



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/03.23.04.15-TDI

UMA ABORDAGEM EM RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA OPERAÇÕES EM TERRA DE PEQUENOS SATÉLITES

David Julian Moreno Peralta

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Walter Abrahão dos Santos, e Douglas Soares dos Santos, aprovada em 17 de abril de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QPGH5L>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/03.23.04.15-TDI

UMA ABORDAGEM EM RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA OPERAÇÕES EM TERRA DE PEQUENOS SATÉLITES

David Julian Moreno Peralta

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Walter Abrahão dos Santos, e Douglas Soares dos Santos, aprovada em 17 de abril de 2018.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QPGH5L>>

INPE
São José dos Campos
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Molano Peralta, David Julian.

M73a Uma abordagem em rádio definido por software para operações em terra de pequenos satélites / David Julian Moreno Peralta. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xxvi + 71 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2018/03.23.04.15-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientadores : Drs. Walter Abrahão dos Santos, e Douglas Soares dos Santos.

1. Radio definido por software. 2. Estações terrenas. 3. Pequenos satélites. 4. GNURadio. 5. Automatização. I.Título.

CDU 629.7.058.5



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **David Julian Molano Peraita**

Título: "UMA ABORDAGEM DE RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE PARA OPERAÇÕES EM TERRA DE PEQUENOS SATÉLITES".

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Engenharia e Tecnologia Espaciais/Eng. Gerenc. de Sistemas Espaciais**


Dr. José Osvaldo Rossi



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Dr. Walter Abrahão dos Santos



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência


Dr. Douglas Soares dos Santos



Orientador(a) / ITA / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Dr. Carlos Alberto Iannaco Miranda



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Dr. Wagner Chiepa Cunha



Convidado(a) / ITA / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 17 de abril de 2018

“El éxito es ese viejo trío: habilidad, oportunidad y valentía”.

Charles Luckman

A Dios y a la Virgen del Milagro, a mis papás David y Nahir, a mis hermanas Lilitiana, Paola y Luisa Fernanda, gracias por todo su apoyo y confianza.

AGRADECIMENTOS

Primeiro eu quero agradecer a Deus e à Virgem do milagre pela oportunidade de fazer o mestrado no INPE - Brasil, fora do meu país natal Colômbia.

Agradeço a meus pais, David y Nahir pelo apoio desde o momento que tomei a decisão de viajar para o Brasil a estudar até agora que estou terminado meus estudos, junto com minhas irmãs Liliana, Paola e Luisa Fernanda todos sempre me ajudaram em tudo o que eu precisei no tempo que estive fora de casa. Sem eles, minha família que eu amo, não pudesse cumprir este sonho.

Para toda a minha família que sempre estava ciente de mim, para me apoiar e encorajar-me a chegar a este ponto.

A meus amigos Jaime Orduy, Jorge Espíndola, Leonel Parra e Roberta Porto que compartilharam seu conhecimento, me apoiaram com bons conselhos e me deram força para vencer os obstáculos que se me apresentaram no meu caminho do mestrado.

À CAPES pela oportunidade dada e ter estudos no Brasil e no INPE.

Aos meus orientadores, Dr. Walter Abrahão dos Santos e Dr. Douglas Soares dos Santos pela orientação neste trabalho. Pelas diversas dúvidas esclarecidas e ensinamentos no INPE e no ITA.

Aos professores do curso CSE/ETE, Dra. Ana Maria Ambrosio; Dr. Otavio Luiz Bogossian; Dra. Fatima Mattiello e Dr. Geilson Loureiro com os quais recebi ensinamentos de categoria internacional por meio das disciplinas, e contei com todo seu apoio durante o curso.

Aos colegas Edson W. Pereira e Auro Tikami pela amizade e ajuda no desenvolvimento do mestrado, pelas informações técnicas, e esclarecimento de dúvidas em todo momento.

Ao colega Daniel Estevez, quem com seu ensino sobre blocos do GNURadio deu uma mão na finalização deste projeto.

À secretaria do curso CSE, principalmente a Edleusa Ferreira, quem esteve sempre disposta para me apoiar em todas as etapas do curso.

E por último, porém não menos importante ao INPE, que me proporcionou toda a infraestrutura necessária para o desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

Para reduzir custos no segmento terrestre para projetos com pequenos satélites, a tecnologia de Rádio Definido por *Software* (SDR) é vantajosa, pois reduz a quantidade de componentes de *hardware* enquanto se adapta para diferentes esquemas de modulação, requisitos de balanço de enlace e apoia diferentes satélites. Este trabalho propõe uma abordagem na tecnologia SDR e no *framework* GNURadio, para a construção de uma solução compacta e eficiente na decodificação de telemetrias de Pico e Nanosatélites. Um primeiro estudo de caso com esta configuração foi implementado mediante o uso de vários *softwares* já legados para receber e processar os sinais enviados de um picosatélite bem como a recepção de imagens de um satélite da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). A segunda aplicação foi feita mediante o desenvolvimento de aplicativo baseado em *GNURadio*, usando um diagrama de blocos que permite a personalização e interconexão dos diferentes elementos. Com isto se obtém um decodificador de telemetrias, capaz de receber e processar os sinais de uma cópia do picosatélite brasileiro chamado Tancredo-1 e obter o valor de engenharia de suas telemetrias. Para esse fim, um *software* específico foi desenvolvido, chamado UbaTM - *Decoder* que permite obter o valor bruto de cada uma das telemetrias, realizar as operações necessárias para a conversão para o valor de engenharia e apresentá-las amigavelmente em tela para o usuário. Uma série de pacotes de *software* de suporte é apresentada para que se possa encaminhar várias operações, o que abre espaço à automação de estações terrestres.

Palavras-chave: Rádio Definido por *Software*. Estações Terrestres. Pequenos Satélites. GNURadio. Automação.

A SOFTWARE DEFINED RADIO APPROACH FOR RECEPTION OF SMALL SATELLITES SIGNALS

ABSTRACT

Software Defined Radio (SDR) technology is advantageous to reduce costs in the ground segment of small satellite projects as it reduces the number of hardware components while adapting to different modulation schemes, link budget requirements and supporting different satellites. This work proposes an SDR technology approach and uses the GNURadio framework in order to construct a compact and efficient solution for decoding of Pico and Nanosatellites telemetries. A first case study with this configuration was implemented by joining several legacy softwares to receive and process the signals sent from a picosatellite as well as to receive and decode images from an NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) satellite. A second test application was made by developing an application based on GNURadio, using a block diagram that allows the customization and interconnection of the different elements. This enables a telemetry decoder capable of receiving and processing signals from a mockup of the Brazilian picosatellite called Tancredo-1 and retrieving the telemetry engineering values. For this purpose, a special software was developed, named UbaTM-Decoder, which allows to obtain the raw value of each telemetry, to perform the necessary operations for engineering value conversion and to present them friendly on a user screen. A series of support software packages are presented so that you may bundle them for various operations, enabling for further ground stations automation.

Keywords: Software Defined Radio. Ground Stations. Small Satellites. Automation.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Propósito geral do projeto.	4
Figura 2.1 - Placa de <i>hardware</i> do SDR.....	9
Figura 2.2 - Placa RTL2832U para a recepção do sinal.....	10
Figura 2.3 - Modulação em amplitude.	16
Figura 2.4 - Sinal de modulação e sinal modulado em frequência.	17
Figura 2.5 – Exemplo de modulação em fase (PM).	18
Figura 2.6 - Modulação por Deslocamento de Amplitude (ASK).	20
Figura 2.7 – Modulação por Deslocação de Fase (PSK)	21
Figura 2.8 – Modulação por Deslocamento de Frequência (FSK).....	22
Figura 2.9 – Formato dos frames do HDLC da Cisco.....	25
Figura 3.1 – Metodologia usada para a decodificação de telemetrias.....	28
Figura 3.2 – Diagrama geral da operação do programa.....	30
Figura 4.1 – Funcube Dongle Pro Plus conectado no laptop.	33
Figura 4.2 – Antena VHF e UHF fabricada para receber os sinais do satélite. 34	
Figura 4.3 – Várias telas do aplicativo <i>Heavens-Above</i> com algumas informações sobre as passagens dos satélites.	35
Figura 4.4 – Tela do <i>software</i> Orbitron com a algumas informações importantes para o rastreo do satélite.	35
Figura 4.5 – Tela do <i>software</i> <i>SDRSharp</i> com o espectro do sinal recebido. ...	36
Figura 4.6 – Telas do programa SoundModem para obter das telemetrias na linguagem ASCII.	37
Figura 4.7 – Programa AGW Online Kiss com valores brutos de algumas telemetrias enviadas pelo satélite e seu arquivo de configuração. 38	
Figura 4.8 – Esquema geral de interoperação para o processo de decodificação de telemetrias.....	39
Figura 4.9 – Esquema para verificação da viabilidade do enlace de recepção.42	

Figura 4.10 – Tela principal do <i>software</i> UbaTM-Decoder com algumas das telemetrias enviadas pelo satélite Tancredo-1 e seu arquivo de configuração.....	45
Figura 4.11 – Esquema geral de configuração dos elementos de <i>hardware</i> e <i>software</i> para receber e decodificar imagens dos satélites da NOAA.....	46
Figura 4.12 – SDRSharp e WXtoImg em execução para recepção de imagens do satélite NOAA-19.....	49
Figura 4.13 – Imagem final, obtida do satélite NOAA-19.	49
Figura 4.14 – Diagrama de blocos para o decodificador de telemetrias em AFSK.....	51
Figura 4.15 – Blocos que compõem o receptor FM.....	52
Figura 4.16 – Blocos que compõem o demodulador AFSK.....	52
Figura 4.17 – Conexão dos blocos em GRC para a contagem de bits.....	55
Figura 4.18 –Blocos em GRC que compõem o deframer do protocolo AX25. .	55
Figura 4.19 –Conexão entre o bloco do <i>deframer</i> e o bloco de depuração.....	56
Figura 4.20 –Blocos em GRC para enviar a informação dos pacotes na porta TCP/IP.....	57

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Classificação de satélites por massa.	14

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADC	<i>Analog to digital converter</i>
APRS	<i>Automatic Packet Reporting System</i>
APT	<i>Automatic Picture Transmission</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CCITT	<i>Comité Consultivo para Telegrafia e Telefonía Internacional</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
DAB	<i>Digital Audio Broadcasting</i>
dB	Decibel
dBW	<i>Decibel Watt</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
GNU	<i>GNU not Unix.</i>
GRC	<i>GNU Radio Companion</i>
Ham	<i>Radio amateur.</i>
HDLC	<i>High Level Data Link Control</i>
IARU	<i>International Amateur Radio Union</i>
IF	<i>Intermediate frequency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NRZ-I	<i>Non-return-to-zero inverted</i>
ISO	<i>International Standards Organization</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OOT	<i>Out-Of Tree</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
RF	Radiofrequências
UHF	<i>Ultra-High Frequency</i>
VHF	<i>Very-High Frequency</i>
UI	<i>Unnumbered Information</i>
WEFAX	<i>Weatherfax ou Weather Facsimile</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de linha de alimentação
f	Frequência. (MHz)
π	Número Pi. (3,14159)
G_a	Ganho da antena. (dB)
G_{LNA}	Ganho do LNA em linear (non-dB)
K	Constante Boltzman's. (-228.6 dBW/K/Hz)
L_a, L_b, L_c	Todas as perdas por cabo ou guia de onda (dB)
L_{bpf}	Perdas por inserção de qualquer filtro de passagem de banda usado na frente de LNA (dB)
L_D	Perdas por Inserção de qualquer outro dispositivo em linha na frente de LNA (dB)
L_{GSAP}	Perda por Apontamento da Antena da Estação Terrena. (dB)
L_{other}	Perdas devido a outro dispositivo em linha (dB)
L_{tl}	Perdas totais na linha de transmissão. (dB)
L_{tlGS}	Perdas Totais na Linha de Transmissão da Estação Terrena (dB)
P_t	Potência de transmissão. (dBW)
$T_{2nd Stage}$	Temperatura de ruído do amplificador do próximo estágio (°K)
T_a	Temperatura da antena ou temperatura do céu. (°K)
T_{LNA}	Temperatura do ruído do amplificador de baixo ruído (°K)
T_o	Temperatura da linha do Sistema (Temperatura Física) (°K)
V_c	Amplitude de pico da frequência portadora.
V_i	Amplitude instantânea da frequência portadora.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Definição do Problema.....	2
1.3. Solução Proposta.....	3
1.4. Objetivo Geral.....	4
1.5. Objetivos Específicos.....	4
1.6. Organização da Dissertação.....	5
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1. SDR (<i>Software Defined Radio</i>)	7
2.1.1. Definições.....	7
2.1.2. Aspectos Gerais.....	8
2.2. Característica do RTL-SDR	9
2.3. Dongle SDR - RTL2832U	10
2.4. GNU RADIO.....	11
2.4.1. Característica do GNU Radio?	11
2.5. O Protocolo AX25	12
2.6. Satélites Artificiais.....	13
2.6.1. Classificação dos Satélites.....	13
2.7. Modulação e Demodulação de Sinais.....	14
2.7.1. Modulação Análoga.....	15
2.7.1.1. Modulação em Amplitude (AM)	15
2.7.1.2. Modulação em Frequência (FM)	17
2.7.1.3. Modulação em Fase (PM)	18
2.7.2. Modulação Digital.....	19
2.7.2.1. Modulação por Deslocamento de Áudio Frequência (AFSK)	19
2.7.2.2. Modulação por Deslocamento de Amplitude (ASK)	20
2.7.2.3. Modulação por Deslocamento de Fase (PSK)	20
2.7.2.4. Modulação por Deslocamento de Frequência (FSK).....	21

2.7.2.5.	Modulação Binária por Deslocamento de Fase (BPSK).....	22
2.7.2.6.	Outras Técnicas de Modulação.....	23
2.8.	Transmissão de Imagem Automática (APT)	24
2.9.	Protocolo de Controle de Enlace de Dados de Alto Nível (HDLC).....	25
3	METODOLOGIA SDR PARA RECEPÇÃO DE SINAIS	27
3.1.	Metodologia para Recepção de Sinais com Softwares Legados	27
3.1.1.	<i>Hardware</i> receptor.....	28
3.1.2.	Processamento do Sinal	28
3.1.3.	<i>Software</i> específico para as telemetrias do satélite Tancredo-1 ...	29
3.2.	Metodologia para Recepção de Sinais Usando GNU Radio.....	29
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SDR E ESTUDOS DE CASO.....	33
4.1.	Recepção de Dados Telemétricos	33
4.1.1.	Opções de <i>Hardware</i> para Rastreamento de Satélites	33
4.1.2.	Opções de <i>Software</i> para Rastreamento de Satélites.....	34
4.1.3.	Configuração dos programas para decodificação das telemetrias	38
4.1.4.	Problemas de Interoperabilidade os <i>Softwares</i> de Rastreio.....	40
4.2.	Estudo de Caso com <i>UbatubaSat</i>	41
4.3.	Estudo de caso – Obtenção e Decodificação de imagens NOAA.....	45
4.4.	Recepção e Processamento de Sinais para Obter Dados Telemétricos	
	Usando GNU Radio.....	50
4.4.1.	Receptor FM.....	51
4.4.2.	Demodulador do Sinal AFSK.....	52
4.4.3.	Contador de Bits.....	54
4.4.4.	<i>Deframer</i> do Protocolo AX25.....	55
4.4.5.	Bloco de Mensagens de Depuração	56
4.4.6.	Envio de Dados à Porta TCP/IP	56
5	CONCLUSÕES.....	59
5.1.	Considerações Finais	59
5.2.	Publicações Realizadas.....	61
5.3.	Sugestão de Trabalhos Futuros.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ANEXO A – PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS.....	67
A.1 JAABC 2018	67
A.2 IEEE AMERICA LATINA 2017	68
A.3 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites 2017.....	69
A.4 8º WETE 2017	71

1 INTRODUÇÃO

Atualmente há uma grande interesse por plataformas miniaturizadas de satélite e em particular no Brasil, o qual está tendo um aumento significativo no desenvolvimento de nanosatélites, como por exemplo: NanoSatC-BR1, PEA-14, e Serpens, todos já lançados (INPE, 2014; AEB, 2015; ITA, 2015; LABRE, 2017), ou o Tancredo - 1 do tipo TubeSat, também já lançado e desenvolvido por alunos e professores da escola Tancredo Neves em Ubatuba com assessoria técnica do INPE (LABRE, 2017), o qual ofereceu um ponto de referência para próximos projetos acadêmicos com pouco orçamento e que precisem de novas soluções tecnológicas para se obter o máximo desempenho e aproveitamento da missão, dos projetos ainda em andamento, como por exemplo, NanoSatC-BR2 e ITASAT (ERENO; RAMOS, 2014). Estes são os principais elementos que criam o interesse e a motivação para o desenvolvimento este trabalho.

Apesar dos custos relativos a essas plataformas serem comparativamente menores, os custos para recepção de seus sinais em terra ainda pode comprometer o orçamento de alguns projetos. Basicamente este é o escopo que este trabalho tenta abordar utilizando a tecnologia de Rádio Definido por Software (SDRs).

Portanto, neste capítulo introdutório são apresentados aspectos principais do trabalho como, motivação, a definição do problema, a solução proposta, o objetivo geral e os objetivos específicos bem como a organização do trabalho.

1.1. Motivação

A principal motivação para empregar componentes SDR nas estações terrenas para pequenos satélites, é melhorar o desempenho delas e, facilitar a aquisição de dados dos satélites. Assim como, reduzir o custo de desenvolvimento e implementação das estações em terra.

O custo desses pequenos projetos é sempre um fator limitante, por isto uma das motivações deste projeto é usar a tecnologia SDR para reduzir os custos e facilitar o acesso à comunicação com pequenos satélites, objetivando a qualificação de pessoas e consolidar a indústria aeroespacial na América Latina.

A exploração da missão espacial desses pequenos satélites exige a aquisição ou construção de estações terrenas que dão o apoio necessário à sua operação. Portanto, uma solução de engenharia com boa relação custo-benefício é desejável, e aqui está a oportunidade de empregarmos o uso da tecnologia SDRs (JUANG *et al.*, 2008).

1.2. Definição do Problema

Os projetos de pequenos satélites na maioria são projetos acadêmicos que usualmente tem restrições de orçamento, pelo qual precisam de soluções efetivas e de baixo custo que concedam um maior aproveitamento dos recursos além de garantir o correto funcionamento e execução das missões espaciais. Isto dá a necessidade de pesquisar sobre novas ferramentas que possam ser utilizadas nos projetos de pequenos satélites e reduzam o custo do segmento solo, sem diminuir a qualidade e eficiência dos seus componentes.

No projeto UbatubaSat, existiu a necessidade de ter um segmento solo com a máxima relação custo – benefício, devido ao pouco orçamento que tinha o projeto, daí a equipe precisou de ferramentas e novas tecnologias que brindaram todo o esquema necessário para obter e processar os sinais e a informação que o satélite Tancredo-1 envia para a terra.

Outros projetos de pequenos satélites que estão em desenvolvimento no Brasil, também precisam maximizar o investimento dos seus recursos econômicos, procurando soluções integrais que aportem a infraestrutura e operação necessária nos segmentos solo de cada missão.

1.3. Solução Proposta

A solução que se propõe neste trabalho para diminuir os custos dos projetos de pequenos satélites sem afetar a eficiência das suas operações, está baseada na utilização de ferramentas de hardware e software de baixo custo ou de uso livre, além da criação e fabricação própria de equipamentos necessários numa missão espacial.

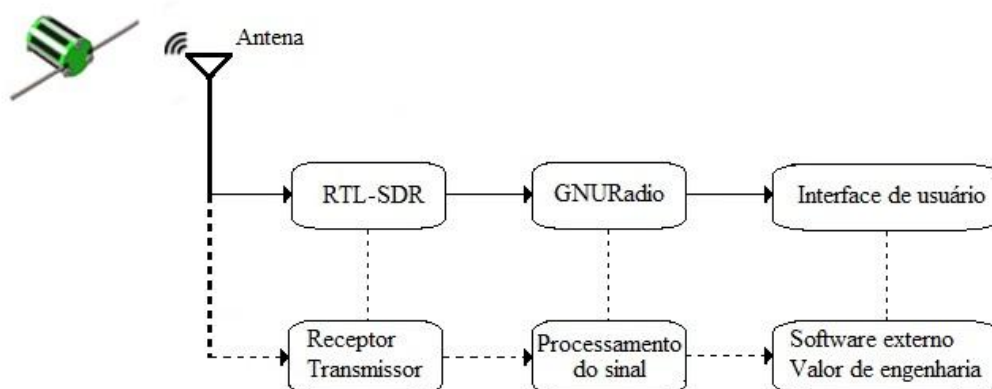
Nesta pesquisa a solução está orientada na redução dos custos do segmento solo dos projetos de pequenos satélites, incluindo o uso de tecnologias de *hardware* do tipo SDR, a fabricação de antenas caseiras, configuração e uso de *softwares* legados já existentes, o uso de *frameworks* que permitam o desenvolvimento de ferramentas de *software* criadas para projetos concretos e finalmente, o desenvolvimento de um *software* que tem a capacidade de processar as informações enviadas por satélites específicos, neste caso o processamento das telemetrias enviadas pelo satélite Tancredo-1.

Este trabalho fornece soluções para estudos de dois casos específicos. Por um lado, apresenta uma solução de baixo custo para o processamento de telemetrias enviadas por pequenos satélites que tenham uma frequência de operação nas faixas de radioamador, junto com uma opção para a aquisição de imagens meteorológicas capturadas e enviadas pelos satélites da NOAA, a qual utiliza os mesmos elementos de *hardware*, tendo apenas que trocar e configurar alguns elementos de software. Por outro lado, encontra-se a solução criada especificamente para a aquisição e processamento de telemetrias enviadas pelo satélite Tancredo-1, do projeto UbatubaSat, fazendo uso do framework GNURadio no qual conseguiu-se desenvolver um software especialmente desenhado para o processamento de sinais modulados em frequência sob a técnica *AFSK (Audio Frequency Shift Keying)*, na qual as informações são empacotadas sob o protocolo de comunicações AX.25.

1.4. Objetivo Geral

O objetivo geral é mostrar uma metodologia, de fácil montagem e de baixo custo, para a aquisição e decodificação de telemetrias de pequenos satélites. O processo é baseado na tecnologia de SDR mostrado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Propósito geral do projeto.



Fonte. Produção do autor.

1.5. Objetivos Específicos

Com a finalidade de alcançar o propósito geral do projeto, os objetivos específicos listados abaixo deverão ser atendidos:

- Desenvolver um processo de referência de baixo custo para a decodificação de telemetrias de pequenos satélites;
- Usar as tecnologias SDR disponíveis para estabelecer uma configuração com a máxima relação custo benefício possível na montagem de um decodificador para pico e nanosatélites;
- Discutir as contribuições geradas pelo processo proposto.

1.6. Organização da Dissertação

O restante do trabalho está dividido de acordo a seguinte estruturação:

CAPITULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEORICA: Apresenta a informação teórica com os conceitos que são o fundamento desde trabalho.

CAPITULO 3 – METODOLOGIA SDR PARA A RECEPÇÃO DE SINAIS: Este capítulo está relacionado com a metodologia usada para a recepção de sinais de pequenos satélites fazendo uso de SDR, software legado e o GNU Radio.

CAPITULO 4 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SDR E ESTUDOS DE CASO: Expõe a aplicação da metodologia proposta em alguns estudos de caso relacionados com a recepção de telemetrias do satélite Tancredo-1, as configurações necessárias para receber imagens meteorológicas de satélites da NOAA e a explicação do software desenvolvido em GNU Radio para receber telemetrias de pequenos satélites.

CAPITULO 5 – CONCLUSÕES: Apresenta as conclusões e a discussão do trabalho, fazendo uma análise dos resultados e as contribuições obtidas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta as fundamentações teóricas que são o objeto base deste trabalho, sendo abordados conceitos básicos para exploração do assunto, assim como revisões de alguns trabalhos relacionados com a proposta desse projeto.

2.1. SDR (*Software Defined Radio*)

Dispositivos de rádio baseados em *hardware* tradicional limitam a funcionalidade interativa e só podem ser modificados através de intervenção física. Isso resulta em maiores custos de produção e baixa flexibilidade mínima no suporte de padrões de forma de onda múltipla. Em contraste, a tecnologia de rádio definido por *software* fornece uma solução eficiente para esse problema, permitindo que dispositivos sem fio, com implementações do tipo, multi-modo, multi-*band* e ou multi-funcional possam ser aprimorados aplicando upgrades de *software* (FORUM, 2017).

2.1.1. Definições

Muitas referências podem ser encontradas para descrever o Rádio Definido por *Software*, também conhecido como *Software Rádio* ou SDR. O *Wireless Innovation Forum*, em colaboração com o grupo P1900.1 do Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE), trabalhou para estabelecer uma definição de SDR que forneça consistência e uma visão clara da tecnologia e seus benefícios associados.

Segundo Forum (2017), basta definir “Software Defined Radio” como:

"Rádio em que algumas ou todas as funções da camada física são definidas por software"

Além disso, eles esclarecem que a SDR aplica uma coleção de tecnologias de *hardware* e *software* onde algumas ou todas as funções operacionais do rádio

(também conhecido como processamento de camada física) são implementadas através de *software* modificável ou *firmware*, operando em tecnologias de processamento programáveis. Esses dispositivos incluem *arrays* de portas programáveis em campo (FPGA), processadores de sinais digitais (DSP), processadores de propósito geral (GPP), *Programmable System on Chip* (SoC) ou outros processadores programáveis específicos. O uso destas tecnologias permite que novos recursos sem fio sejam adicionados aos sistemas de rádio existentes sem necessidade de um novo *hardware*. (FORUM, 2017)

Componentes de rádio, como moduladores, demoduladores e sintonizadores, são tradicionalmente implementados em componentes de *hardware*. O advento da computação moderna permite que a maioria desses componentes tradicionais baseados em *hardware* sejam implementados em *software*. Por isso, existe o termo rádio definido por *software*. Isso permite o processamento fácil de sinal e, assim, os rádios de baixo custo para scanner de banda larga podem ser produzidos (RTL-SDR, 2015).

2.1.2. Aspectos Gerais

SDRs foram incorporados no mercado de equipamentos de radioamador para oferecer melhor desempenho, redução de ruído e filtragem digital. SDR fazem uso de processadores digitais de sinais DSP (*Digital Signal Processing*) para operações numéricas de altíssima velocidade realizando funções típicas de rádios analógicos.

A flexibilidade em *software* provida por SDRs advém de sua capacidade em alterar seu funcionamento permitindo a atualização de novos e melhores modos e uma melhor taxa de desempenho, sem a necessidade de trocar constantemente o *Hardware* (YOUNGBLOOD, 2002).

O uso de SDR pode ser feito mediante o emprego de um transceptor digital que possui componentes virtuais embarcados numa placa de *hardware* como

apresentado na Figura 2.1, porém seu desenvolvimento e aplicação são definidos via *software*, resultando em maior capacidade operacional e diminuindo o custo de equipamentos. Como exemplo, citam-se o *FUNCube Dongle* (FUNCUBE, 2017) e o *GAUSS Ground Dongle* (GAUSS, 2017).

Figura 2.1 - Placa de *hardware* do SDR



Fonte: Superkuh (2017)

2.2. Característica do RTL-SDR

RTL-SDR é um rádio de *software* muito barato que usa um *dongle* de sintonizador de televisão DVB-T com base no *chipset* RTL2832U. Com os esforços combinados de Antti Palosaari, Eric Fry e Osmocom, descobriu-se que os dados de sinal I/Q (*In-phase* e por *Quadrature*) podiam ser acessados diretamente, o que permitia que o sintonizador de televisão DVB-T fosse convertido em um rádio por *software* de banda larga por meio de um novo *driver* de *software*. (RTL-SDR, 2015)

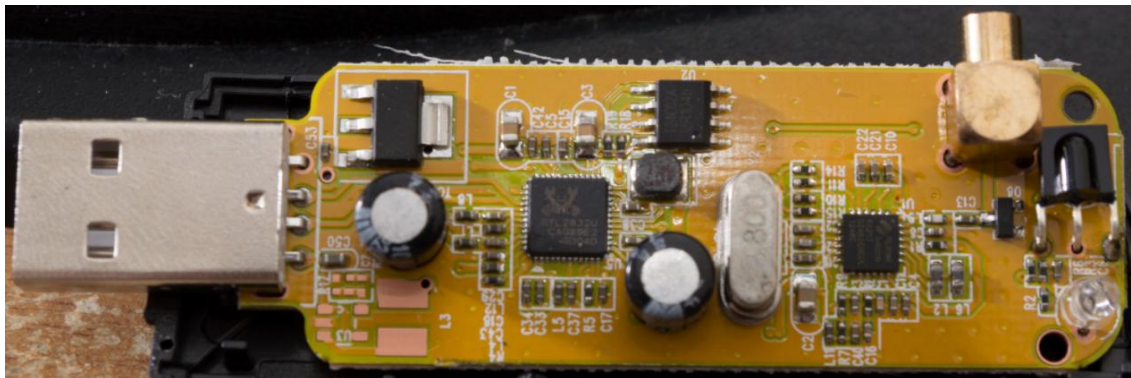
Essencialmente, isso significa que um *dongle* USB de \$20 USD sintonizador de televisão com o *chip* RTL2832U pode ser usado como um *scanner* de rádio baseado em computador. Esse tipo de capacidade de *scanner* teria custado centenas ou mesmo milhares de dólares há alguns anos atrás. O RTL-SDR também é frequentemente referido como RTL2832U, DVB-T SDR, RTL *dongle* ou o "\$20 USD Software Defined Radio".

Existem muitos outros rádios definidos por *software* melhor que o RTL-SDR, mas todos eles chegam a um preço mais alto. Atualmente, os *SDRs Airspy* (\$199 USD) e *SDRPlay* (\$149 USD) são os melhores SDR de recepção de baixo custo. Depois, estão os *HackRF* (\$300 USD) e *BladeRF* (desde \$420 USD até \$650 USD), que podem transmitir e receber (RTL-SDR, 2015).

2.3. Dongle SDR - RTL2832U

Este *dongle* foi usado neste projeto devido ao seu baixo custo e porque *dongles* DVB-T com base no Realtek RTL2832U podem transferir as amostras I/Q brutas para o *host*, que são usados oficialmente para demodulação DAB/DAB+/FM (OSMOCOM, 2017). A Figura 2.2 mostra a placa RTL2832U. De acordo com a Osmocom (2016), o GrOsmoSDR é um bloco GNURadio desenvolvido principalmente para o *hardware* OsmoSDR, mas este bloco também suporta *dongles* DVB-T baseados em RTL2832U.

Figura 2.2 - Placa RTL2832U para a recepção do sinal.



Fonte: Techzone (2012)

O RTL2832U é um demodulador DVB-T COFDM de alto desempenho que suporta uma interface USB 2.0. O RTL2832U está em conformidade com a ETSI (2009) nas especificações NorDig Unified 1.0.3, D-Book 5.0 e EN300 744. Ele suporta o modo 2K ou 8K com largura de banda de 6, 7 e 8 MHz. Parâmetros de modulação, por exemplo, taxa de código e intervalo de proteção, são detectados automaticamente.

O RTL2832U suporta sintonizadores em IF (36,125MHz), baixa IF (4,57MHz) ou saída Zero-IF usando um cristal de 28,8MHz e inclui suporte de rádio FM/DAB/DAB+. Incorporado com um ADC avançado, o RTL2832U apresenta alta estabilidade na recepção portátil.

O RTL2832U de última geração possui algoritmos proprietários da *Realtek* (patente pendente), incluindo a estimativa de canal superior, rejeição de interface de canal, recepção de canal de eco longo e cancelamento de ruído de impulso, e fornece uma solução ideal para uma ampla gama de aplicativos para PC-TV, como USB *dongle* e MiniCard/USB, e sistema embutido via interface USB (REALTEK, 2017).

2.4. GNU RADIO

Uma outra alternativa de utilização de tecnologias SDR é mediante o emprego de ambientes de desenvolvimento de software e nesta categoria este trabalho destaca o GNU Radio. Sua melhor definição de acordo com Gnuradio (2010) é de um kit de ferramentas de desenvolvimento de *software* gratuito e aberto que fornece blocos de processamento de sinal para implementar rádios por meio de *software*.

Ele pode ser usado com *hardware* de RF externo de baixo custo prontamente disponível para criar rádios definidos por *software*, ou sem *hardware* em um ambiente similar a simulação. O GNU Radio é amplamente utilizado em ambientes de pesquisa, indústria, academia, governo e hobby para apoiar pesquisas de comunicações sem fio e sistemas de rádio do mundo real.

2.4.1. Característica do GNU Radio?

O GNU Radio executa todo o processamento do sinal e pode-se usar para escrever aplicativos para receber e transmitir dados com *hardware* de rádio ou para criar aplicativos totalmente baseados em simulação. O GNU Radio possui filtros, códigos de canal, elementos de sincronização, equalizadores,

demoduladores, *vocoders*, decodificadores e muitos outros tipos de blocos que normalmente são encontrados em sistemas de processamento de sinais. Adicionalmente, ele inclui um método de conexão desses blocos e, em seguida, gerencia como os dados são passados de um bloco para outro. Caso necessário, a extensão do GNU Radio também é simples, pois pode-se encontrar um bloco específico que está faltando, pode-se criar e adicioná-lo rapidamente.

As aplicações de rádio GNU podem ser escritas em linguagem de programação C++ ou *Python*. Entretanto, o caminho de processamento de sinal mais crítico em desempenho é geralmente implementado em C++, usando extensões do processador de ponto flutuante, quando disponíveis. Isso permite que o desenvolvedor implemente sistemas de rádio de alto rendimento em tempo real em um ambiente de desenvolvimento de aplicações rápidas e simples de usar (GNURADIO, 2010).

2.5. O Protocolo AX25

Um componente muito importante no processamento de sinal para projetos com nanosatélites é o *deframer* do protocolo AX25 que é largamente utilizado. Como exemplo, o satélite Tancredo-1 usa o protocolo AX.25. Este é um protocolo da camada de enlace de dados derivado do conjunto de protocolos X.25 e projetado para uso por operadores de rádio amadores. O nome AX25 é originário da recomendação X.25 do CCITT, acrescentando a letra A que significa “Amador”; AX25 é, portanto, protocolo da camada de enlace para o pacote amador. Estas são as principais diferenças entre os dois protocolos:

- O campo de endereço foi expandido para incluir chamadas de Radioamador-Ham (cada Ham tem um indicativo internacional, e os Hams devem sempre se identificar em suas conversas por meio do indicativo).

- Foi adicionada a possibilidade de usar quadros UI (Unnumbered Information), que são pacotes não numerados; geralmente os pacotes são numerados para restaurar a sequência de envio.

O objetivo deste protocolo é definir a estrutura do *frame* e definir os requisitos da estação que envia ou recebe esse frame ou pacote. Todo pacote, além dos dados, contém outras informações auxiliares e de controle, de modo que cada pacote inclui todas as informações necessárias para alcançar seu destino. Esta técnica de endereçamento permite que estações de rádio de pacotes compartilhem a mesma frequência sem interferir entre si. Toda estação pode monitorar todo o tráfego no canal de frequência, ou filtrar apenas a atividade relacionada a uma ou mais estações, ignorando o resto (YO5OFH, 2011).

2.6. Satélites Artificiais

Segundo Bogossian (2016) pode-se descrever um satélite como qualquer elemento que esteja em órbita da Terra e denominados como satélites naturais; os satélites que são desenvolvidos e colocados em órbita são caracterizados como satélites artificiais, ou simplesmente, satélites.

2.6.1. Classificação dos Satélites

A classificação de um satélite depende de alguns aspectos, tanto físicos como operacionais. Para fins deste trabalho, é considerada apenas a classificação referente à massa. A Tabela 2.1 apresenta esta classificação, entretanto, em NASA (2015) definem-se satélites pequenos como satélites com uma massa inferior a 180 kg.

Tabela 2.1 - Classificação de satélites por massa.

GRUPO DO SATÉLITE	MASSA (kg)
<i>Satélite Grande</i>	> 1000
<i>Satélite Mediano</i>	500 a 1000
<i>Minisatélite</i>	100 a 500
<i>Microsatélite</i>	10 a 100
<i>Nanosatélite</i>	1 a 10
<i>Picosatélite</i>	0,1 a 1
<i>Femtosatélite</i>	< 1

Fonte: Adaptada de Gergely; Clegg (2015)

2.7. Modulação e Demodulação de Sinais

Os satélites enviam sinais para a terra mediante ondas de rádio, esses sinais estão modulados a fim de viabilizar o envio de informações. As definições de modulação e demodulação são apresentadas abaixo.

Modulação:

Operação mediante a qual certas características de uma onda, denominada portadora, são modificadas em função de outra, denominada moduladora, que contém a informação a transmitir. A onda resultante e em condições para ser transmitida denomina-se sinal modulado (CASTRO; FUSARIO, 2006, p. 172).

Demodulação:

Operação mediante a qual o sinal modulado, transmitido pelo meio de comunicação, é recebido pelo coletor e novamente processado para recuperar o sinal denominado modulador que

contém a informação, para que logo possa ser utilizada (CASTRO; FUSARIO, 2006, p. 172).

Para obter o valor das telemetrias, é necessário decodificar a informação implícita no sinal, isto é, deve-se fazer a decodificação do sinal enviado pelo satélite para o processamento da informação e obtenção dos valores das telemetrias. Os conceitos de princípios e tipos de modulações são extremamente importantes para entender o funcionamento de um decodificador de telemetrias, pois cada sinal tem que ser decodificado de acordo com a técnica utilizada para sua modulação e assim enviar informações à terra. As técnicas de modulação e demodulação mais conhecidas e utilizadas neste trabalho serão abordadas.

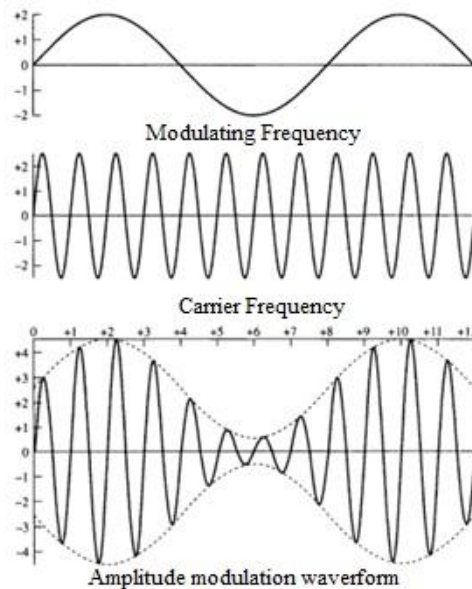
2.7.1. Modulação Análoga

A característica do sinal modulador é analógica, isto significa que, o número de valores que pode tornar o sinal modulador é infinito. Nas emissões de rádio e televisão analógica, emprega-se a modulação de amplitude (AM) e a modulação de frequência (FM) (IGLESIAS, 2005).

2.7.1.1. Modulação em Amplitude (AM)

Na modulação em amplitude, a amplitude da portadora varia acordo com a amplitude do sinal de modulação. Um modulador produz uma forma de onda como se mostra na Figura 2.3 onde se também pode observar a variação da amplitude na frequência da portadora. A forma do envelope resultante é a mesma que a da frequência de modulação. Na prática, o sinal modulante engloba uma faixa de frequência; Esta faixa de frequência pode ser na fala comercial que é usada em uma rede telefônica. (SMILLIE, 2002).

Figura 2.3 - Modulação em amplitude.



Fonte: Smillie (2002).

O relacionamento matemático é dado por:

$$V_i = [f_a(t) + V_c] \sin n\omega t \quad (2.1)$$

onde, V_c é a amplitude de pico da frequência portadora, V_i é a amplitude instantânea do sinal modulado e a amplitude instantânea da frequência portadora v_c é dada por:

$$v_c = V_c \sin n\omega t \quad (2.2)$$

A amplitude instantânea da frequência de modulação é dada por:

$$v_a = f_a(t) \quad (2.3)$$

Como $[f_a(t) + V_c]$ é dependente do tempo, isso resulta na amplitude da portadora sendo função da amplitude da frequência do sinal modulante.

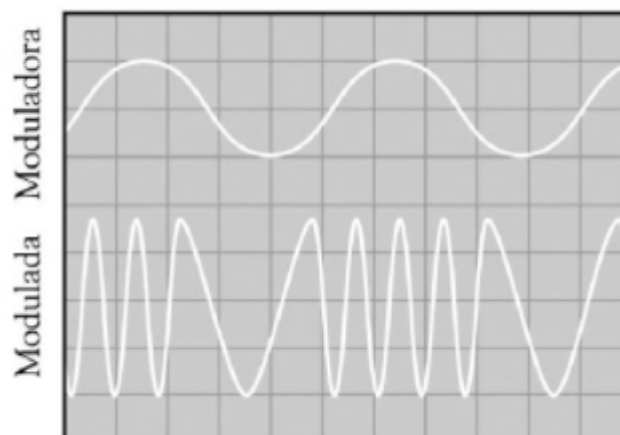
A forma de onda complexa mostrada na Figura 2.3 contém os seguintes produtos de modulação:

- A frequência da portadora.
- A banda lateral inferior.
- A banda lateral superior.

2.7.1.2. Modulação em Frequência (FM)

A modulação em frequência é a técnica de transmissão por rádio mais usada atualmente, devido a que um sinal modulado em frequência é capaz de transmitir mais informação do som que se deseja transmitir, já que, na modulação em amplitude (AM), a transmissão de sons é feita com uma largura de banda maior. A modulação em frequência baseia-se em variar a frequência da portadora em relação à amplitude da moduladora (IGLESIAS, 2005). Na Figura 2.4, é apresentado o sinal de modulação e o sinal modulado em frequência.

Figura 2.4 - Sinal de modulação e sinal modulado em frequência.



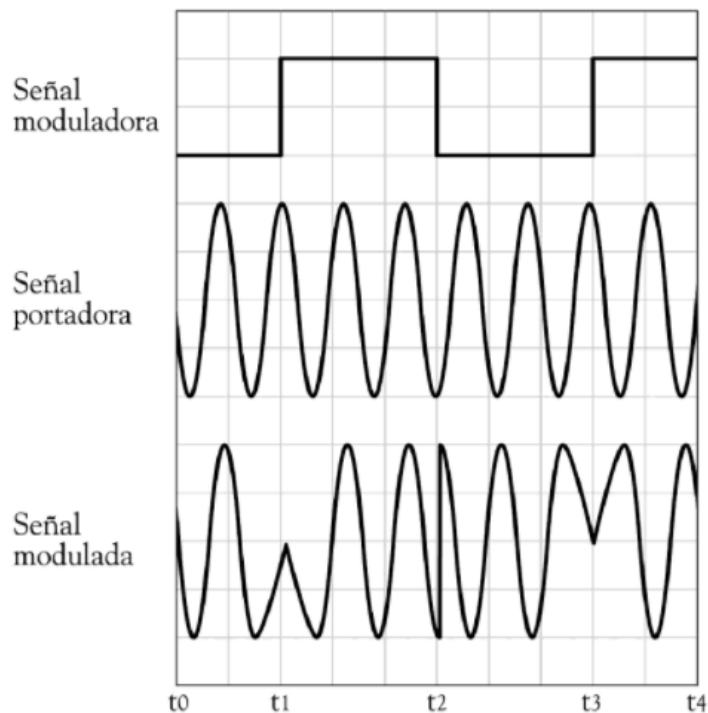
Fonte: Iglesias (2005).

2.7.1.3. Modulação em Fase (PM)

Na modulação em fase, realiza-se uma variação da fase relativa da frequência portadora com respeito à amplitude do sinal de modulação. Essa relação entre a fase da portadora e o sinal de modulação é uma relação linear.

Nesta modulação, a principal característica é o deslocamento de fase no qual representa o máximo deslocamento de fase que produz o sinal de modulação. Tal como acontece na modulação em frequência, o índice de modulação é o deslocamento de fase que sofre a frequência portadora, segundo a amplitude do sinal de modulação (IGLESIAS, 2005). A Figura 2.5, mostra um exemplo da modulação em fase, com o sinal de modulação, da portadora e o sinal modulado.

Figura 2.5 – Exemplo de modulação em fase (PM).



Fonte: Iglesias (2005)

2.7.2. Modulação Digital

O processo para realizar a modulação digital é quase o mesmo da modulação análoga, a diferença está na característica do sinal modulador que é digital. Este é formado por uma sequência de “uns” e “zeros” que se agrupam em grupos de “*n*” bits, esses grupos se denominam símbolos. O número de símbolos em uma modulação digital é um número finito (IGLESIAS, 2005).

Este trabalho está focado no manuseio da técnica de modulação AFSK de 1200 bits por segundo.

2.7.2.1. Modulação por Deslocamento de Áudio Frequência (AFSK)

O Departamento de Engenharia Elétrica e Ciências da Computação (EECS, 2017a) da Universidade de Califórnia, no seu laboratório sobre comunicações digitais, explica que a modulação por deslocamento de áudio frequência (AFSK) é uma forma de modulação de sinais por deslocamento binário de frequência (BFSK) em uma faixa de áudio, (por isto a troca da letra “B” pela letra “A” nas siglas em inglês).

Este trabalho está baseado na decodificação de sinais em **AFSK1200**, na qual codificará dados binários digitais a uma taxa de dados de 1200 bits/s. Utilizará as frequências 1200Hz e 2200Hz (frequência central de 1700 Hz \pm 500 Hz) para codificar os bits '0' e '1' (também conhecidos como espaço e marca). Mesmo que tenha uma taxa de bits relativamente baixa, o AFSK ainda faz parte do padrão dominante para os pacotes de dados usados por radioamadores em relação ao VHF. É uma camada física comum para o protocolo de comunicações AX.25.

AFSK é uma forma de modulação de frequência digital, conforme explicado anteriormente, pode ser também demodulado como FM. Como o AFSK alterna entre duas frequências, é possível colocar dois filtros de passagem de banda em torno da frequência da *Marca* e do *Espaço* e usar a detecção de envelope

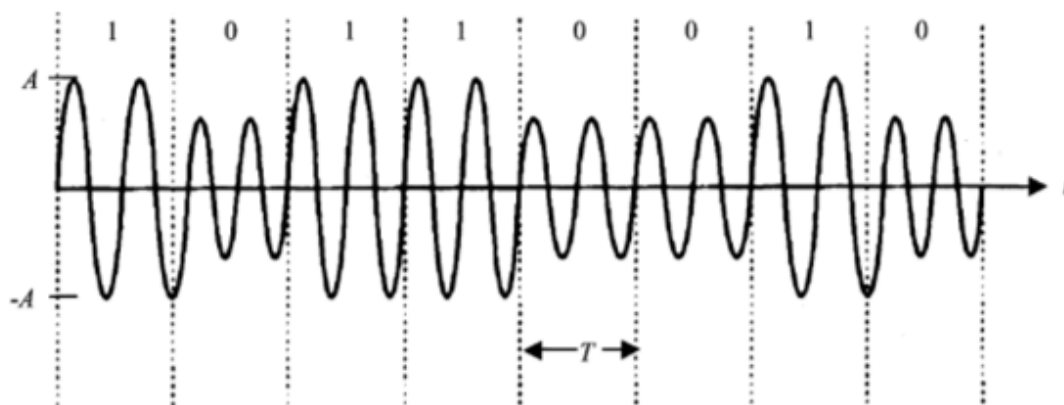
para determinar qual frequência está ativa em um período de bit. Esta é uma demodulação não-coerente AFSK, porque a fase de receptor não precisa ser sincronizada com a fase do transmissor para demodular o sinal.

Além da técnica de modulação que foi descrita anteriormente, existem mais algumas outras técnicas de modulação digital. As técnicas mais conhecidas são mostradas a seguir.

2.7.2.2. Modulação por Deslocamento de Amplitude (ASK)

Na modulação ASK a amplitude da frequência portadora é variada em concordância com a fonte binária, ver Figura 2.6. Na sua forma mais simples a portadora é ligada (*ON*) e desligada (*OFF*) cada T segundos, para representar “uns (1)” e “zeros (0)”; dessa forma ASK é conhecida como *On-Off Keying* (*OOK*). (SMITH, 2004)

Figura 2.6 - Modulação por Deslocamento de Amplitude (ASK).



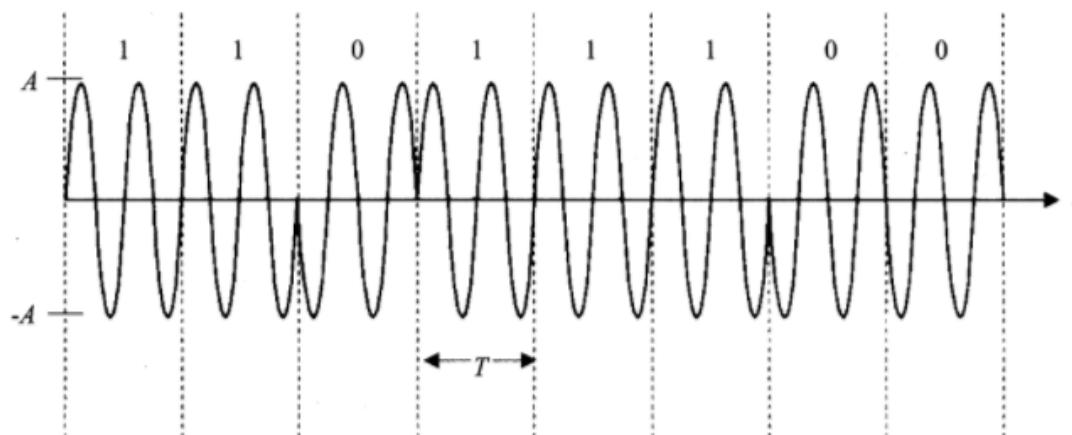
Fonte: Smith (2004)

2.7.2.3. Modulação por Deslocamento de Fase (PSK)

Na modulação por deslocamento de fase, a fase da portadora muda em níveis discretos de acordo com o sinal digital de entrada, enquanto a amplitude do portador permanece igual (FARUKE, 2017). A Figura 2.7 apresenta o sinal

modulado por PSK com os valores que vai transportar em cada instante do tempo.

Figura 2.7 – Modulação por Deslocação de Fase (PSK)

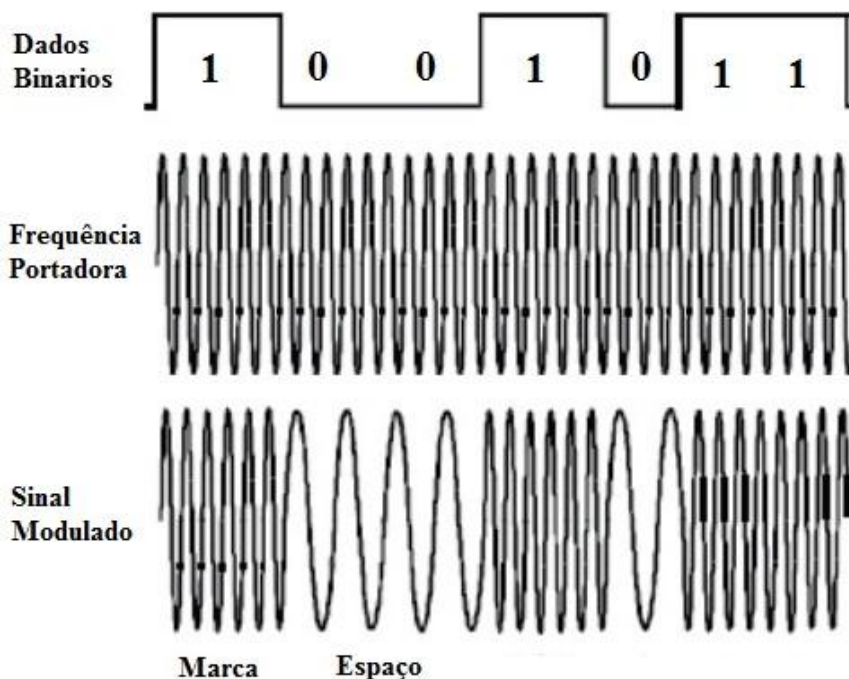


Fonte: Smith (2004)

2.7.2.4. Modulação por Deslocamento de Frequência (FSK)

É um tipo de modulação de frequência, em que os dados ou códigos binários são transmitidos por meio de uma frequência portadora que é deslocada entre dois valores de frequências fixas, isto é, f_i representando o “0” lógico e f_c representando o “1” lógico. As frequências correspondentes para o “1” lógico e “0” lógico são chamados *marca* e *espaço*, respectivamente (SALIVAHNAN; KANCHANA, 2008). O sinal modulado por deslocamento de frequência, a frequência portadora e os dados que serão transmitidos, estão mostrados na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Modulação por Deslocamento de Frequência (FSK)



Fonte: Produção do Autor.

2.7.2.5. Modulação Binária por Deslocamento de Fase (BPSK)

O deslocamento de fase (PSK) é um método de modulação digital que utiliza a mudança da fase do conteúdo da fase relativa do sinal. O sinal a ser modulado e transmitido é binário, que é codificado antes da modulação. Esta é uma tarefa indispensável nas comunicações digitais, onde os bits redundantes são adicionados com os dados brutos que permitem ao receptor detectar e corrigir erros de bits, se eles ocorrerem durante a transmissão. Embora existam muitos esquemas de codificação de erros disponíveis, por exemplo uma técnica de codificação simples conhecida como "Codificação de blocos".

2.7.2.6. Outras Técnicas de Modulação

Algumas outras técnicas de modulação digital são:

- **SC-FDMA** (em inglês *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) ou Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência.
- **GMFK** (em inglês *Gaussian Frequency Shift Keying*) ou Modulação por deslocamento de Frequência Gaussiana.
- **MSK** (em inglês *Minimum Shift Keying*) ou Modulação por deslocamento Mínimo.
- **QAM** (em inglês *Quadrature Amplitude Modulation*) ou Modulação de Amplitude em Quadratura.
- **OOK** (em inglês *On-off Keying*) ou Modulação Binária Simples.
- **PPM** (em inglês *Pulse Position Modulation*) ou Modulação da Posição de Pulsos.
- **TCM** (em inglês *Trellis Coded Modulation*) ou Modulação Codificada por Treliças.
- **GMSK** (em inglês *Gaussian Minimum Shift Keying*) ou Modulação por deslocamento Mínimo Gaussiano.
- **CPM** (em inglês *Continuous Phase Modulation*) ou Modulação em Fase Contínua.

2.8. Transmissão de Imagem Automática (APT)

A Transmissão de Imagem Automática ou *Automatic Picture Transmission* por suas sigla em inglês, é um sistema projetado para fornecer imagens de baixa resolução de satélites com sinais analógicos. Por outro lado, as imagens de resolução maior são atrasadas até o satélite passar por estações terrenas com o equipamento receptor apropriado, isso é necessariamente mais complexo e mais caro do que o equipamento de recepção APT.

O primeiro sistema APT foi carregado como uma carga útil no *TIROS-8* lançado em 1963, e continuou como serviço nos subsequentes *TIROS*, *ESSA*, *ITOS*, *NOAA* e o primeiro dos satélites meteorológicos da série *Nimbus da NASA*. A partir de 1972, o sistema APT também foi realizado nos satélites meteorológicos Russos começando com *METEOR-1-11*. Os satélites *NOAA-15*, *NOAA-18* e *NOAA-19* possuem sistema APT.

Uma imagem de satélite com o sistema APT consiste em linhas que vêm de uma varredura da Terra. As varreduras sucessivas são feitas à medida que o satélite se move em sua órbita. Nas órbitas polares, o satélite está à vista de um receptor de terra apenas por cerca de 15 minutos. O tempo será menor se o satélite não passar diretamente sobre a cabeça da estação. Quanto mais o satélite estiver no céu acima do receptor, mais forte será o sinal e melhor a recepção dos dados. O sistema APT foi projetado com essas restrições em mente. (HILLGER; TOTH, 2009)

Na nave espacial, as ópticas apropriadas focam o mapa da nuvem abaixo do satélite na face de um *vidicon* (pequeno tubo de câmera de televisão) de armazenamento. Esta imagem é convertida em um sinal elétrico por leitura de feixe de elétrons; é modulada uma sub-portadora que, por sua vez, modula o transmissor VHF. O sinal passa através da antena e do receptor no solo e a imagem é recriada diretamente em uma unidade de *facsimile* em tempo real. (STAMPFL; STROUD, 1963)

2.9. Protocolo de Controle de Enlace de Dados de Alto Nível (HDLC)

Protocolo de Controle de Enlace de Dados de Alto Nível ou *High Level Data Link Control* (HDLC) por suas siglas em inglês é um padrão ISO popular, orientado a bits e protocolo da camada de enlace de dados. Especifica um método de encapsulamento para dados em enlaces de dados seriais síncronos usando campos de caracteres e somas de verificação. O HDLC é um protocolo ponto-a-ponto usado em linhas alugadas. Nenhuma autenticação pode ser usada com HDLC.

Em protocolos orientados a bytes, as informações de controle são codificadas usando bytes inteiros. Por outro lado, os protocolos orientados a bit usam bits individuais para representar as informações de controle. Alguns protocolos comuns orientados a bit incluem SDLC, LLC, HDLC, TCP e IP.

O HDLC é o encapsulamento padrão utilizado pelos roteadores da Cisco em relação a links seriais síncronos, e o HDLC da Cisco é proprietário - ele não se comunicará com a implementação de HDLC de outros fornecedores. A Figura 2.9 mostra o formato Cisco HDLC.

Figura 2.9 – Formato dos frames do HDLC da Cisco



• Each vendor's HDLC has a proprietary data field to support multiprotocol environments.



• Supports only single-protocol environments.

Fonte: Lammle (2007)

Conforme mostrado na figura, o motivo pelo qual cada fornecedor possui um método de encapsulamento HDLC próprio é que cada fornecedor possui uma maneira diferente para encapsular o protocolo HDLC com vários protocolos de camada de rede. Se os fornecedores não fizessem um desenvolvimento para comunicar o HDLC com os diferentes protocolos da camada de rede, o HDLC só seria capaz de transportar um protocolo. Este cabeçalho próprio é colocado no campo de dados do encapsulamento HDLC. (LAMMLE, 2007)

Uma vez apresentados os conceitos mais fundamentais para a recepção de sinais de satélites, no próximo capítulo abordam-se as metodologias propostas para esta recepção utilizando SDR's sem baixo custo.

3 METODOLOGIA SDR PARA RECEPÇÃO DE SINAIS

Para receber sinais de pequenos satélites é necessário a utilização de elementos de *hardware* e *software* onde alguns deles podem ser construídos ou simplesmente adquiridos no mercado, seja de forma gratuita o por meio de pagamento.

A utilização de ferramentas de *software* que já foram construídas e que estão disponíveis para serem usadas na comunicação com satélites, requerem configurações para interligar elas e ter uma operacionalidade ótima para fornecer soluções úteis, mas na maioria de casos podem limitar as operações que se deseja ter numa recepção de informação satelital. Entretanto, a construção de *software* pode fornecer funcionalidades mais próprias ou eficientes na hora de resolver uma necessidade específica.

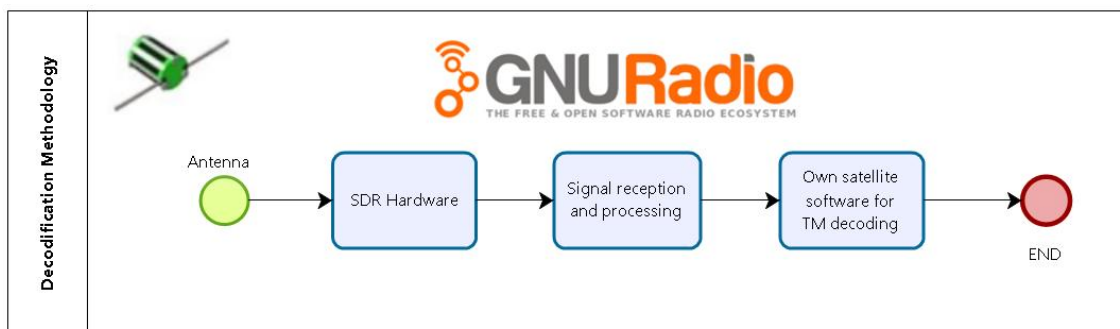
Neste capítulo vai se mostrar a metodologia utilizada para ter uma recepção de sinais usando a tecnologia SDR e fazendo uso de *software* desenhado e construído para cumprir um objetivo específico.

3.1. Metodologia para Recepção de Sinais com Softwares Legados

A metodologia para o decodificador SDR baseia-se especificamente no uso do *hardware* RTL-SDR e no uso da ferramenta de desenvolvimento de GNU Radio para a construção de um decodificador de telemetrias para o satélite Tancredo-1. Na Figura 3.1, é mostrado o esquema geral da configuração final para o processo de recepção e decodificação da telemetria, que possui três elementos fundamentais: 1) Utilização do *hardware* do receptor do tipo RTL-SDR, para receber sinais nas bandas UHF e VHF. 2) Construção de um programa que permite o processamento digital dos sinais recebidos no *hardware*, desenvolvidos em linguagem *Python*, através de diagramas de fluxo e com a ajuda do ambiente gráfico *GNU Radio Companion*. 3) Uso de *software* externo, desenvolvido especificamente para obter o valor de engenharia de cada

telemetria enviada pelo satélite Tancredo-1. Esses três elementos são explicados abaixo.

Figura 3.1 – Metodologia usada para a decodificação de telemetrias.



Fonte: Produção do autor.

3.1.1. Hardware receptor

O primeiro elemento da metodologia utilizada para desenvolver o decodificador de telemetrias é um componente de *hardware* que permite a recepção do sinal enviado pelo satélite e ele envia esse sinal para o computador para que seja processado digitalmente. O *hardware* usado neste trabalho é o RTL-SDR.

3.1.2. Processamento do Sinal

O segundo elemento fundamental desta metodologia é a construção de uma ferramenta de *software* que permite realizar todo o processamento digital do sinal, até obter o valor bruto de cada uma das telemetrias, onde a informação pode ser representada e visualizada no sistema hexadecimal.

Para o desenvolvimento e a construção deste programa, o GNURadio é utilizado, o que permite o desenvolvimento de programas através de diagramas de fluxo usando o ambiente gráfico *GNU Radio Companion*. Esta ferramenta possui blocos padrão que são desenvolvidos em linguagens como *Python* ou *C++*, que cumprem as funções físicas ou operacionais dos rádios convencionais. Estes, que por serem interconectados, geram funcionalidades robustas, como a que é desenvolvida. Algumas funções que não estão disponíveis no entorno padrão podem ser criadas desenvolvendo-se e

programando-se blocos próprios para executar o trabalho específico que é necessário.

Uma grande vantagem de usar esta ferramenta é que, por ser de uso livre, permite que toda a comunidade GNU contribua e apoie projetos relacionados a questões similares, bem como promover a cooperação entre pessoas e desenvolvedores no mundo todo para atingir os objetivos de cada projeto. Neste caso, o objetivo geral é construir um decodificador AFSK.

3.1.3. Software específico para as telemetrias do satélite Tancredo-1

Até agora, o uso dos dois primeiros elementos da metodologia, hardware receptor e processamento de sinais. Permite obter o valor bruto (hexadecimal) de cada uma das telemetrias enviadas pelo satélite Tancredo-1.

O terceiro e último elemento da metodologia utilizada neste trabalho refere-se a um *software* adicional desenvolvido em linguagem C++ chamado *UbaTM-Decoder*. Este *software* foi projetado e programado especificamente para fazer parte do projeto *UbatubaSat*, como uma contribuição do radioamador brasileiro Edson Pereira (PY2SDR), que também ajudou com o primeiro rastreamento por satélite a disponibilizar sua infraestrutura de rastreamento de satélites para a equipe do projeto, em Pardinho - São Paulo (AEB, 2017).

O Decodificador *UbaTM-Decoder* lê os dados enviados pelo programa do processador de sinal para a porta TCP/IP, executa a conversão dos dados e todos os cálculos que cada telemetria precisa para obter seu respectivo valor de engenharia; finalmente, apresenta essas informações em uma tela amigável e fácil de ler para o usuário.

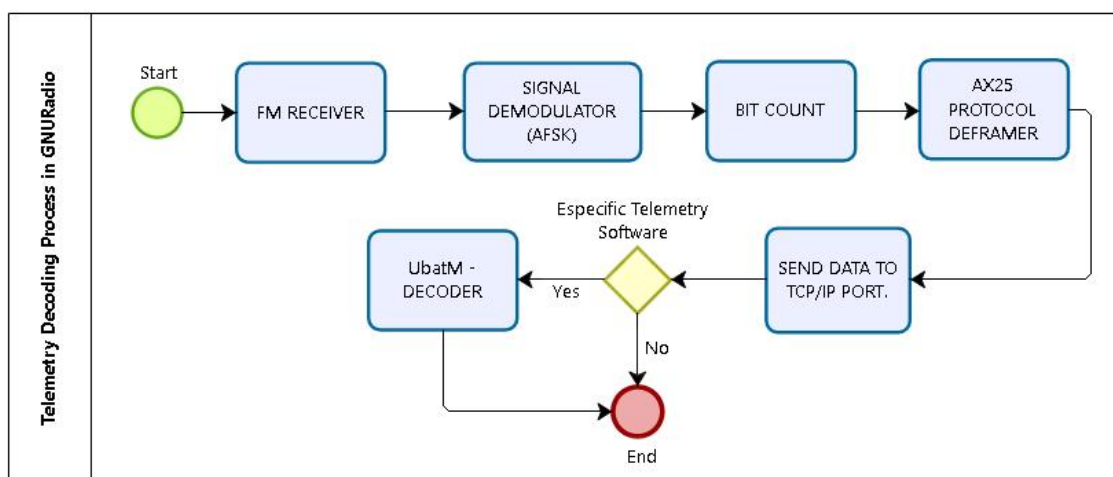
3.2. Metodologia para Recepção de Sinais Usando GNU Radio

O *software* responsável de receber, demodular o sinal e decodificar a informação é desenvolvido no ambiente gráfico do GNU Radio Companion (GRC).

Este ambiente permite a construção de uma ferramenta personalizada e especificamente projetada para o satélite Tancredo-1, através de um diagrama de fluxo composto por blocos interligados entre si. Cada bloco é usado para executar uma tarefa específica dentro do processamento em cadeia, executado pelo programa durante a operação.

A Figura 3.2 mostra o diagrama geral do funcionamento do programa onde pode-se ver a ordem de cada uma das principais funcionalidades do decodificador e a forma como a informação deve fluir para adquirir a informação do satélite a partir da recepção do sinal, até a obtenção do valor bruto e de engenharia de cada uma das telemetrias.

Figura 3.2 – Diagrama geral da operação do programa.



Fonte: Produção do autor.

Cada diagrama observado na figura anterior, inclui uma série de componentes (blocos) que, dentro do ambiente do *GNU Radio Companion*, permite a criação de funcionalidades específicas para um decodificador de telemetrias de pequenos satélites que tenham o sinal modulado em AFSK ou propriamente para o satélite Tancredo-1.

Cada um dos blocos tem que ter obrigatoriamente entradas e saídas de informação que vão fornecer o fluxo completo da decodificação.

Para ter uma operação ótima, é necessário ter componentes de *hardware* que permitam receber o sinal enviado pelo satélite, neste caso esses componentes são do tipo SDR que permitem um posterior processamento no computador.

No fluxo estabelecido no GNU Radio, se definiu a utilização de blocos para:

- Receber sinais FM em faixas de frequência de radioamador.
- Demodular o sinal AFSK para extrair a informação contida nele e poder fazer o processamento de cada bit.
- Ordenar os bits para reduzir a perda de dados, ocasionada por comunicações assíncronas.
- Desempacotar os dados de acordo ao protocolo de comunicações estabelecido pelo dono do satélite.
- Enviar a informação para os programas encargados de apresentar os dados ao usuário final ou simplesmente mostrar os dados brutos enviados pelo satélite.
- Fazer os cálculos necessários para apresentar os valores de engenharia de cada telemetria e ter uma informação legível e entendível.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA SDR E ESTUDOS DE CASO

Com a aplicação da metodologia é possível obter dados telemétricos de pequenos satélites e adquirir imagens meteorológicas de alguns satélites, só muda a utilização de componentes de *software* legados ou construídos no ambiente de desenvolvimento GNU Radio.

4.1. Recepção de Dados Telemétricos

A implementação de uma solução econômica para o rastreamento de satélites pequenos baseado na tecnologia SDR envolve uma série de elementos de *hardware* e *software*, os quais interligados entre si, fornecem a função de recepção e decodificação dos sinais enviados pelo satélite.

Alguns dos pontos apresentados a seguir são apenas algumas opções de *software* disponíveis principalmente para o monitoramento de *downlink* onde alguns são adequados para um rastreamento por satélite convencional. Entretanto, não são muito adequados para serem integrados em um sistema de estação terrestre que às vezes precisa funcionar de forma autônoma.

4.1.1. Opções de *Hardware* para Rastreamento de Satélites

A parte de *hardware* da infraestrutura para o rastreio pode ser reduzida aos seguintes itens: (1) Laptop, (2) Funcube Dongle Pro Plus (FUNCUBE, 2017) mostrados na Figura. 4.1 ou SDRs similares e, (3) Antena RF.

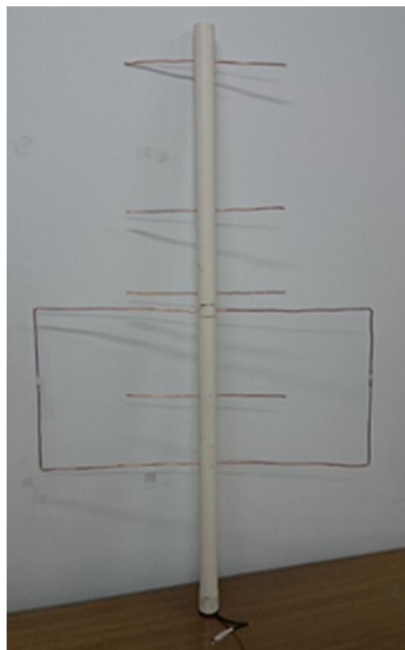
Figura 4.1 – Funcube Dongle Pro Plus conectado no laptop.



Fonte: Funcube (2017)

Para a parte de RF do projeto, podem-se empregar muitas soluções e uma escolhida neste trabalho é uma antena MoxonZBZ (MOXON, 2003) mostrada na Figura 4.2 com dois elementos em VHF e quatro elementos em UHF.

Figura 4.2 – Antena VHF e UHF fabricada para receber os sinais do satélite.



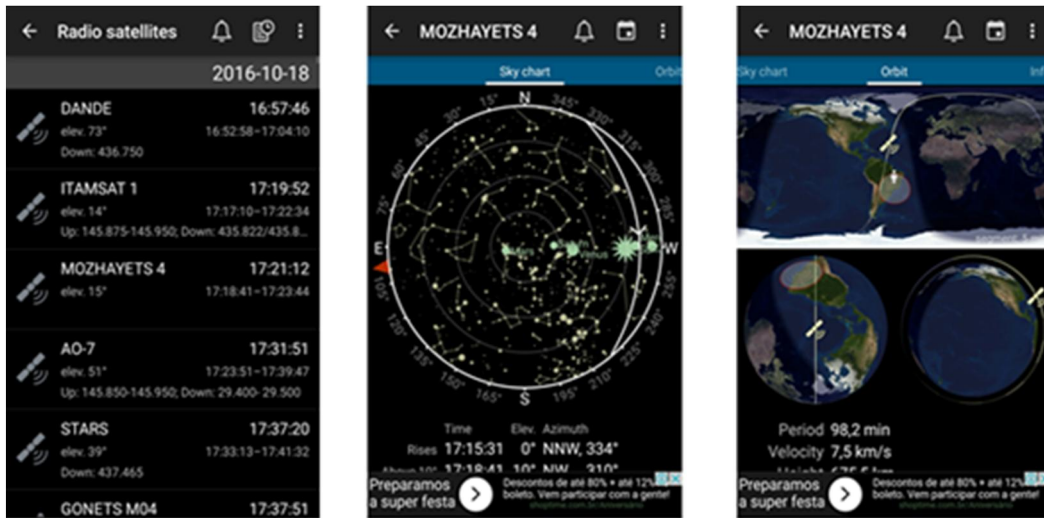
Fonte: Produção do autor.

4.1.2. Opções de Software para Rastreamento de Satélites

Existe uma grande quantidade de pacotes de *software* disponíveis para várias plataformas desde *desktop* até celulares. Este trabalho chama a atenção sobre alguns disponíveis, gratuitamente, tornando-os adequados para projetos que funcionam com baixo orçamento, a saber: *Heavens-Above*, *Orbitron*, *SDRSharp*, *SoundModem*.

O aplicativo *Heavens-Above no Android* (PEAT, 2015), mostrado na Figura 4.3, possui uma lista de satélites, incluindo aqueles dedicados ao rádio amador, com informações sobre eles e suas passagens.

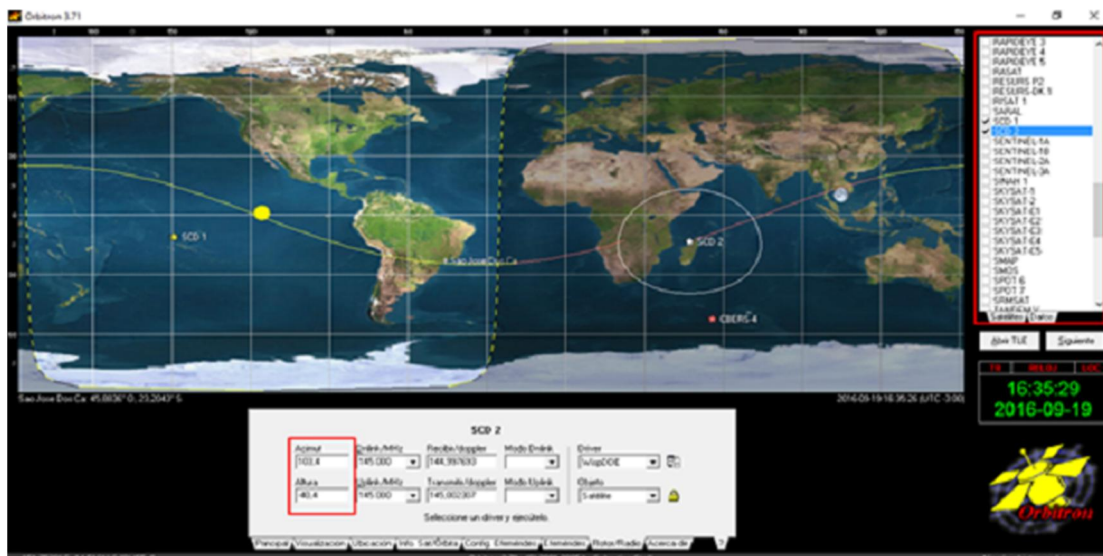
Figura 4.3 – Várias telas do aplicativo *Heavens-Above* com algumas informações sobre as passagens dos satélites.



Fonte: Peat (2015)

O *Orbitron* é um *software* bem conhecido no meio espacial para rastrear satélites, mostrado na Figura 4.4, fornecendo a posição e apontamento das antenas em tempo real e em tempo simulado de acordo com a graduação da azimute e elevação (STOFF, 2005).

Figura 4.4 – Tela do *software* *Orbitron* com algumas informações importantes para o rastreo do satélite.



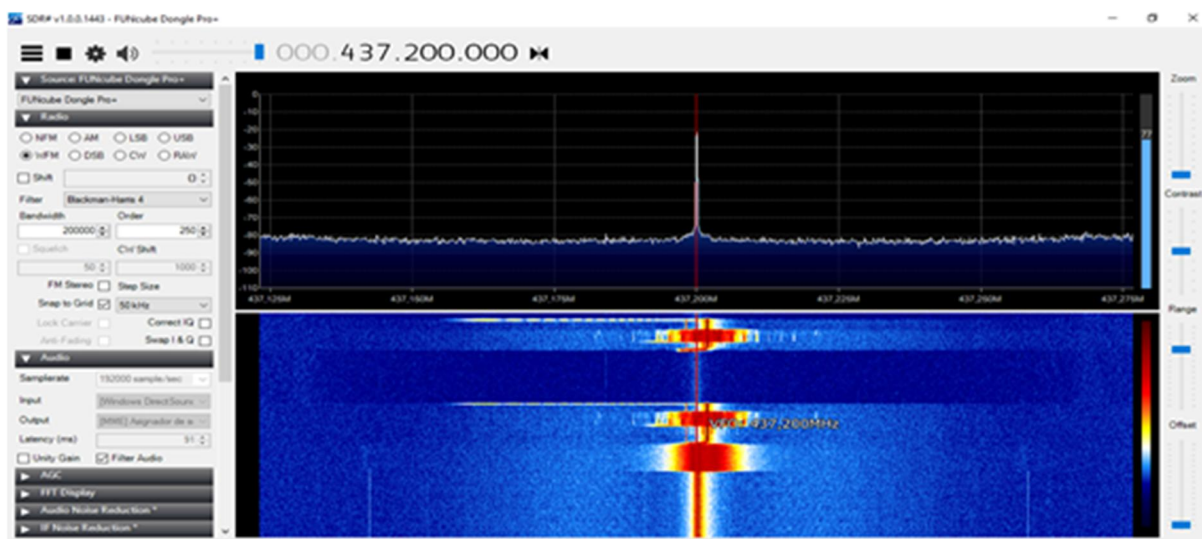
Fonte: Stoff (2005).

SDRSharp da *AIRSPY* (AIRSPY, 2016) é uma aplicação que substitui os rádios físicos convencionais por um *software* rádio como se mostra na Figura 4.5, que lhe permite ouvir os sinais enviados pelo satélite.

Este software tem todos os componentes de um rádio convencional mas todos eles estão definidos por software. Isto permite uma melhor manipulação dos sinais e da informação contida neles. Fornece uma alta variedade funções que podem ser trocadas e intercambiar para se conseguir o melhor resultado possível, dependendo do objetivo que se quer atingir.

No caso da recepção de sinais enviadas por satélites, o software conta com funcionalidades ótimas na escolha de *hardware* para a entrada de informação, opções de ajuste para a largura de banda da frequência, otimizações para reduzir a perda de sinal, opções para a saída e gravação do áudio e outras funções ajustáveis que representam uma vantagem em comparação com os rádios físicos convencionais.

Figura 4.5 – Tela do *software SDRSharp* com o espectro do sinal recebido.

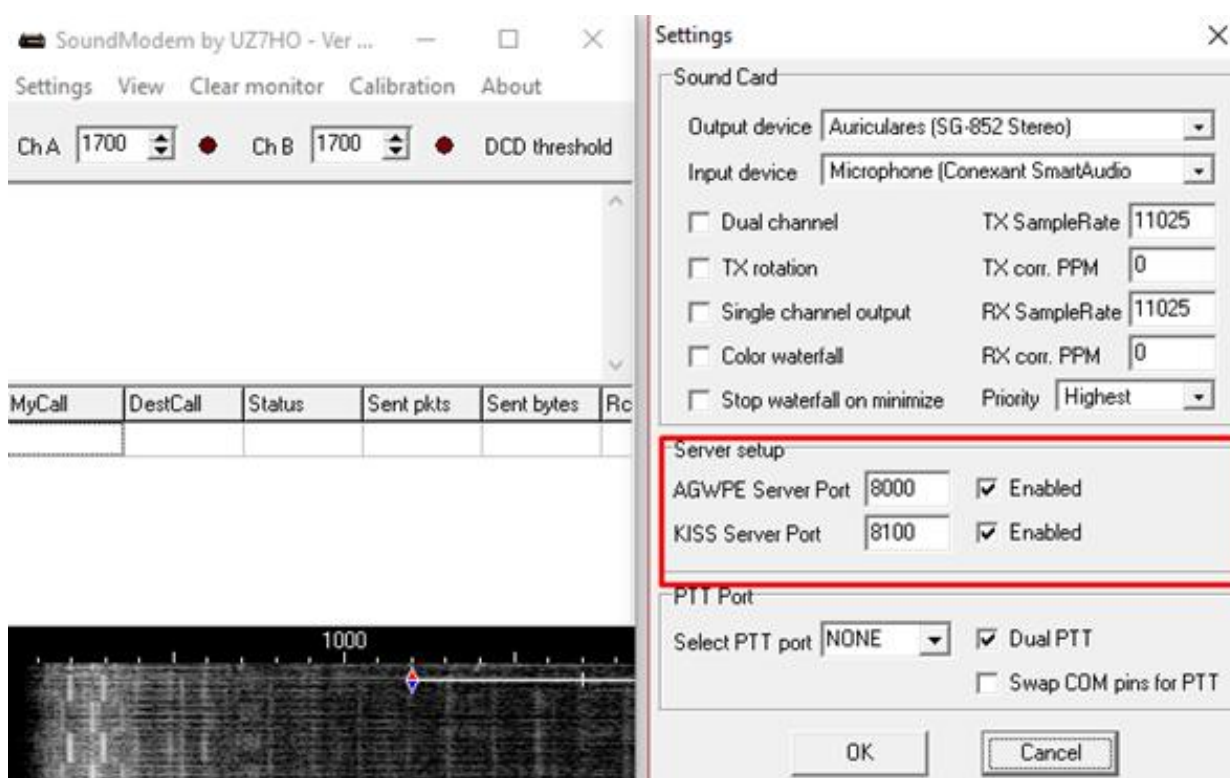


Fonte: Airspy (2016).

SoundModem v.95 feito por UZ7HO (UZ7HO, 2016) é um *software* que converte os sinais enviados pelo satélite em informações codificadas na

linguagem ASCII, como se mostra na Figura 4.6. Ai pode se observar duas telas do programa *SoundModem*: uma delas mostra as informações codificadas na ASCII após o rádio (*neste caso um SDR - SDRSharp*) receber e enviar o áudio através do microfone do computador; na outra imagem mostra-se a tela da configuração, onde pode se escrever as portas do servidor que vão receber a informação e fazer a conversão, a fim de mostrar os dados na linguagem hexadecimal ou no valor de engenharia.

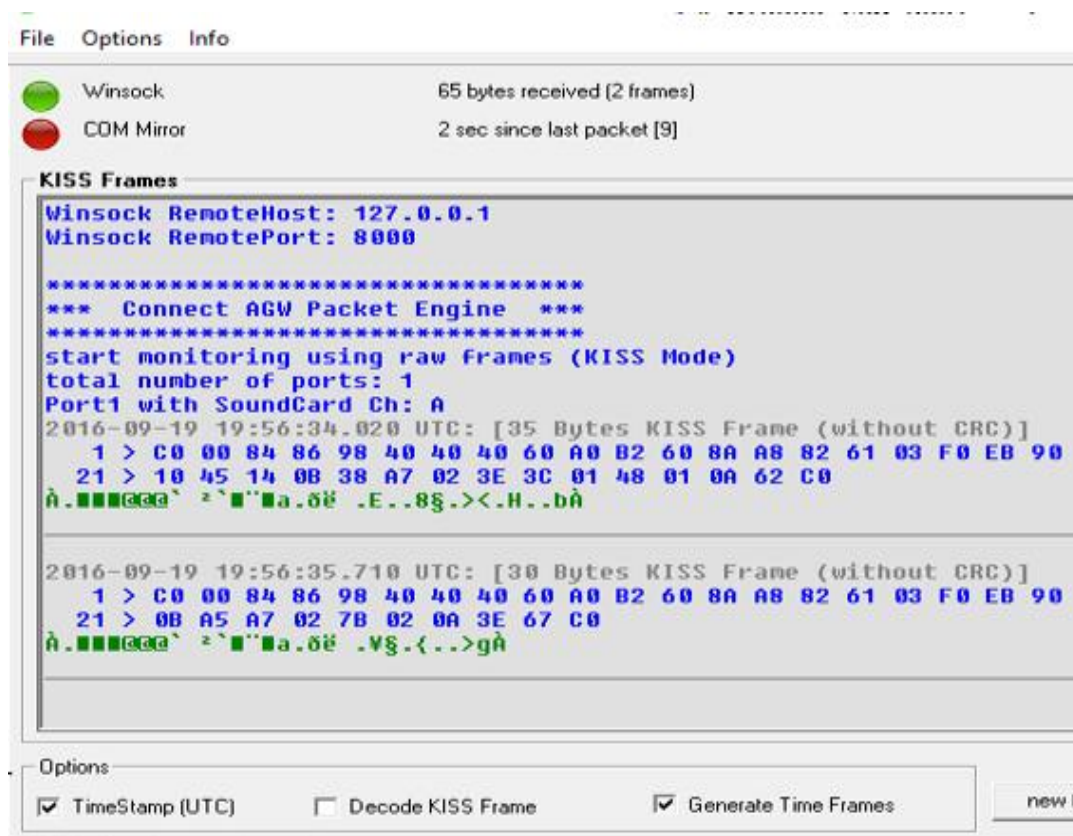
Figura 4.6 – Telas do programa *SoundModem* para obter das telemetrias na linguagem ASCII.



Fonte: Uz7ho (2016)

O software *AGW Online Kiss v. 2.4.4* feito pelo radioamador identificado com o código internacional DK3WN (PEØSAT, 2015). Este *software* converte informações obtidas pelo *software SoundModem* em valores brutos como mostra a Figura 4.7. Este *software* permite que os valores das telemetrias enviados por um satélite sejam processados e visualizados em valor bruto (*hexadecimal*).

Figura 4.7 – Programa AGW Online Kiss com valores brutos de algumas telemetrias enviadas pelo satélite e seu arquivo de configuração.

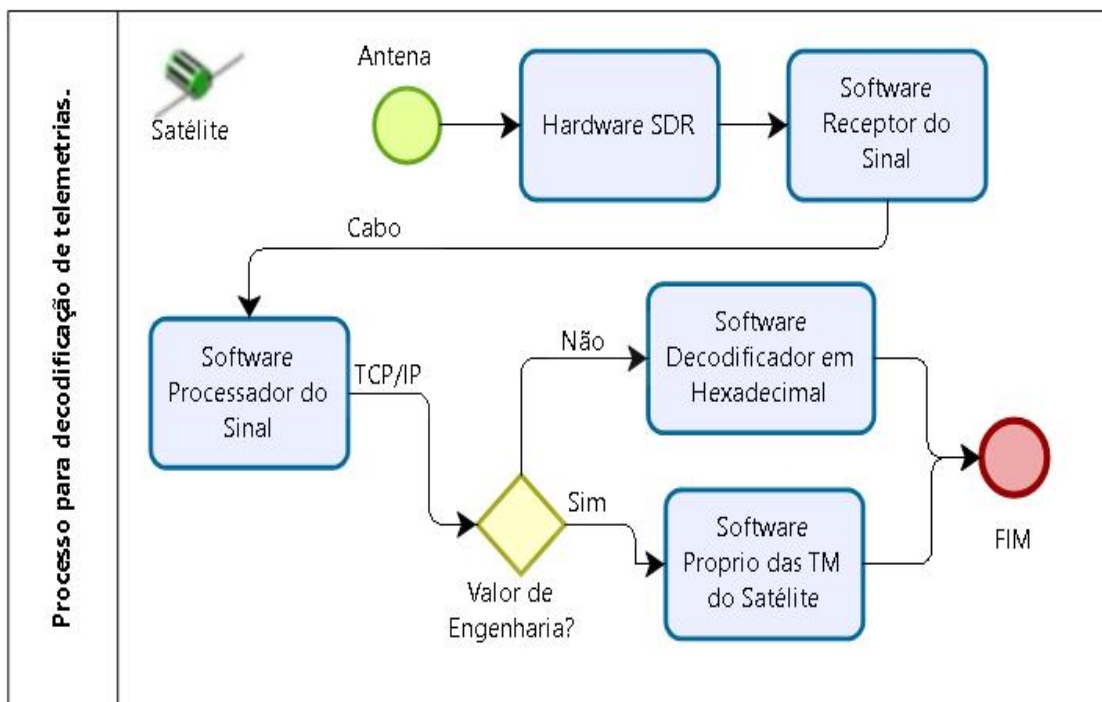


Fonte: Peøsat (2015).

4.1.3. Configuração dos programas para decodificação das telemetrias

A configuração do *software* é implementada com as ferramentas de *software* mencionadas anteriormente. Na Figura 4.8 se apresenta o diagrama de interoperação dos *softwares*. Para este diagrama, deve-se notar que existem dois possíveis elementos finais. Por um lado, o valor hexadecimal de cada telemetria pode ser obtido ou, por outro lado, pode-se obter o valor de engenharia de cada telemetria. Entretanto, isto é possível somente se houver um *software* específico para o satélite, o qual deve fazer todos os cálculos necessários e converter os dados brutos para valores de engenharia compreendidos pelo usuário.

Figura 4.8 – Esquema geral de interoperação para o processo de decodificação de telemetrias.



Fonte: Produção do autor.

Independentemente do resultado final a ser obtido, o seguinte processo deve ser realizado:

- Inicialmente, o *hardware* do receptor (*dongle SDR*) deve estar conectado corretamente à antena que opera na faixa de frequência (*VHF - Very High Frequency*).
- Conectar o *hardware* receptor ao computador onde a decodificação será executada.
- Executar o programa *SDRSharp*, que serve como receptor do sinal enviado por satélite. Devem ser configurados todos os parâmetros necessários para a correta recepção dos sinais, tendo em contas as características de transmissão próprias de cada satélite (frequência de operação, modulação, largura de banda, etc.)

- Executar o programa *SoundModem*, que recebe o som enviado pelo *SDRSharp*, para decodificar a informação e exibi-la em linguagem ASCII.

Neste ponto, pode-se escolher uma das seguintes opções, dependendo das ferramentas com as quais o operador conta.

- Executar o programa *AGW Online KISS*, que receberá as informações do programa *SoundModem*, para realizar a codificação e mostrar cada telemetria em valor hexadecimal.
- Executar o próprio *software* de satélite de telemetria para obter o valor de engenharia de cada telemetria.

É necessário configurar a comunicação entre os *softwares* de decodificação (*SoundModem - AGW Online KISS* ou *SoundModem* – software de TM próprio do satélite) para uma comunicação do tipo TCP/IP.

4.1.4. Problemas de Interoperabilidade os Softwares de Rastreo

Os problemas de interoperabilidade aparecem quando se tenta rastrear um satélite e tem que reunir todos os pacotes de *software* acima mencionados para se obter telemetrias, por exemplo. Nesse cenário, existem dois tipos de problemas possíveis: o primeiro está entre a entrada de som recebida e a saída, o segundo está entre as portas da rede da aplicação. Mais precisamente, estes são detalhados a seguir:

- A saída de som do *SDRSharp*, é a entrada de informação do programa *SoundModem* (por cabos físicos, cabos virtuais ou simplesmente o cartão de som da máquina) para converter o som em dados apresentados na linguagem ASCII. As vezes aqui o barulho externo na comunicação pode causar interferência.

- As informações codificadas na ASCII fornecidas pelo programa *SoundModem* são enviadas através de uma porta de comunicação (TCP/IP), para uma máquina local ou remota, podendo apresentar os problemas típicos da comunicação remota (TCP/IP)

4.2. Estudo de Caso com *UbatubaSat*

Como estudo de caso, buscou-se uma configuração para receber os sinais de telemetria e obter o valor de engenharia das telemetrias enviadas pelo satélite brasileiro Tancredo-1, lançado em janeiro de 2017.

Inicialmente, o balanço do enlace precisa ser verificado para certificar que a recepção do satélite é viável. Isso começa com as características principais de RF do picosatélite Tancredo-1 listadas abaixo:

- Potência de transmissão $P_t = -3$ dBW,
- Perdas totais na linha de transmissão $L_{tl} = -2$ dBW
- Ganho da antena $G_a = 2.2$ dBW

Portanto, a Potência Isotrópica Equivalente Irradiada (EIRP) é dada por:

$$EIRP = P_t \cdot L_{tl} \cdot G_a = -2.8 \text{ dBW} \quad (4.1)$$

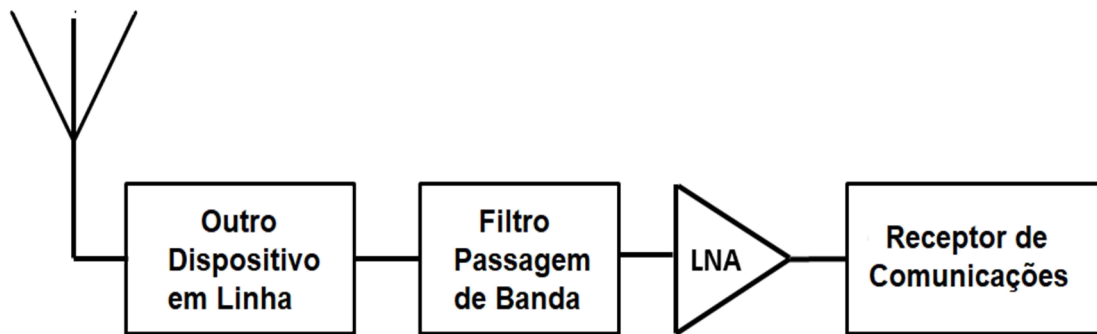
O nível de sinal recebido na Terra na proximidade da estação terrena usando uma antena omnidirecional é dado pelo EIRP do veículo espacial subtraído pelas perdas de caminho de *downlink*. A maior perda é devido à perda pelo espaço livre (FSL), que é dada por:

$$FSL = 10 \log [4\pi \cdot d \cdot f/c]^2 = 150.1 \text{ dBi} \quad (4.2)$$

Onde $d = 1732$ km para uma faixa inclinada, a frequência $f = 437.5$ MHz e $c = 3 \times 10^8$ m/s.

Outras perdas também devem ser determinadas devido principalmente à pressão atmosférica, ionosférica, à antena e à polarização da antena. Estimando essas perdas igual a 3,0 dB, o nível de sinal isotrópico na estação terrena, conforme ilustrado na Figura 4.9, $EIRP_{GS}$ é -155.9 dBW para um diagrama de bloco de estação terrena genérico.

Figura 4.9 – Esquema para verificação da viabilidade do enlace de recepção.



Fonte: Produção do autor.

A margem do link da estação terrestre pode então ser calculada a partir do método E_b/N_o ou do método SNR. Este método é apresentado aqui onde o primeiro passo é calcular a temperatura do ruído efetivo da estação terrena, T_S é dada pela expressão:

$$T_S = (\alpha) T_a + (1-\alpha)T_o + T_{LNA} + T_{2ndStage}/(G_{LNA}/L_D) \quad (4.3)$$

Onde:

T_a = Temperatura da antena ou temperatura do céu (°K) = 500 K

T_o = Temperatura da linha do Sistema (Temperatura Física) (°K) = 290 K

T_{LNA} = Temperatura do ruído do amplificador de baixo ruído (°K) = 60K

$T_{2nd Stage}$ = Temperatura de ruído do amplificador do próximo estágio (°K)

G_{LNA} = Ganho do LNA em linear (non-dB) unidades = 63.1 (18 dB)

L_D = Perdas por Inserção de qualquer outro dispositivo em linha na frente de

LNA (dB) = 2.3 dBi

α = Coeficiente de linha de alimentação fornecido por:

$$\alpha = 10^{-(L_a+L_b+L_c+L_{bpf}+L_{other})/10} \quad (4.4)$$

Onde:

L_a, L_b, L_c = Todas as perdas por cabo ou guia de onda (dB)

L_{bpf} = Perdas por inserção de qualquer filtro de passagem de banda usado na frente de LNA (dB)

L_{other} = Perdas devido a outro dispositivo em linha (dB)

Estimando as perdas totais em linha da antena para a LNA igual a 0,48 dB, então, a partir de (4.4) temos o coeficiente de linha de transmissão $\alpha = 0,8954$. Daí, a partir de (4.3), derivamos a Temperatura do Ruído Efetivo da Estação Terrena que é $T_s = 565 K$.

O próximo passo é determinar a figura da estação terrena do mérito (G / T) dada por:

$$G/T = G_a - L_{tGS} - 10 \cdot \text{Log}(T_s) \quad (4.5)$$

Onde estimou-se:

G_a = Ganho da Antena da Estação Terrena = 24 dBi

L_{tGS} = Perdas Totais na Linha de Transmissão da Estação Terrena = 0.5 dB

Portanto tem-se, $G/T = -4.02$ dB/K. Em seguida, calcula-se a densidade de energia de sinal a ruído (S/N_o) e a energia por bit / densidade espectral de potência de ruído E_b/N_o dado por:

$$S/N_o = EIRP_{GS} - L_{GSAP} + (G/T) - K \quad (4.6)$$

onde K = Constante Boltzman's = -228.6 dBW/K/Hz e L_{GSAP} = Perda por Apontamento da Antena da Estação Terrena = 0.4 dB (Estimado). Daí $S/N_o = 68.28$ dBHz e utilizando:

$$E_b/N_o = S/N_o - 10 \log (R) \quad (4.7)$$

onde R = taxa de dados, então $E_b/N_o = 37.48$ dB para $R = 1200$ bps.

De acordo com a planilha Método de Modulação e Demodulação da IARU o E_b/N_o necessário é de 21 dB para a modulação *AFSK/FM* e o *BER* é igual a 10^{-4} e, considerando a perda de implementação do demodulador igual a 1 dB, tem-se um $E_b/N_{o\text{threshold}} = 22$ dB. Portanto, a margem do link do sistema será:

$$E_b/N_o - E_b/N_{o\text{threshold}} = 37.48 - 22 = 15.48 \text{ dB} \quad (4.8)$$

Isto verifica que a recepção do sinal é viável.

Depois de comprovar a viabilidade da recepção e solucionar todos os problemas de operacionalidade mencionados anteriormente, a porta de saída do *SoundModem* deve ser conectada a um decodificador de telemetrias.

Para isso, foi desenvolvido um *software* específico para o satélite Tancredo-1, responsável por obter o valor de engenharia de cada uma das telemetrias, realizar as operações necessárias para a conversão e apresentá-las de forma amigável em uma tela para o usuário, tal que as informações sobre o satélite são mostradas de uma maneira simples e compreensível para qualquer um. O nome do *software* é *UbaTM-Decoder v.1.0* desenvolvido por o rádio amador Edson Pereira *PY2SDR* como uma contribuição para o projeto *UbatubaSat*, Na

Figura 4.10 mostra-se a tela principal do *software* com algumas das telemetrias convertidas em seu valor de engenharia.

Figura 4.10 – Tela principal do *software* UbaTM-Decoder com algumas das telemetrias enviadas pelo satélite Tancredo-1 e seu arquivo de configuração.

AMSAT-BR :: UBATUBASAT Telemetry Console by PY2SDR -- Ver 1.00

Program Mode

PYZEMT Decode

Group	Description	Value	Units
1	0x25 Battery Voltage	?	Volts
2	0x25 Temperature	?	Degrees C
3	0x56 Sequence Controller Least	19.00	
4	0x56 Sequence Controller Most	0.00	
5	0x56 Battery Voltage	3.90	Volts
6	0x56 Temperature	29.33	Degrees C
7	0x56 Solar Panel 1	0.98	Volts
8	0x56 Solar Panel 2	0.98	Volts
9	0x56 Solar Panel 3	0.98	Volts
10	0x56 Solar Panel 4	0.49	Volts
11	0x56 Solar Panel 5	0.98	Volts
12	0x56 Solar Panel 6	0.98	Volts
13	0x56 Solar Panel 7	0.98	Volts

config.txt: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
# Callsign of the groundstation
StationCallsign, [REDACTED]

# Callsign of the satellite
SatelliteCallsign, [REDACTED]

# Simulator IP, port
SimulatorAddress,150.163.30.82,8101

# TNC IP, port
ModemAddress,150.163.30.80,8100
```

Fonte: Produção do autor.

4.3. Estudo de caso – Obtenção e Decodificação de imagens NOAA

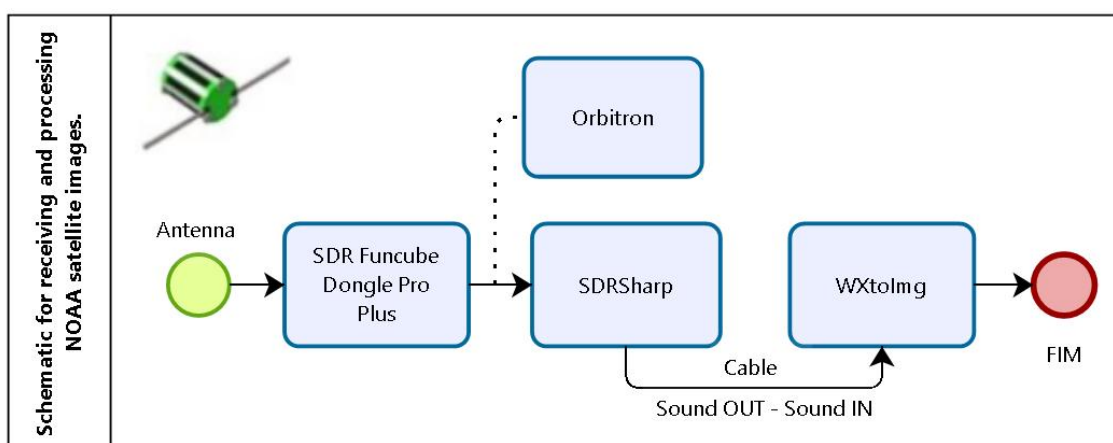
Neste estudo de caso, o programa SDRSharp mencionado anteriormente deve ser usado.

O mesmo esquema de conexão de todos os elementos de *hardware* é usado, o *hardware* de recepção deve ser conectado ao equipamento onde a imagem será decodificada e processada.

Adicionalmente, a antena do receptor VHF, também deve estar devidamente conectada ao *hardware* de recepção SDR. A Figura 4.11 mostra o esquema de

interoperação entre os elementos de *hardware* e *software* para recepção e decodificação de imagens dos satélites da NOAA.

Figura 4.11 – Esquema geral de configuração dos elementos de *hardware* e *software* para receber e decodificar imagens dos satélites da NOAA.



Fonte: Produção do autor.

Da mesma forma que o programa *SDRSharp* é usado para o decodificador de telemetrias explicado no caso de estudo um, ele deve ser usado para obter imagens dos satélites meteorológicos da NOAA, com a diferença de que, para cada um dos satélites NOAA, os parâmetros de comunicação entre satélite e terra devem ser estabelecidos, a fim de poder processar e decodificar esse sinal e finalmente adquirir uma imagem meteorológica por satélite.

Além disso, para adquirir as imagens desses satélites, é necessária uma ferramenta adicional, um *software* próprio para os satélites da NOAA, o *software* é chamado *WXtoImg* (*WXTOIMG*, 2015), que permite a decodificação e visualização em tempo real das imagens que esteja capturando satélite num momento específico.

O *software WXtoImg* é um completo decodificador de imagens enviadas por satélites meteorológicos, ele é totalmente automatizado para APT e WEFAX. O *software* suporta gravação, decodificação, edição e visualização em todas as versões do Windows, Linux e Mac OS X.

O *WXtoImg* suporta decodificação em tempo real, sobreposições de mapas, aprimoramentos avançados de cores, imagens tridimensionais, animações, imagens *multipass*, transformação de projeção, sobreposições de texto, criação de páginas web automatizadas, exibição de temperatura, interface de GPS, criação de imagens compostas de área ampla e controle de computador para muitos receptores de satélites meteorológicos, receptores de comunicação e scanners (WXTOIMG, 2015).

O processo começa com a configuração do *SDRSharp*, estabelecendo a configuração apropriada para a recepção do sinal de cada um dos satélites da NOAA.

Deve-se indicar a fonte de sinal a ser utilizada, ou seja, o tipo de receptor que está sendo usado, por exemplo: *Airspy*, *Funcube Dongle pro*, *Funcube Dongle pro Plus*, *RTL-SDR*, etc; para garantir que o sinal de entrada esteja sendo capturado pelo *hardware* correto.

No painel de áudio, deve-se estabelecer os mecanismos de entrada e saída para o trabalho, neste caso, a entrada de áudio será o mesmo *hardware* receptor usado (o SDR). Para a saída, deve se assegurar que a saída de áudio do computador seja devolvida, ou seja, o áudio gerado pelo *SDRSharp* deve ser convertido em uma fonte de entrada para o *software* de decodificação *WXtoImg*.

Neste caso, deve-se escolher o tipo de saída com o qual é contado, pode ser um cabo físico que se conecta da porta de saída de áudio à porta de entrada de áudio do equipamento. Também pode-se usar um *software* que tenha a mesma função que o conector físico, como um "*cabo virtual*", o que implica

usar a placa de som do seu computador, mas isso não garante o bom fluxo das informações.

É muito importante conhecer a frequência de operação de cada um dos satélites dos quais se deseja receber a imagem. Abaixo estão os satélites que estão em operação e sua frequência de download.

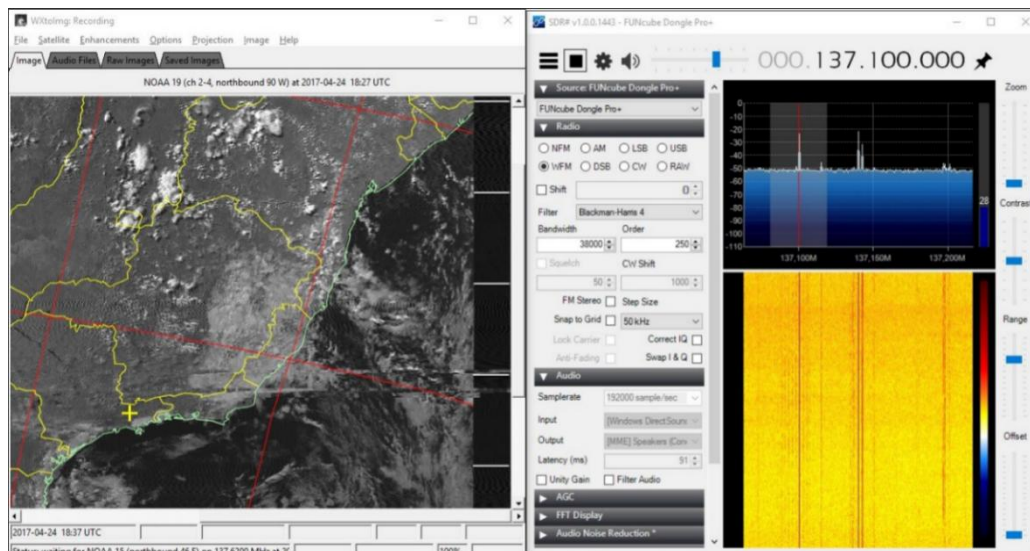
- NOAA-15: 137,62 MHz
- NOAA-18: 137,9125 MHz
- NOAA-19: 137,1 MHz

Agora, o programa *WXtoImg* deve ser configurado, atribuindo o ponto geográfico a partir do qual o satélite está sendo rastreado, isto na opção "*Ground Station Location*". Na opção "*Recording Options*", deve ser configurado o mecanismo de entrada, neste caso é o mesmo mecanismo de saída do *software SDRSharp* e, finalmente, na opção "*Satellite*", é necessário que a opção "*Autodetect APT*" esteja marcada.

O *software Orbitron* pode ser usado para acompanhar visualmente a posição atual do satélite, para começar a adquirir a imagem no momento certo.

Quando o satélite entra na faixa de visualização da estação em terra, com a antena apontando no endereço certo e a recepção do sinal constante, deve-se executar a opção "*Autorecord*". Nesse momento se começa-se a obter a imagem em tempo real. Na Figura 4.12, é mostrada uma captura de tela, durante o processo de recepção de uma imagem do satélite NOAA-19, onde os dois *softwares* que trabalham simultaneamente (*SDRSharp* e *WXtoImg*) também são mostrados.

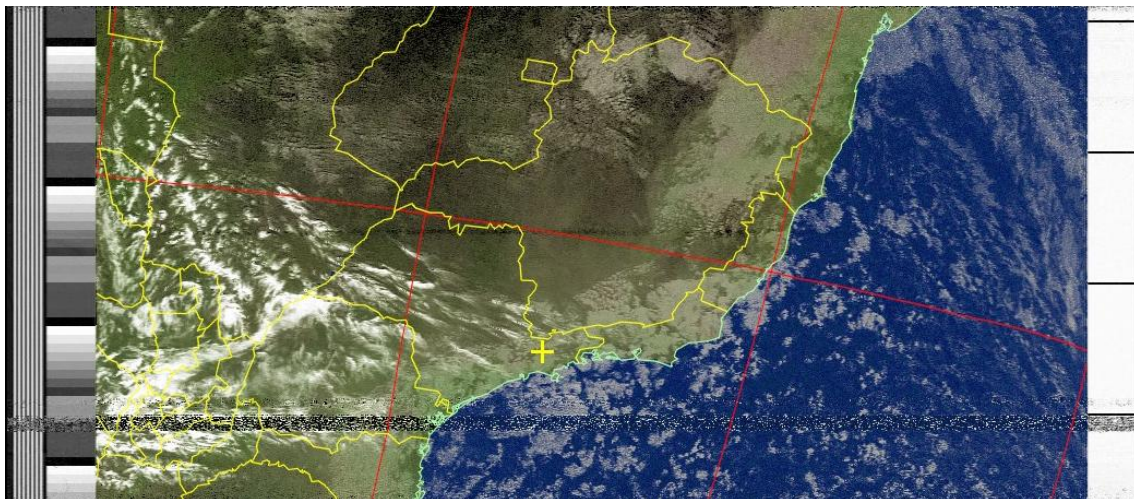
Figura 4.12 – SDRSharp e WXtoImg em execução para recepção de imagens do satélite NOAA-19.



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.13 mostra uma imagem final capturada em 3 de julho de 2017, na cidade de São José dos Campos, São Paulo, Brasil, obtida do satélite NOAA-19.

Figura 4.13 – Imagem final, obtida do satélite NOAA-19.



Fonte: Produção do autor.

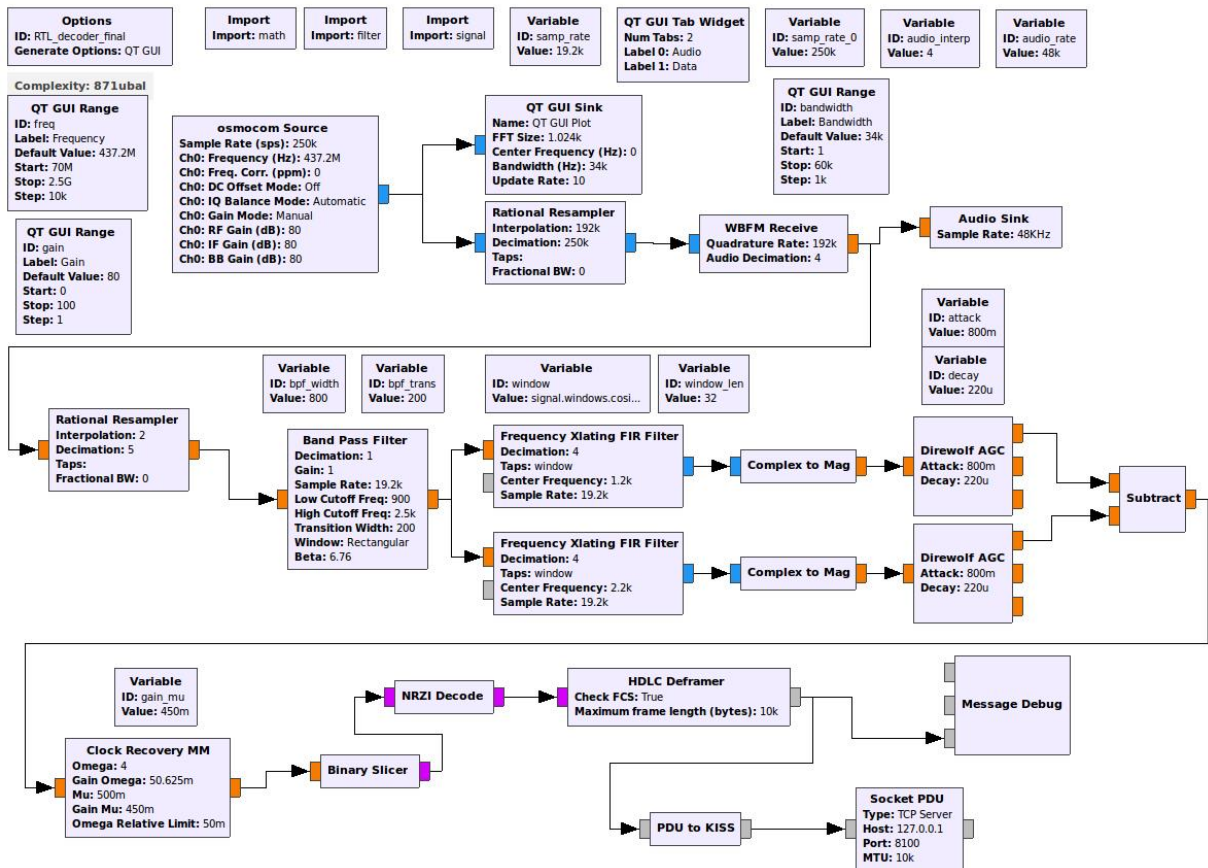
A ferramenta WXtoImag permite aprimoramentos para cada uma das imagens adquiridas, a fim de obter uma melhor qualidade de visualização da imagem.

Este experimento foi realizado usando o SDR do *Funcube Dongle Pro Plus* para obter mais informações sobre os processos de aquisição de imagens usando o RTL-SDR. O RTL-SDR apresenta um tutorial disponível em (RTL-SDR, 2013).

4.4. Recepção e Processamento de Sinais para Obter Dados Telemétricos Usando GNU Radio

A Figura 4.14 mostra o diagrama de fluxo do programa inteiro, construído no GRC e que permite a decodificação de todas as telemetrias do satélite Tancredo-1.

Figura 4.14 – Diagrama de blocos para o decodificador de telemetrias em AFSK.



Fonte: Produção do autor.

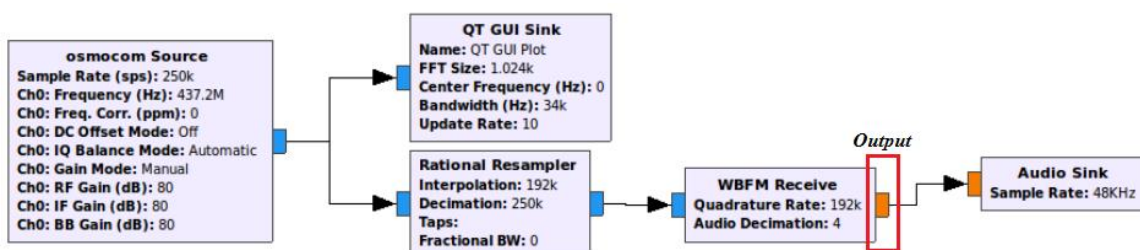
O diagrama de fluxo do decodificador de telemetria é explicado abaixo, com base nas características do programa (receptor de FM, Demodulador de sinal AFSK, contagem de bits, *deframer* do protocolo AX-25 e envio de dados para porta TCP/IP) anteriormente apresentado no diagrama de blocos da operação do programa.

4.4.1. Receptor FM

Na Figura 4.15, o receptor de FM, que consiste, é composto pelos seguintes elementos do GNU Rádio:

- Um bloco “*Osmocom Source*” que permite o reconhecimento da fonte de entrada do sinal, isto é, um bloco que indica que o *hardware* receptor é o RTL2832U.
- Bloco “*Rational Resampler*” para adaptar o número de amostras transmitidas e bloco “*QT GUI Sink*” para gerar uma interface de rádio gráfica para o usuário.
- Um bloco “*WBFM Receive*” para demodular o sinal de Faixa Larga Modulado em Frequência do fluxo de dados (ETTUS, 2017).
- Um bloco “*Audio Sink*” que permite ao usuário ouvir áudio recebido.

Figura 4.15 – Blocos que compõem o receptor FM.

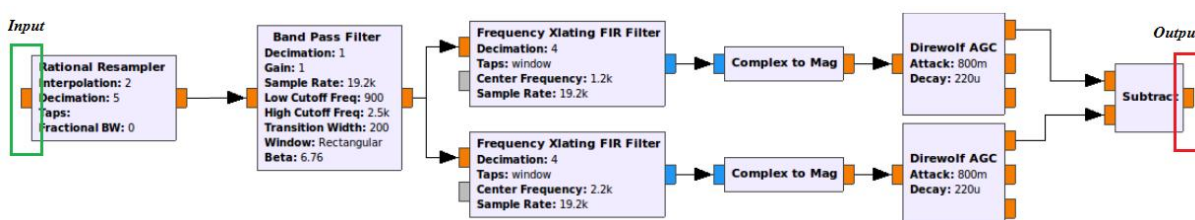


Fonte: Produção do autor.

4.4.2. Demodulador do Sinal AFSK

Tendo em conta o conceito de modulação AFSK, a construção de um demodulador para este tipo de sinal é feita usando os blocos necessários do ambiente GNU Radio Companion. A Figura 4.16 mostra os elementos que compõem o demodulador inteiro.

Figura 4.16 – Blocos que compõem o demodulador AFSK.



Fonte: Produção do autor.

O satélite Tancredo-1 executa a codificação usando o AFSK1200 cuja modulação por deslocamento de Frequência de Áudio - AFSK1200 codifica dados binários digitais a uma taxa de dados de 1200 b/s (EECS, 2017b). Nela se utiliza as frequências 1200Hz e 2200Hz (frequência central de 1700 Hz \pm 500 Hz) para codificar os bits '0's e '1's, também conhecidos como espaço e marca.

A informação de entrada para o demodulador AFSK é o sinal enviado pelo receptor de FM, que normalmente passa através de um filtro de passagem de banda que limita a passagem do sinal a uma faixa de frequência predeterminada. Em GNURadio esta funcionalidade é provida pelo bloco "*Band Pass Filter Block*".

À medida que o AFSK alterna entre duas frequências, dois filtros de passagem de banda são colocados no demodulador em torno da frequência da *marca* e do *espaço*. O GNURadio possui diversos tipos de filtros FIR (*Finite Impulse Response* ou Resposta de Impulso Finito) implementados como blocos. Esses filtros FIR são um tipo de filtro digital cuja resposta a um impulso de sinal como entrada terá um número finito de termos não-zero. No GRC existe o bloco "*Frequency Xlating FIR Filter*" o qual permite:

- Executar a tradução de frequência: O usuário seleciona uma frequência desejada, que é deslocada para quase zero hertz. Isso pode ser usado para mudar a menor frequência de banda passante para zero hertz.
- Aplicar a filtragem FIR: Se o filtro passa-baixa for usado, todas as frequências acima da frequência de banda passante superior podem ser atenuadas.
- Dizimar o sinal: A anulação ocorre por último porque a filtragem é melhor feita com a taxa de amostragem completa. Desta forma, há menos chances de ruído.

Usando esse bloco pode-se analisar o canal específico de marca ou espaço, para determinar qual frequência está sendo utilizada para a transmissão de informação. Depois de identificar a frequência, tem que se converter os dados do formato complexo a uma magnitude. Para isso o GRC oferece a possibilidade de usar o bloco "*Complex to Mag*", que permite ter uma correta comunicação entre os blocos do decodificador porque a entrada do próximo bloco é uma magnitude.

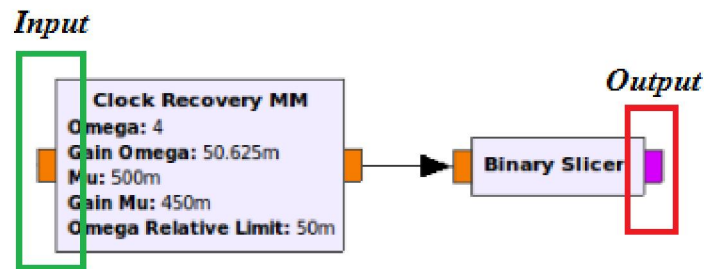
O bloco "*Direwolf AGC*" faz parte do módulo OOT (*Out-Of Tree*) gr-bruning. O filtro de pré-ênfase FM de cada rádio é único. Como tal, isso resulta em amplitudes de cada tom variando de transmissão para transmissão. Este bloco forma uma "média móvel" entre os picos e vales, e escala a forma de onda adequadamente.

Finalmente, pode-se determinar qual frequência está ativa em um período de bits, subtraindo as saídas dos dois filtros.

4.4.3. Contador de Bits

Nesta parte, o demodulador recebe como uma entrada o sinal demodulado. Esta etapa envolve tomar este sinal e fazer uma análise dos máximos e mínimos para um padrão lógico, e em seguida usar essa informação para discernir 0's e 1's (WEBER, 2014). Para isso, é necessário usar dois blocos específicos no GRC: "*Clock Recovery MM*" e "*Binary Slicer*". O bloco "*Clock Recovery MM*" faz o discernimento de máximos e mínimos. O "*Binary Slicer*" marca os máximos como um "1" e os mínimos como "0". A Figura 4.17 mostra a conexão entre os blocos para a contagem de bits.

Figura 4.17 – Conexão dos blocos em GRC para a contagem de bits.



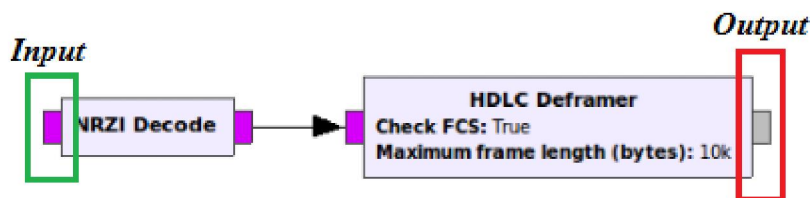
Fonte: Produção do autor.

A recuperação do relógio M&M (Mueller e Müller) é o nome de um dos blocos de processamento de sinal no GNU Radio. Sua tarefa é recuperar amostras de um sinal com a mesma frequência e fase que as usadas pelo transmissor. Isso é necessário, por exemplo, quando se deseja extrair símbolos de um sinal digital assíncrono. Ele permite sincronizar o receptor com os centros de uns e os zeros presentes no sinal (TOMAŽ, 2015).

4.4.4. Deframer do Protocolo AX25

A Figura 4.18 mostra os dois blocos que compõem o *deframer* do protocolo AX25 cuja camada de enlace é o HDLC (*High Level Data Link Control*). O protocolo HDLC, definido pela ISO, fornece um serviço de transmissão transparente na camada de enlace de dados do modelo de referência OSI.

Figura 4.18 – Blocos em GRC que compõem o deframer do protocolo AX25.



Fonte: Produção do autor.

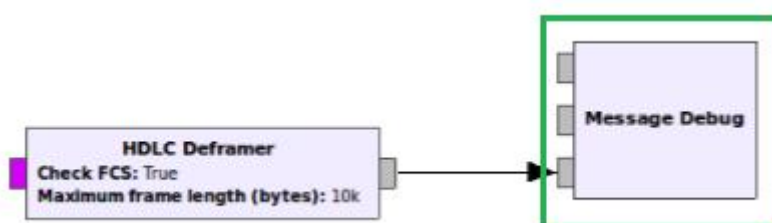
O GNU Radio tem um bloco *deframer* HDLC, entretanto aqui está se usando um bloco do módulo OOT (*Out-Of Tree*) chamado gr-kiss de um membro da

comunidade GNU. Uma das vantagens deste bloco é que ele pode passar em quadros cujo CRC (*Cyclic Redundancy Check*) não coincide. O CRC é um código de detecção de erros comumente utilizado em redes digitais e dispositivos de armazenamento para detectar mudanças acidentais em dados brutos. Sempre que se recebe um sinal BPSK, não é possível saber se está recebendo o sinal original ou o sinal invertido (onde os 0 e 1 são trocados). Isso ocorre porque existe uma ambiguidade de fase de 180°. Muitas vezes, uma codificação diferencial é usada para resolver essa ambiguidade mas, o HDLC geralmente emprega a NRZ-I. No entanto, também é possível que nenhuma codificação diferencial seja usada e essa ambiguidade seja resolvida de outra forma (ESTEVEZ, 2016).

4.4.5. Bloco de Mensagens de Depuração

Na Figura 4.19 é mostrada uma conexão entre o bloco *deframer* e o bloco de depuração no GRC. O bloco *Message Debug* imprime informações interessantes sobre depuração e técnica. No caso de não haver um *software* específico para se obter o valor de engenharia das telemetrias, aqui pode-se observar a informação do frame em valor hexadecimal.

Figura 4.19 –Conexão entre o bloco do *deframer* e o bloco de depuração.



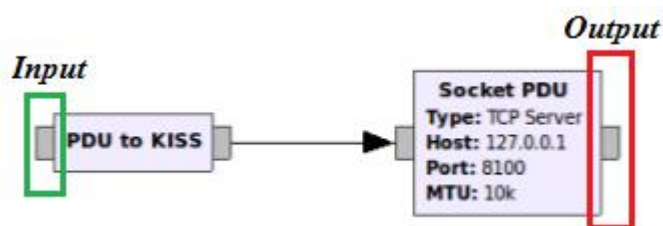
Fonte: Produção do autor.

4.4.6. Envio de Dados à Porta TCP/IP

Quando os frames HDLC são extraídos, eles são armazenados em um arquivo KISS e enviados a um determinado *socket* para seu posterior processamento. Neste caso, o processamento é realizado usando o *software* de telemetria

próprio do satélite Tancredo-1. A Figura 4.20 mostra os blocos que fazem a comunicação e o envio da informação dos frames ao socket.

Figura 4.20 –Blocos em GRC para enviar a informação dos pacotes na porta TCP/IP.



Fonte: Produção do autor.

Neste ponto pode se usar o *software* desenvolvido para obter o valor de engenharia das telemetrias do satélite Tancredo-1. O *software* foi explicado no capítulo anterior.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho cumpriram o objetivo principal da pesquisa, reduzindo-se significativamente os custos ao receber informações de satélites pequenos, principalmente devido ao uso de *hardware* de baixo custo, ferramentas de *software* gratuitas, usando o Linux como sistema operacional e envolvendo membros da Comunidade Open Source.

A motivação do estudo foi o de reduzir os custos de monitoramento dos enlaces de subida e descida para projetos de pequenos satélites, que são principalmente executados com restrição orçamentária. Portanto, apresentou-se o uso de ferramentas de *software* e poucos elementos de *hardware* que facilitam a montagem de uma estação terrestre simples para receber e decodificar o sinal que é enviado por um satélite.

Existem outras configurações que também podem ser implementadas para se adquirir informações dos satélites, utilizando *hardware* de baixo custo semelhante e permitindo que a recepção do sinal seja tratada digitalmente usando o GNU Radio Companion. Além disso, este ambiente gráfico permite a construção de descodificadores baseados em qualquer técnica de modulação digital.

5.1. Considerações Finais

Utilizando o *hardware* e o *software* apresentados neste trabalho, a decodificação de telemetrias moduladas em AFSK pode ser feita para o picosatélite Tancredo-1. Isto permite que qualquer pessoa interessada em tecnologia espacial tenha acesso e uso de ferramentas de baixo custo.

A configuração resultante deste trabalho possibilita a aquisição das informações de pequenos satélites com um custo mínimo, com não mais de 50 USD. Com isto é possível conectar-se a um satélite e obter suas informações,

desde que o sinal enviado pelo satélite cumpra as características de modulação e recepção que o decodificador requer.

Para obtenção do valor de engenharia da telemetria de um satélite é necessário se conhecer a estrutura e as curvas de calibração de cada um deles, e fazer os cálculos para obter o resultado final. Este processo é realizado independentemente do processo de demodulação do sinal.

Os elementos gerados neste trabalho como os diagramas de fluxo e código em Python são uma contribuição para a comunidade GNU, devido ao uso de ferramentas gratuitas e ao incentivo constante por aumentar o uso de novas tecnologias que permitem melhorar o custo-benefício em relação a projetos de pequenos satélites.

Os participantes do projeto tornam-se conscientes do fluxo de informações a partir da aquisição de sinal de RF até a telemetria decodificada no seu valor de engenharia. Ainda assim, eles são capazes de reduzir os custos de rastreamento em grande porcentagem, em comparação com a solução, com base em estações fixas atualmente disponíveis no mercado, de acordo com a análise custo-benefício. A fim de proporcionar confiabilidade, é necessário um maior desenvolvimento na área do *software*.

Os pacotes de *software* mencionados neste trabalho em conjunto com os elementos de *hardware* permitem a decodificação de telemetrias. Parte desse processamento em cadeia é independente do satélite. Apenas o fluxo final, quando os valores de engenharia das telemetrias são derivados, é preciso se conhecer a configuração e a estrutura de cada um dos dados de telemetria.

O material apresentado é uma solução que foi usada para monitorar o sinal de telemetria de um picosatélite chamado *Tancredo-1* como estudo de caso e uma prova de conceito.

5.2. Publicações Realizadas

Durante o trabalho de mestrado foram produzidas as seguintes publicações em diferentes eventos e jornais.

- Artigo em periódico 1: MOLANO. P, D. J; SANTOS, W. A.; SANTOS, D. S; TIKAMI, A.; PEREIRA, E. W; *Satellite Telemetry and Image Reception with Software Defined Radio Applied to Space Outreach Projects in Brazil*, JAABC - *Jornal Anais da Academia Brasileira de Ciências*, ENGENHARIAS III, Classificação QUALIS B1. (Aceito 18-feb-2018)
- Artigo submetido em periódico: MOLANO. P, D. J; SANTOS, W. A.; SANTOS, D. S; *Reception and Decodification of Small Satellites Telemetries Using GNURadio and Software Defined Radio (SDR)*; *Revista IEEE América Latina*, ENGENHARIAS III, Classificação QUALIS B2. (Submetido 29-nov-2017). Em avaliação.
- Artigo de conferência 1: MOLANO. P, D. J; SANTOS, W. A.; SANTOS, D. S; TIKAMI, A.; PEREIRA, E. W; *A software defined radio approach to ground operations of small satellites. 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites, Buenos Aires, Argentina, 2017.*
- Artigo de conferência 2: MOLANO. P, D. J; SANTOS, W. A.; SANTOS, D. S; *SDR: Rádio definido por Software para Recepção e Decodificação de Telemetrias e Imagens de Pequenos Satélites. 8º WETE, São Jose dos Campos, 2017.*

5.3. Sugestão de Trabalhos Futuros

Com a intenção de melhorar as configurações apresentadas e aumentar os estudos relacionados com as tecnologias de Rádio Definido por *Software* estudadas no presente trabalho, se propõem os seguintes trabalhos futuros:

- Incluir na solução desenvolvida no framework GNURadio a funcionalidade para a obtenção do valor de engenharia das telemetrias enviadas pelo satélite Tancredo-1. Com isto pode se completar uma solução integral para a recepção e processamento de dados telemétricos enviados por pequenos satélites.
- Agregar ferramentas para o rastreamento de satélites com a solução desenvolvida. Estes programas proporcionam informação sobre a localização do satélite no momento do seguimento e o enlace desde o segmento solo. Isto ajudará a diminuir as perdas ocasionadas pelo apontamento da antena.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA - AEB. **Nanosatélite serpens está em órbita e tem sinais captados no brasil.** São José dos Campos, 2015. Disponível em: < <http://www.aeb.gov.br/nanosatelite-serpens-esta-em-orbita-e-tem-sinais-captados-no-brasil/> >. Acesso em: 16 maio 2017.

_____. **Picosatélite Tancredo -1 tem sinais captados em diversas partes do planeta.**, Brasília - DF, 2017. Disponível em: < <http://www.aeb.gov.br/picosatelite-tancredo-1-tem-sinais-captados-em-diversas-partes-do-planeta/> >. Acesso em: 08 ago. 2017.

AIRSPY. A . 2016. Disponível em: < <http://airspy.com/download/> >. Acesso em: 05 jul. 2017.

BOGOSSIAN, O. L. **Introdução à tecnologia de satélites CSE-200-4.**: módulo 1: introdução. São José dos Campos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016. Notas de aula.

CASTRO, R. A. L.; FUSARIO, R. J. **Teleinformática para ingenieros en sistemas de información.** 2.ed. España: Publidisa, 2006. ISBN 84-291-4394-7.

EECS ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES. **Instructional and electronics support.** Berkley, 2017a. Disponível em: < <https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee123/sp15/lab/lab6/Lab6-Part-A-Audio-Frequency-Shift-Keying.html> >.

_____, ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCES, **Instructional and electronics support:**, Lab 6, Digital Communication with Audio Frequency Shift Keying (AFSK). Berkley, 2017b. Disponível em: < <https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee123/sp15/lab/lab6/Lab6-Part-A-Audio-Frequency-Shift-Keying.html> >. Acesso em: 12 ago. 2017.

ERENO, D.; RAMOS, L. Pequenos ganham o espaço. **Revista Pesquisa FAPESP**, v.219, p.19-20, 2014

ESTEVEZ, D. **The GNU Radio Foundation, Inc.** reverse-engineering outernet. 2016. Disponível em: < <https://www.gnuradio.org/blog/reverse-engineering-outernet/> >. Acesso em: 12 ago. 2017.

ETTUS, R. **Implementation of a simple FM receiver in GNU radio.** 2017. Disponível em: < https://kb.ettus.com/Implementation_of_a_Simple_FM_Receiver_in_GNU_Radio/#WBFM_Receive >. Acesso em: 10 ago. 2017.

EUROPEAN STANDARD.. **ETSI EN 300 744:** digital video broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. Sophia Antipolis Cedex, 2009.

FARUKE, S. **Radio frequency modulation made easy**. Grand Forks, ND, USA: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-41202-3.

FORUM, W. I. **Software Defined Radio (SDR) forum: technical definitions.**, 2017. Disponível em: < http://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR >. Acesso em: 17 maio 2017.

FUNCUBE. **The FUNcube Dongle Pro+**: LF to L band software-defined radio. 2017. Disponível em: < <http://www.funcubedongle.com/> >. Acesso em: 17 maio 2017.

GAUSS. **Groud of Astrodymaics for the Use of the Space System**. 2017. Disponível em: < <https://www.gaussteam.com/services/satellite-subsystem/radio/> >. Acesso em: 17 maio 2017.

GERGELY, T. E.; CLEGG, A. **Nano y picosatélites**. Alexandria, Virginia: U S National Science Foundation, 2015.

GNURADIO, F. **About GNU Radio**. 2010. Disponível em: < <https://www.gnuradio.org/about/> >. Acesso em: 10 ago. 2017.

HILLGER, D.; TOTH, G. Picture transmission. **Topical Time**, p.39-42, nov./dez. 2009

IGLESIAS, R. M. **Instalación de equipos y sistemas de comunicación radioelectrónicos**. Vigo, Espanha: Ideaspropias, 2005. 232p. ISBN 978-84-96585-29-4.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **NanosatC-BR1 é lançado com sucesso e estação já recebe sinais do primeiro cubesat nacional**. São Jose dos Campos, 2014. Disponível em: < http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=3640 >. Acesso em: 16 maio 2017.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA - ITA. **Cubesat brasileiro lançado com sucesso da estação espacial internacional**. São José dos Campos, 2015. Disponível em: < <http://www.ita.br/noticias14> >. Acesso em: 16 maio 2017.

JUANG, J. C.; TSAI, C. T.; MIAU, J. J. A Software-defined radio approach for the implementation of ground station receivers. In: SANDAU, R.; ROESER, H.P.; VALENZUELA, A. (Eds.). **Small satellites for earth observation**. Netherlands: Springer Verlag, 2008. p.293-298.

LABRE, L. D. A. B. D. R. **AMSAT-BR tubesat Tancredo-1 é ejetado e inicia transmissões**. 2017. Disponível em: < <http://amsat-br.org/> >. Acesso em: 27 jun. 2017.

LAMMLE, T. **CCNA: Cisco Certified Network Associate Study Guide: Exam 640-802**. Indianapolis, Indiana: Wiley Publishing, 2007.

MOXON, P. **Moxon antenna project**. 2003. Disponível em: < <http://www.moxonantennaproject.com/index.html> >. Acesso em: 05 jul. 2017.

NASA. **Small spacecraft technology state of the art**. Washington: NASA, 2015.

_____. **Open source mobile communications - RTL - SDR (Wiki)**. 2017. Disponível em: < <https://osmocom.org/projects/sdr/wiki/rtl-sdr> >. Acesso em: 09 ago. 2017.

_____. **Open Source Mobile Communications - RTL - SDR (Wiki)**. 2017. Disponível em: < <https://osmocom.org/projects/sdr/wiki/rtl-sdr> >. Acesso em: 09 Agosto 2017.

PEAT, C. **Heavens above application**. 2015. Disponível em: < <http://www.heavens-above.com/> >. Acesso em: 05 jul. 2017.

PEØSAT, A. R. **Information about Amateur radio: satellite experiments.**, 2015. Disponível em: < <http://www.pe0sat.vgnet.nl/decoding/tlm-decoding-software/dk3wn/> >. Acesso em: 05 jul. 2017.

REALTEK. **RTL2832U - DVB-T COFDM Demodulator + USB 2.0: general description**. 2017. Disponível em: < <http://www.realtek.com.tw/products/productsView.aspx?Langid=1&PFid=35&Level=4&Conn=3&ProdID=257> >. Acesso em: 09 ago. 2017.

RTL-SDR. **RTL-SDR tutorial: receiving noaa weather satellite images**. 2013. Disponível em: < <http://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-tutorial-receiving-noaa-weather-satellite-images/> >. Acesso em: 08 jul. 2017.

_____. **About RTL-SDR**. 2015. Disponível em: < <http://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/> >. Acesso em: 07 ago. 2017.

SALIVAHNAN, S.; KANCHANA, B. V. **Linear integrated circuits**. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2008. ISBN 978-0-07-064818-0.

SMILLIE, G. **Analogue and digital communication techniques**. 200 Wheeler Road, Burlington, MA: Elsevier, 2002. ISBN 0-340-73125-7.

SMITH, D. R. **Digital transmission systems**. 3.ed. New York, NY: Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 978-1-4613-4726-2.

STAMPFL, R. A.; STROUD, W. G. **The automatic picture transmission (apt) tv camera system for meteorological satellites**. Washington: NASA, 1963.(NASA-TN-D-1915).

- STOFF, S. **Orbitron**: satellite tracking system. 2005. Disponível em: < <http://www.stoff.pl/> >. Acesso em: 05 jul. 2017.
- SUPERKUH. **RTL-SDR and GNU radio with realtek RTL2832U**: [Elonics E4000/Raphael Micro R820T] software defined radio receivers. 2017. Disponível em: < <http://superkuh.com/rtlsdr.html> >. Acesso em: 17 maio 2017.
- TECHZONE. **RTL2832U+R820T full size USB TV tuner**. 2012. Disponível em: < <http://goughlui.com/2013/07/14/rtl2832ur820t-full-size-usb-tv-tuner/> >. Acesso em: 27 nov. 2017.
- TOMAŽ. **Notes on M&M clock recovery**. 2015. Disponível em: < https://www.tablix.org/~avian/blog/archives/2015/03/notes_on_m_m_clock_recovery/ >. Acesso em: 11 ago. 2017.
- UZ7HO. **PERSONAL PAGE OF UZ7HO.- The software Packet-Radio TNC**. 2016. Disponível em: < <http://uz7.ho.ua/packetradio.htm> >. Acesso em: 05 jul. 2017.
- WEBER, D. C. **InGUARDIANS LABS**: advanced persistent testing . GRC transmission analysis: getting to the bytes. 2014. Disponível em: < http://labs.inguardians.com/posts/20140516_GRC_Signal_Analysis.html >. Acesso em: 11 ago. 2017.
- WXTOIMG. **Software to decode APT and WEFAX signals from weather satellites**. 2015. Disponível em: < <http://www.wxtoimg.com/> >. Acesso em: 06 jul. 2017.
- Y YO5OFH. **The AX25 protocol**. 2011. Disponível em: < <http://www.qsl.net/yo5ofh/doc/ax25%20protocol%20.htm> >. Acesso em: 25 ago. 2017.
- YOUNGBLOOD, G. A software-defined radio for the masses **QEX: The Forum for Communications Experimenters**, p.13-21, jul./ago. 2002.

ANEXO A – PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS

A.1 JAABC 2018

Satellite Telemetry and Image Reception with Software Defined Radio Applied to Space Outreach Projects in Brazil

DAVID JULIAN MOLANO PERALTA¹, DOUGLAS SOARES DOS SANTOS²,
AURO TIKAMI³, WALTER ABRAHÃO DOS SANTOS³
and EDSON WANDER DO REGO PEREIRA⁴

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, 12227-010 São José dos Campos - SP, Brasil.

²Departamento de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias, 12228-900, São José dos Campos - SP, Brasil

³Coordenação de Engenharia e Tecnologia Especial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, 12227-010 São José dos Campos - SP, Brasil.

⁴AMSAT-BR/LABRE, Radio Amateur Satellite Corporation - Brasil, CP 4, CEP: 70275-970, Brasília-DF

Keywords: Ground Stations, Satellites, Software Defined Radio, Space Systems

Running title: Satellite SDR on Outreach Projects in Brazil

Academy Section: ENGINEERING SCIENCES

Contacting Author: Walter Abrahão dos Santos - walter.abrahaoo@inpe.br

ABSTRACT

Software Defined Radio (SDR) uses a processor, a special receiver and software that play the main parts of the receiver (mixer, filters, amplifiers, modulators, demodulators, etc.) and it is quite advantageous as it reduces the amount of hardware components while adapting for different needs. This work briefly presents the SDR concept and its approach for obtaining satellite telemetries and imagery in the context of different modulation schemes, link budget requirements and different satellites types. Two case studies are presented for supporting affordable ground segment and promoting satellites projects in Brazil. Reception from the 1st Brazilian picosatellite named Tancredo-1 with specific

Correspondence to: Walter Abrahão dos Santos
E-mail: walter.abrahaoo@inpe.br

Reception and Decodification of Small Satellites Telemetries Using GNURadio and Software Defined Radio (SDR).

D. J. Molano, D. S. Santos, W. A. Dos Santos, *Member IEEE*

Abstract— Software Defined Radio (SDR) technology allows for significant cost reductions in the ground segment of small satellite projects, substituting robust and conventional hardware to software tools that allow more efficient manipulation of the different tasks carried out in an typical earth station. This work has as a main objective to reduce the costs for receiving telemetries of small satellite projects by using low-cost hardware and free software tools, like graphical environment GNU Radio Companion. A telemetry (TM) decoder was developed for the Tancredo-1 picosatellite that is part of the UbatubaSat Project, which allows the capture of the signal through a receiver hardware and digitally processing it until obtaining their raw hexadecimal value. Afterwards, with the help of additional TM decoder software called UbaTM-Decoder, it is possible to obtain the engineering value. This process guarantees a fully functional reception that significantly increases the cost-benefit relationship for small satellite projects that usually do not have a large budget for their own developments.

Keywords— software defined radio, ground stations, small satellites.

I. INTRODUCCIÓN.

A TRAVÉS de los últimos años, Brasil ha llevado a cabo una serie de proyectos relacionados con pequeños satélites, también conocidos como "smallsat", del tipo CubeSat y TubeSat que han sido desarrollados por universidades, instituciones tecnológicas y de investigación e incluso escuelas. NANOSATC-BR1, PEA-14, SERPENS y TANCREDO - 1, son satélites brasileños de este tipo que ya fueron colocados en órbita y algunos aún están en funcionamiento [1-4], además, Brasil también tiene algunos proyectos que están aún en desarrollo como NanoSatC-BR2 e ITASAT [5].

Normalmente el presupuesto destinado para estos proyectos es un factor limitante, por lo tanto, el propósito de este trabajo es reducir el costo de algunos elementos y algunas operaciones del segmento suelo y ayudar a maximizar el costo beneficio en futuros proyectos de pequeños satélites. Con el fin de

contribuir a la reducción de costos en estaciones terrenas para pequeños satélites, algunos investigadores, comunidades de radioaficionados y empresas privadas han puesto en el mercado ciertas herramientas de hardware y software (en su mayoría software libre), las cuales debido a su bajo costo y disponibilidad son perfectas para el desarrollo de este trabajo. En esta investigación se hace énfasis a la utilización de herramientas de software libre para la realización de procesos más orientados a la necesidad y a las características específicas de cada proyecto, como por ejemplo, UbatubaSat Project, en el cual se obtuvo como resultado la construcción, lanzamiento y puesta en operación del satélite Tancredo - 1.

El Proyecto UbatubaSat - *Un viaje de descubrimiento* es un proyecto de ciencia de una escuela pública brasileña, ideado y diseñado por un maestro de matemáticas apasionado por las ciencias. Al profesor le surgió la idea de este proyecto después de leer un artículo en una revista nacional, el cual hablaba sobre la viabilidad de la construcción de satélites. Con el apoyo de la escuela y varios socios, poco tiempo después los estudiantes del colegio "Presidente Tancredo de Almeida Neves" ubicado en Ubatuba - São Paulo, se involucraron en la construcción de un pequeño satélite. Con el objetivo de despertar la curiosidad en la ciencia y la tecnología espacial, el proyecto terminó yendo más allá del aula, superando todas las limitaciones que se tenían. También demuestra que es posible estimular a los estudiantes en una etapa temprana, poniendo en práctica lo que generalmente solo se enseña en teoría. [6]

Por las características del proyecto UbatubaSat, nace la motivación de este trabajo, la construcción de herramientas libres y de bajo costo para la operación en tierra de estos satélites, como en este caso, un decodificador del tipo *Audio Frequency Shift Keying - AFSK* para las telemetrias del satélite Tancredo-1, usando el entorno gráfico GNU Radio Companion (GRC).

II. FUNDAMENTACION TEÓRICA.

En esta sección se presentan algunos conceptos básicos utilizados durante el desarrollo de este trabajo.

A. ¿Qué es RTL-SDR?

RTL-SDR es radio definido por software de bajo costo que utiliza un Dongle de sintonizador de televisión DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial en español* / *Diffusão de Vídeo Digital - Terrestre*) basado en el chipset RTL2832U de Realtek. Con los esfuerzos combinados de Antti Paloczari,

D. J. Molano, estudiante de maestría en Ingeniería y Tecnología Espacial, Instituto Nacional de Investigación Espacial (INPE), São José dos Campos-SP, Brasil, ing.djuan.molano@gmail.com.

D. Soares, Doctor en Ingeniería Electrónica y Computación, profesor adjunto en la División de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos-SP, Brasil, dsoares@ita.br.

W. A. dos Santos, Doctor en Ingeniería Electrónica y Computación, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Tecnólogo 3º en la División de Electrónica Aeroespacial del Instituto Nacional de Investigación Espacial (INPE), S. José dos Campos-SP, Brasil, walter.abrhaao@inpe.br.

A.3 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites 2017

A software defined radio approach to ground operations of small satellites.

David J. Molano. (1), Auro Tikami. (2), Douglas Soares. (3), Edson W. Pereira. (4), Walter A. dos Santos (5).

(1) National Space Research Institute.
Mail: big.djmolano@gmail.com

(2) National Space Research Institute.
Mail: auro.tikami@insp.br

(3) Technological of Aeronautics Institute
Mail: dsoares@ta.br

(4) AMSAT-BR – Brazilian Radio Amateur Satellite Corporation.
Mail: ewpereira@gmail.com

(5) National Space Research Institute.
Mail: walter.abrvalho@insp.br

ABSTRACT

In order to reduce costs on the ground segment for small satellites projects, Software Defined Radio (SDR) technology is advantageous as it reduces the amount of hardware components while adapting for different modulation schemes, link budget requirements while supporting different satellites. This work briefly presents this proposal and discusses some of the issues it entails. The SDR technology uses a processor, a special receiver and software that plays the main parts of the receiver (mixer, filters, amplifiers, modulators, demodulators, etc.) to listen to radio, television and almost all transmission modes, whether digital or analog. A first trial with this configuration was implemented to receive signals sent from a Brazilian picosatellite named Tancredo-1 and obtain the engineering value of the telemetries sent by the same. For this purpose, specific software was developed, named Uba™ - Decoder for obtaining the raw value of each of the telemetries, perform the operations necessary for the conversion to engineering value and present them friendly on a screen to the user. A series of support software packages is presented so that one can pipeline various operations, which can lead to ground stations automation.

Keywords: Software Defined Radio. Ground Stations. Small Satellites. Automation.

1. INTRODUCTION

The development of projects regarding to pico and nanosatellites, also called sometimes of small satellites, the type CubeSat/TubeSats in the university environment has grown in Latin America significantly in the last decade. In 2002, there were fewer than two active projects and currently this number exceeds 20 projects [1]. Besides that, in Brazil



SDR: Rádio definido por Software para Recepção e Decodificação de Telemetrias e Imagens de Pequenos Satélites.

MOLANO, D. J. P.¹, DOS SANTOS, D. S.², DOS SANTOS, W. A.³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais.

²Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil
Doutor, ITA, Brasil, 2011. Engenharia Eletrônica e Computação

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Doutor, ITA, Brasil, 2008. Engenharia Eletrônica e Computação.

log.djulian.molano@gmail.com

Resumo. Para reduzir os custos no segmento terrestre para pequenos projetos de satélites, a tecnologia de Rádio Definido por Software (SDR) é vantajosa, pois reduz a quantidade de componentes de hardware enquanto se adapta para diferentes esquemas de modulação, vincula os requisitos de orçamento e apoia diferentes satélites. Este trabalho apresenta brevemente esta proposta e discute algumas das questões que ela implica. A tecnologia SDR usa um processador, um receptor especial e um software que reproduz as partes principais do receptor (misturador, filtros, amplificadores, moduladores, demoduladores, etc.) para ouvir rádio, televisão e quase todos os modos de transmissão, digitais ou analógicos. Um primeiro teste com esta configuração foi implementado para receber os sinais enviados de um picosatélite brasileiro chamado Tancredo-1 e obter o valor de engenharia das telemetrias enviadas pelo mesmo. Uma série de pacotes de software de suporte é apresentada para que uma possa encaminhar várias operações, o que pode levar à automação de estações terrestres. Finalmente, um segundo teste foi realizado com uma configuração para receber imagens enviadas a partir de satélites de classe NOAA, em frequências VHF e decodificadas por um software específico.

Palavras-chave: Rádio Definido por Software; Estações Terrenas; Pequenos Satélites; Automação.

1. Introdução

O desenvolvimento de projetos sobre pico e nanosatélites, também chamado de pequenos satélites, o tipo CubeSat/TubeSats no ambiente universitário cresceu significativamente na América Latina nos últimos 15 anos. Além disso, no Brasil houve um aumento significativo no desenvolvimento de tais satélites, por um lado, com o

