando se fala de transceptores serão apresentados a seguir.



### 2.2.3.1 FREQUÊNCIAS

De acordo com Rodriguez (2016), frequência é o número de ciclos senoidais completados por uma onda eletromagnética em um segundo, unidade utilizada para exprimir essa grandeza é o Hertz (Hz). As faixas de frequências são classificadas pelo comprimento de onda e suas bandas podem ser vistas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2: Bandas de frequências.

Frequências	Banda
3 kHz a 30 kHz	VLF (Very Low Frequency)
30 kHz a 300 kHz	LF (Low Frequency)
300 kHz a 3000 kHz	MF (Medium Frequency)
3 MHz a 30 MHz	HF (High Frequency)
30 MHz a 300 MHz	VHF (Very High Frequency)
300 MHz a 3000 MHz	UHF (Ultra High Frequency)
3 GHz a 30 GHz	SHF (Super High Frequency)
30 GHz a 300 GHz	EHF (Extremely High Frequency)

Fonte: Rodriguez (2016).

Entre as faixas de radiofrequência para serviço de radioamadorismo destinadas a satélites (de caráter não exclusivo) estão a faixa de 144 a 146 MHz (VHF), 430 a 435 MHz (UHF) e 435 a 4368 MHz (UHF). (ANATEL, 2018)

### 2.2.3.2 TRANSMISSOR

Um transmissor é o equipamento encarregado de enviar o sinal em forma de ondas eletromagnéticas por meio de uma antena. Para enviar esse sinal, o transmissor conta com vários componentes, dentre eles amplificadores de potência, modulador e filtro. (RODRIGUEZ, 2016)

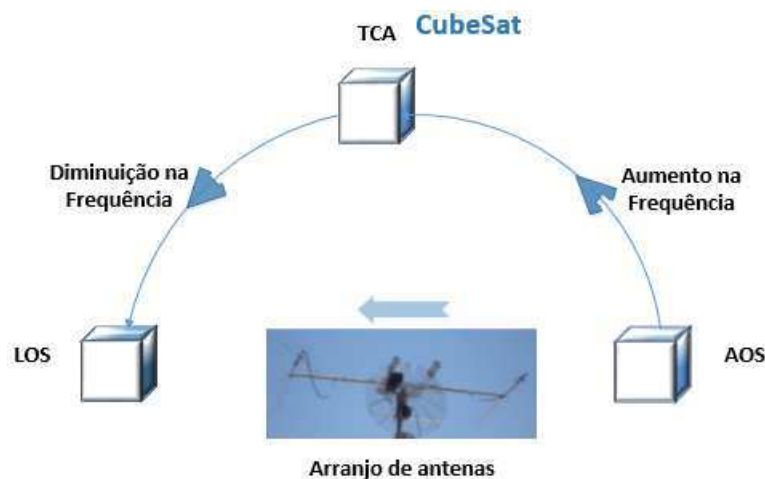
### 2.2.3.3 RECEPTOR

O receptor é encarregado de receber o sinal do satélite e interpretá-lo. A seção de recepção é composta dentre outros componentes por conversores, e em alguns casos, demodulador e filtros. (RODRIGUEZ, 2016)

### 2.2.3.4 EFEITO DOPPLER

De acordo com Ichikawa (2006), citado por Rodriguez (2016), o efeito Doppler é um fenômeno observado na frequência de uma onda quando a fonte e o observador estão em movimento relativo entre um e o outro. O deslocamento do satélite e o efeito Doppler podem ser observados na Figura 2.12, onde AOS: aquisição do sinal; TCA: tempo em que um satélite está acima do horizonte do observador; LOS: perda do sinal.

Figura 2.12: Deslocamento do Doppler.



Fonte: Adaptada de Ichikawa (2006), citado por Rodriguez (2016).

O Doppler deve ser corrigido continuamente, para a banda de 2 m o deslocamento máximo é de  $\pm 3,27 \text{ kHz}$ , para 70 cm é de  $\pm 9,76 \text{ kHz}$  e para banda de 13 cm (Banda-S) é de  $\pm 53,8 \text{ kHz}$ . (DASCAL et al., 2013, apud RODRIGUEZ, 2016)

### 2.2.3.5 TIPOS DE TRANSCÉPTORES

Existem dois tipos de transceptores: analógico e digital. Os analógicos são os rádios frequentemente encontrados em estações radioamadoras. Os transceptores digitais possuem

mais componentes virtuais do que reais, ganhando mais capacidade operacional e diminuindo o custo do equipamento. (RODRIGUEZ, 2016)

#### 2.2.4 MODEM

O modem de uma ERS corresponde à interface entre o transceptor e o computador, ou seja, entre o digital e o analógico. (RODRÍGUEZ, 2011, apud RODRIGUEZ, 2016)

O modem tem o objetivo de transmitir informação elétrica (em uma onda denominada portadora) com a menor potência possível; menor distorção possível, e com facilidade de recuperar o sinal original, esse processo é chamado de modulação. A demodulação é o processo de recuperação do sinal transmitido. (CAMPOS et al., 2016, apud RODRIGUEZ, 2016)

Existem dois tipos de modem: os desenvolvidos em *hardware* e os desenvolvidos em *software*. Em alguns casos, o transceptor e modem convertem-se em um único equipamento. (RODRIGUEZ, 2016)

#### 2.2.5 SOFTWARE E INTERFACE DE USUÁRIO

De acordo com Rodriguez (2016) existem três tipos diferentes de softwares em estações terrenas, cada um desempenhando funções específicas, são eles:

- *Software* para rastreamento: são *softwares* que identificam a posição inicial e final do satélite, dentre eles: Gsat/Predict, Orbitron, NOVA/SatScape;
- *Software* para controle e gerenciamento: são *softwares* que permitem controlar a estação antes, durante e depois da passada do satélite. Geralmente são desenvolvidos pelo proprietário da estação. Exemplos: Plan 73 do radioamador PY2SDR e o ROTOR CONTROL *SOFTWARE*, com a finalidade de controlar o rotor da antena;
- *Software* de rádio: esses *softwares* executam funções de tratamento de sinais, permitindo a recepção de qualquer tipo de taxa de transmissão de dados (analógico e digital). Permitem também a correção de erros e decodificação das informações provenientes dos sinais. Também desenvolvidos pelo serviço radioamador, alguns exemplos são: BAYCOM 1.6 para MS-DOS, AWG *Packet Engine*, KISS *Console* para MS-Windows.

## 2.2.6 ESTRUTURA DE SUPORTE DA ESTAÇÃO

Entende-se por estrutura da estação o ambiente interno e externo da estação e depende das características funcionais, ou seja, quais serviços serão prestados, se a estação é fixa ou móvel, por exemplo. Se a estação for fixa, precisa-se pensar na instalação da antena e do controle da mesma, se a estação for móvel, o controle do sistema irradiante muito provavelmente poderá ser feito de forma manual. (RODRIGUEZ, 2016)

## 3 O LABORATÓRIO DE RÁDIO PROPAGAÇÃO

O Laboratório de Rádio Propagação (LARP) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFCG é um laboratório de pesquisa e ensino na área de radio propagação, onde a estação radioamadora PR7DEE funciona sob a coordenação do prof. Rômulo Valle tendo a autorização da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

No item 3.1 do presente documento alguns equipamentos existentes no LARP serão apresentados e em sequência, no item 3.2, são expostos os subsistemas que precisam ser desenvolvidos para se ter uma Estação de Rastreamento de Satélite completa.

### 3.1 EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS NO LARP

Além de computadores, há disponível no LARP um analisador de ROE, modelo MFJ-269, que pode ser visto na Figura 3.1. Além da ROE ele também analisa a atenuação no cabo coaxial, capacitância e indutância do sistema e tem uma entrada para frequencímetro, para ser utilizado em conjunto com o analisador. Pode ser usado para as frequências HF/VHF/UHF.

No LARP também pode-se encontrar um rotor e seu controlador da YAESU, modelo G-1000DXA, cujas as partes podem ser vistas nas Figura 3.2 e Figura 3.3. O conjunto de controlador de posição de antenas da YAESU serve para o deslocamento em uma das grandezas: elevação ou azimute.

Figura 3.1: Analisador de ROE.



Fonte: Autora.

Figura 3.2: Rotor do conjunto G-1000DXA da YAESU.



Fonte: Autora.

Figura 3.3: Controlador do rotor do conjunto G-1000DXA da YAESU.



Fonte: Autora.

### 3.1.1 TRANSMISSORES E RECEPTORES DE RF

Para recepção e transmissão de sinais, o LARP conta com três equipamentos: dois transceptores e um receptor, todos da ICOM. O transceptor mais simples é o IC-7200 que atua nas bandas HF e 50 MHz, o segundo transceptor é o IC-9100 que atua nas bandas MF, HF, VHF e UHF e o receptor IC-R9500, cobre a banda de 0,005 a 3335 MHz, os equipamentos podem ser vistos nas Figuras a seguir.

Figura 3.4: Transceptor IC-7200.



Fonte: Site da ICOM.

Figura 3.5: Transceptor IC-9100.



Fonte: Site da ICOM.

Figura 3.6: Receptor IC-R9500.



Fonte: Autora.

## 3.2 SUBSISTEMAS A SEREM DESENVOLVIDOS

Com visto no tópico 2.2 para ter uma Estação de Rastreamento de Satélite completa precisa-se de aproximadamente seis subsistemas: sistema irradiante, controle da antena, transceptor RF, modem, *softwares* e interface de usuário.

No item anterior foi feito um levantamento dos equipamentos já existentes no LARP, que constituem a estação radioamadora PR7DEE. Fazendo a comparação dos subsistemas

necessários para a composição de uma ERS com os subsistemas disponíveis no laboratório constatou-se que era necessário desenvolver as seguintes atividades:

- Projeto e montagem do sistema irradiante;
- Possibilitar que o controle do rotor G-1000DXA da YAESU seja feito de forma digital e que a grandeza de elevação possa ser controlada;
- Instalar uma torre como suporte para antena, de preferência com base giratória, para que a grandeza azimute possa ser ajustada;
- Fazer a conexão receptor-computador para que o sinal recebido seja digitalizado e decodificado com auxílio de *softwares*.

## 4 ESCOLHA DOS SATÉLITES E DEFINIÇÃO DAS BANDAS DE FREQUÊNCIA

Pensou-se inicialmente em rastrear um ou mais satélites do tipo *CubeSat* de origem brasileira, mas o único satélite que estava ativo quando esta pesquisa foi iniciada era o NanosatC-BR1, podendo ser rastreado apenas quando o mesmo estiver sob a luz do Sol o que dificulta seu rastreamento.

Os nanossatélites AO-73 e AO-85 foram recomendados por radioamadores mais experientes, pois os mesmos são rastreados com maior facilidade no Brasil. Os dois nanossatélites têm a frequência de *downlink* próximo de 145 MHz e mais detalhes deles podem ser vistos nos itens 4.1 e 4.2 do presente documento.

Além dos nanossatélites AO-73 e AO-85, outros satélites que transmitem nas frequências de radioamadorismo, que passam próximo ao céu de Campina Grande/PB, com a frequência de *downlink* próxima de 145 MHz, encontram-se listados no Apêndice A.

### 4.1 FUNCUBE-1 (AO-73)

O FUNcube-1, também conhecido como AO-73, é um *CubeSat* de 1U construído e lançado com a colaboração de AMSAT-UK, AMSAT-NL e ISIS-BV, (AMSAT-NA, entre 2013 e 2018), foi lançado com sucesso da Rússia em 21 de novembro de 2013 e continua a ter um bom desempenho no espaço. (SHIRVILLE, entre 2014 e 2018)

O FUNcube-1 está em órbita terrestre baixa, a aproximadamente 630 km acima da Terra. Em tal órbita, um satélite passa pela maioria dos locais aproximadamente 6 vezes por dia. (SHIRVILLE, entre 2014 e 2018)

As características do satélite podem ser encontradas no site da AMSAT-NA<sup>2</sup> e estão descritas a seguir:

- Telemetria BPSK de 145,935 MHz 30 mW (eclipse) ou 300 mW (iluminada);
- Transponder inversor SSB/CW 300 mW PEP (eclipse);
- *Uplink* 435,150 – 435,130 MHz;
- *Downlink* 145,950 – 145,970 MHz.

## 4.2 FOX-1A (AO-85)

O AO-85 (ou FOX-1A) é o um *CubeSat* 1U, da AMSAT, lançado em 8 de outubro de 2015, na Califórnia que tem um repetidor U/V FM operando com sinais de até 880 mW. Além das operações amadoras, há uma série de experimentos científicos a bordo da espaçonave, como um experimento de radiação de prótons de baixa energia. (AMSAT, entre 2015 e 2018)

As características do satélite podem ser encontradas no site da AMSAT e estão descritas a seguir:

- *Uplink* 435,172 MHz;
- *Downlink* 145,980 MHz.

## 5 PROJETO DO SISTEMA IRRADIANTE

Alguns modelos de antenas mais usadas para rastreamento de satélite foram expostos no item 2.2.1.2, para compor a Estação de Rastreamento de Satélite do DEE. O sistema irradiante escolhido para ser projetado foi o arranjo de antenas Yagi-Uda Cruzadas, por ter uma construção mais simples do que a antena helicoidal quadrifilar, apresentar um ganho considerável e possibilitar a polarização circular.

Apesar dos satélites escolhidos serem de órbita baixa, não necessitando que o sistema irradiante tenha um ganho muito alto, espera-se que a antena apresente um ganho relativo a um dipolo de meia onda de pelo menos 9,2 dBd (de acordo com a Tabela 5.1). Como exposto anteriormente, é interessante que o sistema irradiante de uma ERS tenha a polarização

---

<sup>2</sup> AMSAT-NA, disponível em: <https://www.amsat.org/>. Acessado em: 27 de julho de 2018.



circular, podendo receber o sinal do satélite, que pudesse estar polarizado linearmente ou circularmente.

Nos próximos itens deste capítulo serão expostos o modelo escolhido para a antena, a norma que foi usada para o projeto, o software para a simulação e os resultados obtidos.

## 5.1 A ANTENA YAGI-UDA CRUZADA

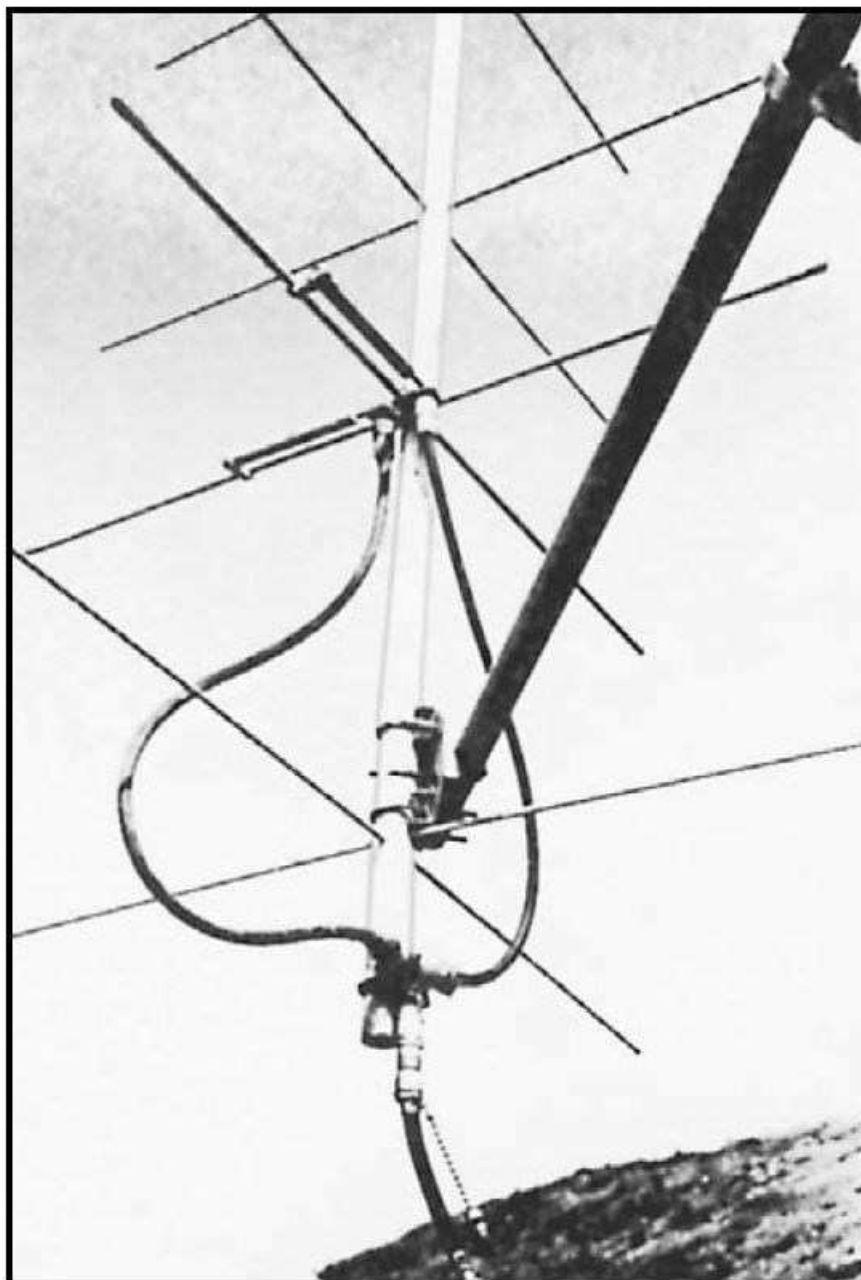
A antena Yagi-Uda cruzada, como o nome sugere, é um conjunto de duas antenas Yagi-Uda cruzadas espacialmente em  $90^\circ$  e um modelo desenvolvido pelo radioamador KH6IJ pode ser visto na Figura 5.1.

Há duas formas de montagem de uma antena Yagi cruzada, a coplanar e a deslocada de  $1/4\lambda$  uma da outra. A defasagem de  $1/4\lambda$  é necessária para que se tenha uma polarização circular, pois uma das antenas tem polarização linear vertical e a outra polarização linear horizontal. (JANSSON, 2007)

Na montagem de uma antena Yagi cruzada coplanar a defasagem se faz na alimentação das mesmas, sendo que o cabo coaxial que alimenta uma das antenas deve ter seu comprimento  $1/4\lambda$  maior do que o cabo coaxial que alimenta a outra. (JANSSON, 2007)

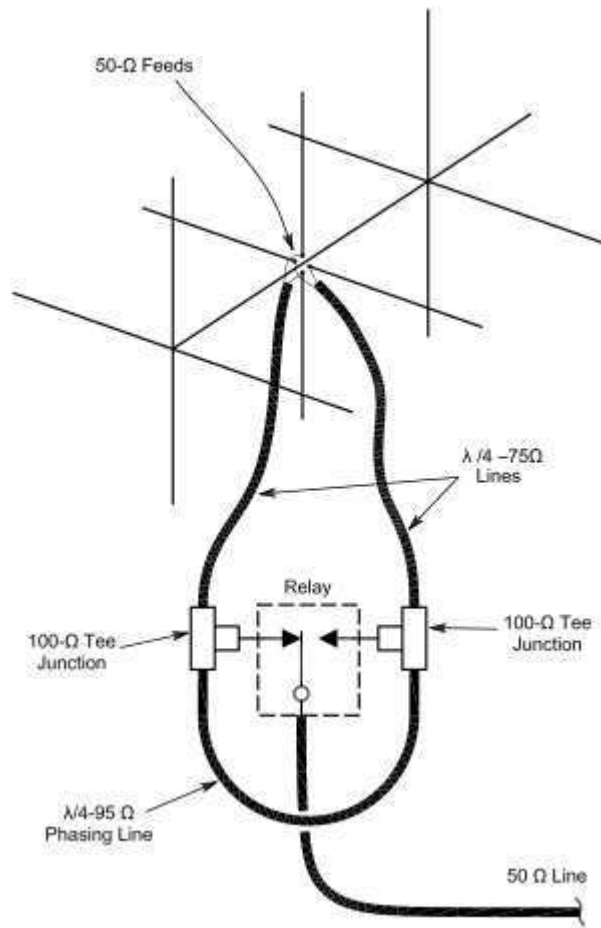
Exemplos de montagens de antena Yagi cruzada coplanar e deslocada podem ser vistos nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente.

Figura 5.1: Antena Yagi-Uda cruzada coplanar com gamma-match.



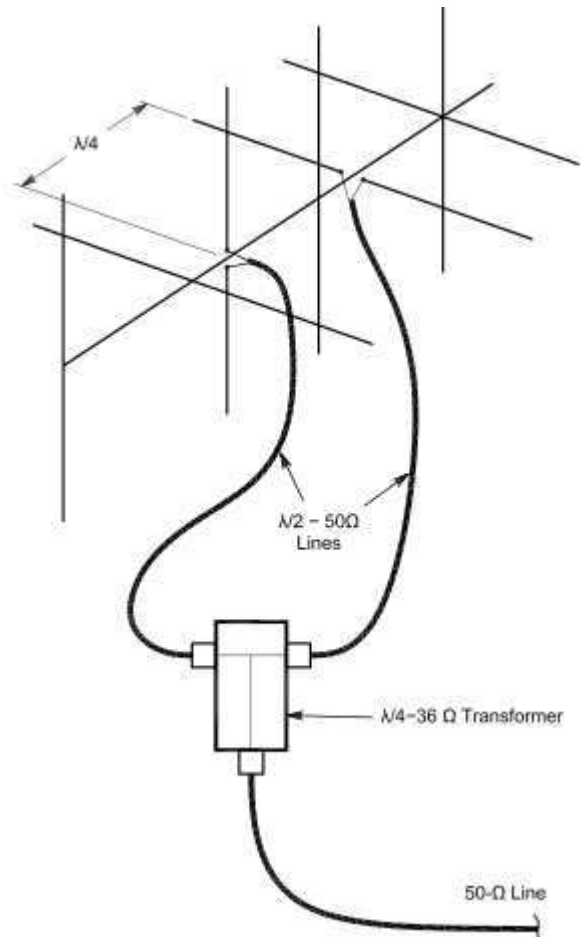
Fonte: Jansson (2007).

Figura 5.2: Antena Yagi cruzada coplanar, com polarização circular comutável.



Fonte: Jansson (2007).

Figura 5.3: Antena Yagi cruzada deslocada, com polarização circular fixa.



Fonte: Jansson (2007).

## 5.2 NORMA TÉCNICA NBS 688

A norma técnica utilizada para o projeto da antena foi a norma NBS 688, escrita por Peter P. Viezbicke, resultado de várias medições feitas pelo *National Bureau of Standards* (NBS/EUA), representados na norma em tabelas e gráficos. Para facilitar o dimensionamento dos elementos de uma antena Yagi-Uda é possível usar tabelas e gráficos. (VIEZBICKE, 1976)

Com o auxílio da Tabela 5.1 é possível realizar os cálculos necessários para o dimensionamento de uma antena Yagi-Uda. A razão  $d/\lambda$  que é um dos parâmetros do projeto é sugerido ser 0,0085, onde  $d$  é o diâmetro da seção transversal dos elemento e o  $s = 0,2\lambda$ , sendo  $s$  o espaçamento entre o elemento ativo e o refletor. Para razões  $d/\lambda$  diferentes de 0,0085 há gráficos para auxiliar no dimensionamento da antena.

Tabela 5.1: Comprimentos dos elementos parasitas para antenas Yagi para cinco diferentes tamanhos de antenas.

$\frac{d}{\lambda} = 0,0085$		Comprimento da antena, $\lambda$				
		0,4	0,8	1,2	2,2	4,2
$s = 0,2\lambda$						
Comprimento do refletor, $\lambda$		0,482	0,482	0,482	0,482	0,475
Comprimento dos refletores, $\lambda$	R <sub>1</sub>	0,424	0,428	0,428	0,432	0,424
	R <sub>2</sub>		0,424	0,420	0,415	0,424
	R <sub>3</sub>		0,428	0,420	0,407	0,420
	R <sub>4</sub>			0,428	0,398	0,407
	R <sub>5</sub>				0,390	0,403
	R <sub>6</sub>				0,390	0,398
	R <sub>7</sub>				0,390	0,394
	R <sub>8</sub>				0,390	0,390
	R <sub>9</sub>				0,398	0,390
	R <sub>10</sub>				0,407	0,390
	R <sub>11</sub>					0,390
	R <sub>12</sub>					0,390
	R <sub>13</sub>					0,390

Tabela 5.1: Comprimentos dos elementos parasitas para antenas Yagi para seis diferentes tamanhos de antenas. (Continuação)

Espaçamento entre os diretores, $\lambda$	0,2	0,2	0,25	0,2	0,2	0,308
Ganho relativo a um dipolo de meia onda, dB	7,1	9,2	10,2	12,25	13,4	14,2

Fonte: VIEZBICKE (1976).

### 5.3 FREQUÊNCIA CENTRAL E DIMENSIONAMENTO DA ANTENA

O dimensionamento de uma antena é baseado no comprimento de onda da frequência central em que a antena será operada. Para o caso da ERS do DEE, a frequência de operação da antena será 145 MHz, sendo assim, seu comprimento de onda é aproximadamente 2,069 m.

Para o projeto da antena Yagi-Uda de 5 elementos, usou-se a Tabela 5.1, resultando nos dados da Tabela 5.2. O comprimento do elemento ativo foi obtido usando a média aritmética do comprimento do refletor e do comprimento do primeiro diretor.

Tabela 5.2: Dimensões elementos da antena Yagi-Uda de acordo com a Tabela 5.1.

Diâmetro dos elementos, $d$	$d = 0,0085\lambda = 0,0085 \cdot 2,069 = 17,58 \text{ mm}$
Elemento refletor, $L_R$	$0,482\lambda = 0,482 \cdot 2,069 \cong 997,26 \text{ mm}$
Diretores 1 e 3, $L_{D1}, L_{D3}$	$0,428\lambda = 0,428 \cdot 2,069 \cong 885,53 \text{ mm}$
Diretor 2, $L_{D2}$	$0,424\lambda = 0,424 \cdot 2,069 \cong 877,26 \text{ mm}$
Elemento ativo, $L_A$	$\frac{997,26 + 885,53}{2} \cong 941,40 \text{ mm}$
Espaçamento entre os elementos, $s$	$0,2\lambda = 0,2 \cdot 2,069 = 413,8 \text{ mm}$
Comprimento da antena	$0,8\lambda = 0,8 \cdot 2,069 \cong 1,66 \text{ m}$

Observa-se que pela norma o diâmetro da seção transversal dos elementos tem que ser 17,58 mm para que as medidas calculadas sejam válidas. No entanto, o diâmetro para os elementos encontrados no mercado local foi de 9,8 mm, sendo necessário o uso dos gráficos presentes no Anexo A para um novo dimensionamento da antena. O comprimento dos elementos depende também do diâmetro da seção transversal da estrutura central da antena, que é o que sustenta os elementos.

Dados da antena:

Frequência 145 MHz,  $\lambda \cong 2,069 \text{ m}$ .

Diâmetro dos elementos,  $d = 9,8 \text{ mm}$ .

$$\frac{d}{\lambda} \cong 0,0047$$

Diâmetro da estrutura central,  $D_E = 38,2 \text{ mm}$ .

$$\frac{D_E}{\lambda} \cong 0,0185$$

Espaçamento entre os elementos,  $s = 0,2\lambda = 0,2 \cdot 2,06 = 413,8 \text{ mm}$ .

Comprimento da antena =  $0,8\lambda = 0,8 \cdot 2,069 \cong 1,66 \text{ m}$ .

Passo 1: No gráfico da Figura 9 da norma NBS 688 (encontrada no Anexo A do presente documento) plotou-se os pontos referentes a Tabela 5.1, para uma antena de comprimento  $0,8\lambda$ :

$$L_R = 0,482\lambda.$$

$$L_{D1} = L_{D3} = 0,428\lambda.$$

$$L_{D3} = 0,424\lambda.$$

Esses serão os pontos de referência para as dimensões da nova antena.

Passo 2: Para a nova razão  $\frac{d}{\lambda} = \frac{9,8 \cdot 10^{-3}}{2,069} \cong 0,0047$ , plotou-se e foram encontrados na Figura 9 da norma NBS 688 (encontrada também no Anexo A do presente documento) os novos tamanhos para o refletor e os primeiro e terceiro diretores. O comprimento do elemento ativo foi calculado fazendo a média aritmética dos comprimentos do refletor e do primeiro diretor.

$$L_R' = 0,484\lambda.$$

$$L_{D1}' = L_{D3}' = 0,44\lambda.$$

$$L_A' = \frac{L_R' + L_{D1}'}{2} = \frac{0,484\lambda + 0,44\lambda}{2} = 0,462\lambda.$$

Passo 3: Com o auxílio de um compasso pegou-se a distância entre os pontos  $L_{D1}$  e  $L_{D3}$ , centrado o compasso no novo ponto  $L_{D1}'$  e cruzando com a linha de referência o novo ponto  $L_{D2}'$  foi encontrado, sendo o mesmo igual a:

$$L_{D2}' = 0,436\lambda.$$

Passo 4: Após ter encontrado os novos comprimentos para os elementos, tem-se ainda que levar em conta o diâmetro da seção transversal da estrutura central da antena. Para a razão  $\frac{D_E}{\lambda} = 0,0185$ , encontra-se na Figura 10 da norma NBS 688 (encontrada também no Anexo A do presente documento) a proporção em que os elementos devem ser acrescidos:  $+0,013\lambda$ .

Passo 5: Portanto os elementos da antena de acordo com os novos ajustes podem ser encontrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Dimensões elementos da antena Yagi-Uda depois dos devidos ajustes.

Frequência de uso	145 MHz
Comprimento de onda, $\lambda$	2,069
Diâmetro dos elementos, $d$	9,8 mm
Diâmetro do elemento central, $D_E$	38,2 mm
Elemento refletor, $L_R$	$0,484\lambda + 0,013\lambda = 0,497\lambda \cong 1028,3 \text{ mm}$
Diretores 1 e 3, $L_{D1}, L_{D3}$	$0,44\lambda + 0,013\lambda = 0,453\lambda \cong 937,3 \text{ mm}$
Diretor 2, $L_{D2}$	$0,436\lambda + 0,013\lambda = 0,449\lambda \cong 929,0 \text{ mm}$
Elemento ativo, $L_A$	$0,462\lambda + 0,013\lambda = 0,475\lambda \cong 982,8 \text{ mm}$
Espaçamento entre os elementos, $s$	$0,2\lambda = 0,2 \cdot 2,069 = 413,8 \text{ mm}$
Comprimento da antena	$0,8\lambda = 0,8 \cdot 2,069 \cong 1,66 \text{ m}$

## 5.4 O SOFTWARE CST

O CST Studio Suite® é um *software* da empresa SIMULIA que tem um pacote de ferramentas para desenhar, simular e otimizar sistemas eletromagnéticos (EM). É possível simular campos EM em todo espectro em uma única interface de usuário, executando simulações híbridas, dando aos engenheiros a flexibilidade de analisar sistemas inteiros com múltiplos componentes de maneira eficiente e direta. (CST, 2018)

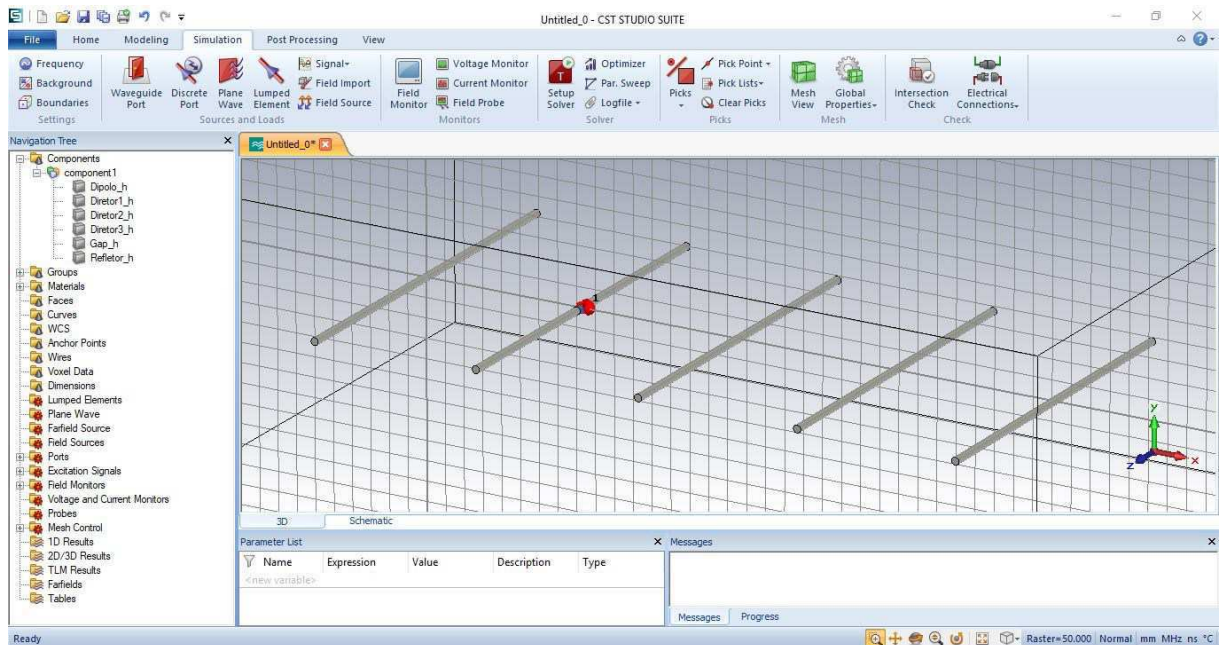
As análises de sistemas EM incluem geralmente o desempenho, a eficiência de antenas e filtros instalados, compatibilidade e interferência eletromagnética (EMC/EMI), exposição do corpo humano a campos, efeitos eletromecânicos em motores e geradores, e efeitos térmicos em dispositivos de alta potência. (CST, 2018)

O CST Studio Suite® é muito utilizado em empresas de alto padrão de tecnologia e engenharia do mundo. (CST, 2018)

## 5.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para a simulação do sistema irradiante foi considerada apenas uma das antenas e o elemento central foi desconsiderado, reduzindo assim o comprimento dos elementos em  $0,013\lambda$ . Na Figura 5.4 pode-se ver a janela do CST e o projeto da antena.

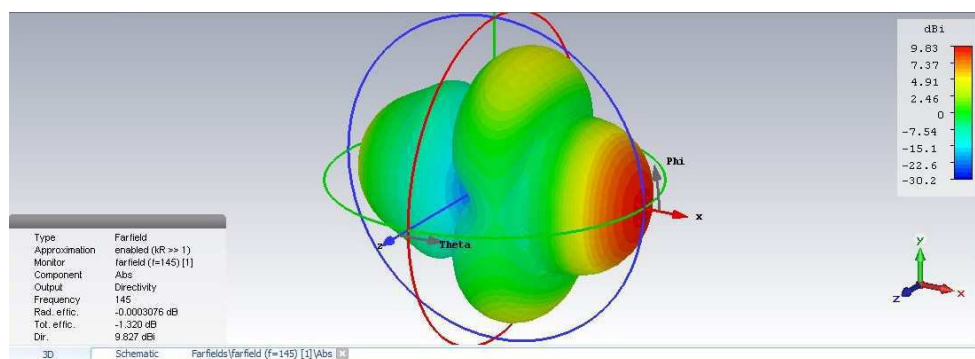
Figura 5.4: Imagem da janela do CST e do projeto de uma das antenas.



Fonte: Autora.

Observando os resultados apresentados nas Figura 5.5 e Figura 5.6, percebe-se que o diagrama de irradiação na frequência central (145 MHz) apresenta uma boa diretividade com valor de ganho 9,83 dBi (ou 7,69 dBd). A relação frente-costa apresenta um valor de aproximadamente 5 dB.

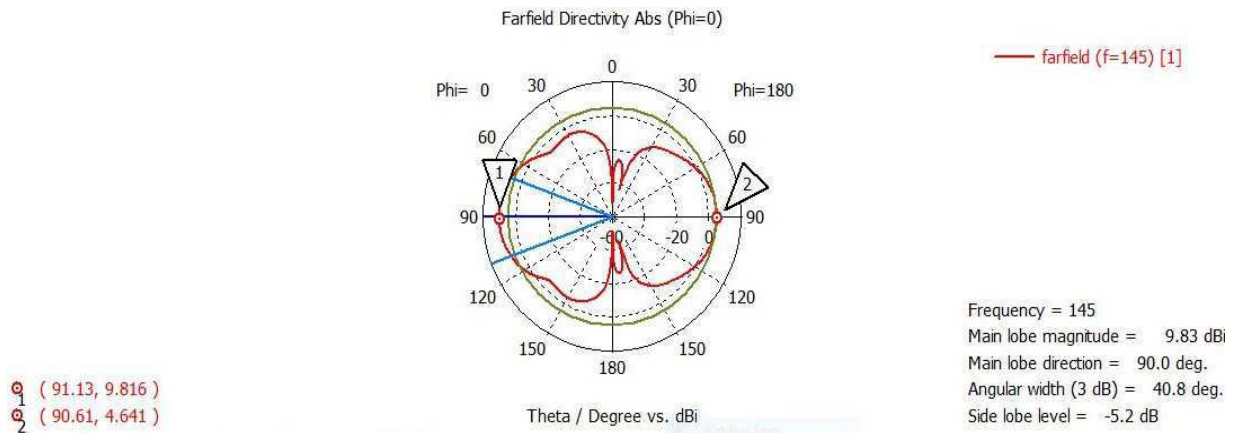
Figura 5.5: Diagrama de irradiação em 3D.



Fonte: Autora.



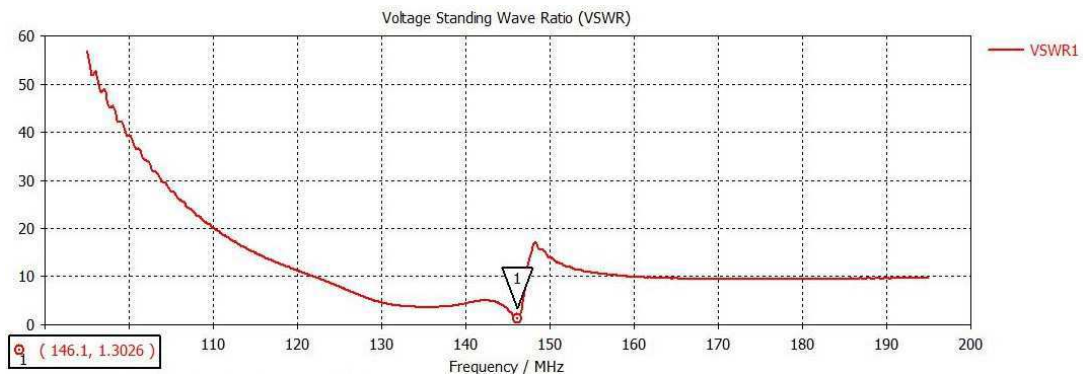
Figura 5.6: Diagrama de irradiação em 2D.



Fonte: Autora.

A ROE dada em termos da tensão é apresentada no gráfico da Figura 5.7, que mostra um valor menor que 1,5, adequado para o objetivo a ser desenvolvido pela antena.

Figura 5.7: Gráfico do VSWR.



Fonte: Autora.

## 6 MONTAGEM DO SISTEMA IRRADIANTE

Os elementos que compõem o sistema irradiante são de alumínio, inclusive a estrutura central. Para o refletor, elemento ativo e os diretores foram comprados varetas de diâmetro externo de 9,8 mm e o elemento central com seção transversal quadrada com uma aresta de 38,2 mm.

Primeiramente as varetas foram cortadas para os tamanhos dimensionados de acordo com a Tabela 5.3, sendo dois componentes para cada elemento projetado da antena. Nas Figura 6.1 e Figura 6.2 podem ser vistas as varetas sendo cortadas e as mesmas depois do corte, respectivamente.

Figura 6.1: Processo de corte dos elementos da antena.



Foto: Autora.

Figura 6.2: Elementos da antena já cortados.



Foto: Autora.

O próximo processo foi o de furação do elemento central ou gôndola, para o encaixe das varetas, na Figura 6.3 pode ser visto o trabalho sendo executado pelo técnico da oficina do DEE e na Figura 6.4 o elemento já com os furos.

Figura 6.3: Furação do elemento central da antena.



Foto: Autora.

Figura 6.4: Elemento central da antena com os furos.



Foto: Autora.

A fixação dos elementos na gôndola foi feita com anéis de silicone e o mesmo material foi utilizado para a isolamento do elemento ativo. Nas Figura 6.5 e Figura 6.6 podem ser acompanhadas algumas etapas desse processo, na Figura 6.7 pode-se ver a estrutura da antena quase completa, faltando apenas o elemento ativo.

Figura 6.5: Elementos de uma das antenas devidamente encaixados.



Foto: Autora.

Figura 6.6: Ajuste dos anéis de silicone para fixação.



Foto: Joaquim.

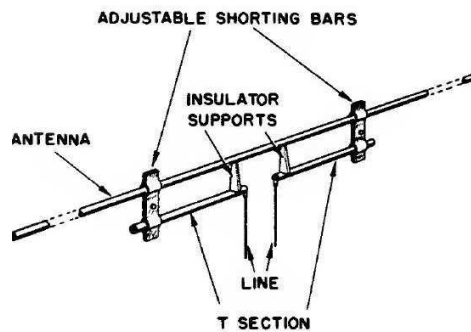
Figura 6.7: Antena Yagi Cruzada sem o elemento ativo.



Foto: Autora.

Para a construção do elemento ativo precisa-se construir um casador de impedância que no caso foi escolhido o T-Match, e o modelo do mesmo pode ser visto na Figura 6.8.

Figura 6.8: Casador de impedância T-Match.



Fonte: Department of the ARMY (1953).

Para a construção do T foram cortados varetas de aproximadamente 300 mm e suas pontas amassadas e furadas com furos de 4 mm para receber a alimentação da antena, como pode ser visto na Figura 6.9, além das varetas foram feitas barras que pudessem ser ajustáveis fechando o circuito com o elemento ativo, o conjunto T-Match com o elemento ativo já instalado na antena pode ser visto na Figura 6.10. A estrutura da antena totalmente montada pode ser vista na Figura 6.11.

Figura 6.9: Furo para alimentação da antena.



Foto: Autora.

Figura 6.10: T-Match montado.



Foto: Autora.

Figura 6.11: Estrutura física da antena.



Foto: Ricardo.

A próxima etapa consiste na parte da alimentação da antena, antes de fazer os cortes dos cabos é necessário lembrar que existe o fator da velocidade de propagação do cabo e esse fator geralmente é 0,66. Sendo o fator de propagação ( $fp$ ) dado pela equação (6.1) e como o cabo coaxial é considerado material não magnético ( $\mu_r \cong 1$ ), então a equação (6.1) torna-se (6.2). Sendo o  $fp = 0,66$ , então  $\epsilon_r \cong 2,3$ .

$$fp = \frac{v_p}{c} = \frac{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}}{c} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (6.1)$$

$$fp = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.2)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{fp^2} = \frac{1}{0,66^2} \cong 2,30 \quad (6.3)$$

Cada antena precisa de um balun de meio comprimento de onda para que haja uma defasagem de  $180^\circ$  entre os elementos ativos, a construção deve ficar parecida com a Figura 6.12.

Figura 6.12: Detalhe de um balun.



Fonte: DL6WU (201?).

Para um balun de meio comprimento de onda, tem-se então:  $\frac{\lambda}{2} \cdot fp = \frac{2,069}{2} \cdot 0,66 \cong 68,28 \text{ cm}$ .

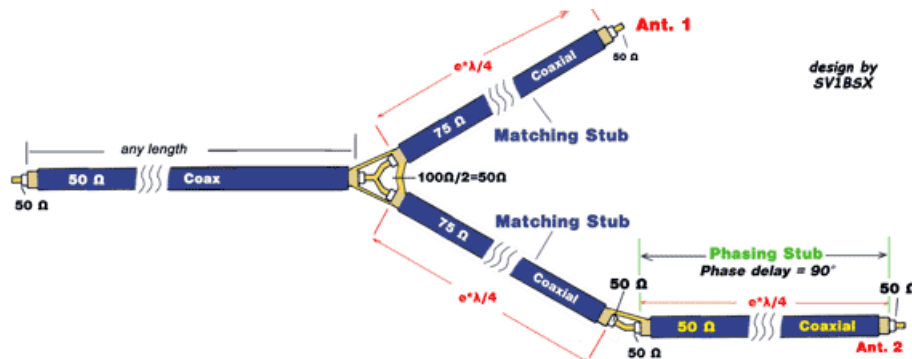
Para a alimentação do conjunto de antenas é necessária uma defasagem de  $90^\circ$  (ou  $\frac{1}{4}$  de onda) entre as antenas, havendo a possibilidade de uma polarização circular, a defasagem, como já relatada neste documento, pode ser feita com as antenas deslocadas entre elas ou por

meio dos cabos coaxiais. Como o projeto do conjunto de antenas escolhido foi o de antenas coplanares, então a defasagem foi feita com os cabos. Do receptor para a antenna precisa-se um cabo de 50 Ω, o sinal neste cabo é dividido por meio de um T para as antenas, do T para a alimentação da 1ª antenna, usa-se um cabo de 75 Ω, do T para a alimentação da 2ª antenna, precisa-se de um cabo de 75 Ω do mesmo comprimento para a alimentação da 1ª antenna com a adição de um cabo de 50 Ω de comprimento de ¼ de onda. Esse esquema pode ser entendido melhor visualizando a Figura 6.13.

O comprimento da defasagem de ¼ de onda do cabo é metade do comprimento do balun, portanto  $\frac{68,28}{2} \cong 34,14 \text{ cm}$ .

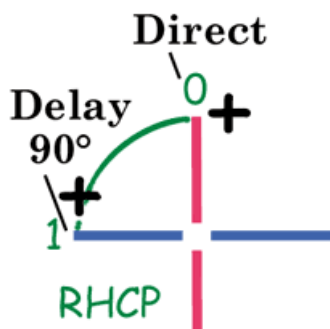
O esquema de ligação nas antenas segue a indicação das Figura 6.14 e Figura 6.15 para polarização circular do lado direito (*Right Hand Circular Polarization – RHCP*).

Figura 6.13: Alimentação das antenas desde o receptor.



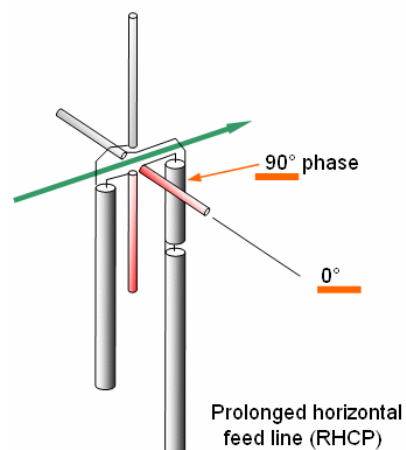
Fonte: SV1BSX (2006).

Figura 6.14: Esquema de ligação do conjunto de antenas, visão traseira.



Fonte: SV1BSX (2006).

Figura 6.15: Detalhe de ligação do cabos para alimentação das antenas.



Fonte: DG7YBN (2017).

Nas figuras 6.16, 6.17 e 6.18 pode ver o processo de montagem da fiação das antenas.

Figura 6.16: Soldagem dos cabos.



Foto: Autora.

Figura 6.17: Terminais soldados e parafusados.

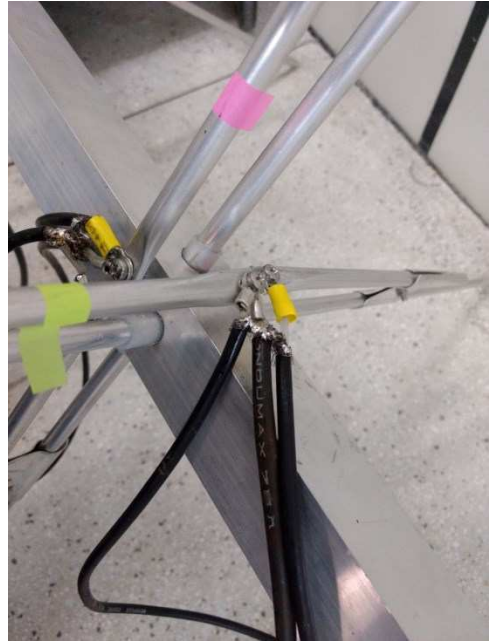


Foto: Autora.

Figura 6.18: Construção da alimentação da antena pronta.

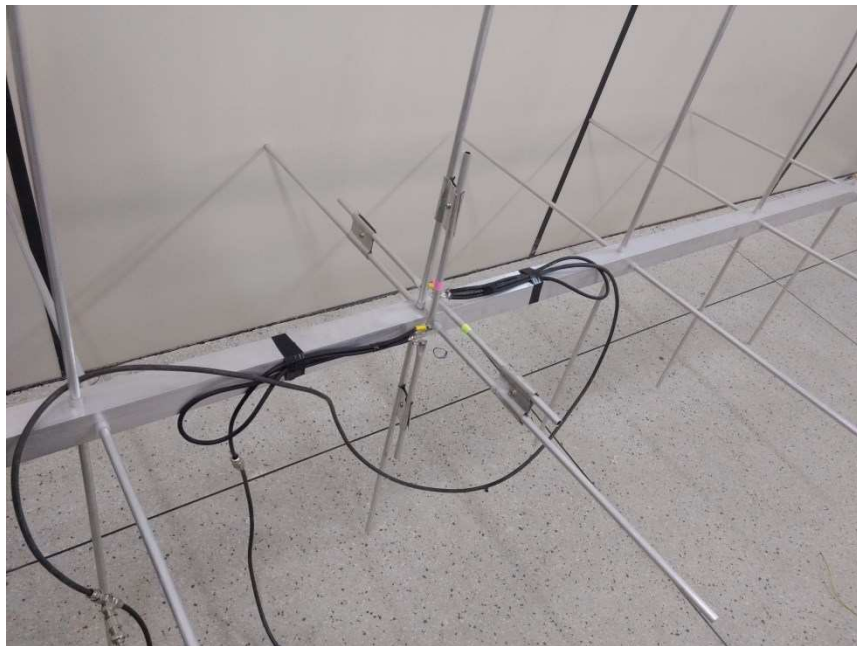


Foto: Autora.



## 6.1 TESTES E RESULTADOS DO SISTEMA IRRADIANTE

Os testes que foram feitos na antena montada foi de ROE e impedância usando o analisador de ROE do LARP.

O menor resultado obtido da ROE foi de 2,6 com uma impedância de entrada da antena de  $z = |73 + j62| \cong 95,78 \Omega$ , para uma frequência de 133,58 MHz.

Para a frequência de 145 MHz a menor ROE encontrada foi de 10 com uma impedância de  $z = |3 + j25| \cong 25,18 \Omega$ .

Os resultados dos testes não foram os esperados, a ROE está muito elevada e a impedância distante do valor que se gostaria, 50  $\Omega$ . Precisa-se analisar a qualidade dos cabos, as condições das soldas e fazer a calibração usando o T-Match para que haja o casamento de impedância e assim para que testes futuros de recepção de sinal possam ser feitos.

## 7 CONCLUSÕES

### 7.1 OBJETIVOS ATENDIDOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresentou, como descrito no objetivo geral aprofundar o conhecimento das técnicas de telecomunicações via satélite utilizando o espaço do Laboratório de Rádio Propagação do DEE (LARP) e assim projetar e implementar uma Estação de Rastreamento de Satélite (ERS). Pode-se afirmar que os conhecimentos foram desenvolvidos, pois houve uma pesquisa de qualidade na área de rastreamento de satélite; o projeto e implementação do sistema irradiante precisa ser otimizado, e as outras etapas deverão ser realizadas futuramente.

Entre os objetivos específicos atribuídos a este documento estão: escolha do satélite a ser rastreado; definição da banda de frequência; projeto do sistema irradiante; escolha dos *softwares* e testes do sistema. Dentre os objetivos específicos foram atendidos a escolha do satélite e a banda de frequência a ser trabalhada, detalhes no Capítulo 4; o projeto e implementação do sistema irradiante também foram atendidos nos Capítulos 5 e 6 onde foram apresentados os detalhes de projeto, montagem e suas análises; as próximas etapas consistem na escolhas dos *softwares* e testes do sistema completo que ficarão para trabalhos futuros.

## 7.2 LIMITAÇÕES

As maiores limitações encontradas foram na parte de montagem da ERS, por exemplo, os detalhes da montagem do sistema irradiante foram mais fáceis de encontrar em sites de radioamadores do que em sites mais científicos.

Alguns equipamentos, como o rotor do LARP, precisa de uma interface para se comunicar com o computador, uma alternativa encontrada foi usando Arduino para fazer o trabalho da mesma, ainda não está funcional.

## 7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A antena precisa de otimização, pois os resultados não foram os esperados, melhorando o casamento de impedância e reduzindo a ROE para que possam ser feitos testes futuros de recepção do sinal do satélite. Sugere-se testar o modo de alimentação deslocado fisicamente, para simplificar a montagem dos balluns e dos T-Match. Pode-se projetar também uma antena planar na banda de 2 m.

No LARP há um rotor e seu controlador manual modelo G-1000DXA da YAESU, lendo o manual do mesmo é possível verificar que há a necessidade de uma interface, GS-232A também da YAESU, para fazer a interação do rotor com o computador. A sugestão é que essa interface pudesse ser feita por Arduino. O aluno do curso de Engenharia Elétrica, Adriel Nascimento, está sendo o responsável por essa etapa, apesar de avanços no *software*, ainda não foi obtido sucesso, pois o computador não reconheceu o Arduino como a interface.

O receptor IC-R9500 foi o equipamento escolhido para fazer a recepção do sinal, principalmente pelo fato de abranger um grande espectro de frequência e de ter uma saída para conexão com o computador, excluindo a necessidade de um modem. A etapa de interação receptor-computador também precisa ser desenvolvida.

Além das etapas citadas anteriormente, precisa-se executar a instalação de uma torre de base giratória, local onde a antena será instalada.

## 8 REFERÊNCIAS

AMSAT. **AO-85 (FOX-1A)**. AMSAT - Amateur Radio in Space, entre 2015 e 2018. Disponível em: <<https://www.amsat.org/two-way-satellites/ao-85-fox-1a/>>. Acesso em: 4 Dezembro 2018.

AMSAT-NA. **AO-73 (FUNcube-1)**. AMSAT-NA - The Radio Amateur Satellite Corporation, entre 2013 e 2018. Disponível em: <<https://www.amsat.org/two-way-satellites/ao-73-funcube-1/>>. Acesso em: 27 Julho 2018.

ANATEL. **Resolução nº 697, de 28 de agosto de 2018**. ANATEL, 29 Agosto 2018. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/en/resolucoes/2018/1157-resolucao-697>>. Acesso em: 20 Dezembro 2018. Última atualização: Sexta, 31 de Agosto de 2018.

AURÉLIO. **Significado de Satélite**. Dicionário do Aurélio, 19 Abril 2018. Disponível em: <<https://dicionariodoaurelio.com/satelite>>. Acesso em: 17 Maio 2018.

BALANIS, C. A. **Teoria de antenas: análise e síntese**. Tradução de J. R. Souza. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2009. revisão Silvio Ernesto Barbin, J. R. Souza. Tradução de: Antenna theory: analysis and design, 3rd ed.

CST. **CST Studio Suite**. CST - Computer Simulation Technology, 2018. Disponível em: <<https://www.cst.com/products/csts2>>. Acesso em: 7 Dezembro 2018.

CUBESAT. **CubeSat Design Specification Rev. 13**. California Polytechnic State University. [S.l.]. 2015.

CUBESAT. **6U CubeSat Design Specification Rev. Provisional**. California Polytechnic State University. [S.l.]. 2016.

DEPARTMENT OF THE ARMY. **TM 11-666: Antennas and Radio Propagation**. ARMY. Washington. 1953.

DG7YBN. **xpol Yagis**. DG7YBN, 18 Dezembro 2017. Disponível em: <<http://dg7ybn.de/Building/xpol.htm>>. Acesso em: 7 Dezembro 2018.

DL6WU. **DL6WU Portable Beams (also known as the Wash Pin Antenna's)**. pa3guo, 2017. Disponível em: <<http://www.pa3guo.com/dl6wu.html>>. Acesso em: 7 Dezembro 2018.

ESTEVEZ, L. C. **Antenas - Teoria Básica e Aplicações**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1980.

HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2003.

INPE. **Primeiro cubesat brasileiro completa 3 anos em operação**. INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 20 Junho 2017. Disponível em: <[http://www.inpe.br/crs/nanosat/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=4506](http://www.inpe.br/crs/nanosat/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=4506)>. Acesso em: 29 Maio 2018.

ITA. **ITASAT é lançado da Base de Vandenberg na Califórnia (EUA)**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 4 Dezembro 2018. Disponível em: <<http://www.ita.br/noticias/itasatlanadodabasedevandenbergnacalifornia>>. Acesso em: 19 Dezembro 2018.

JANSSON, D. **Antennas for Satellite Work**. In: THE ARRL, I. ANTENNA BOOK. 21st. ed. [S.l.]: [s.n.], 2007. Cap. 19, p. 19.2-19.32.

MEDEIROS, J. C. D. O. **Princípios de telecomunicações: teoria e prática**. 2ª. ed. São Paulo: Érica, 2007.

MICHAELIS. **Satélite**. Dicionário Online Michaelis, 2018. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/satelite/>>. Acesso em: 17 Maio 2018.

NASA. **Small Spacecraft Technology State of the Art**. NASA Aames Research Center. Moffet Field, Califórnia, E. U. A. 2015.

RODRIGUEZ, J. E. O. **Processo de Referência para Desenvolvimento da Arquitetura de uma Estação Terrena para Pico e Nanosatélites**. INPE. São José dos Campos, São Paulo, Brasil. 2016. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3LDAGLL>>. Acesso em: 17 de Maio de 2018.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. Tradução de Jorge Amoretti Lisboa e Liane Ludwig Loder. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SHIRVILLE, G. **Introduction**. FUNcube AMSAT-UK, entre 2014 e 2018. Disponível em: <<https://funcube.org.uk/>>. Acesso em: 27 Julho 2018.

SV1BSX. **Antenna Circular Polarization**. QSL, Abril 2006. Disponível em: <<https://www.qsl.net/sv1bsx/antenna-pol/polarization.html>>. Acesso em: 7 Dezembro 2018.

SWEETING, M. N. **Modern Small Satellites-Changing the Economics of Space**. Proceedings of the IEEE, 106, n. 3, Março 2018. 343-361.

TIKAMI, A.; MOURA, C.; DOS SANTOS, W. A. **First On-Orbit Results from the Tancredo-1 Picosat Mission**. 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites: Advanced Technologies and Distributed Systems, Março 2017. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/314952730\\_First\\_On-Orbit\\_Results\\_from\\_the\\_Tancredo-1\\_Picosat\\_Mission](https://www.researchgate.net/publication/314952730_First_On-Orbit_Results_from_the_Tancredo-1_Picosat_Mission)>. Acesso em: 19 de Julho de 2018.

VIEZBICKE, P. P. **NBS 688 - Yagi Antenna Design**. National Bureau of Standards. Washington. 1976.

VILLELA, T.; BRANDÃO, A.; LEONARDI, R. **Cubesats e oportunidades para o setor espacial brasileiro**. Parcerias Estratégicas, Brasília-DF, v. 21, p. 91-114, Jan-Jun 2016.

## 9 APÊNDICES

### 9.1 APÊNDICE A: ALGUNS SATÉLITES QUE PASSAM PRÓXIMO AO CÉU DE CAMPINA GRANDE

É possível ver na Tabela A. 1 alguns satélites radioamadores que passam perto do céu de Campina Grande e que a frequência de *downlink* é aproximadamente 145 MHz, para a construção da mesma foi consultado o site da *Heavens Above*<sup>3</sup>.

Tabela A. 1: Satélites radioamadores que passam próximo ao céu de Campina Grande na Paraíba, Brasil.

Satélite	Freq. <i>Downlink</i> (MHz)	Satélite	Freq. <i>Downlink</i> (MHz)
<b>AO-85</b>	145,980	OBJECT H	145,795 – 145,815
AO-91	145,960	OBJECT J	145,860 – 145,880
AO-92	145,880	OBJECT M	145,980 – 146,000
CAS-4B	145,925 USB	OBJECT N	145,730 – 145,750
DELFI C3	145,870	OBJECT P	145,475/437,950
EO-88	145,990 – 145,960	OBJECT Q	145,865
<b>Funcube-1 (AO-73)</b>	145,935	OBJECT R	145,935 – 145,965
Max Valier Satellite	145,860	OBJECT Y	145,880/145,840
OBJECT B	145,935 – 145,965	PCSAT	145,827
OBJECT E	145,665 – 145,685	VELOX 1	145,980

Fonte: Site Heavens Above.

## 10 ANEXOS

### 10.1 ANEXO A: GRÁFICOS DISPONÍVEIS NA NORMA NBS 688 PARA AUXÍLIO DO DIMENSIONAMENTO DA ANTENA YAGI-UDA

<sup>3</sup> Heavens Above, disponível em: <https://www.heavens-above.com/>. Acesso em: 22 de maio de 2018.

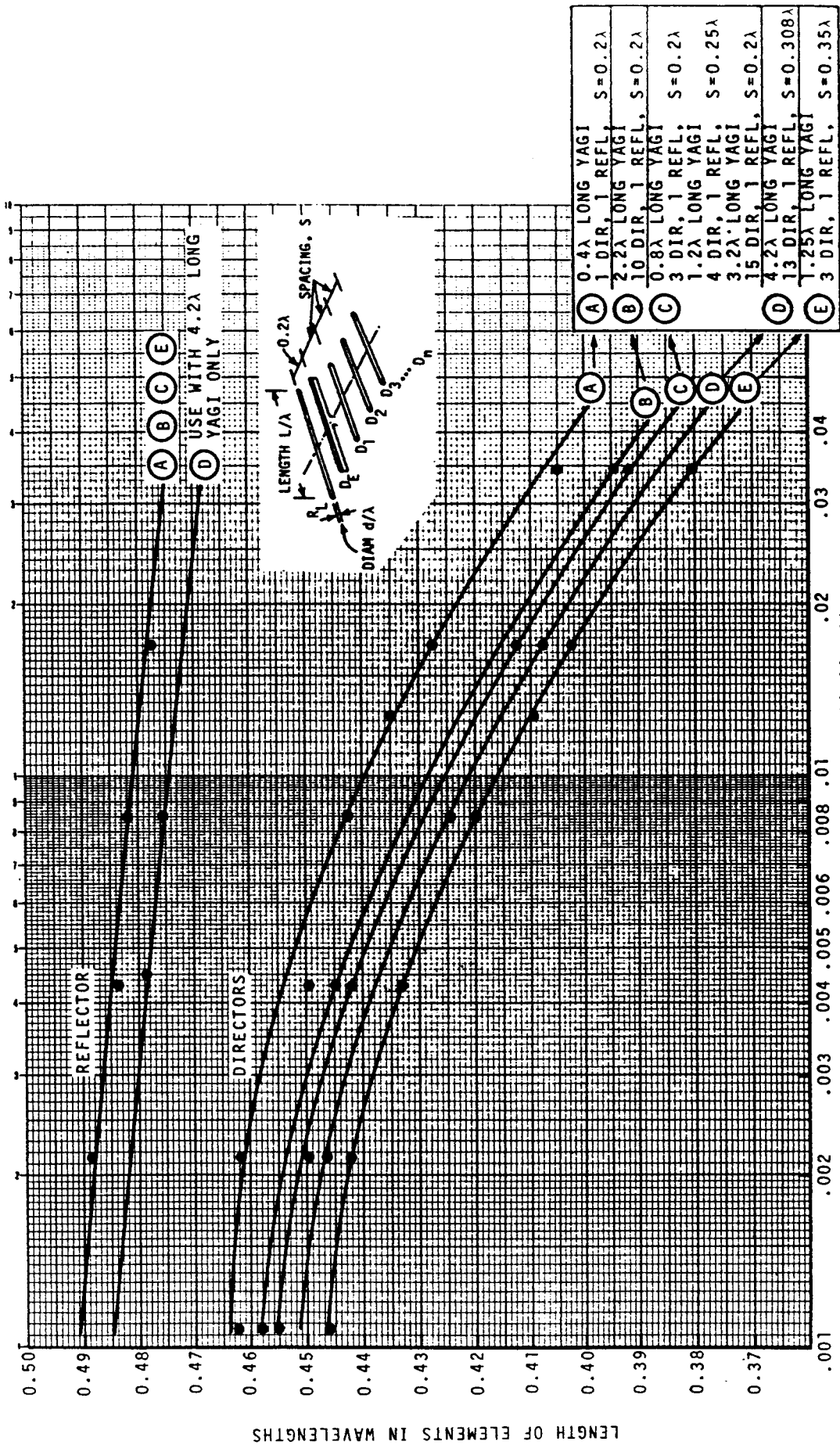


FIG. 9 YAGI ANTENNA DESIGN DATA SHOWING THE RELATIONSHIP BETWEEN ELEMENT DIAMETER TO WAVELENGTH RATIO AND ELEMENT LENGTH FOR DIFFERENT ANTENNAS

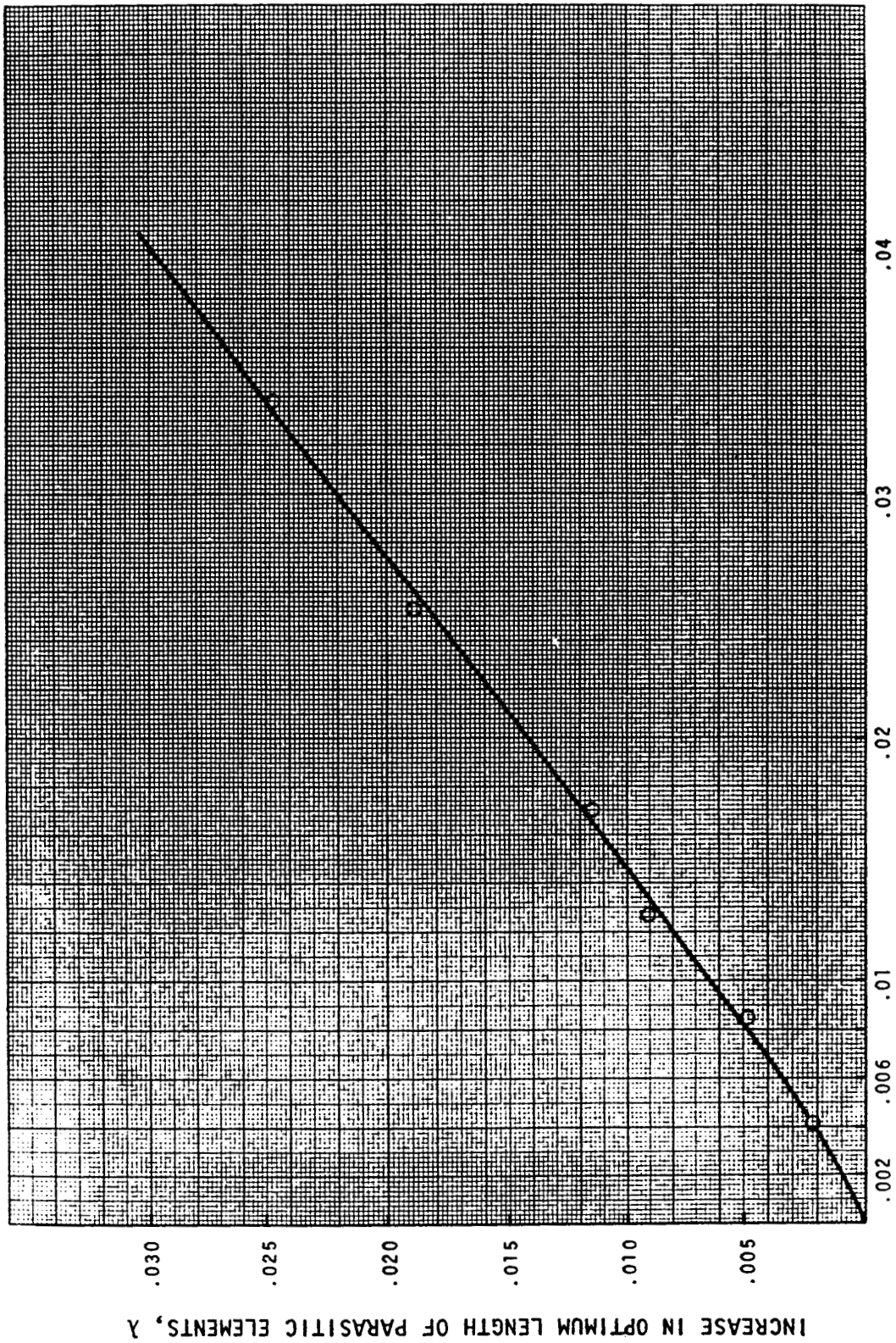


FIG. 10 GRAPH SHOWING THE EFFECT OF A SUPPORTING BOOM ON LENGTH OF ELEMENTS