

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO**

**PROJETO DE UM TRANSMISSOR HOMÓDINO  
EM BANDA S PARA APLICAÇÕES EM  
NANOSATÉLITES**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

**Tiago Mantay**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2016**

# **PROJETO DE UM TRANSMISSOR HOMÓDINO EM BANDA S PARA APLICAÇÕES EM NANOSSATÉLITES**

**Tiago Mantay**

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

**Orientador: Prof. Dr. Renato Machado**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2016**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Curso de Engenharia Elétrica**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova o Trabalho de Conclusão de Curso**

**PROJETO DE UM TRANSMISSOR HOMÓDINO EM  
BANDA S PARA APLICAÇÕES EM NANOSSATÉLITES**

elaborado por  
**Tiago Mantay**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Renato Machado, Dr.**  
(Orientador)

---

**Prof. Marcelo Zanetti, Dr. (UFSM)**

---

**Vinícius Ludwig Barbosa, Eng. (UFSM)**

Santa Maria, 16 de dezembro de 2016

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família, especialmente meus pais, Elmar e Juraci, e minha namorada Katiane, que sempre me apoiaram em todos os momentos pacientemente.

Gostaria de agradecer aos colegas do grupo de pesquisa e amigos Cristiano Santos, Juliano Rafael Andrade e Vinícius Barbosa pelos momentos compartilhados e troca de experiências, colaborando de diversas formas.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Renato Machado, pela confiança depositada aceitando a orientação deste trabalho e por toda ajuda e conhecimentos repassados.

## **RESUMO**

Trabalho de Conclusão de Graduação  
Curso de Engenharia de Computação  
Universidade Federal de Santa Maria

### **PROJETO DE TRANSMISSOR HOMÓDINO EM BANDA S PARA APLICAÇÕES EM NANOSSATÉLITES**

AUTOR: TIAGO MANTAY

ORIENTADOR: RENATO MACHADO

Local de Defesa e Data: Santa Maria, 16 de Dezembro de 2016

Atualmente, o estudo das tecnologias voltadas para aplicações espaciais tem crescido consideravelmente. Este fato se deve a redução da complexidade, dos custos e do tempo envolvido no desenvolvimento de projetos. Satélites de pequeno porte vêm sendo utilizados para a validação de experimentos científicos e tecnológicos. O sistema de comunicação é um dos mais críticos componentes de um nanossatélite. Este trabalho apresenta um protótipo de um *front-end* de transmissor Homódino de dois canais que opera em banda S, com componentes comercializados irrestritamente. Por fim, foram desenvolvidas placas de circuito impresso para validação individual dos componentes que juntas formam um canal completo do transmissor.

# **ABSTRACT**

Undergraduate Final Work  
Graduation on Computing Engineer  
Federal University of Santa Maria  
Technology Center

## **DESIGNING OF A S-BAND HOMODINE TRANSMITER FOR NANO-SATELLITES APPLICATIONS**

AUTHOR: TIAGO MANTAY

ADVISOR: RENATO MACHADO

Place and Data of Presentation: Santa Maria, December 15<sup>th</sup>, 2016

Recently, the study of technologies for space applications has grown considerably. This is due to the reduction of the complexity, the costs and the time involved in the development of projects. The applicability of small satellites has increased a lot lately, comes to simplify the validation of scientific and technological experiments. The communication system is one of the main components of a nanosatellite. This work presents a prototype of a two-channel Homodine transmitter front-end wich operate in S-band, with unrestricted commercially available components. Printed circuit boards were developed for individual component validation, together form a complete transmitter channel.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB – Agência Espacial Brasileira

BER – *Bit Error Rate* (Taxa de erro de bit)

BPSK – *Binary Phase Shift Keying* (Modulação por Chaveamento de Fase)

CI – Circuito Integrado

FPGA – *Field Programmable Gate Array*

IF – Frequência Intermediária

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica

LEO – *Low Earth Orbit* (Órbita Terrestre Baixa)

LO – *Local Oscillator* (Oscilador Local)

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

PA – *Power Amplifier* (Amplificador de Potência)

PCI – Placa de Circuito Impresso

RF – Rádiofrequência

SNR – Razão sinal-ruído

VCO – *Voltage Control Oscillator* (Oscilador controlado por tensão)

UFMS – Universidade Federal de Santa Maria

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustração de uma constelação de nanossatélites em órbita terrestre .....	14
Figura 2.2 – Estruturas padronizadas de Cubesats .....	16
Figura 2.3 – Nano satélite AESP-14 .....	17
Figura 2.4 – Transmissor do nano satélite AESP-14 .....	17
Figura 2.5 – Nano-Satélite BR1.....	18
Figura 3.1 – Diagrama de um sistema de transmissão de dados .....	20
Figura 3.2: Esquemas de transmissão .....	21
Figura 3.3 – Processo de upconversion .....	24
Figura 3.4: Camadas do modelo OSI .....	27
Figura 3.5 – Camadas da comunicação via satélite .....	28
Figura 3.6: Pacote de informação do protocolo AX.25 .....	28
Figura 5.1 - Modelo básico de um transmissor .....	33
Figura 5.2 - Arquitetura de conversão direta (Homódina) .....	33
Figura 6.1 – Gráfico do desvanecimento do sinal .....	39
Figura 6.2 – Gráfico que apresenta a potência do sinal na antena do transmissor .....	40
Figura 6.3 – Diagrama do transmissor com dois canais.....	41
Figura 6.4 – Diagrama de um canal do circuito transmissor.....	42
Figura 6.5 – Representação dos sinais no diagrama do transmissor .....	43
Figura 6.6 – Diagrama dos sinais na entrada do mixer .....	44
Figura 6.7: Diagrama do circuito com valores de ganho dos componentes .....	44
Figura 6.8 – Informações para desenvolvimento do layout das placas do Filtro 1 .....	46
Figura 6.9 – Ilustração da estrutura de uma CPW .....	47
Figura 6.10 – Medidas das vias de aterramento .....	48



## LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Características genéricas de Cubesats .....	37
Tabela 6.2: Parâmetros iniciais servindo de base para a escolha dos componentes .....	37
Tabela 6.3 – Transmissores de Cubesats lançados entre 2009 e 2011 .....	38
Tabela 6.4: Sinais de entrada e saída do circuito .....	43
Tabela 6.5: Representação dos valores de ganhos e figura de ruído em valores lineares e em dB .....	45

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2 Organização do trabalho .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Nano-satélites .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Introdução .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Missões brasileiras de satélites de pequeno porte .....</b>	<b>16</b>
2.2.1 AESP-14 .....	16
2.2.2 BR-1 .....	17
<b>3. Sistemas de comunicação digital .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Transmissão de dados .....</b>	<b>20</b>
3.1.1 Transmissão Simplex .....	20
3.1.2 Transmissão Half-Duplex .....	20
3.1.3 Transmissão Full-duplex .....	21
<b>3.2 Características de um sistema de comunicação wireless .....</b>	<b>21</b>
3.2.1 Taxa de dados .....	22
3.2.2 Largura de banda .....	22
3.2.3 SNR .....	23
3.2.4 Erro de bit .....	23
<b>3.3 O canal de comunicação .....</b>	<b>24</b>
3.3.1 Modelagem do canal de Comunicação .....	25
<b>3.4 Modulação digital .....</b>	<b>25</b>
3.4.1 BPSK .....	26
<b>3.5 Protocolos de comunicação .....</b>	<b>26</b>
3.5.1 Modelo OSI .....	26
3.5.2 Protocolo AX.25 .....	27
<b>4. Linhas de transmissão e Microondas .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Distorção Harmônica .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2 Parâmetros S .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3 Cálculo da figura de ruído .....</b>	<b>31</b>
<b>5. CIRCUITOS TRANSMISSORES .....</b>	<b>32</b>
<b>5.1 Arquitetura de circuitos transmissores .....</b>	<b>32</b>
5.1.1 Arquitetura de conversão direta (homódina) .....	32

<b>5.2</b>	<b>Componentes de um transmissor .....</b>	<b>33</b>
5.2.1	Filtros.....	33
5.2.2	Mixer .....	34
5.2.3	Amplificador.....	34
5.2.4	Multiplexador .....	34
<b>6.</b>	<b>PROJETO DO CIRCUITO TRANSMISSOR .....</b>	<b>35</b>
6.1	Metodologia do projeto .....	35
6.2	Considerações iniciais para o projeto .....	35
6.3	Simulação de transmissão - Perdas de transmissão no espaço livre .....	37
6.4	Escolha da Arquitetura do circuito .....	39
6.5	Escolha dos componentes do circuito.....	40
6.6	Cálculo da potência dos sinais .....	41
6.7	Análise de figura de ruído .....	43
6.8	Projeto do Layout das placas de validação dos componentes.....	44
6.8.1	Impedância das trilhas da PCI .....	45
6.8.2	Vias de aterramento .....	46
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O setor aeroespacial vem recebendo grandes investimentos por parte do governo brasileiro, priorizando projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico que vêm sendo desenvolvidos pela academia, institutos de pesquisa e através da parceria entre estes. Uma das áreas considerada como estratégica e prioritária para o governo brasileiro é a área de satélites, a qual é imprescindível para diversos segmentos como o de monitoramento ambiental, telecomunicações e defesa.

A academia tem desenvolvido diversos trabalhos envolvendo nanossatélites, os quais são uma boa opção para a realização de testes e validação de conceitos por oferecerem menor custo e complexidade do que os satélites de maior porte. Em geral, podem ser projetados para realizar missões para telemetria de dados coletados por dispositivos como sensores de temperatura, magnetômetro, entre outras aplicações. Cientes do potencial estratégico, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com a Agência Espacial Brasileira (AEB) vêm desenvolvendo programas para construção de satélites de pequeno porte no Brasil desde 2003.

A comunicação do satélite com as estações terrenas é viabilizada pelo subsistema de telemetria e telecomando, responsável por enviar dados da carga útil e dos sistemas de bordo e receber comandos. Na maioria dos projetos nacionais de satélites de pequeno porte foram utilizados transceptores de empresas estrangeiras, adicionando custos consideráveis ao projeto.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo de *front-end* de transmissor que possa ser utilizado em nanossatélites. Mais precisamente, o trabalho propõe um protótipo de baixo custo de um circuito transmissor que opere em banda S, com arquitetura própria, utilizando componentes *Off-The-Shelf*, para aplicações em nanossatélites que operam em órbita baixa.

O desafio do projeto está em garantir que o transmissor seja robusto e confiável e que o receptor detecte e decodifique o sinal de telemetria recebido. As características de

um link espacial aumentam a complexidade dos problemas, pois uma vez que o satélite é lançado não há como realizar modificações ou manutenções. O canal de comunicação também é um desafio a ser considerado, pois além de distância de transmissão (maior do que 600km), existem diversas variáveis que podem corromper a informação.

## **1.2 Organização do trabalho**

O trabalho inicialmente apresenta um breve histórico dos nanossatélites e uma revisão bibliográfica sobre características da comunicação digital, do canal de comunicação e eletrônica de alta frequência. A revisão também inclui um estudo sobre a arquitetura homódina e aspectos relevantes sobre circuitos transmissores.

No Capítulo 3, apresenta-se o projeto do transmissor, que enfatiza a arquitetura e os componentes utilizados no projeto, as justificativas para as escolhas de padrões utilizados, além de cálculos necessários para o funcionamento do circuito. Nos Capítulos 4 e 5, discutem-se os layouts das placas para os componentes do circuito e também uma simulação do desvanecimento do sinal no canal de comunicação.

Por fim, o Capítulo 7, a conclusão, discute as metodologias utilizadas, as atividades realizadas, as melhorias que poderão ser implementadas em trabalhos futuros e a aplicação deste trabalho no contexto de nanossatélites.

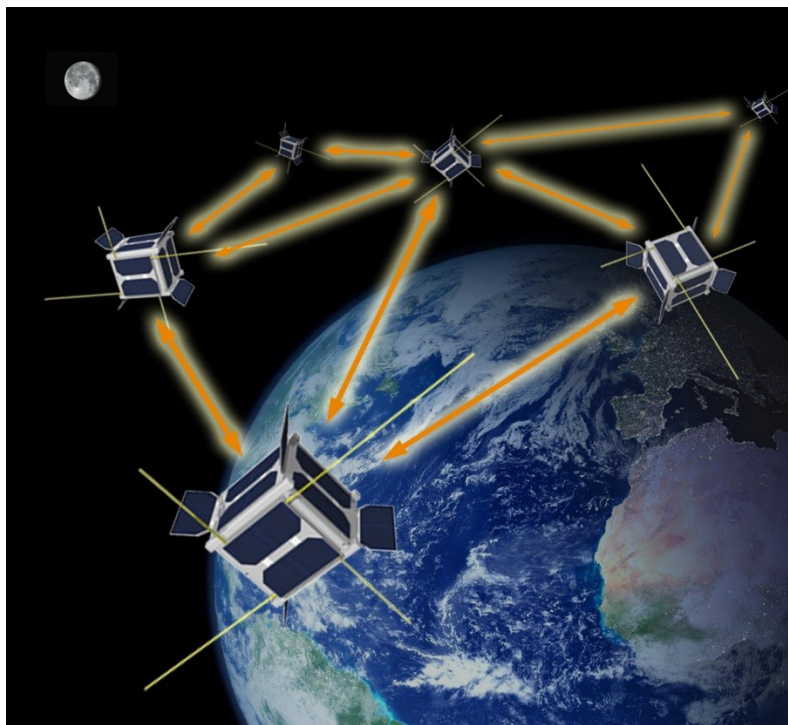
## 2. NANO-SATÉLITES

Nano-satélites são satélites artificiais miniaturizados, que pesam entre 1 e 10 Kg e projetados para aplicações em órbita baixa (LEO – *Low Earth Orbit*). Tipicamente, possuem dimensões de 10 cm<sup>3</sup>. Em seu design, na maioria dos casos, são utilizados componentes *off-the-shelf* e possuem custo muito inferior a satélites de médio e grande porte.

O Cubesat, modelo extensivamente utilizado de nanossatélite, é originário de pesquisadores das Universidades Estadual Politécnica da Califórnia (Cal Poly) e Stanford, que por volta dos anos 2000 desenvolveram o padrão, juntamente com especificações necessárias para promover projetos nesse âmbito. Os Cubesats podem pesar até 1,33Kg

Até 2013, os nanossatélites lançados eram majoritariamente universitários. A partir daí, pode-se observar um aumento significativo de projetos comerciais e amadores. A Figura 2.1 apresenta uma ilustração de uma constelação de nanossatélites em órbita terrestre (THE CUBESAT PROGRAM, 2014).

Figura 2.1 - Ilustração de uma constelação de nanossatélites em órbita terrestre.



Fonte: (BENTUM, 2014)

## 2.1 Introdução

Graças aos recentes avanços tecnológicos e do conhecimento acumulado pela comunidade científica, o número de nano-satélites lançados ao espaço tem aumentado significativamente. Além disso, o custo de lançamento do satélite, que representa grande parte do investimento do projeto, tem caído gradualmente à medida que novos lançadores são construídos e novas tecnologias são empregadas.

As vantagens oferecidas quando em comparação com satélites maiores são muito expressivas, permitindo que projetos de nível universitário, sem grandes investimentos, sejam executados com sucesso. Atualmente é possível desenvolver um satélite de pequeno porte exclusivamente com componentes comerciais do tipo off-shelf.

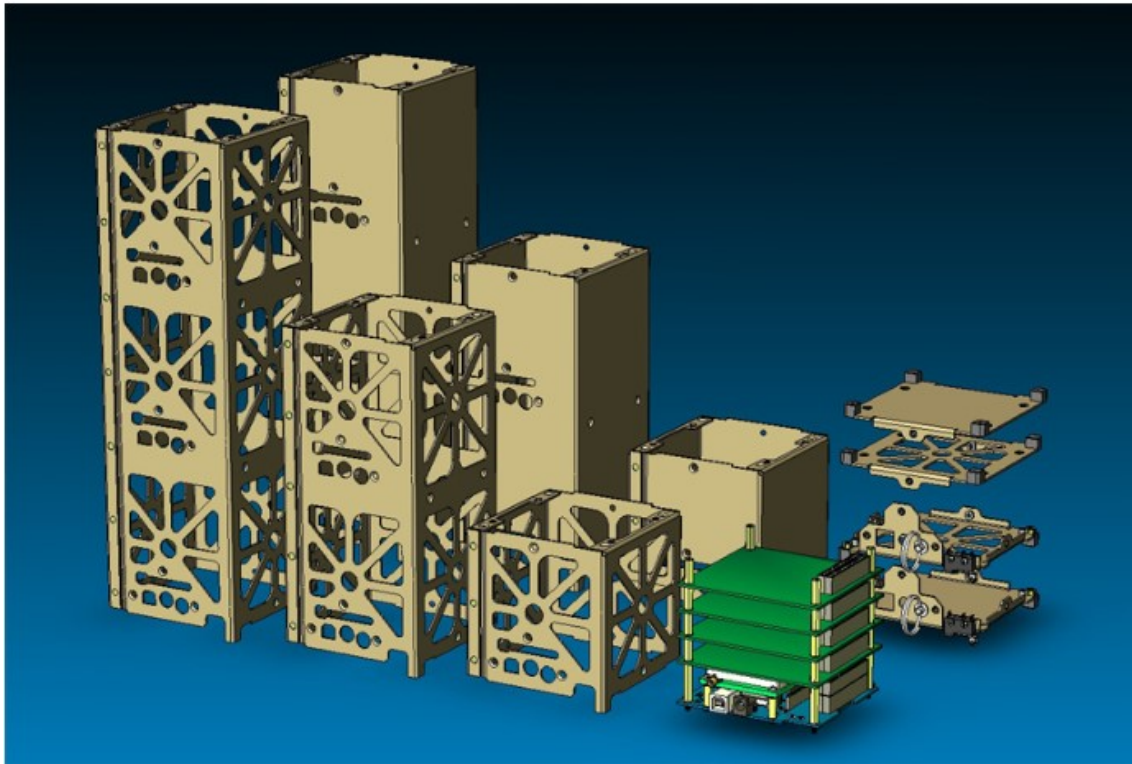
Além de possuírem a capacidade de realizar tarefas que alguns anos atrás eram exclusivas de satélites de grande porte, o uso de nanosatélites tem facilitado muito a realização de todo tipo de experimentos científicos no ambiente espacial. No entanto, cabe ressaltar que o tempo de vida médio de um nanosatélite em órbita é de 2 anos.

Um sistema de comunicação via satélite necessita no mínimo de um satélite transmissor e uma estação rádio base para receber as informações do espaço. Para que haja confiabilidade no tráfego dos sinais, faz-se necessário a implementação de um protocolo robusto. Esse trabalho avalia dois protocolos clássicos e elege um deles para conceber o transmissor do projeto. Maiores detalhes são apresentados no Capítulo 3.

A estrutura mecânica utilizada em satélites de pequeno porte é modular, deste modo a integração dos sistemas é facilitada (BENTUM, 2014).

A Figura 2.2 apresenta um modelo de estrutura mecânica dos Cubesats.

Figura 2.2 – Estruturas padronizadas de Cubesats



Fonte: (Clyde-Space, 2009). A ilustração apresenta 3 diferentes modelos de Cubesats. Da esquerda para a direita, padrão 3U, 2U e 1U.

## 2.2 Missões brasileiras de satélites de pequeno porte

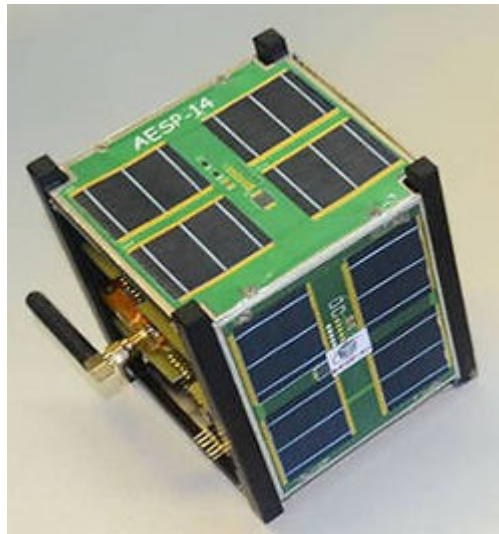
### 2.2.1 AESP-14

O AESP-14 foi um CubeSat U1, lançado em fevereiro de 2015, declarado inoperante dias após seu lançamento. Seu objetivo era realizar um estudo da dinâmica da Atmosfera ionizada. Este projeto foi executado por estudantes de Graduação do ITA e de Pós-Graduação INPE que fizeram um trabalho de engenharia reversa do satélite NANOSATC-BR1. O projeto foi executado em Campos do Jordão - São Paulo.

O CubeSat AESP-14 pode ser visto na Figura 2.3 e na Figura 2.4 o transmissor do desenvolvido no projeto por alunos do ITA e do INPE (INPE, 2015).

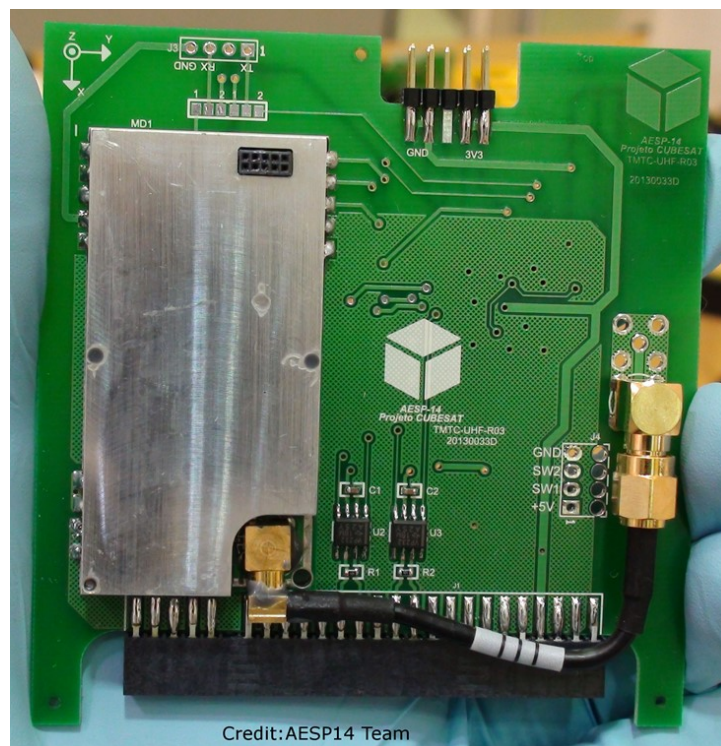


Figura 2.3 – Nano satélite AESP-14



Fonte: (INPE, 2015)

Figura 2.4 – Transmissor do nano satélite AESP-14



Fonte: (INPE, 2015)

## 2.2.2 BR-1

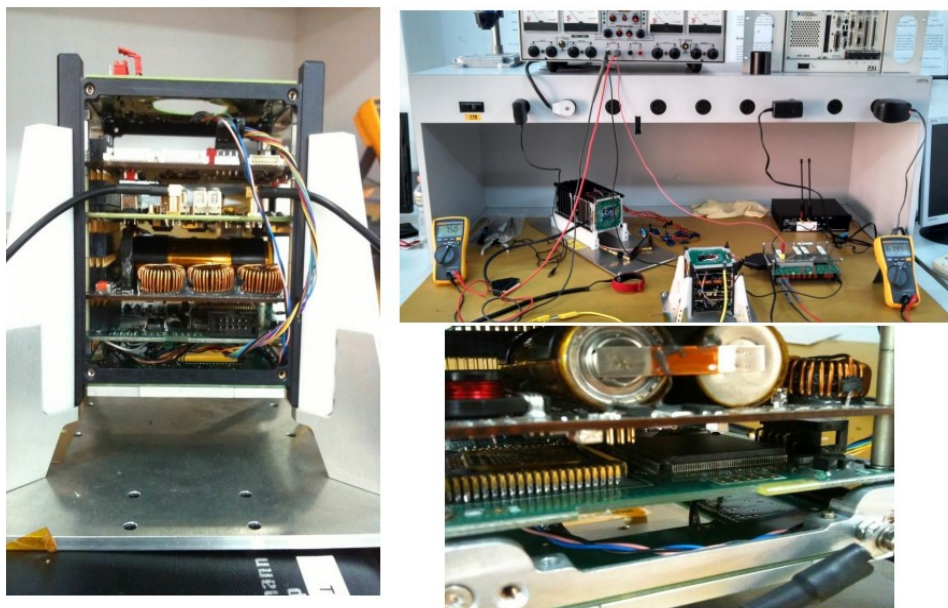
Lançado em 19 de julho de 2014, o Cubesat BR-1 foi desenvolvido por pesquisadores do INPE e da UFSM com dois objetivos, um científico e outro tecnológico.

A Missão Tecnológica do NANOSATC-BR1 foi a realização de testes de CIs tolerantes à radiação ionizante, produzidos por pesquisadores da SMDH em parceria com a UFSM. A missão científica foi, principalmente, a coleta de dados referentes ao Campo Magnético Terrestre, na região da América do Sul onde há anomalias no campo magnético da terra (INPE, 2014).

Segundo Otávio Durão, coordenador de engenharia e tecnologia espacial de projetos de nanossatélites do INPE, o custo total do projeto foi próximo de R\$ 800 mil.

Em 24 de junho de 2014, 5 dias após seu lançamento, as estações terrenas do INPE em Santa Maria e São José dos Campos, captaram sinais enviados do Cubesat, comprovando o sucesso do projeto (AEB, 2015). A Figura 2.5 apresenta o Cubesat BR1.

Figura 2.5 – Nano-Satélite BR1. Detalhes da bancada de teste e da carga útil lançada na missão.



Fonte: (INPE, 2015)

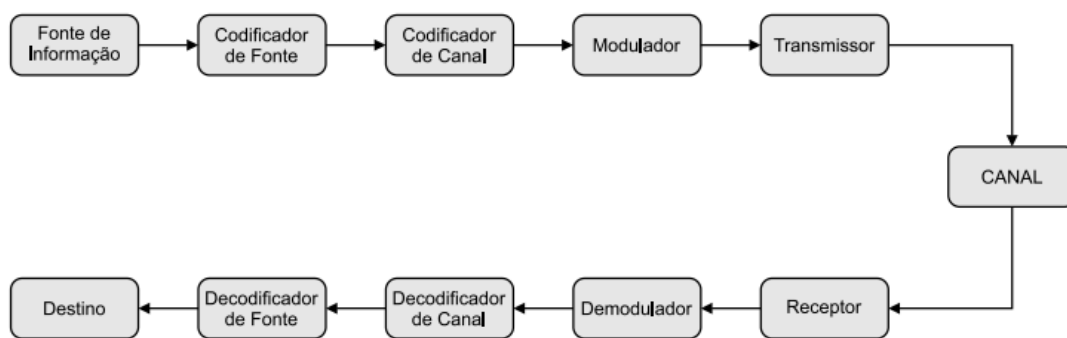
### 3. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL

Os princípios da comunicação digital remetem a Claude Shannon, em seu famoso livro intitulado *A mathematical theory of communication* (A teoria matemática da comunicação), publicado em 1949 em coautoria com Warren Weaver. Neste livro, lançado após o artigo de mesmo nome, são sistematizados conceitos fundamentais para o entendimento da eficiência em sistemas de comunicação que possibilitaram grandes avanços na área (KINCHIN, 1957).

Um sistema de comunicação tem como propósito transportar uma mensagem de um ponto no espaço a outro. Se o sistema for digital, a mensagem será composta de dados (bits). Os principais componentes de um sistema de comunicação são: a fonte de informação, o transmissor, o receptor e o destino (LATHI, 1998).

O diagrama da Figura 3.1 apresenta os componentes de um sistema de comunicação digital.

Figura 3.1 – Diagrama de um sistema de transmissão de dados



Fonte: (Autoria própria)

- Fonte de Informação – onde a informação é gerada
- Codificador de Fonte – retira o excesso de redundância proveniente da fonte de informação;
- Codificador de Canal – responsável por codificar os sinais de informação objetivando a redução da BER durante a transmissão;
- Modulador – realiza o processo de conversão digital/analógico, necessário para inserir informações em um sinal analógico;

- Transmissor – componente responsável pela manipulação e o envio do sinal através do canal;
- Canal – meio físico por onde o sinal é propagado, adicionando sempre ruídos ao sinal original;
- Receptor – componente responsável por receber e tratar o sinal que se propagou através do canal;

Receptores, transmissores e transceptores, geralmente são responsáveis por acumular outras funções como modulação/demodulação, codificação/decodificação, amplificação, filtragem, verificação de erros, entre outros procedimentos (LATHI, 1998).

### **3.1 Transmissão de dados**

Os sistemas de comunicação podem operar de diferentes formas e empregar diferentes técnicas. Basicamente, pode-se classificar um sistema de comunicação considerando o fluxo de informações do transmissor para o receptor. Os esquemas de transmissão podem ser classificados de acordo com a habilidade dos agentes transmitirem e receberem informações ao longo do tempo, dessa forma existem três modalidades: Simplex, Half-duplex e Full-duplex.

#### **3.1.1 Transmissão Simplex**

Este esquema é caracterizado pela existência de um agente transmissor e um agente receptor. O modelo Simplex é largamente empregado por estações de rádio, sistema GPS e satélites.

#### **3.1.2 Transmissão Half-Duplex**

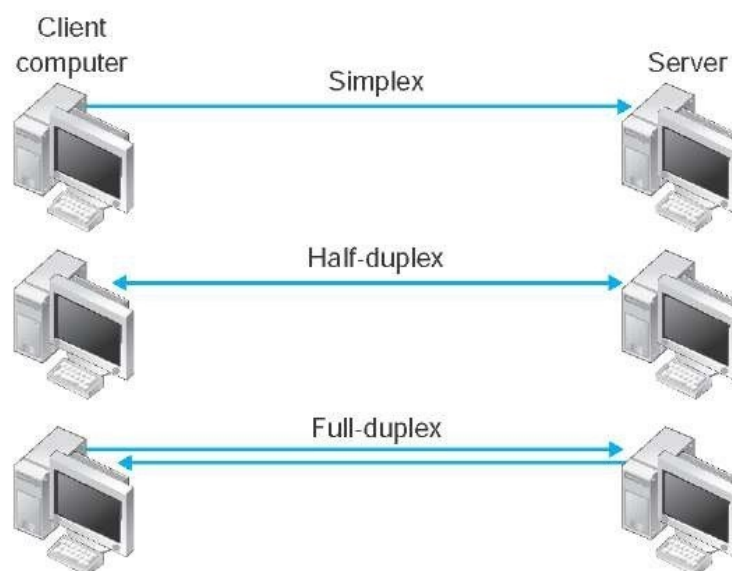
O esquema Half-duplex permite que ambos agentes transmitam e recebam informações, porém somente um agente pode transmitir por vez. Rádios amadores utilizam o esquema Half-duplex para comunicarem entre si.

### 3.1.3 Transmissão Full-duplex

Sistemas de comunicação onde ambos agentes podem enviar e receber dados simultaneamente são chamados de Full-duplex. A telefonia é um exemplo de esquema Full-duplex, onde os dois agentes de comunicação podem receber e enviar dados simultaneamente (LATHI, 1998).

A Figura 3.2 apresenta uma ilustração dos esquemas Simplex, Half-duplex e Full-duplex.

Figura 3.2: Esquemas de transmissão



Fonte: (Autoria própria). Modelo de esquemas de transmissão.

## 3.2 Características de um sistema de comunicação *wireless*

Existem sistemas de comunicação de todos os níveis, local, regional, nacional e global. Cada sistema deve possuir as características que a sua aplicação demande. A distância de transmissão, a qualidade, a confiabilidade e a velocidade dos dados são fatores de extrema importância na construção de um sistema de comunicação.

O conhecimento dos efeitos gerados pelo canal de comunicação utilizado pelo sistema é de vital importância no projeto. O ruído acrescentado pelo canal tem grande influência na arquitetura e nas tecnologias empregadas no sistema de comunicação, para

que o mesmo seja eficiente e confiável. Atualmente a transmissão sem fio (*wireless*) é largamente utilizada pelas facilidades oferecidas, porém, a vantagem de não necessitar meios físicos artificiais traz como desvantagem a enorme quantidade de efeitos indesejados ao sinal transmitido.

De forma geral, as características mais importantes que definem um sistema de comunicação sem fio são a taxa de dados, a largura de banda, a frequência de transmissão e a SNR desejada (RAPPAPORT, 2011).

### 3.2.1 Taxa de dados

Uma das características mais importantes em um sistema de comunicação é a velocidade de transmissão, ou seja, a quantidade de dados enviados por unidade de tempo. Essa medida pode ser chamada de taxa de dados ou *bit rate*, e é usualmente expressa em bits por segundo ou símbolos por segundo.

É apropriado definir, nas primeiras etapas do projeto, a taxa de dados mínima requerida, para então dimensionar e definir as demais características do sistema. Geralmente deseja-se a maior taxa de transmissão possível dentro dos limites de execução do projeto.

A velocidade da transmissão está intimamente associada a outros fatores como a qualidade da transmissão, a modulação empregada, a redundância e, principalmente, o canal de comunicação. É necessário garantir baixos índices de BER, e a maior SNR possível no receptor, para evitar retransmissões de dados.

### 3.2.2 Largura de banda

A largura de banda de um sistema é a faixa de frequência que será utilizada para o envio das informações. Este parâmetro tem relação direta com a capacidade de transmissão. Para um canal ideal (sem adição de ruído), quanto maior a largura de banda, maior será a capacidade do canal, segundo a Equação 3.1.

$$C = 2B \quad (3.1)$$

Em que  $C$  é a capacidade do canal e  $B$  a largura de banda do sinal (Hz) no caso do sistema utilizar 2 níveis de tensão, ou seja, 1 símbolo por bit (NASCIMENTO, 2007).

A Equação que apresenta a capacidade do canal para sinais com  $N$  níveis, é apresentada a seguir:

$$C = 2B \log_2 N \quad (3.2)$$

### 3.2.3 SNR

A relação sinal-ruído estabelece uma importante relação entre a potência do sinal e a potência do ruído no receptor. Esta relação é logarítmica e expressa em dB pela Equação abaixo.

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{\text{potência do sinal}}{\text{potência de ruído}} \quad (3.3)$$

Quanto menor a diferença entre as potências do sinal transmitido e do ruído, maior será a probabilidade que ocorra um erro de bit. De modo que a potência do sinal recebido deve ser suficientemente maior que a potência de ruído para que seja possível decodificar a informação.

### 3.2.4 Erro de bit

A taxa de erro de bit ou BER (*Bit Error Rate*) é a relação direta entre a quantidade de bits transmitidos e a quantidade de bits decodificados erroneamente e constitui um parâmetro fundamental para avaliar-se a qualidade de transmissão. Quanto maior a BER de um sistema, menor será a taxa efetiva de transmissão de bits, pois mais bits terão de ser retransmitidos ou serão perdidos.

### 3.2.5 Frequência de transmissão

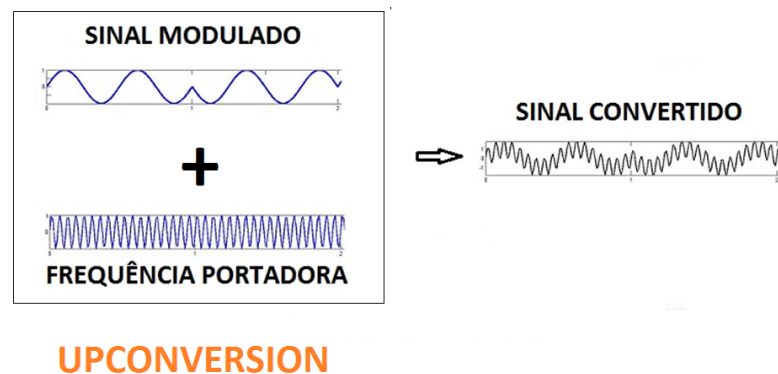
Em sistemas de transmissão sem fio, surge a necessidade de utilizar uma frequência, denominada portadora, que utilizada para “carregar” a informação transportada pelo canal. O espectro de frequências utilizado deve estar em conformidade com a legislação (no Brasil regida pela ANATEL). Além disso, a portadora terá grande

influência sobre o projeto do sistema de comunicação no que se refere ao efeito do canal, projeto das antenas e do receptor/transmissor.

A frequência portadora modula o sinal através do processo chamado *upconversion*, e será recuperado no receptor através do processo de *downconversion* (NASCIMENTO, 2007).

Este processo é resultado da operação chamada de convolução dos dois sinais, conforme ilustra a Figura 3.3.

Figura 3.3 – Processo de *upconversion*



Fonte: (Autoria própria). Processo de conversão de um sinal modulado para a frequência de transmissão, no processo chamado *upconversion*.

### 3.3 O canal de comunicação

Existem diversos meios físicos para conduzir o fluxo de informações do transmissor até o receptor, guiados ou não-guiados. Esses meios são chamados de canais de comunicação. O sinal pode trafegar por meio de condutores sólidos, líquidos ou gasosos. Os meios mais utilizados atualmente são sólidos (cabos) e gasosos (ar).

Para transmissões sem fio, o canal de comunicação é um dos primeiros fatores limitantes a ser levado em consideração quando se está projetando sistemas de comunicação pelo fato de, geralmente, causarem maior parte das atenuações e interferências no sinal em questão. (TANENBAUM, 1996)



### 3.3.1 Modelagem do canal de Comunicação

A Equação de Friis simplificada, (Equação 3.4) nos permite realizar uma aproximação do cálculo da perda de potência no espaço livre, utilizando como parâmetros os ganhos das antenas, a potência de transmissão, a distância entre transmissor e receptor e comprimento de onda do sinal (LATHI, 1998).

$$Pr = Pt * \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 * Gt * Gr \quad (3.4)$$

Sendo :

*Pr* a Potência recebida em watts

*Pt* a Potência transmitida em watts

$\lambda$  o Comprimento de onda em metros

*Gt* o Ganho da antena transmissora

*Gr* o Ganho da antena receptora

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) pode ser calculado a partir da frequência ( $F$ ), em que  $v = 300.000.000$  m/s. (RAPPAPORT, 2011)

$$\lambda = \frac{v}{F} \quad (3.5)$$

## 3.4 Modulação digital

A modulação é o processo que permite adicionar informação a um sinal através da variação de frequência (FM), amplitude (AM) ou fase (PM) do sinal. Esse processo pode ser executado na forma analógica ou digital.

O circuito analógico requer o projeto individual para cada tipo de modulador, ou seja, diferentes componentes deverão ser especificados para que o circuito atenda a demanda requisitada. Por outro lado, a modulação digital é muito mais versátil, permitindo a programação e implementação de diversos esquemas de modulação com o mesmo circuito físico. Para fins práticos, independentemente do processo de modulação

considerado, o sinal resultante desse processo é analógico (HAYKIN, 2004).

#### 3.4.1 BPSK

A modulação BPSK (do inglês, *Binary Phase Shift Keying*) é uma modulação que emprega o sistema de deslocamento de fase e possui a capacidade de transmitir 1 bit por símbolo. Sendo considerado um esquema robusto, além de facilitar o tratamento de erros.

Além de ser um esquema muito robusto, ou seja, tolerante a um nível alto de ruído, o esquema BPSK também é de fácil implementação (RAPPAPORT, 2011).

### 3.5 Protocolos de comunicação

Para garantir a funcionalidade e eficiência no processo de comunicação é necessário a definir qual padrão será utilizado para transmissão/recepção do sinal. Os protocolos devem ser escolhidos de forma que o formato dos dados facilite a implementação das diversas funcionalidades do sistema.

Quando se transmite dados digitais, estes devem seguir uma métrica, devem ser divididos e quantificados. A divisão dos dados é implementada através de pacotes. Cada pacote carrega, além dos bits de dados a serem enviados, bits de controle para detecção e correção de erros, bits de endereçamento, entre outras funções. Há protocolos que são mais utilizados que outros, normalmente por terem sido mais testados e aperfeiçoados ao longo do tempo.

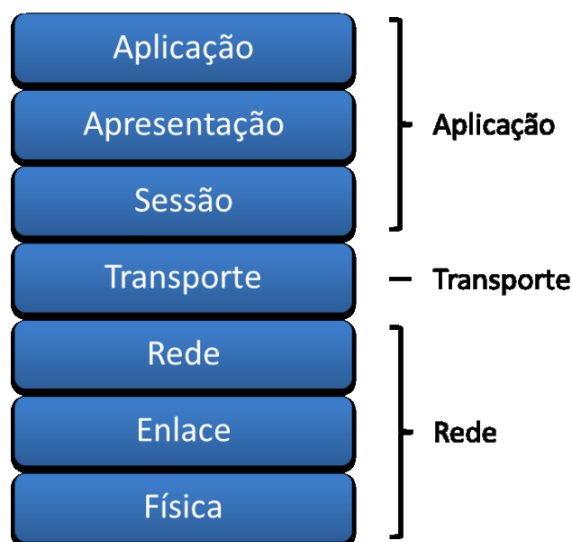
Em aplicações militares ou que requeiram um nível maior de segurança ou customização, pode vir a ser necessário implementar um protocolo próprio para o sistema idealizado. (LATHI, 1998)

#### 3.5.1 Modelo OSI

O modelo OSI (Interconexão de Sistemas Abertos, do inglês: Open Systems Interconnection) foi desenvolvido a fim de criar um padrão de protocolo de comunicação entre sistemas, garantindo a compatibilidade em redes de dados digitais. Ao total são 7 camadas: Física, enlace, rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação. Em muitos sistemas não há necessidade de implementação de todas as camadas do modelo OSI (TANENBAUM, 1996).

A Figura 3.4 descreve as camadas da estrutura do modelo OSI

Figura 3.4: Camadas do modelo OSI



Fonte: (Autoria própria)

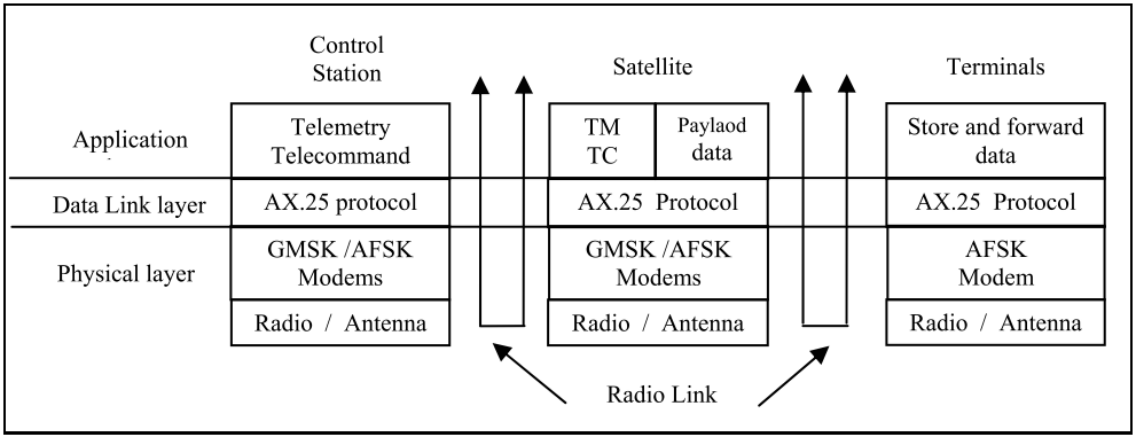
### 3.5.2 Protocolo AX.25

O objetivo deste protocolo é assegurar a compatibilidade entre estações de transmissão e recepção, permitindo a usuários um alto nível de integração entre as partes de um sistema de comunicação. Um padrão amplamente utilizado traz consigo muitos benefícios, principalmente pelo fato de ser continuamente testado e melhorado.

O AX.25 foi derivado do protocolo X.25 e foi desenvolvido por operadores de radioamador. Os avanços no protocolo X.25 foram necessários para permitir a inclusão das opções de endereçamento e outras características da transmissão via rádio.

A ampla compatibilidade do AX.25 com milhares de rádio amadores do mundo inteiro é um dos motivos que justificam a aderência por diversos projetistas, incluindo nano satélites. O diagrama das camadas OSI do protocolo AX.25 pode ser visualizado na Figura 3.5 apresentando uma estrutura com 3 camadas, implementadas na estação de controle, no satélite e nos terminais (ADDAIM, 2010).

Figura 3.5 – Camadas da comunicação via satélite



Fonte: (ADDAIM, 2010)

Este protocolo provê o serviço de padronização das comunicações sem necessitar camadas superiores do modelo OSI. Além de ser funcional na operação com circuitos de RF parcialmente prejudicados, o protocolo possui inúmeros benefícios e otimizações que foram sendo incorporados ao longo dos anos.

O AX.25 oferece uma interface que prevê correções e detecções de erros, retransmissão de pacotes, opções de controle e possibilidades de encapsulamento via pacotes IP ou UDP. A Figura 3.6 ilustra um pacote de que segue o protocolo AX.25. (Tucson Amateur Packet Radio Corporation, 1998).

Figura 3.6: Pacote de informação do protocolo AX.25

Flag	Address	Control	PID	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 Bits	8/16 Bits	8 Bits	N*8 Bits	16 Bits	01111110

Fonte: (Tucson Amateur Packet Radio Corporation, 1998).

Nanossatélites que utilizam o protocolo AX.25 possibilitam que usuários de radioamador possam receber e decodificar os sinais advindos do espaço, auxiliando os pesquisadores na confirmação do funcionamento dos dados obtidos pela carga útil dos satélites.

## 4. LINHAS DE TRANSMISSÃO E MICROONDAS

Em sinais com componentes de alta frequência (microondas), elementos de circuitos como resistores, capacitores e indutores apresentam um comportamento muito diferente de quando se trabalha com baixas frequências. Este fenômeno ocorre porque existe, para altas frequências, uma maior expressão do efeito *skin* e das perdas por radiação nesses componentes e nas PCIs.

Para sinais com frequências superiores a 300 MHz, o comprimento de onda do sinal passa a ser suficientemente pequeno (aproximadamente 1 metro) para que haja variações na fase da tensão e da corrente no circuito. Deste modo as teorias de circuito, conhecidas como as Leis de Kirchhoff, não podem ser empregadas, pois os valores de tensão e corrente não são mais constantes. Logo, para circuitos de RF emprega-se o estudo das linhas de transmissão.

Uma linha de transmissão é um disposto condutor elétrico responsável por transportar um sinal de RF entre dois pontos (RAZAVI, 2011).

### 4.1 Distorção Harmônica

Se um sinal senoidal é aplicado a um sistema não-linear, a saída deste sistema irá ser composta, além do sinal de entrada, de componentes em frequência que são múltiplos inteiros deste sinal, chamados de harmônicos.

Dado um sinal,  $x(t) = A \cos(\omega t)$ , onde  $\omega = 2\pi f$ , onde o mesmo é aplicado na entrada do sistema que possui a função de transferência estabelecida pela Equação 4.1, a resposta do sistema será descrito como na Equação 4.2 e 4.3.

$$y(t) = a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + \dots + a_n x^n(t) \quad (4.1)$$

$$y(t) = \alpha_1 A \cos(\omega t) + \alpha_2 A^2 \cos^2(\omega t) + \alpha_3 A^3 \cos^3(\omega t) + \dots \quad (4.2)$$

$$= \frac{\alpha_2 A^2}{2} + \left( \alpha_1 A + \frac{3\alpha_3 A^3}{4} \right) \cos(\omega t) + \frac{\alpha_2 A^2}{2} \cos(2\omega t) + \frac{\alpha_3 A^3}{4} \cos(3\omega t) \dots \quad (4.3)$$

As componentes indesejadas do sinal, se somam ao sinal, porém multiplicadas pelo termo da amplitude ao cubo, de forma que podem ser mais expressivas que o próprio sinal original.

## 4.2 Parâmetros S

Os parâmetros S dos componentes de RF fornecem todas as informações necessárias para calcular as variáveis da rede como o ganho e o coeficiente de reflexão. Por fornecerem simplicidade com uma boa precisão na determinação dos parâmetros através dos coeficientes da matriz S, são amplamente preferidos quando se trabalha com baixas amplitudes de sinal.

Um dispositivo de duas portas geralmente é descrito por tensões e correntes externas de cada porta ou por ondas de tensão incidentes (parâmetros S – Scattering parameters). Sendo N o número de portas, os coeficientes de espalhamento da matriz S serão da ordem de  $N^2$ .

As Equações 4.4, 4.5 e 4.6 relacionam as variáveis de corrente de entrada de corrente de saída e impedância do circuito, são dadas, respectivamente, por (NASCIMENTO, 1992)

$$I_1 = S_{11} * V_1 + S_{12} * V_2 \quad (4.4)$$

$$I_2 = S_{21} * V_1 + S_{22} * V_2 \quad (4.5)$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \text{ e } Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \quad (4.6)$$

Os parâmetros S do circuito podem ser calculados por

$$S_{11} = \frac{I_1}{V_1}, \text{ para curto circuito na saída } (V_2 = 0). \quad (4.7)$$

$$S_{22} = \frac{I_2}{V_2}, \text{ para entrada com impedância casada } (V_1 = 0). \quad (4.8)$$

$$S_{21} = \frac{I_2}{V_1}, \text{ para saída com impedância casada. } (V_2 = 0). \quad (4.9)$$

$$S_{12} = \frac{I_1}{V_2}, \text{ para curto circuito na saída } (V_1 = 0). \quad (4.10)$$

### 4.3 Cálculo da figura de ruído

Todos os componentes de um circuito que opere em alta frequência apresentam um ruído associado a uma fonte térmica. Este ruído pode ser modelado como uma resistência que varia com a temperatura. A potência de ruído térmico é apresentada por (POZAR, 2005):

$$N_o = GkT_kB \quad (4.11)$$

Sendo:

G o ganho do dispositivo

B a largura de banda

k a constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )

O primeiro estágio do circuito tem grande impacto no desempenho total, pois o termo ( $G_1$ ) é multiplicado no divisor de todas as parcelas seguintes. Quanto maior a quantidade de parcelas, maior será a influência dos primeiros elementos na figura de ruído do sistema.

O cálculo da figura de ruído de um circuito é calculado da seguinte forma

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_1} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \frac{NF_4 - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3} + \frac{NF_5 - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4} + \dots \quad (4.11)$$

Sendo:

F a figura de ruído do dispositivo

G o ganho do dispositivo (em dB)

NF a figura de ruído total do sistema

## 5. CIRCUITOS TRANSMISSORES

Há três principais métodos conhecidos para implementação de um *front-end* de transmissor RF, que são:

- I. Design de um transmissor encapsulado em um microchip, através de técnicas de circuitos integrados;
- II. Fabricação de um circuito eletrônico com componentes discretos e interligados através de uma Placa de Circuito Impresso (PCI);
- III. Utilização de uma FPGA para implementação de algoritmos (programados) e circuitos analógicos auxiliares.

O primeiro método possui um alto nível de complexidade, exige tempo de projeto e custo de implementação expressivo e profundos conhecimentos em concepção de CIs, em contrapartida pode oferecer uma solução mais eficiente e com menores dimensões físicas. A terceira opção possui vantagens como a possibilidade de reconfiguração do circuito físico remotamente, porém necessita de circuitos auxiliares que devem ser corretamente integrados, além do alto consumo de energia.

No presente trabalho, o projeto do *front-end* será desenvolvido com o segundo método, utilizando componentes eletrônicos já existentes no mercado e a prototipação de placas de circuito impresso para interligação e fixação dos componentes. Este método requer cálculos e conhecimentos de engenharia de microondas, no entanto o custo de implementação é mais baixo.

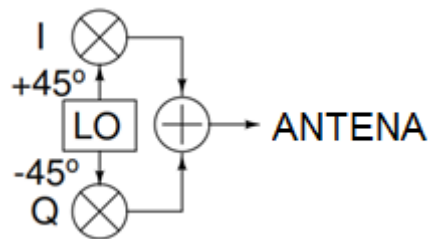
### 5.1 Arquitetura de circuitos transmissores

#### 5.1.1 Arquitetura de conversão direta (homódina)

A partir de um modelo simplificado de um transmissor representado na Figura 5.1, existem duas arquiteturas principais de transmissores digitais de RF: Arquitetura de Conversão direta ou homódina (Figura 5.2) e de conversão indireta (ou heteródina).



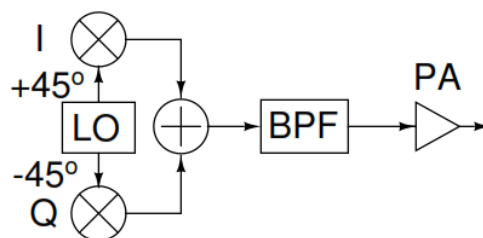
Figura 5.1 - Modelo básico de um transmissor



Fonte: (Razavi, 1998)

As arquiteturas se diferenciam, basicamente, na existência de um ou mais estágios de conversão do sinal. O circuito Homódino possui somente um estágio de conversão enquanto que o Heteródino possui dois ou mais estágios. (Razavi, 1998)

Figura 5.2 - Arquitetura de conversão direta (Homódina)



Fonte: (Razavi, 1998)

## 5.2 Componentes de um transmissor

Um transmissor basicamente é um sistema que é capaz de transmitir sinais. Todavia, para executar tal tarefa, é necessário que o sinal a ser transmitido esteja condicionado. Desta forma, é necessário realizar a amplificação, a filtragem e o tratamento da impedância do sinal. Para transmissores com mais de um canal é necessário também um controle de seleção do canal a ser transmitido e possivelmente a sincronização entre eles.

### 5.2.1 Filtros

Componente passivo seletivo em frequência, que atenua uma parte do sinal de entrada. Os tipos de filtros mais comuns são: Passa-baixa, passa-alta e passa-banda. O

funcionamento consiste na atenuação das frequências indesejadas, através da inserção de ruído, e a capacidade de permitir a passagem do sinal na frequência de interesse (Razavi, 2011)

### 5.2.2 Mixer

Realiza a soma ou diferença dos sinais de entrada. Possui 3 portas sendo duas de entrada e uma de saída, além da alimentação e aterramento. A frequência do sinal de saída resultante do mixer é:

$$f_{IF} = f_1 \pm f_2 \quad (5.1)$$

IF – Saída – Sinal da portadora modulado

LO – Entrada – Sinal do Oscilador com a frequência portadora

RF – Entrada – Sinal do Modulador com sinal responsável pela modulação

### 5.2.3 Amplificador

Para que o sinal de RF chegue na antena com potência suficiente, é necessário um estágio de amplificação. O amplificador basicamente aumenta a potência do sinal de entrada, aumentando sua amplitude. Entretanto todos amplificadores, como não são dispositivos ideais, acabam por distorcer no sinal de saída.

A qualidade da amplificação é diretamente proporcional a fidedignidade do sinal amplificado. Desta forma prioriza-se uma relação entre potência e qualidade condizente com as especificações do circuito projetado.

### 5.2.4 Multiplexador

O multiplexador é um dispositivo utilizado para fazer a seleção do canal de saída, através da combinação de bits de controle. Se existirem  $n$  entradas, serão necessários  $2^n$  bits de controle para selecionar a saída desejada.

Neste projeto, o transmissor possui 2 canais de entrada. Desta forma o multiplexador é responsável pela seleção do canal.

## **6. PROJETO DO CIRCUITO TRANSMISSOR**

### **6.1 Metodologia do projeto**

A metodologia do projeto consiste principalmente em:

- Revisão bibliográfica dos conceitos de comunicação de dados, micro-ondas, componentes eletrônicos, envolvidos no projeto;
- Estudo de conceitos, aplicações e legislação pertinentes ao projeto no âmbito de nano satélites;
- Definições de projeto: parâmetros, protocolos, tecnologias e arquiteturas;
- Cálculos e simulações referentes aos diferentes estágios de manipulação dos sinais;
- Construção de placas para validação dos componentes escolhidos;
- Testes das placas de validação com os componentes reais;
- Desenvolvimento de um canal completo do transmissor;

### **6.2 Considerações iniciais para o projeto**

Grande parte dos projetos de nano satélites possui estrutura modular, sendo possível desenvolvê-lo com ajuda de sistemas eletrônicos especializados vendidos comercialmente. Como o sistema de comunicação é um dos principais elementos do projeto, sendo talvez o de maior complexidade, grande parte dos projetistas acabam por buscar soluções comerciais, que possuem um custo expressivo pelo fato de utilizarem as mais modernas tecnologias de fabricação e por ser exaustivamente testadas (ADDAIM, 2010).

Devido à complexidade da construção de um transmissor de RF, especialmente para aplicações espaciais, o presente trabalho tem como intuito produzir um protótipo funcional de um Circuito Transmissor Homódino.

O desenvolvimento de transmissores nacionais para o ambiente espacial, é de grande importância para o desenvolvimento tecnológico do Brasil. A independência tecnológica, no âmbito espacial, é vital para que garantir o pioneirismo e o sucesso de projetos apoiados pela AEB e MCT (AEB, 2015).

Para contextualização do projeto, foi realizada uma análise de tecnologias de transmissão empregadas em nanossatélites lançados nos últimos anos. Através da análise dos dados obtidos da Tabela 6.3 pode-se afirmar que algumas características são comuns à maioria dos projetos, dessa forma, a Tabela 6.1 apresenta os dados dos padrões e parâmetros mais utilizados pelos projetos analisados.

Pode-se perceber que a velocidade de transmissão é o parâmetro com a maior variação entre os considerados. Essa variação ocorre por diversos fatores inerentes ao comportamento apresentado pelos circuitos, sinais transmitidos e definições de projeto.

Tabela 6.1 – Características genéricas de Cubesats

Frequência de <i>Downlink</i>	~2,4 Ghz e ~433 Mhz
Taxa de transferência de dados	1,2 Kbps a 1,5Mbps
Potência de transmissão	500mW a 2W
Protocolo de comunicação	AX.25

Tabela 6.2: Parâmetros iniciais servindo de base para a escolha dos componentes

<b>Definições iniciais para o projeto</b>	
Frequência de transmissão	2,26 Ghz
Arquitetura do circuito	Homódina
Tipo de encapsulamento dos componentes	SMD
Montagem dos circuitos físicos	PCI
Modulação Digital	BPSK
Protocolo de comunicação	AX.25
Impedância das trilhas e componentes	50 $\Omega$
Software para simulação dos sinais	Matlab
Software para o layout das PCIs	Kicad

Tabela 6.3 – Transmissores de Cubesats lançados entre 2009 e 2011

Launch Date/Location	Satellite(s)	Size	Frequency	Power	Protocol	Baud Rate/Modulation
May 19, 2009 Minotaur-1 Wallops, US	PharmaSat	3U	2.4 GHz	1 W	Proprietary	15 kbps
	CP6	1U	437 MHz	1 W	CC1000 AX.25	1200 baud AFSK
	HawkSat-I	3U	425 GHz	1 W	MHX-425 NSP	1200 baud AFSK
	AeroCube-3	1U	900 MHz	2 W	Freewave FHSS	Proprietary
July 30, 2009 STS-127	Aggiesat-2	1U	436.25 MHz	1 W	AX.25	1200 baud AFSK
September 23, 2009 ISILaunch 01 India	SwissCube	1U	437.505 MHz	1 W	AX.25	FSK 1200 baud
	ITUpSat1	1U	437.325 MHz	1 W	Custom	GFSK 19.2 kbps
	UWE-2	1U	437.385 MHz	500 mW	AX.25	FSK 9600 BPS
	BeeSat	1U	436 MHz	500 mW	AX.25	4800 and 9600 GMSK
May 20, 2010 Japanese H-IIA Japan	Hayato (K-Sat)	1U	13.275 GHz		Custom	10kbps/1 Mbps
	Waseda-Sat1	1U	437.485 MHz	1 W	AX.25	9600 baud FSK
	Negai	1U	427.305 MHz	1 W	AX.25	1200 FSK
July 12, 2010 PSLV-C15 India	TISat-1	1U	437.305 MHz	400 mW	Custom CW	110 WPM
	StudSat	1U	437.505 MHz	450 mW	AX.25	9600 baud FSK
November 20, 2010 STP-S26 Kodiak, Alaska	O/OREOS	3U	437.305 MHz	1 W	AX.25	1200 FSK
	RAX1	3U	437.505 MHz	2 W	AX.25	9600 baud FSK
			2.4 GHz	2 W		
	NanoSail-D2	3U	437.275 MHz	1 W	AX.25	1200 baud FSK
August 12, 2010 Falcon 9-002 Capa Canaveral	Perseus (4)	1.5U	PI	PI	PI	PI
	QbX (2)	3U	PI	PI	PI	PI
	SMDC-ONE	3U	UHF	PI	PI	PI
	Mayflower	3U	437.600 MHz	900 mW	AX.25	1200 AFSK
March 4, 2011 Tarus XL Failure Vandenberg, CA	E1P	1U	437.505 MHz	1 W	KISS/Custom	1200 FSK
	Hermes	1U	2.4 GHz	1 W	MHX-2420	56.2 kbps
	KySat	3U	436.790 MHz	1 W	AX.25	1200 FSK
Oct 12, 2011 India	JUGNU	3U	437.275 MHz	500 mW	CW	20 WPM
Oct 28, 2011 Elana3 Vanderburg, CA	DICE-1/2	1.5U	460/465 MHz	2 W	PI	1.5 Mbps
	M-Cubed	1U	437.485 MHz	1 W	AX.25	9600 GMSK
	RAX-2	3U	437.345 MHz	2 W	AX.25	9600 FSK
			2.4 GHz	2 W		
	E1P-2	1U	437.505 MHz	850 mW	AX.25	1200 FSK
	AubieSat-1	1U	437.475 MHz	708 mW	CW	20 WPM

Fonte: (MURI, 2012)

### 6.3 Simulação de transmissão - Perdas de transmissão no espaço livre

O objetivo foi simular, com auxílio do software MATLAB®, a potência recebida por uma antena isotrópica, com a ajuda de cálculos aproximados pela equação de Friis, através da transmissão em três frequências diferentes (500 MHz, 1 GHz e 3 GHz) e verificar o efeito da frequência no desvanecimento do sinal e a potência recebida ao longo de 600 km.

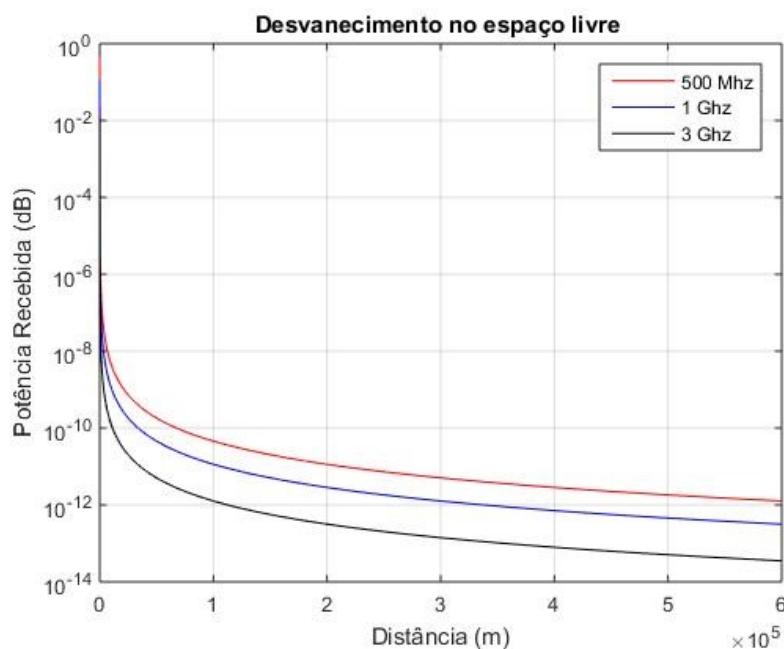
Para realizar o cálculo, foram utilizados valores extraídos do projeto CONASAT do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em que a potência de transmissão utilizada foi de 0,5 W e o ganho da antena transmissora 6 dB. Segundo o INPE, a recepção dos dados pela estação terrena do CRS localizado em Santa Maria é feita através de uma antena com ganho de 21,4 dB. Desse modo foram utilizados os valores de  $G_r=6$  dB e  $G_r=20$  dB para simulação.

Através da simulação, obteve-se para uma transmissão de 2,26 GHz com potência de 0,5 W, a potência recebida de aproximadamente 6,20 fW a 600 km de distância. É perceptível que o desvanecimento é inversamente proporcional a frequência. Os valores obtidos para 500 MHz, 1 GHz e 3 GHz foram, respectivamente, 1,26 pW, 31,60 fW e 3,52 fW.

O gráfico da Figura 6.1 apresenta a relação de perda em função da distância em escala semilog e a Figura 6.2, em escala loglog, para linearizar a curva de desvanecimento.

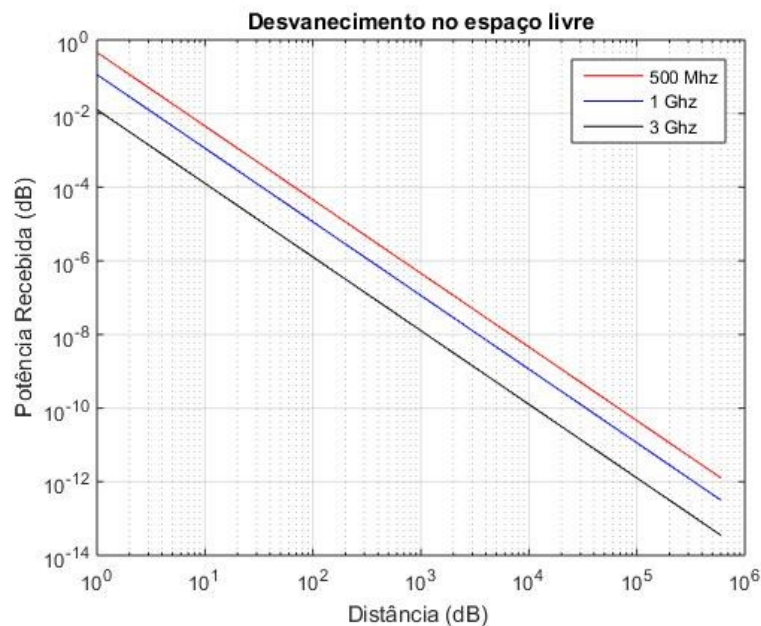
A fórmula de Friis nos fornece uma aproximação otimista, os dados obtidos servem como base para cálculo de outros parâmetros nas próximas etapas do projeto.

Figura 6.1 – Gráfico do desvanecimento do sinal



Fonte: (Autoria própria). Gráfico representando o desvanecimento do sinal ao longo da distância de 600 Km para as frequências de 500 MHz, 1 GHz e 3 GHz (eixo X em dBw e eixo Y representando a distância em metros).

Figura 6.2 – Gráfico que apresenta a potência do sinal na antena do transmissor



Fonte: (Autoria própria). Gráfico das três frequências representando A potência recebida pela distância de 600 Km (Eixo X em dBw e eixo Y dB).

#### 6.4 Escolha da Arquitetura do circuito

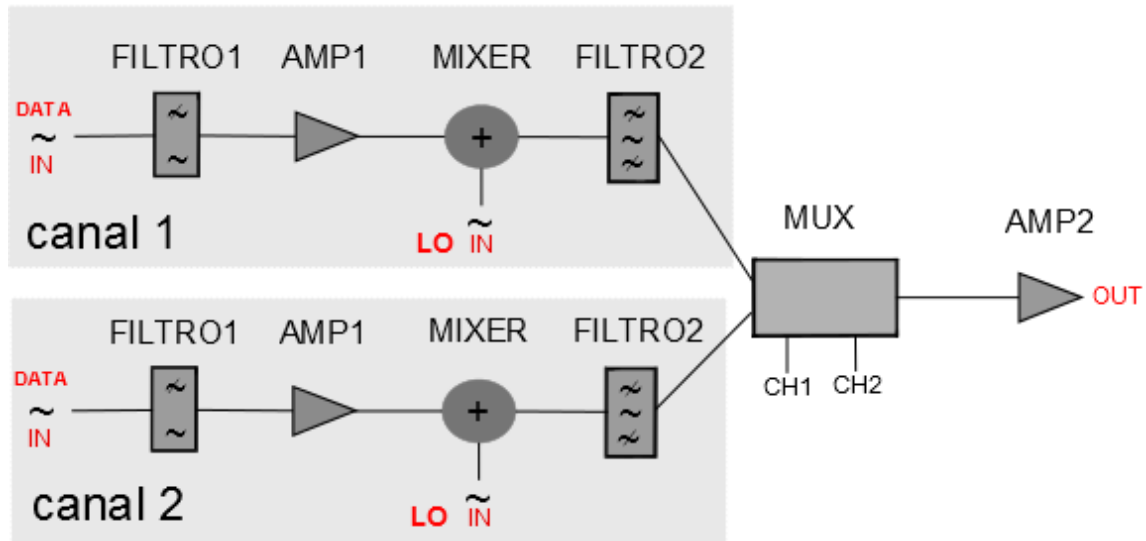
Como o projeto tem como objetivo apresentar um protótipo de um transmissor, buscou-se optar por elementos de menor complexidade e custo. Essa abordagem é válida, pois para projetos de alta complexidade deseja-se, inicialmente, simplificar e dividir o problema para atingir um resultado positivo.

Após um estudo realizado sobre as arquiteturas de transmissores optou-se pela arquitetura homódina devida a baixa complexidade e a menor quantidade de componentes utilizados.

Foi introduzido um amplificador logo após o Filtro 1, utilizando uma técnica que permite aumentar significativamente a SNR resultante utilizando um elemento com alto ganho nos primeiros estágios do circuito (RAZAVI, 2001).

A Figura 6.3 apresenta um *front-end* de transmissor Homódino de dois canais.

Figura 6.3 – Diagrama do transmissor com dois canais



Fonte: (Autoria própria).

## 6.5 Escolha dos componentes do circuito

Para especificar os componentes, torna-se necessário adquirir informações das características pelo projeto. A taxa de dados, a distância máxima de transmissão, o consumo de potência, as dimensões físicas são exemplos dessas características.

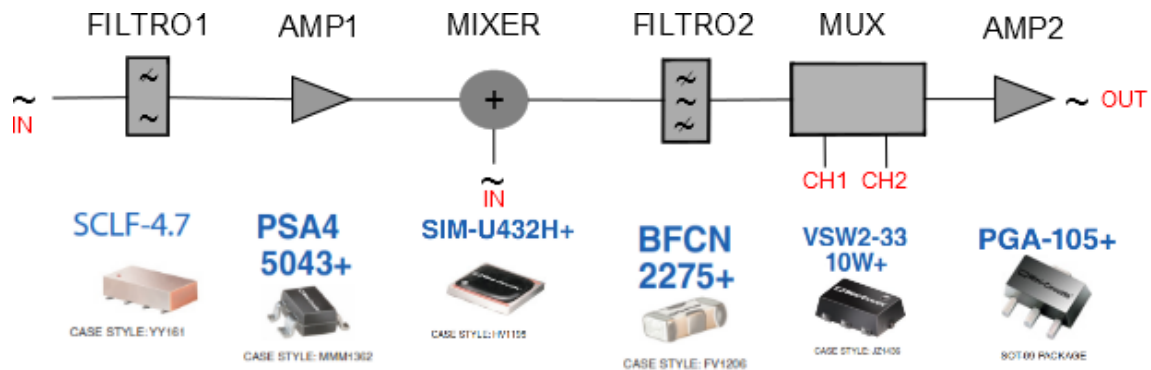
A frequência definida para a transmissão neste projeto é 2,26 GHz. Esta frequência está na faixa denominada UHF, também classificada como Banda S. Este parâmetro apresenta maior impacto na escolha dos componentes.

Para todos os componentes, priorizou-se os que apresentaram menor adição de ruído e distorção do sinal, maior ganho, dimensões físicas e encapsulamento apropriadas e um custo x benefício ótimo. Todos os componentes escolhidos são provenientes da empresa Minicircuits, sediada nos Estados Unidos, por oferecerem uma vasta gama de dispositivos com certificações de qualidade comprovadas por diversos projetistas.

Utilizando todos os componentes que compõem um canal completo do transmissor, o circuito resultante pode ser visualizado na Figura 6.4.



Figura 6.4 – Diagrama de um canal do circuito transmissor



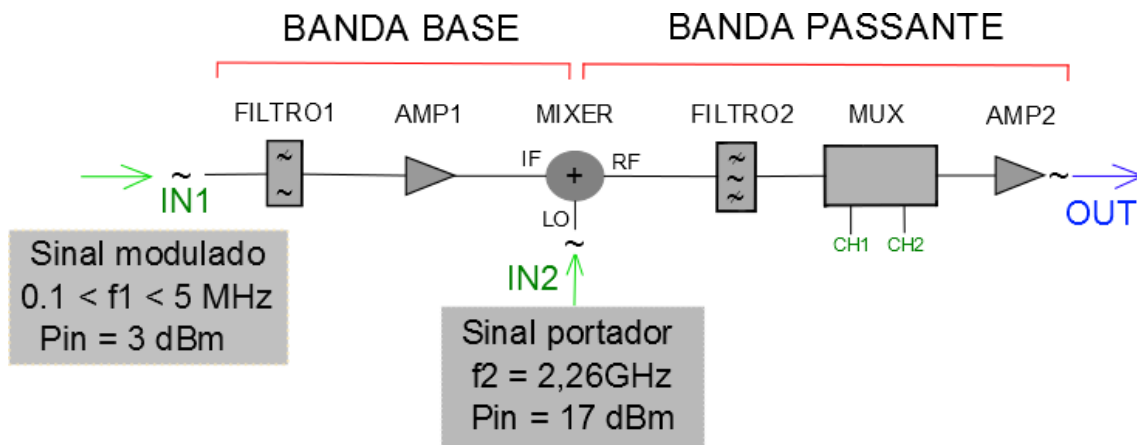
Fonte: (Fonte própria). Diagrama de um canal do circuito transmissor com a ilustração dos componentes selecionados

Para efeitos de teste, o sinal de entrada do mixer, contendo a portadora com 2,26GHz, pode ser gerado por um gerador de sinais. Pode-se também utilizar um VCO (Voltage Control Oscillator) para realizar a geração do sinal na frequência de interesse. O sinal de entrada, conectado a entrada do Filtro 1, também pode ser gerado por um gerador de sinal. Esse sinal contém a informação modulada a ser transmitida.

## 6.6 Cálculo da potência dos sinais

O componente que limita a potência dos sinais de entrada é o mixer, cada entrada tem o limite de potência estabelecido pelo fabricante em 17 dBm. A Figura 6.5 apresenta um diagrama dos sinais na entrada do componente.

Figura 6.5 – Representação dos sinais no diagrama do transmissor



Fonte: (Autoria própria). Diagrama do transmissor apresentando o sinal de entrada, o sinal portador e as respectivas potências na entrada do mixer.

Tabela 6.4: Sinais de entrada e saída do circuito

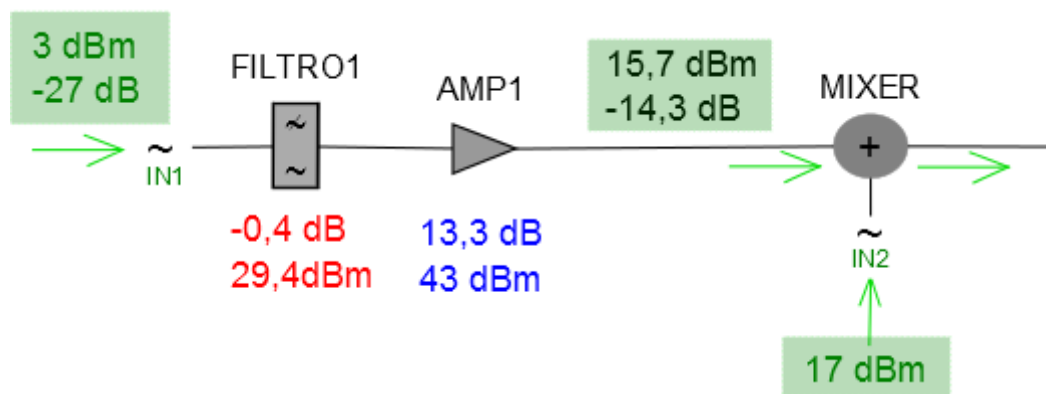
Entrada	Potência (dBm)	Frequência (Mhz)
<b>IN1</b>	+3 dBm	0.1 – 800
<b>IN2</b>	+17 dBm	2600

Os cálculos foram realizados da seguinte forma:

- Sinal de entrada **IN1 (IF)**:  $+3 \text{ dBm} = -27 \text{ dBW} \sim 2 \text{ mW}$
- Cálculo do sinal **IF**:  
  
Em dBW:  $IF = -27 \text{ dBW} - 0,4 \text{ dB} + 13,3 \text{ dB} = -14,1 \text{ dBW}$   
Em dBm:  $IF = -14,1 \text{ dBW} \approx 15,9 \text{ dBm}$   
Em watts =  $0.002 \text{ W} * 0,912 * 21.38 = 0,03899 \text{ W} \approx 39 \text{ mW}$
- Sinal de entrada **IN2 (LO)**:  $17 \text{ dBm} = -13 \text{ dBW} \approx 50 \text{ mW}$

A Figura 6.6 apresenta os sinais de entrada do circuito, passando por diferentes estágios até as portas de entradas do mixer.

Figura 6.6 – Diagrama dos sinais na entrada do mixer

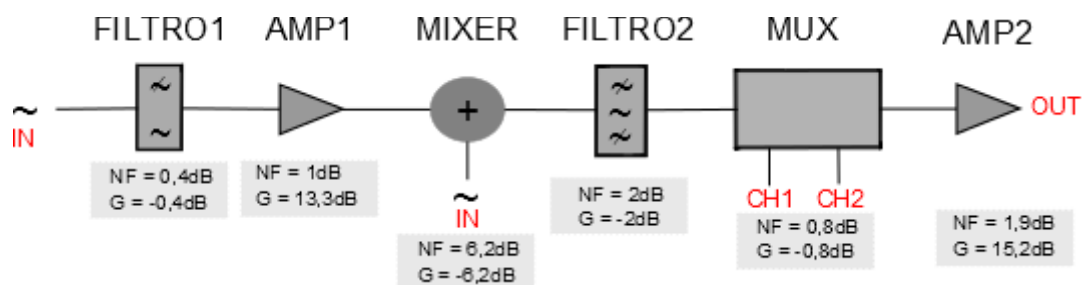


Fonte: (Autoria própria). Representação dos sinais nas portas de entradas do mixer, respeitando os limites do componente.

## 6.7 Análise de figura de ruído

A análise de figura de ruído é de extrema importância para a constatação da SNR do sinal que será transmitido através da antena. A qualidade do sinal está intimamente ligada ao valor da SNR. Além disso, pode-se verificar se a potência do sinal está condizente com o propósito do projeto.

A Figura 6.7 apresenta um diagrama dos componentes do transmissor com seus respectivos valores de ganho e figura de ruído em dB.



Fonte: (Autoria própria)

Tabela 6.5: Representação dos valores de ganhos e figura de ruído em valores lineares e em dB

	1	2	3	4	5	6
	Passabaixa	AMP1	Mixer	Passabanda	MUX	AMP2
NF (dB)	0,4	1	6,2	2	0,8	1,9
NF	1,09	1,26	4,17	1,58	1,20	1,55
G (dB)	-0,4	13,3	-6,2	-2	-0,8	15,2
G	0,91	21,38	0,24	0,63	0,83	33,11

O cálculo da figura de ruído do circuito pode ser visualizado abaixo.

$$NF = 1,09 + \frac{1,26 - 1}{0,91} + \frac{4,17 - 1}{0,91 \cdot 21,38} + \frac{1,58 - 1}{0,91 \cdot 21,38 \cdot 0,24} + \frac{1,2 - 1}{0,91 \cdot 21,38 \cdot 0,24 \cdot 0,63} + \frac{1,55 - 1}{0,91 \cdot 21,38 \cdot 0,24 \cdot 0,63 \cdot 0,83}$$

$$NF = 1,09 + 0,28 + 0,16 + 0,12 + 0,07 + 0,22 = 1,92 = \mathbf{2,94dB}$$

$$G = (-0,4 + 13,3 - 6,2 - 2 - 0,8 + 15,2)dB = \mathbf{19,1 dB}$$

## 6.8 Projeto do Layout das placas de validação dos componentes

As placas de circuito impresso ou PCIs, permitem realizar a fixação e a interligação de componentes através de trilhas de condução. O projeto do layout das placas é determinado pelas ligações elétricas e características dos componentes e dos sinais.

O encapsulamento dos componentes é muito importante para a fabricação das placas. A menor largura de trilha exigida pode ser verificada, geralmente, na menor distância entre pinos dos componentes. É necessário verificar se os equipamentos que irão realizar a prototipação e a soldagem são compatíveis com as especificações requeridas pelos componentes e trilhas escolhidos.

É de grande importância utilizar componentes e matérias de qualidade, da mesma forma que técnicas que visam melhorar a eficiência do circuito ou reduzir os efeitos indesejados. O casamento de impedâncias das trilhas e o uso de vias de aterramento são técnicas amplamente aconselhadas e fornecem um método efetivo para reduzir os efeitos das linhas de transmissão.

Para desenvolver o layout para as placas de teste dos componentes escolhidos, foi utilizado o software Kicad, pelo fato de ser de livre distribuição, com ampla documentação e suporte. O primeiro passo foi fazer uma busca para tentar encontrar modelos de esquemáticos com a configuração do encapsulamento dos componentes. Como não foram encontrados a maioria dos modelos, foi necessário criá-los. O primeiro modelo criado foi o filtro SCLF-4.7+, que utiliza o socket YY161 da Minicircuits. A Figura 6.8 apresenta os dados para construção do layout para o componente SCLF-4.7+

**SCLF-4.7+**  
**SCLF-4.7**

**Case Style: YY161**

**Outline Drawing**

**Demo Board MCL P/N: TB-187+  
Suggested PCB Layout (PL-049)**

**Notes:**

1. TRACE WIDTH IS SHOWN FOR ROGERS RO4350B WITH DIELECTRIC THICKNESS (500" ± .002"). COPPER: 1/2 OZ. EACH SIDE. FOR OTHER MATERIALS TRACE WIDTH MAY NEED TO BE MODIFIED.
2. BOTTOM SIDE OF THE PCB IS CONTINUOUS SOLDER MASK.

**Legend:**

- DENOTES PCB COPPER LAYOUT WITH SMOG (GOLDER MASK OVER BARE COPPER)
- DENOTES COPPER LAND, PATTERN FREE OF SOLDER MASK
- DENOTES COPPER LAYOUT WITH SMOG (GOLDER MASK OVER BARE COPPER)

### 6.8.1 Impedância das trilhas da PCI

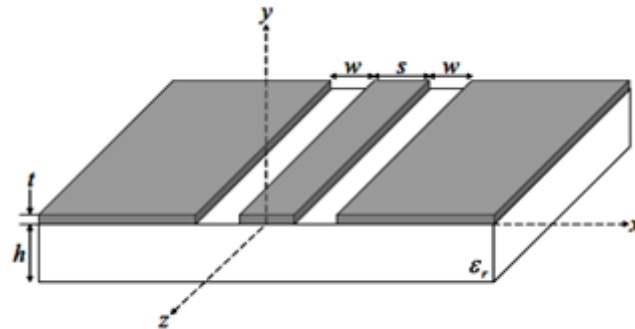
Para dimensionar corretamente as trilhas da PCI com esse valor de impedância, foi necessário calcular a largura da trilha.

O dimensionamento das linhas de uma CPW pode ser feito através de uma combinação de valores das dimensões. O cálculo da estrutura das linhas foi executado com auxílio do software de livre distribuição Kicad, que realiza o cálculo de linhas de micro-ondas. Deve-se analisar com cuidado os parâmetros utilizados pois a precisão

requerida pelo equipamento responsável pelo design das trilhas é limitada, desta forma exige-se a compatibilidade das dimensões calculadas. (WEN, 1969) (SIMONS, 2001)

O resultado dos layouts produzidos para os componentes seleccionados do transmissor pode ser visualizado no ANEXO B.

Figura 6.9 – Ilustração da estrutura de uma CPW



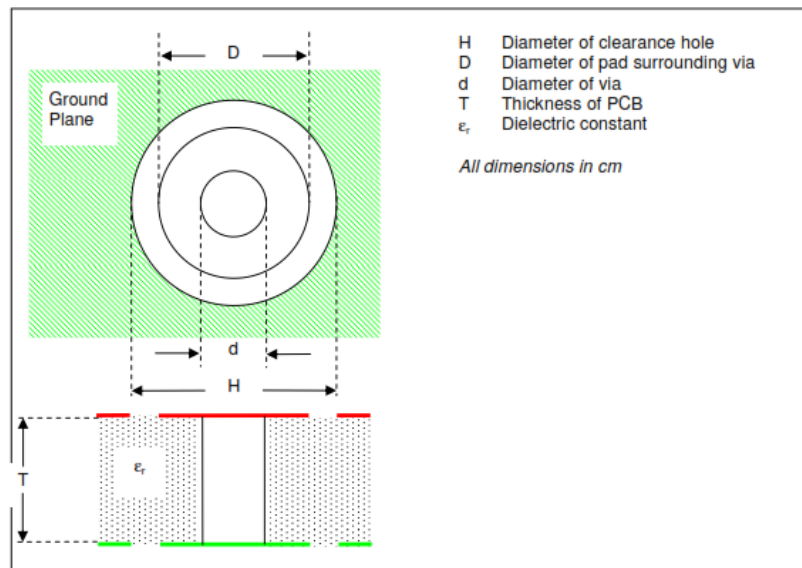
Fonte: (SHARMA, 1993)

#### 6.8.2 Vias de aterramento

As vias de aterramento são fundamentais para aumentar a eficiência da transmissão dos sinais de alta frequência em uma PCI. Trata-se de uma técnica muito utilizada que visa equilibrar o indesejado efeito dos campos magnéticos gerados pelo sinal.

As vias conectam os planos de terra das duas superfícies da PCI. Recomenda-se dimensionar o espaçamento entre vias com um valor de  $\lambda/30$ . A Figura 6.10 ilustra as medidas das vias de aterramento. (SEMTEC, 2006)

Figura 6.10 – Medidas das vias de aterramento



Fonte: (SEMTEC, 2006)

Sendo  $c = 300.000 \text{ m/s}$ , o comprimento de onda do sinal de 2,26 GHz é dado por:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300.000.000}{2.260.000.000} = 0.132m$$

O cálculo da distância mínima recomendada entre vias de aterramento resultou em:

$$d = \frac{\lambda}{30} = \frac{0.132}{30} = 0.0044m = 4.4mm$$

## 7. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs a construção de um protótipo de transmissor Homódino, que opera em Banda S. Foram estudadas diferentes arquiteturas e técnicas para implementar o circuito. A análise de figura de ruído dos componentes do sistema garante que o sinal a ser transmitido seja corretamente dimensionado ao longo dos diferentes estágios do transmissor. Além disso foi feita uma pesquisa e escolha de componentes reais, e desenvolvidas placas de validação para cada um dos componentes selecionados e foram utilizadas técnicas para minimização dos efeitos das altas frequências nas placas.

Outras implementações mais arrojadas, aprimoramentos e aplicações de novas técnicas podem vir a utilizar as contribuições deste projeto.

As próximas etapas para dar continuidade ao projeto são:

- Simulação elétrica dos sinais e componentes de um canal do circuito;
- Implementação e teste do canal completo em um circuito físico real;
- Implementação de um transceptor Homódino;
- Utilização de um sistema digital para modulação, permitindo vários esquemas remotamente configurável;
- Prototipação em FPGA de um transmissor remotamente configurável;



## ANEXO A

Este anexo apresenta as características dos componentes selecionados para integrar o transmissor. Os dados foram retirados dos datasheets dos componentes fornecidos pela empresa Minicircuits.

### Filtro 1

**Modelo:** SCLF-4.7 (PASSA-BAIXA)

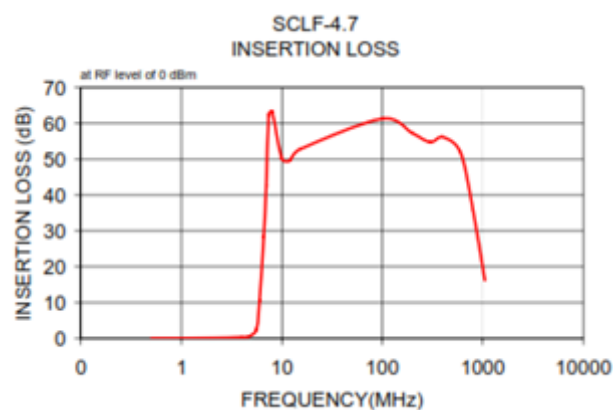
**Fcorte:** 4,7 MHz

**Potência de entrada:** 27 dBm

0,5W (máx.)

**NF:** 0,4 dB

Figura A1 – Parâmetros do componente SCLF-4.7



Fonte: (Minicircuits, 2014). Gráfico apresentando a resposta em frequência do filtro 1.

Link do Datasheet: [<http://www.minicircuits.com/pdfs/SCLF-4.7.pdf>]

### Amplificador 1 (PA1)

**Modelo:** PSA4-5043+

**Foperação:** 0,05 – 4 GHz

**Vin:** 3 V(min) 5 V(típico) 6 V (máx.)

**Id:** 58mA (típico) - 76 mA (máx.)

**Pin** : 17 dBm (contínuo) -  
 23 dBm (máx. 5 minutos)  
**Pout**: 20,7 dBm @ 1 dB compressão  
**IP3**: 17 dBm (máx.)  
**NF**: 1 dB @ 2 GHz  
**GANHO**: 13,3 dB @ 2 GHz  
 mW  
 (máx.)

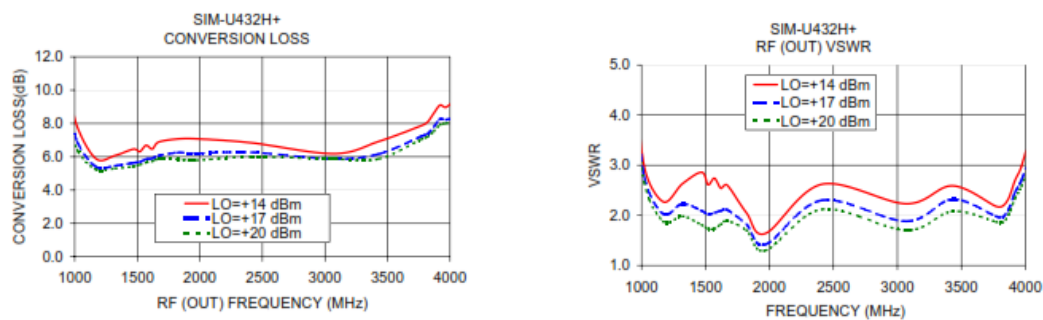
**Potência máxima**: 400  
**Dissipação**: 0,38W

Link do Datasheet: [<http://www.minicircuits.com/pdfs/PSA4-5043+.pdf>]

## Mixer

Modelo: SIM-U432H+  
**IN1 (IF)**: 17 dBm (máx.) = 50 mW  
**IN2 (LO)**: 17 dBm (máx.) = 50 mW  
**Potência máxima**: 100 mW

Figura A2 – Parâmetros e ilustração do componente SIM-U432H+



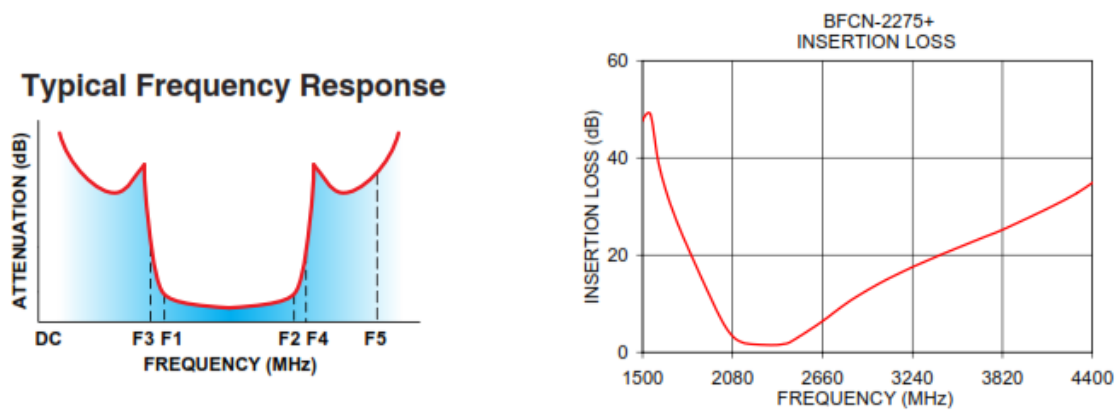
Fonte: (MINICIRCUITS, 2015). À esquerda o gráfico da perda de conversão pela frequência de saída e a direita a potência de saída em relação a frequência

Link do Datasheet : [<http://www.minicircuits.com/pdfs/SIM-U432H+.pdf>]

## Filtro 2

Modelo: BFCN-2275+  
**Fpassagem**: 2,170 – 2,380 GHz  
**Potência de entrada**: 31,75 dBm = 1,5 W máx.  
**NF**: 0,8 dB

Figura A3 – Resposta em frequência e inserção de perdas do filtro 2



Fonte: (MINICIRCUITS, 2014)

Link do Datasheet : [<http://www.minicircuits.com/pdfs/BFCN-2275+.pdf>]

## Multiplexador (MUX)

**Modelo:** VSW2-33-10W+

**Foperação:** 0,05 – 3 GHz

**Potência do sinal de entrada:** 9 W @ 2 GHz

**NF:** 0,8 dB máx.

**Potência máxima:** 100 mW

**Saída RF Common:** Canal 1 e canal 2 de acordo com os sinais de seleção

**Sinais de seleção das entradas(canaís):**

Tabela A1 – Tabela representando as condições de entrada para seleção do canal de saída do multiplexador

**Truth Table** (State of control voltage selects the desired switch state)

State of Control Voltage		RF Common to	
V <sub>CTL1</sub>	V <sub>CTL2</sub>	RF1	RF2
Low	High	OFF	ON
High	Low	ON	OFF
Low	Low	N/A	N/A
High	High	N/A	N/A

ON- low insertion loss state    OFF- Isolation State

Fonte: (MINICIRCUITS, 2014)

Link do Datasheet: [<http://www.minicircuits.com/pdfs/VSW2-33-10W+.pdf>]

O funcionamento do multiplexador é representado pela tabela (5) e pelas expressões abaixo:

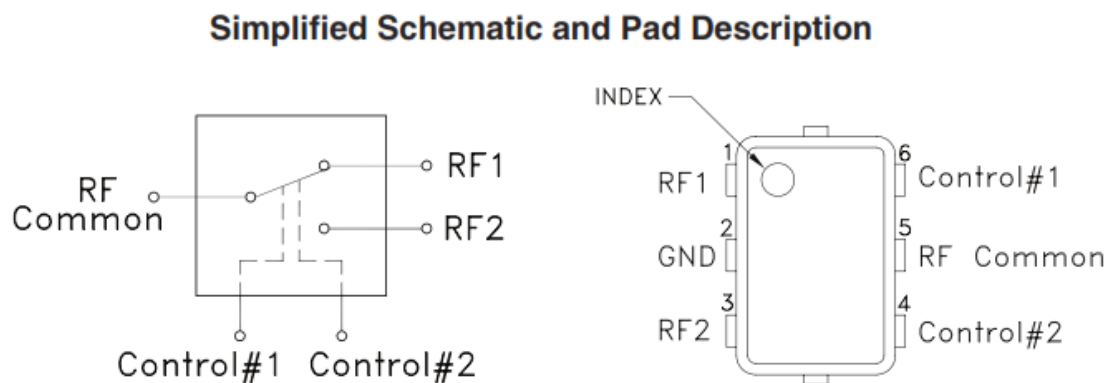
$V_{CTL1}^* = 5\text{ V}$  e  $V_{CTL2} = 0\text{ v}$  - Selecciona o canal 1 para saída

$V_{CTL1}^* = 0\text{ V}$  e  $V_{CTL2} = 5\text{ v}$  - Selecciona o canal 2 para saída

\* $V_{CTL1}$  (ou Control #1) = C1(layout)

\*\* $V_{CTL2}$  (ou Control#2) = C2 (layout)

Figura A4 – Funcionamento do componente MUX1



Function	Pad Number	Description
RF COM	5	RF Common/ SUM Port, requires DC block (see Fig. 2)
RF1	1	RF Out #1/In Port #1, requires DC block (see Fig. 2)
RF2	3	RF Out #2/In Port #2, requires DC block (see Fig. 2)
Control #1 ( $V_{CTL1}$ )	6	Control IN #1
Control #2 ( $V_{CTL2}$ )	4	Control IN #2
GND	2	RF DC Ground

Fonte: (MINICIRCUITS, 2013)

Tabela A2 – Tabela com as informações de tensão e corrente de funcionamento do componente

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
Control Voltage Low ( $V_{CTL}$ )	0	—	0.2	V
Control Voltage High ( $V_{CTL}$ )	2.8	—	5.2	V
Control Current at ( $V_{CTL}$ )= 3V	—	—	—	$\mu\text{A}$
( $V_{CTL}$ )= 5V	—	20	—	
	—	42	—	

Fonte: (MINICIRCUITS, 2013)

Link do Datasheet: [<http://www.minicircuits.com/pdfs/VSW2-33-10W+.pdf>]

## **Amplificador 2 (AMP2)**

**Modelo:** PGA-105+

**Foperação:** 0,4 – 2,6 GHz

**Vin:** 3 - 5 V

**Imax:** 66 mA

**IN :** 17 dBm (contínuo) - 23 dBm (máx. 5 minutos)

**OUT:** 19,3 dBm @ 1 dB compressão

**IP3:** 32,7 dBm (máx.)

**NF:** 1.9 dB @ 2 GHz

**GANHO:** 15,2 dB @ 2 GHz

**Potência máxima:** 400 mW

**Dissipação:** 0,47W (máx.)

Link do Datasheet: [<http://www.minicircuits.com/pdfs/PGA-105+.pdf>]

## APÊNDICE A

O anexo B apresenta os layouts das placas de validação dos componentes utilizados neste projeto desenvolvidos no software CAD de distribuição livre Kicad.

Todas as trilhas que transportam o sinal de 2,26 GHz foram dimensionadas para realizar o casamento de impedâncias de  $50\ \Omega$ .

Figura B1 – Layout do filtro 1

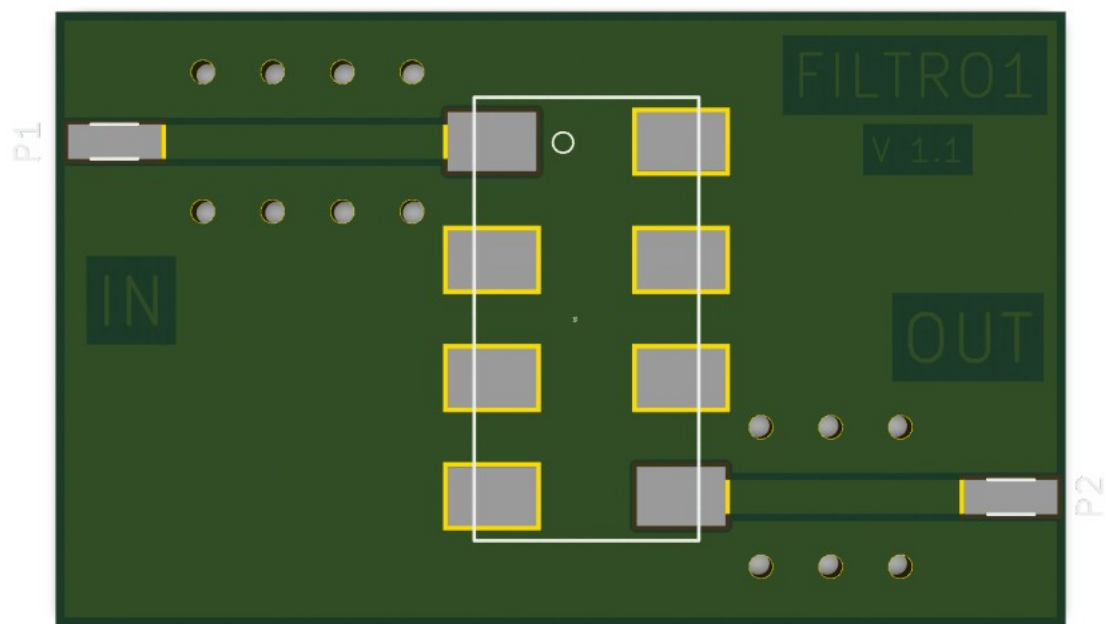


Figura B2 – Layout do componente AMP1

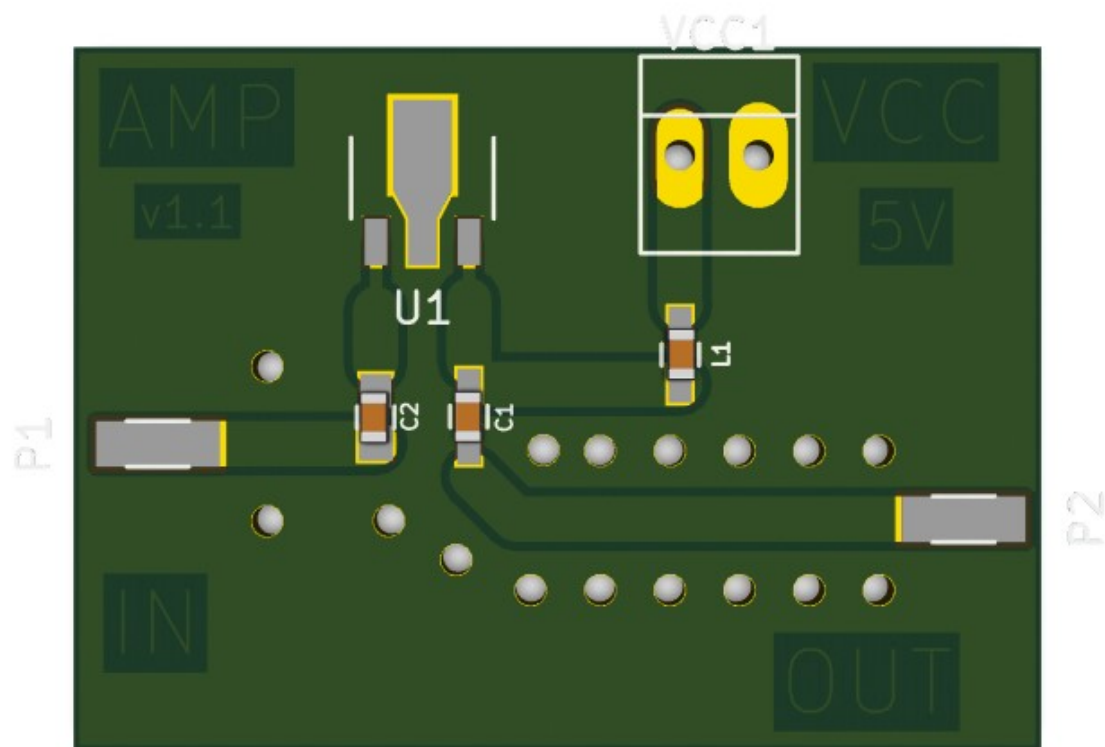


Figura B3 – Layout do componente AMP2

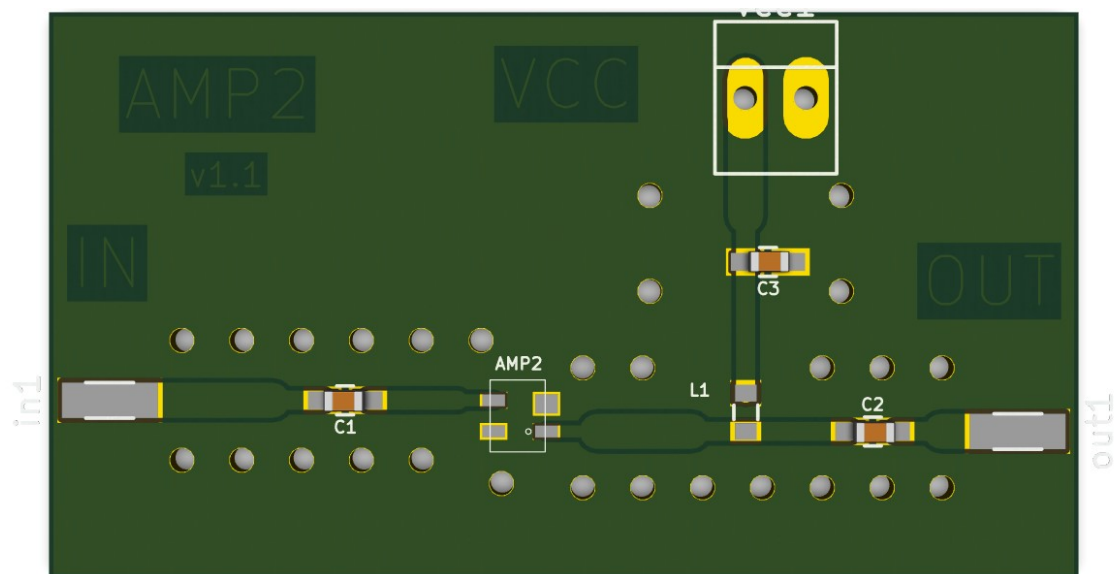


Figura B4 – Layout do filtro 2

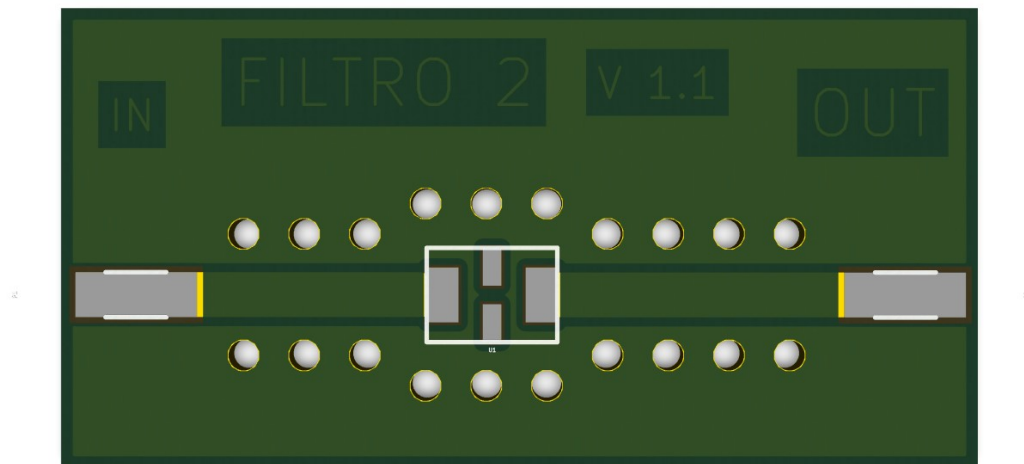


Figura B5 – Layout do mixer

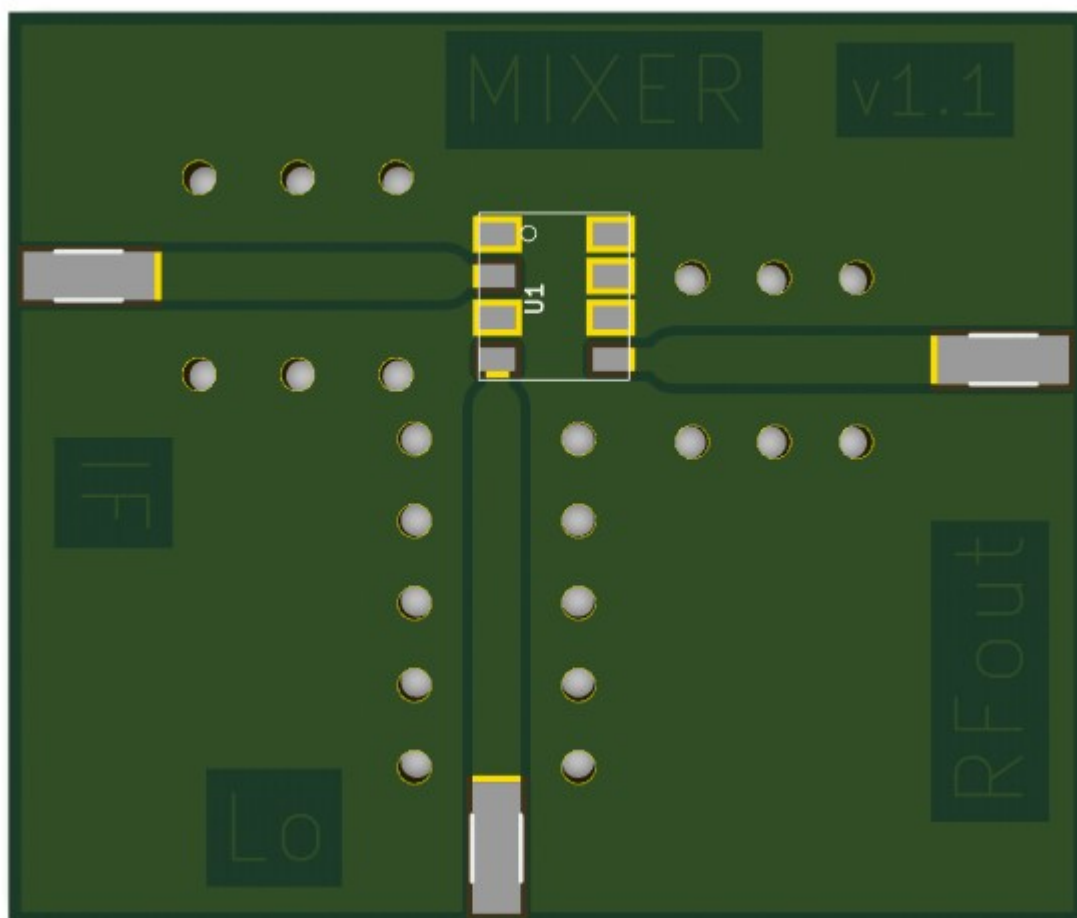
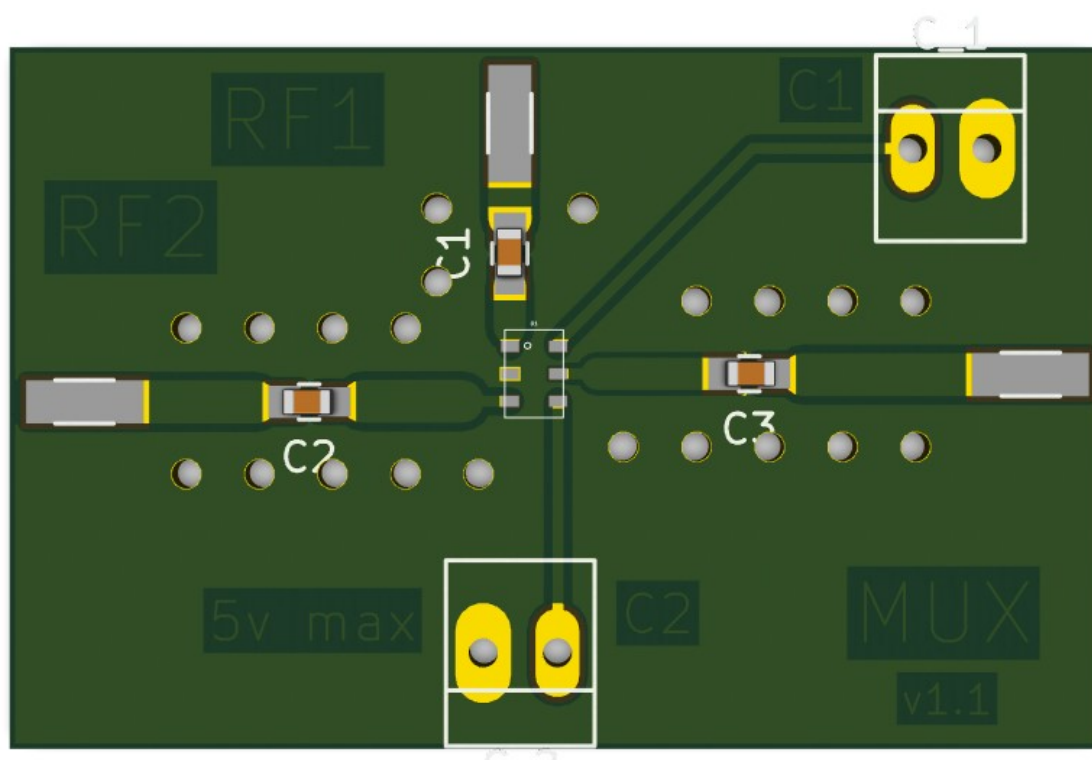




Figura B6 – Layout do componente MUX



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOWICK, C.; AJLUNI, C.; BLYLER, J. **RF Circuit Design**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2011.

ADDAIM; A. KHERRASA, K. **Design of Low-cost Telecommunications CubeSat-class Spacecraft**, *Aerospace Technologies Advancements*, ISBN: 978-9537619-96-1, InTech, 2010.

BENTUM, Mark. **OLFAR - Orbiting Low Frequency Antenna for Radio Astronomy**. TUDELFT. 2014.

HAYKIN, S. **Sistemas de comunicação: Analógicos e digitais**. Bookman, 2004.

LATHI, B. P. **Modern Digital and Analog Communication Systems**. Oxford USA Trade, 1998.

KINCHIN, A. **Mathematical foundation of information theory**. Dover Publications, 1957.

MURI, Paul; MCNAIR, Janise. **A Survey of Communication Sub-systems for Intersatellite Linked Systems and CubeSat Missions**. *Journal of communications*, Vol 7 N° 4, 2012.

NASCIMENTO Juarez do, **Telecomunicações**. Makron Books, 1992.

POZAR, D. M. **Microwave and RF Wireless Systems**. 1 ed. New York, USA: [s.n.], 2001.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 3.ed. Hoboken, NJ, USA: J. Willey & Sons, 2005.

RAPPAPORT, T. **Wireless Communications**. 2nd Edition, 2011.

RAZAVI, B. **RF Microelectronics**. Prentice Hall, 1998.

RAZAVI, B. **RF Microelectronics**. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2011.

RAZAVI, B. **Design Considerations for Direct-Conversion Receivers.** IEEE Transactions on Circuits and Systems, [S.l.], v.44, n.6, 1997.

SEMTECH. **AN 1200.04 Application Note RF Design Guidelines: PCB Layout and Circuit Optimization,** 2006.

SILVEIRA, J. **Comunicação de Dados e Sistemas de Teleprocessamento.** Makron, McGrawHill, 2002.

SIMONS, R. **Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems.** John Wiley & Sons, Inc. The CubeSat Program. **Cal Poly SLO CubeSat Design Specification.** Rev. 13, 2014.

Stallings, W. **Wireless Communications and Networks,** Prentice Hall, 2002

Stallings, William. **Data and Computer Communications.** Prentice Hall, 6th edition, 2000.

A. K. Sharma and T. Itoh. **Special Issue on Modeling and Design of Coplanar Monolithic Microwave and Millimeter-Wave Integrated Circuits.** IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 41, No. 9, Sept. 1993.

SEMTECH. **RF Design Guidelines:PCB Layout and Circuit Optimization.** AN 1200.04, 2006.

Tanenbaum, Andrew S. **Redes de Computadores,** Editora Campus, 1996.

Tucson Amateur Packet Radio Corporation. **AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio.** Versão 2.2, 1998

C. P. Wen, **Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications.** IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 17, No. 12, pp. 1087—1090, Dec. 1969.

YAMAGUTI, W, **Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais: Estado Atual, Demandas e Estudo de Propostas de Continuidade da Missão de Coleta de Dados.** INPE, 2006.

WEBSITE: AEB <http://www.aeb.gov.br/estacoes-terrestres-ja-recebem-sinais-do-satelite-nanosatc-br1/>. Acessado em 25 de maio de 2016.

WEBSITE: INPE <http://www.inpe.br/crs/nanosat/NanoSatCBR1.php>. Acessado em 30 de junho de 2016.

WEBSITE: AEB <http://www.aeb.gov.br/falha-deixa-cubesat-nacional-inoperante/>  
<http://www.intechopen.com/books/aerospace-technologiesadvancements/design-of-low-cost-telecommunications-cubesat-class-spacecraft>. Acessado em 30 de junho de 2016.