

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SAMIR CALDAS AIALA

**ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE
TRANSMISSÃO ISDB-T VIA SOFTWARE
GNU RADIO E USRP**

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SAMIR CALDAS AIALA

ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE TRANSMISSÃO ISDB-T VIA SOFTWARE GNU RADIO E USRP

Relatório Final do Projeto de Diplomação II
apresentado ao Departamento de Engenharia
Elétrica da Escola de Engenharia da Univer-
sidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial para Graduação em Enge-
nharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Ivan Müller

Porto Alegre

2022

SAMIR CALDAS AIALA

ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE TRANSMISSÃO ISDB-T VIA SOFTWARE GNU RADIO E USRP

Relatório Final do Projeto de Diplomação II apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Prof. Dr. Ivan Müller
Orientador - UFRGS

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich
Chefe do Departamento de Engenharia
Elétrica (DELET) - UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan Müller
UFRGS

Prof. Dr. Ronaldo Husemann
UFRGS

Me. Sandro Roberto de Araújo
UFRGS

Dedico este trabalho a minha família, sobretudo aos meus pais, Ademar Solano Aiala e Giselda Caldas Aiala, por todo o apoio que me deram durante o desenvolvimento deste trabalho, como também durante todo o processo de graduação.

"O desenvolvimento humano depende fundamentalmente da invenção. Ela é o produto mais importante de seu cérebro criativo. Seu objetivo final é o completo domínio da mente sobre o mundo material e o aproveitamento das forças da natureza em favor das necessidades humanas"

Nikola Tesla

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise teórica e prática no sistema de transmissão de imagem digital ISDB-T, levando em conta todas as etapas da transmissão e também analisando as características que o sinal de televisão digital pode apresentar ao deixar o transmissor e ao chegar a um determinado receptor. Para tanto, é utilizado como ferramenta de simulação, o software GNU Radio Companion, pois este é atualmente uma dos mais adequados para simular sistemas de comunicação em geral. O trabalho está dividido em 5 capítulos, incluindo introdução e conclusão. Após a introdução, no segundo capítulo, são apresentados referenciais teóricos, com uma síntese de trabalhos relacionados, comparando diversas obras entre si e em relação ao presente trabalho. São apresentadas também, simulações de transmissões ISDB-T através de um modelo de canal ideal e com ruído gaussiano com valores variados, para testar o SNR do sistema. Depois, são feitas emulações com SDRs, tanto através de transmissões com cabo coaxial, simulando um canal livre de ruídos e por fim, transmissões utilizando dois SDRs para que se comuniquem entre si. Ao final do trabalho, são apresentadas as conclusões, onde constam as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do projeto, as melhorias que podem ser aplicadas, e também as possíveis contribuições que o mesmo pode oferecer.

Palavras-chave: ISDB-T, Transmissor, Receptor, GNU Radio, USRP, OFDM, Simulação.

ABSTRACT

This work aims to carry out a theoretical and practical analysis on the ISDB-T digital image transmission system, taking into account all the stages of transmission and also analyzing the characteristics that the OFDM signal can present when leaving the transmitter and when arriving at a particular receiver. For that, the GNU Radio Companion software will be used as a simulation tool, as it presents an excellent performance when used to simulate communication systems in general. The work is divided into 5 chapters, including introduction and conclusion. Just after the introduction, in the second chapter, theoretical references will be presented, with a presentation of the various related works, comparing several works among themselves and in relation to the present work. Simulations of ISDB-T transmissions will also be presented through an ideal channel model and with gaussian noise with varying values, to test the SNR of the system. Then, emulations with SDRs must be done, both through transmissions with coaxial cable, simulating a real channel and finally, real transmissions using two SDRs to communicate with each other. At the end of the work, the conclusion will be presented, where it should be contained, the difficulties encountered during the development of the project, the improvements that can be applied and also the possible contributions that it can offer.

Keywords: ISDB-T, Transmitter, Receptor, GNU Radio, USRP, OFDM, Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Macro blocos do um transmissor ISDB-T	23
Figura 2 – Representação detalhada em blocos do transmissor ISDB-T.	24
Figura 3 – Representação do circuito Entrelaçador de Byte.	28
Figura 4 – Blocos do entrelaçador temporal.	29
Figura 5 – Diagrama em blocos do entrelaçador de frequência.	30
Figura 6 – Inserção do intervalo de Guarda nos dados do transmissor.	32
Figura 7 – Módulo USRP 2932.	37
Figura 8 – Foto do analisador de espectro e computador utilizados nos experimentos de laboratório.	40
Figura 9 – Foto dos USRPs e switch utilizados nos experimentos de laboratório.	41
Figura 10 – Foto do atenuador variável e dos cabos coaxiais utilizados nos experi- mentos de laboratório.	41
Figura 11 – Blocos de Tx ISDB-T <i>full-seg</i> com três camadas hierárquicas e TS independente representado no software GNU Radio Companion.	43
Figura 12 – Representação do bloco File Source.	45
Figura 13 – Representação do bloco <i>Stream to Vector</i>	46
Figura 14 – Representação do bloco <i>Reed-Solomon</i>	47
Figura 15 – Representação de dois blocos <i>Energy Dispersion</i>	48
Figura 16 – Representação dos blocos <i>Byte Interleaver</i>	49
Figura 17 – Representação do bloco <i>Inner Coder</i>	50
Figura 18 – Representação do bloco <i>Vector to Stream</i>	51
Figura 19 – Representação do bloco <i>Carrier Modulation</i>	52
Figura 20 – Representação do bloco <i>Hierarchical Combinator</i>	53
Figura 21 – Representação do bloco <i>Time Interleaver</i>	53
Figura 22 – Representação do bloco <i>Frequency Interleaver</i>	54
Figura 23 – Representação do bloco Skip Head.	55
Figura 24 – Representação do bloco Pilot Signals.	55
Figura 25 – Representação do bloco <i>TMCC Encoder</i>	56
Figura 26 – representação do bloco FFT.	57
Figura 27 – Representação do bloco <i>OFDM Cyclic Prefixer</i>	58
Figura 28 – Representação do bloco <i>Fast Multiply Const</i>	59
Figura 29 – Representação do bloco QT GUI Constellation Sink.	59
Figura 30 – Representação do bloco QT GUI <i>Frequency Sink</i>	60
Figura 31 – Representação de Receptor ISDB-T por blocos do GNU Radio.	62
Figura 32 – Representação de um modelo de canal através do bloco do software GNU Radio.	63

Figura 33 – Diagrama em blocos do circuito que realiza o cálculo do SNR do sinal OFDM com AWGN.	64
Figura 34 – Representação do bloco UHD: USRP Sink	65
Figura 35 – Representação em blocos das ligações dos equipamentos usados para o experimento de transmissão do padrão ISDB-T utilizando o módulo USRP.	67
Figura 36 – Espectro de Frequência do canal segmentado do transmissor ISDB-T utilizando janelamento retangular de FFT.	70
Figura 37 – Diagrama de constelação das subportadoras QPSK, 16-QAM, 64-QAM e dos símbolos das portadoras piloto.	71
Figura 38 – Representação do diagrama de constelação do sinal OFDM no receptor ISDB-T através de um modelo de canal sem ruído.	72
Figura 39 – Constelação OFDM na presença de Ruído de aproximadamente 2 dBm, potência do sinal OFDM, Potência do AWGN em dB, e SNR do sinal no modelo de canal.	73
Figura 40 – Constelação OFDM na presença de Ruído de aproximadamente 10dBm, potência do sinal OFDM, Potência do AWGN em dB, e SNR do sinal no modelo de canal.	74
Figura 41 – Constelação OFDM na presença de Ruído de aproximadamente 16dBm, potência do sinal OFDM, Potência do AWGN em dB, e SNR do sinal no modelo de canal.	75
Figura 42 – Gráfico no domínio frequência do sinal OFDM recebido pelo analisador de espectro.	77
Figura 43 – Espectro de frequência do sinal OFDM transmitido entre módulos USRPs.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de <i>hardwares</i> SDR disponíveis no mercado.	36
Tabela 2 – Parâmetros para transmissão ISDB-T.	44
Tabela 3 – Parâmetros escolhidos para o bloco UHD: USRP Sink.	66
Tabela 4 – Relação dos valores de SNR simulados , de acordo com o AWGN aplicado a um sinal OFDM com potência de aproximadamente 36,8dBm.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATSC	<i>Advanced television System Committee</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BW	<i>BandWidth</i>
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
GF	<i>Galois Field</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcast Terrestrial</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Digital Modulation</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RS	<i>Reed Solomon</i>
ISDB	<i>Integrated Services Digital Broadcast)</i>
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SNR	<i>Signal Noise Rate</i>
TMCC	<i>Transmission and Multiplexing Configuration Control</i>
TS	<i>Transport Stream</i>
TSP	<i>Transport Stream Package</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação do trabalho	15
2	REVISÃO LITERÁRIA	16
2.1	Transmissão de Imagem digital	16
2.2	Sistema de Transmissão ISDB-T	17
2.3	GNU Radio	18
2.4	USRP	19
2.5	Rádio definido por software aplicado à Modulação ISDB-T	19
2.6	Trabalhos Relacionados	20
3	MÉTODOS E MATERIAIS	22
3.1	Transmissor ISDB-T	23
3.2	Tipos de transmissores ISDB-T	24
3.2.1	Transmissor <i>oneseg</i>	24
3.2.2	Transmissor <i>fullseg</i>	25
3.2.3	Transmissor <i>fullseg</i> com fluxo de transporte independente (TS)	25
3.3	Blocos do Transmissor ISDB-T	25
3.3.1	Codificador Externo (<i>Reed-Solomon</i>)	26
3.3.2	Dispersor de Energia	27
3.3.3	Entrelaçador de Byte	27
3.3.4	Codificador Interno	28
3.3.5	Mapeamento	28
3.3.6	Entrelaçador Temporal	29
3.3.7	Entrelaçador em Frequência	30
3.3.8	Adaptador do Quadro OFDM	30
3.3.9	IFFT	30
3.3.10	Intervalo de Guarda	31
3.4	Software GNU Radio	33
3.4.1	Flowgraphs	33
3.4.2	Blocos	33
3.4.3	Blocos existentes no GNU Radio Companion	34
3.5	Rádio Definido por Software (SDR)	35
4	EXPERIMENTOS COM ISDB-T	38
4.1	Materiais Utilizados	39

4.2	Experimentos realizados com GNU Radio.	42
4.2.1	<i>File Source</i> (Arquivo fonte)	44
4.2.2	<i>Stream to Vector</i>	45
4.2.3	<i>Reed Salomon</i>	46
4.2.4	<i>Energy Dispersal</i> (dispersor de energia)	47
4.2.5	<i>Byte Interleaver</i>	47
4.2.6	<i>Inner Coder</i>	49
4.2.7	<i>Vector to Stream</i>	50
4.2.8	<i>Carrier Modulation</i>	51
4.2.9	<i>Hierarchical Combinator</i>	52
4.2.10	<i>Time Interleaver</i>	53
4.2.11	<i>Frequency Interleaver</i>	54
4.2.12	<i>Skip Head</i>	54
4.2.13	<i>Pilot Signals</i>	55
4.2.14	TMCC <i>Encoder</i>	55
4.2.15	FFT (Transformada Rápida de Fourier)	56
4.2.16	OFDM <i>Cyclic Prefixer</i>	57
4.2.17	<i>Fast Multiply Constant</i>	58
4.2.18	QT GUI <i>Constellation Sink</i> .	59
4.2.19	QT GUI <i>Frequency Sink</i>	60
4.3	Aplicando modelo de canal AWGN para Receptor ISDB-T	61
4.3.1	Receptor ISDB-T	61
4.3.2	Modelo de Canal	62
4.4	Experimentos com USRP.	65
4.4.1	Experimento com Transmissor ISDB-T com Analisador de Espectro.	66
4.4.2	Experimento com USRPs Tx e Rx	67
5	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	69
5.1	Resultados das simulações com GNU Radio	69
5.1.1	Resultado das Simulações com o Transmissor	69
5.1.2	Resultado dos experimentos com Receptor utilizando modelo de canal	72
5.2	Resultados dos experimentos com o módulo USRP 2932.	76
5.2.1	Resultados do Experimento com Transmissor ISDB-T no Analisador de Espectro.	76
5.2.2	Resultado do experimento com USRPs Tx e Rx	79
6	CONCLUSÃO	81
6.1	Dificuldades encontradas	81
6.2	Melhorias no projeto	82
6.3	Contribuições do trabalho	83

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 84

1 INTRODUÇÃO

A transmissão de imagem, a qual foi desenvolvida a partir dos anos 40, tem passado por constantes evoluções com o passar dos anos em busca de melhoria de qualidade de transmissão e recepção de imagem, padrão e velocidade de comunicação. Com esse avanço constante da tecnologia, já nos anos 70, os japoneses iniciaram o estudo sobre transmissão de imagem digital, no entanto, foram os norte-americanos, que nos anos 80, começaram de fato com o desenvolvimento do primeiro sistema de transmissão de imagem digital. No Brasil, os estudos em cima de transmissão digital só começaram nos anos 90 (SANTIAGO, 2020).

Um dos principais motivos para se adotar o padrão digital de transmissão, foi diminuir os ruídos causados por interferências de sinais externos e com isso, melhorar a qualidade da imagem recebida, que eram problemas muito comuns no antigo padrão analógico de transmissão de imagem. Outro fator importante foi principalmente utilizar as tecnologias de circuitos digitais que também começaram a serem empregados em larga escala já nos anos 70 (MACHADO, 2018).

Durante esses anos, vários padrões de transmissão de imagem digital foram desenvolvidos ao redor do mundo. Dentre eles, está o padrão ISDB que será o objetivo dos estudos deste projeto. Esse padrão foi desenvolvido no Japão no fim dos anos 90 e teve sua primeira transmissão em Tóquio no ano de 2003 (SANTIAGO, 2020). O sistema foi baseado no padrão de transmissão europeu DVB com algumas melhorias, foi criado para ser muito versátil, obtendo características de uso para dispositivos portáteis e móveis, além do sistema tradicional de televisão digital. Além disso, foi criado para ser transmitido em vários meios de comunicação, como satélite, cabo e terrestre. Neste trabalho será estudado o padrão ISDB de transmissão de imagem digital terrestre, conhecido como ISDB-T. O sistema de transmissão baseado em ISDB-T, assim como outros sistemas semelhantes, é dividido em vários subsistemas, ou blocos, os quais são responsáveis por gerar, codificar, modular e filtrar os sinais de imagem digital (HERNÁNDEZ JAVIER; CASTRO, 2018).

O transmissor ISDB-T será simulado pelo software GNU Radio, utilizando métodos de programação disponíveis por esse software, no qual é possível criar e simular blocos de forma individual ou como um sistema completo. Após as simulações feitas em GNU Radio, os dados obtidos devem ser transferidos para um hardware de comunicação que possa ser programado por software (SDR). O hardware escolhido para essa tarefa foi módulo USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) o qual é programado através do próprio GNU Radio. Com auxílio do USRP, poderá ser desenvolvido um sistema de transmissão ISDB-T para ser testado em laboratório, onde serão testados vários modos de operação e

canais de transmissão. Depois dos experimentos completos, tanto por simulação, como para emulação, os sinais gerados podem ser comparados com os parâmetros encontrados nos referenciais teóricos.

1.1 Motivação do trabalho

Esse trabalho tem como motivação, o desenvolvimento de um sistema de transmissão de imagem digital baseado no padrão ISDB-T, utilizando software de simulação de rádio, GNU Radio, e a interface utilizada para emular a comunicação será hardware USRP que funcionará como sistema de transmissão programado pelo mesmo software GNU Radio Companion. Devido a facilidade de implementação de sistemas de comunicação em geral, através de circuitos construídos em blocos, uma vasta biblioteca de módulo, além da possibilidade criação de módulos através de linguagem de programação em python e C++, faz do GNU Radio, torna o software adequado para se aplicar neste projeto.

Através do desenvolvimento deste projeto poderá ser compreendido melhor, não somente o funcionamento dos sistemas de transmissão de imagem digital de um modo geral, como também o sistema ISDB-T mais especificamente, podendo assim abrir caminho para novos trabalhos baseados neste tema.

2 REVISÃO LITERÁRIA

2.1 Transmissão de Imagem digital

O trabalho de (GLEDSON, 2004) trata de uma época em que os sistemas de transmissão digital estavam sendo testados no Brasil e ainda eram uma novidade no país. Este trabalho serve como um embasamento teórico para o estudo dos sistemas de televisão digital e seus diversos padrões de transmissão. O principal objetivo de (GLEDSON, 2004) foi apresentar uma introdução teórico-prática sobre a TVDI. Os aspectos teóricos do trabalho são abordados através da apresentação de arquiteturas, protocolos e padrões de Middleware para sistemas TVDI. Os aspectos práticos, por sua vez, são mostrados através da montagem e utilização de uma plataforma de testes simplificada, capaz de permitir o desenvolvimento básico para o TVDI.

O trabalho de de (PEREIRA LÍVIA CIRNE; BEZERRA, 2008) traz a evolução dos sistemas de transmissão de imagem, desde os analógicos até os digitais. Nele, os autores explicam o conceito histórico pelo qual cada país decidiu escolher ter um padrão diferente de transmissão de imagem digital. Também é mostrado o conceito histórico da evolução da televisão no Brasil, desde os padrões analógicos até a fase de testes e escolha do padrão de transmissão digital japonês como o mais adequado para o tipo de território nacional.

Outro trabalho utilizado para embasamento teórico de Sistemas de Transmissão de Imagem Digital foi (GUIDO, 2016). Neste, o autor explica o funcionamento de vários métodos de transmissão de imagem digital, podendo ser por satélite, radiodifusão terrestre, distribuição via cabo, distribuição por redes digitais de alta velocidade. Logo após uma breve introdução dos métodos de transmissão, o autor se dedica a explicar sobre os vários padrões de transmissão de imagem digital por radiodifusão terrestre utilizados por países ao redor do mundo. O autor demonstra os modelos matemáticos por trás dos padrões de modulação digital como, DVB-T, ATSC e ISDB-T, utilizando de equações e gráficos tirados de outras bibliografias e simulações matemáticas. Ao final, é feita uma comparação entre os padrões de sistemas de modulação utilizados e chega-se à conclusão de que o sistema ISDB-T possui várias vantagens sobre outros.

2.2 Sistema de Transmissão ISDB-T

Na dissertação de (MACIEL LIVIA BATISTA; MOREIRA, 2006) é mostrado o contexto histórico da evolução dos sistemas de transmissão de imagem aplicados no Brasil e quais foram as principais razões para a aplicação do sistema ISDB-T como padrão digital no país. Na época desse trabalho, o sistema de transmissão ISDB-T ainda estava sendo implantado no país e os estudos sobre o assunto estavam em grande intensidade. Ao final desse trabalho, também é feita uma análise teórica descrevendo as vantagens do sistema ISDB-T no Brasil em relação a outros sistemas de transmissão de imagem digital aplicados em outros países.

Em (ABNT. . . , 2007) são detalhadas as formas de transmissão e recepção, os modos de operação, e as faixas de frequência disponíveis. Basicamente, é possível encontrar todos requisitos necessários para instalação e utilização do sistema de modulação ISDB-TB, padronizado no Brasil, também conhecido como SBTVD. Neste trabalho também é mostrado que o sistema de transmissão ISDB-T utiliza modulação OFDM, o qual é dividido em camadas hierárquicas de transmissão, sendo cada uma podendo ser modulada em QPSK, 16-QAM, 64-QAM.

O artigo de (AKAMINE CRISTIANO; IANO, 2015) busca fazer um estudo aprofundado de todas as etapas do processamento do sinal em um transmissor ISDB-T explicando cada um dos seus blocos relacionados. Para tanto, o trabalho usa software desenvolvido pelos próprios autores. Software criado, possui a capacidade de ser compatível com arquivos formato MATLAB e também compatibilidade com módulo FPGA, o qual possui a capacidade de ser um circuito programável para operar como muitos sistemas em geral, inclusive de sistemas de comunicação. Ao final, o trabalho apresenta resultados numéricos e gráficos sobre todo o sistema ISDB-T.

O artigo de (AKAMINE CRISTIANO; IANO, 2015) busca fazer um estudo aprofundado de todas as etapas do processamento do sinal em um modulador ISDB-T explicando cada um dos seus blocos relacionados. Para tanto, o trabalho usa software desenvolvido pelos próprios autores. Software criado, possui a capacidade de ser compatível com arquivos formato MATLAB e também compatibilidade com módulo de comunicação externa FPGA, o qual proporciona os sinais necessários para a análise completa do sistema. Ao final, o trabalho apresenta resultados numéricos e gráficos sobre todo o sistema ISDB-T.

No trabalho de (QUIMBITA, 2016), é feito uma análise mais aprofundada do sistema ISDB-T, descrevendo de forma analítica o funcionamento das partes do sistema e fazendo simulações utilizando o software de análise matemática MATLAB. O uso do software de simulação se aplica para análise da transmissão do sinal em si, buscando os possíveis problemas de desvanecimento do sinal digital ao longo da distância e obstáculos

simulados durante o teste. O trabalho usa como referência para seus estudos das redes de transmissão, o uso do software ICS Telecom, com o qual se capta o sinal de tais redes.

Segundo a tese de (CARDOSO, 2018), é confrontado o uso das normas regulamentadoras da transmissão e recepção de imagem do Brasil, com o padrão de transmissão ISDB-T/Tb implantado no país. De forma geral, na sua própria introdução, o autor comenta sobre os problemas que ainda existem com utilização da norma regulamentadora em relação padrão japonês adaptado, pois apesar de atender de forma satisfatória em muitos aspectos, é utilizada uma legislação muito antiga. Neste trabalho também são mostrados os benefícios do sistema ISDB-T em relação a outros padrões digitais e também aos padrões de transmissão analógicos antigos. Ao final da tese, é feita uma avaliação do sistema de transmissão digital terrestre, o seu impacto nas políticas públicas existentes e quais são as novas propostas possíveis para melhorar a utilização do sistema brasileiro de transmissão de vídeo digital.

2.3 GNU Radio

Segundo (GNURADIO, 2020), GNU Radio é uma ferramenta de software livre o qual fornece blocos de processamento de sinais para implementação de sistemas de rádio comunicação. O software pode ser usado em conjunto com hardwares de RF programáveis para desenvolver SDR (*Software Defined Radio*), ou podendo ser utilizado sem a presença de um software, simplesmente com o intuito de criar um ambiente de simulação. Trata-se de um software amplamente usado nas áreas de pesquisa, indústria, acadêmica, governo, ou simplesmente como hobby, com objetivo de apoiar quaisquer esforços de pesquisa e desenvolvimento na comunicação sem fio.

No trabalho de (SANTIAGO, 2020), o autor utiliza o simulador GNU Radio para simular e provar diferentes valores de configuração para o transmissor como especifica o padrão ISDB-Tb e com isso analisar o comportamento do sistema para determinar as melhores opções que permitam ao rádio difusor melhorar a cobertura de uma zona específica.

A partir do trabalho de (DINIZ, 2013) foi possível fazer um estudo sobre o funcionamento e sobre as principais aplicações do software GNU Radio. Para realizar os testes a partir dos dados desenvolvidos no software, foi utilizado em conjunto, como plataforma de comunicação, o módulo desenvolvedor de sinais USRP. Ao final do trabalho, os testes e simulações feitas foram comparadas com sinais gerados a partir do software MATLAB e, com isso, foi comprovada a alta confiabilidade do software GNU Radio para simular um sistema de comunicação.

O conhecimento retirado de (GNURADIO, 2020) foi essencial para compreender a ferramenta base para o desenvolvimento deste trabalho. Nessa literatura online, foram

encontrados todos os tutoriais necessários para o entendimento básico do software GNU Radio. O trabalho de (GOES, 2022) também serviu como conhecimento auxiliar para o aprendizado do GNU Radio. Nesse trabalho, muitos exemplos de simulações são encontrados e estão apresentados de forma muito didática, para fácil compreensão dos sistemas aí simulados e do software como um todo.

2.4 USRP

O dispositivo de rádio definido por software USRP é um dispositivo de RF reconfigurável que inclui uma combinação de processadores baseados em host, FPGAs e *front-ends* de RF. O dispositivo de rádio definido por software USRP inclui opções que variam de opções de custo mais baixo com FPGA fixos a rádios de ponta com FPGAs abertos e de grande capacidade e ampla largura de banda instantânea. Esses dispositivos podem ser usados para aplicações como sistemas de entrada múltipla, saída múltipla (MIMO), LTE/WiFi, SIGINT e sistemas de radar (NATIONAL INSTRUMENTS, 2022).

Para obtenção do conhecimento básico do módulo USRP, foi também utilizado como referência a documentação de (ETTUS, 2007), o qual fornece uma introdução rápida sobre o funcionamento e compatibilidade do módulo de testes de uma forma geral. Nessa breve leitura, também são mostradas as vantagens do uso do USRP para aplicações de comunicações, tanto em questão de ser um hardware de baixo custo como possuir grande flexibilidade como plataforma. Além disso, é comentado sobre a importância do uso dessa plataforma, devido à vasta comunidade de desenvolvedores que aderiram a ela.

No manual (USRP-2930/2932... , 2019), é mostrada de forma mais técnica, uma introdução de como instalar e utilizar o módulo USRP. Com as informações fornecidas nesse texto, é possível entender como instalar o software compatível com o sistema operacional, como preparar o hardware para utilização e como aprender a realizar a solução de problemas no caso de uma má configuração, problemas durante a comunicação com o software, ou ainda no caso de erro durante os testes.

2.5 Rádio definido por software aplicado à Modulação ISDB-T

O trabalho de (BAMPI, 2014), procurou dividir o sistema ISDB-T em seus blocos que fazem parte, tanto do sistema de transmissão como de recepção. A ideia do autor foi criar um sistema completo de transmissão e recepção a partir do software GNU Radio e aplicando os testes práticos do sistema utilizando o módulo USRP.

Dentre outros trabalhos encontrados, está o dos autores de (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020), que desenvolveram um sistema completo de transmissão e recepção ISDB-T utilizando hardware definido por software. No projeto, foi feita a adaptação do software

GNU Radio em um módulo de SDR alternativo de baixo custo. Esta implementação possibilita trabalhar com uma menor largura de banda, o que possibilitou otimizar a potência limitada de transmissão do SDR utilizado.

O trabalho desenvolvido por (MUTTONI, 2017) tem como objetivo realizar o desenvolvimento de um receptor ISDB-T através do uso de um SDR. Em sua proposta, é criado um receptor que funciona em tempo real e é implementado em uma plataforma de baixo custo. O autor também desenvolveu em seu trabalho, uma simulação via MATLAB e usando como sua principal ferramenta o Simulink para criação de blocos do receptor ISDB-T.

2.6 Trabalhos Relacionados

Dentre os trabalhos usados como referência, alguns possuem muitos métodos semelhantes a estes usados aqui neste presente projeto de diplomação. Entre eles está (DINIZ, 2013), que faz um desenvolvimento sobre o sistema de transmissão ISDB-T e possui como objetivo a simulação e testes com hardware utilizando o software GNU-Radio e um módulo USRP. No trabalho, os autores estão voltados no desenvolvimento de um transmissor ISDB-T completo, com todas as funcionalidades de multiprogramação simultânea utilizando, os blocos pré-definidos por GNU Radio e criando seus próprios blocos, utilizando programação em linguagem Python. Ao final, os autores fizeram uma análise completa do sistema ISDB-T testando alguns parâmetros como, taxa de erro de modulação e taxa de erro de bits. Além disso, utilizaram a simulação de um canal de transmissão e realizaram uma transmissão pelo ar, assim, comparando os dois meios de transmissão. Testaram o transmissor ISDB-T através do USRP para que o sinal fosse captado por vários tipos de aparelhos televisores.

O trabalho de (SANTIAGO, 2020) também se utiliza de software GNU Radio para simulação de um sistema ISDB-T. A diferença no trabalho de (SANTIAGO, 2020) em relação ao corrente trabalho, é que seu foco é criar um receptor ISDB-T completo para captar os sinais de televisão locais, enquanto, neste trabalho, o objetivo é simular um transmissor ISDB-T e testar os sinais das multiportadoras de modulação OFDM.

Por fim, dentre todos os trabalhos citados um dos mais recentes é o de (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020) que faz um estudo minucioso sobre as redes de sequências únicas em um sistema de transmissão e recepção ISDB-TB. Para tanto, sua principal motivação foi inserir no sistema sequências de códigos pseudo aleatórios para corrigir erros de sincronização de transmissores que trabalham em uma mesma banda de frequência e que precisam enviar os mesmos sinais de lugares diferentes ao mesmo tempo. Como ferramentas de simulações foi usado MATLAB para simular os gráficos dos atrasos dos sinais enviados por transmissores diferentes e assim comparar com os sinais gerados por

um sistema de transmissão e recepção usando como ferramenta o software GNU Radio, inserindo aí as sequências pseudo aleatórias. O trabalho (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020) contribuiu muito para o desenvolvimento deste projeto de diplomação pela maneira aprofundada que desenvolve cada etapa do sistema ISDB-TB e por usar de forma elaborada as ferramentas de desenvolvimento.

3 MÉTODOS E MATERIAIS

Os sistemas de transmissão de dados digitais possuem uma necessidade cada vez maior de velocidade devido ao gigantesco volume de dados produzidos e consumidos. Dentre os meios mais utilizados de comunicação estão a transmissão via satélite, via cabos de sinais elétricos, via fibra óptica e rádio digital terrestre. No meio de transmissão por radiodifusão terrestre, especialmente transmissão de imagem, existem muitos fatores que podem prejudicar a qualidade dos sinal após a saída do transmissor, sendo um dos problemas mais comuns, a interferência causada por multi-percurso (RABAÇA RICARDO; AKAMINE CRISTIANO; DE OLIVEIRA; MACIEL, 2017).

Quando o transmissor utilizado possui uma única portadora, os símbolos precisam ter um curto período de duração para que possam caber dentro do espectro de frequência da portadora, caso contrário pode ocorrer uma interferência entre símbolos do sinal digital que por sua vez causará o desvanecimento do sinal e distorção da imagem no receptor (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020). Uma forma de reduzir o problema de interferência causada por multipercurso, é utilização de uma modulação que possa apresentar multiportadoras. O padrão de transmissão de imagem digital ISDB-T trata-se de um sistema que utiliza radiodifusão terrestre designada pelo método de modulação por multiportadoras locadas de forma ortogonal, o OFDM (*Orthogonal Frequency Digital Modulation*).

Para desenvolvimento deste trabalho foi necessário pensar em forma de representar o sistema ISDB-T de forma mais fiel possível, onde o mesmo pudesse ser simulado por algum software e emulado por algum meio físico, como um módulo de circuito de telecomunicação onde fosse possível provar a fidelidade da simulação realizada no software inicialmente. Para tanto, a solução para simular um sistema de transmissão digital do tipo ISDB-T foi utilizar o software de simulação de sistemas de rádio comunicação GNU Radio. Esta plataforma permite, através da programação em linguagem Python e C++, a criação de blocos de sistemas de comunicação variados. Além disso, este software dispõe de uma variedade de sistemas de comunicação presentes em sua biblioteca padrão ou em fontes online, onde os sistemas podem ser criados por desenvolvedores independentes.

Além da simulação, é necessário que o sistema possa ser emulado por um circuito que faça o papel de transmissor, como já citado acima. Para esta etapa é utilizado um módulo capaz de transmitir sinais na faixa de frequência do padrão de transmissão ISDB-T. Para isso, foi escolhido o módulo USRP, com um modelo compatível com a faixa de frequência desejada. Além do mais, o módulo USRP é compatível com o software de

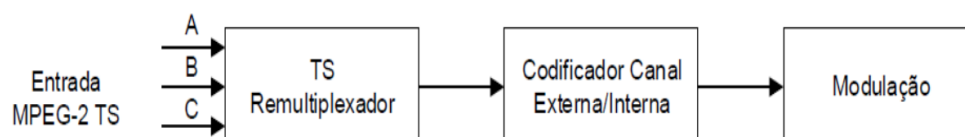
simulação GNU Radio, podendo assim, serem usados em conjunto para o desenvolvimento deste presente projeto de diplomação.

Como o padrão de transmissão ISDB-T se trata de um sistema composto de vários blocos e cada bloco possui sua própria característica, é importante que seja feita uma explicação, mesmo que breve, do seu funcionamento dentro do transmissor. Por se tratar de um sistema complexo, muitos dos blocos não estão presentes na biblioteca do software GNU Radio e portanto sua construção deve ser feita tanto através de alguns blocos existentes no próprio software, como em blocos encontrados em repositórios de desenvolvedores independentes na web para complementar o sistema.

3.1 Transmissor ISDB-T

Na presente seção deste capítulo será apresentada inicialmente, uma breve explicação, de forma geral, sobre o funcionamento do transmissor ISDB-T como um todo e depois, atentar-se para cada uma das suas etapas. O transmissor ISDB-T pode ser ainda dividido em três grandes blocos, como mostra a figura 1 abaixo.

Figura 1 – Macro blocos do um transmissor ISDB-T



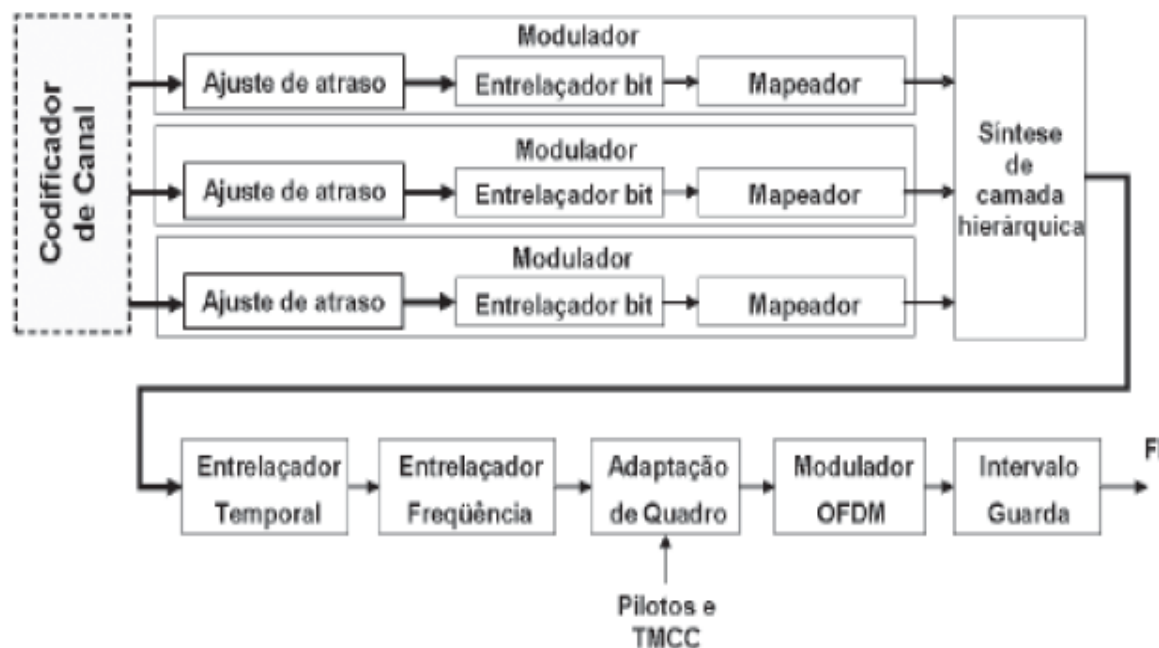
Fonte: (BAMPI, 2014)

No primeiro grande bloco, está a etapa onde o sinal pode ser dividido em até três pacotes de dados conhecido como TS (Transport Stream) onde as informações de áudio e vídeo são comprimidas. No bloco seguinte, está a etapa de codificação, que pode ser dividida em externa e interna. A codificação externa está dividida em três partes: Codificador Reed-Solomon, Aleatorizador de Dados e Entrelaçador de Bytes. O codificador interno é um codificador convolucional que utiliza o método de codificação Viterbi.

O último bloco macro consiste na modulação que está dividida em duas etapas. A primeira é onde deve ser escolhido o tipo de modulação que deve ser utilizado para as subportadoras das camadas hierárquicas. Ainda nessa primeira está também a combinação hierárquica, onde as subportadoras são unidas em uma único pacote de transmissão separado ortogonalmente. Em seguida o entrelaçamento no tempo e frequência que consistem embaralhar e acrescentar atrasos aos símbolos e ao final são inseridos sinais pilotos para referência, sincronização e controle. Na segunda e última parte está o modulador OFDM

e na saída do mesmo se encontra o prefixo fixo que deve ser utilizado para aumentar a robustez do sinal no transmissor. Uma visão mais detalhada do Transmissor ISDB-T pode ser vista na figura 2 abaixo onde pode ver a separação dos seus blocos.

Figura 2 – Representação detalhada em blocos do transmissor ISDB-T.



Fonte: (MACIEL LIVIA BATISTA; MOREIRA, 2006)

3.2 Tipos de transmissores ISDB-T

Os tipos mais comuns de transmissores ISDB-T existentes serão apresentados brevemente nessa seção, com o objetivo de introduzir o leitor a respeito do que será tratado mais adiante, mostrando primeiramente as possibilidades de projeto deste transmissor que são mais comumente encontradas. Cada um dos transmissores é determinado a partir das necessidades de projeto em uma dada região de transmissão. Os tipos de transmissores existentes devem sempre estar de acordo com as normas de comunicação de cada país, respeitando as frequências de transmissão e alcance do sinal.

3.2.1 Transmissor *oneseg*

Um dos modelos contemplados para recepção de um sistema ISDB-T é a do tipo parcial que consiste em utilizar apenas o segmento central da banda OFDM, deixando de lado os demais 12 segmentos existentes. Este tipo de recepção é muito utilizada

para dispositivos móveis, devido a sua baixa largura de banda e taxa de bits, já que os dispositivos móveis possuem uma baixa capacidade de recepção e processamento, se comparados a outros dispositivos. Para que ocorra este tipo de recepção, a forma mais econômica, em termos de projeto, é utilizar um transmissor *oneseg*, que necessita de muito pouco hardware, e logo, tempo de processamento, para que apenas um segmento seja transmitido (HERNÁNDEZ JAVIER; CASTRO, 2018).

3.2.2 Transmissor *fullseg*

Este tipo de transmissor tem a capacidade de transmitir uma informação em até três camadas hierárquicas diferentes, ou seja, até três tipos de modulação diferentes. Para que isso ocorra, a informação contida no sinal banda base é separada através de um divisor hierárquico, que permite que a mesma informação seja codificada e modulada por padrões diferentes. Este tipo de transmissor é utilizado, quando se necessita que uma única informação seja recebida por equipamentos diferentes, podendo ser móveis ou fixos e com tipos de demodulação diferentes, podendo receber apenas um segmento, ou todos os 13, dependendo da necessidade (HERNÁNDEZ JAVIER; CASTRO, 2018).

3.2.3 Transmissor *fullseg* com fluxo de transporte independente (TS)

O transmissor *fullseg* com fluxo de transporte independente, tem como objetivo aproveitar ao máximo capacidade da banda OFDM, pois nesse modelo é possível transportar até três informações diferentes em TS independentes. Neste modelo, as etapas de codificação e modulação dos sinais também são feitas de forma isolada, podendo cada uma delas ter sua própria taxa de codificação e tipo de modulação, que como já visto anteriormente, pode QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM. Depois que os sinais passam por essas etapas, são reunidos numa única banda de transmissão através de um combinador hierárquico (HERNÁNDEZ JAVIER; CASTRO, 2018).

Este modelo de transmissor ISDB-T é o que foi escolhido para ser analisado e simulado neste projeto, sendo necessário para isso, a modelagem dos seus blocos no software GNU Radio, como dito anteriormente. Apesar deste modelo necessitar de um hardware e capacidade de processamento maior, ele foi escolhido por ter uma grande capacidade de transmitir sinais em diferentes regiões, podendo a necessidade do seu uso ser tanto para uma maior taxa de dados, como para evitar interferências de multicaminhos.

3.3 Blocos do Transmissor ISDB-T

Nesta subseção será apresentada, de forma mais detalhada, a teoria a respeito dos blocos existentes em um transmissor ISDB-T, explicando a função de cada um deles e demonstrando sua aplicação através de figuras ou fórmulas matemáticas.

3.3.1 Codificador Externo (*Reed-Solomon*)

O codificador *Reed-Solomon* utiliza um código para correção de erros, que consiste em adicionar informação redundante no sinal, para que o receptor possa detectar e corrigir erros que possam vir a ocorrer na transmissão. O *Reed-Solomon* se encaixa nos códigos de blocos, ou seja, a mensagem a ser transmitida é dividida em vários blocos separados de dados. Em cada bloco se tem informação de paridade que junto forma a palavra de código. A sigla do código *Reed Solomon* é designada como RS e a função que representa a palavra de código é classificada como RS (n,k,t), no qual n representa o número de símbolos que saem do codificador, k representa o número de símbolos que entram. A função é composta pela mensagem original mais os símbolos de paridade (2t), e a capacidade de correção de erros está relacionada diretamente com o valor dos bits de paridade, ou seja, t (SANTIAGO, 2020).

Um código *Reed-Solomon* é considerado código linear (ao se adicionar duas palavras de código produz outra palavra de código) e também é considerado um código cíclico (deslocar um símbolo ciclicamente de uma palavra de código produz outra palavra de código). E por ter símbolos multibit faz com que esse código seja bom para combater rajadas de erros já que ao invés de todos os bits do símbolo estarem no erro, isso conta como somente um erro de símbolo.

Na entrada do codificador externo RS do transmissor ISDB-T são recebidos pacotes com o tamanho de 188 bytes provenientes do TSP . O RS acrescenta 16 bytes de paridade em cada pacote, com isso o tamanho do mesmo é acrescido para 204 bytes. Com a atualização do código corretor de erros, o receptor tem a capacidade até, no máximo, 8 bytes errados de cada pacote de informação, sendo que no ISDB-T, o código de entrada utilizado é o RS encurtado (204, 188, 8) que é aplicado aos pacotes TS. Na entrada do codificador são adicionados 51 bytes, dessa forma a função do código Reed-Solomon é dada como sendo RS (n=255, k=239, t=8). A correção do código RS é obtida através da seguinte equação 1 (SANTIAGO, 2020).

Equação 1 - Capacidade de correção do código RS.

$$t = \frac{n - k}{2}$$

Fonte: (SANTIAGO, 2020)

3.3.2 Dispersor de Energia

A probabilidade de que o fluxo de transporte de dados que entram pelo transmissor possam conter uma longa sequência de uns ou zeros é grande. Esta sequência pode representar um problema de sincronização na hora que o sinal chega ao receptor provocada por uma interferência intersimbólica. Para evitar isso, é ideal que a sequência de bits seja embaralhada de forma aleatória para que a correção do receptor seja a mais simples possível e essa função é feita, ainda no transmissor, pelo dispersor de energia que se localiza na saída do codificador Reed Solomon (QUIMBITA, 2016).

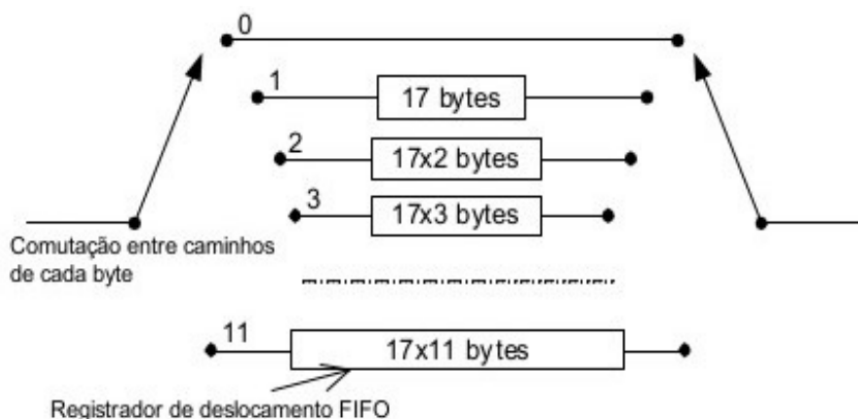
Tecnicamente, a função do dispersor de energia é gerar uma sequência de bits pseudo-aleatória que é realizado por quinze registradores de deslocamento feedback, cada um composto por um par de flip-flops RS e uma porta lógica XOR que realiza a operação dos sinais que entram no dispersor com os bits que passam pelos registradores.

3.3.3 Entrelaçador de Byte

O entrelaçador de byte tem como função executar o embaralhamento de todos os dados recebidos. Os dados, quando embaralhados pelo entrelaçador, ajudam a diminuir os efeitos do ruído impulsivo e erros de bloco. Este processo é essencialmente importante quando os sinais estão com erros concentrados porque quando ocorre o embaralhamento dos dados, os erros também sofrem o embaralhamento.

Devido a sua arquitetura, o entrelaçador de byte possui um atraso de onze TSPs (*Transport Stream Packet*) o qual obriga com que o sistema opera em atraso. A combinação dos dois atrasos gera um quadro OFDM. Ao associar o entrelaçador de byte com o ajuste de atraso, o tempo de atraso resultante é idêntico ao tempo para transmissão e recepção das camadas hierárquicas. A figura 3 abaixo representa o circuito entrelaçador que recebe 17 bytes em cada registrador de deslocamento FIFO, sendo um total onze registradores, correspondendo ao número de atrasos do TSPs. Cada um de seus caminhos possui um tamanho de memória diferente e suas entradas e saídas tem que ser comutadas de forma diferentes a cada byte, indo do caminho 0 até o 11. O tamanho total de cada caminho é proporcional a $N \times 17$ bytes, sendo N o número do caminho, determinando o valor do atraso. No caminho 0 não existe nenhum atraso.

Figura 3 – Representação do circuito Entrelaçador de Byte.



Fonte: (MACHADO, 2018)

3.3.4 Codificador Interno

O codificador interno é um codificador convolucional do tipo Viterbi que utiliza memórias dentro do seu circuito. No sistema ISDB-T, este codificador é implantado individualmente para cada camada hierárquica e as taxas de codificação que podem ser utilizadas nele podem ser selecionadas nos valores de $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$, e $7/8$. O codificador interno é do tipo corretor de erros assim como o codificador Reed Solomon, no entanto, não utiliza bits de paridade no final da mensagem como o codificador RS (SANTIAGO, 2020).

O codificador interno Viterbi pode ser implantado utilizando um circuito combinacional construído a partir de registradores, flip-flops, somadores e multiplexadores/demultiplexadores. Para o codificador interno, quanto maior o número de bits de correção, maior é o nível de robustez do sinal, mas apesar disso, a quantidade de informação útil a ser enviada é reduzida.

3.3.5 Mapeamento

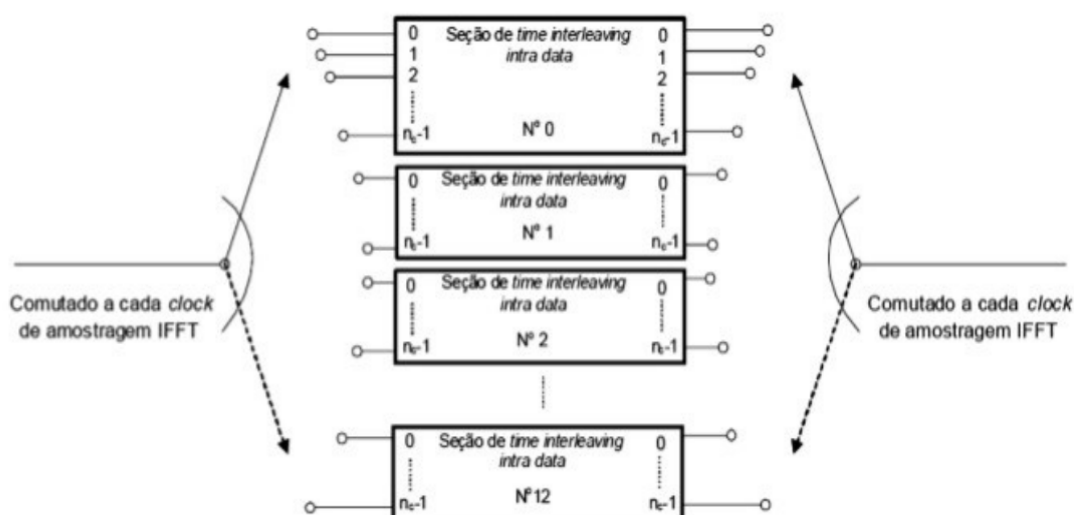
O método de modulação utilizado para o transmissor ISDB-T, como mencionado na introdução deste mesmo capítulo acima, é o OFDM que utiliza multiportadora, onde as subportadoras estão separadas de forma ortogonal, como o próprio nome do método já diz. Esta modulação é dividida em até no máximo três feixes de informação, para cada uma das camadas hierárquicas que são utilizadas no transmissor. O transmissor ISDB-T também utiliza uma segmentação de banda de 6MHz que é dividida em treze segmentos por camada hierárquica (SANTIAGO, 2020).

A primeira etapa do processo de modulação é o mapeamento que é basicamente composto em dois blocos, que tem a função fazer o entrelaçamento de bits e depois mapeá-los em cada uma das suas respectivas constelações, podendo ser elas divididas em QPSK, 16QAM e 64QAM. O entrelaçador de bits, sendo o primeiro bloco do mapeamento, tem a função de pegar os bits que vem da saída do codificador interno e os entrelaça de acordo com o tipo de modulação da sua camada hierárquica. Cada camada hierárquica possui seu próprio processo de entrelaçamento e mapeamento independente, pois as camadas hierárquicas podem operar com subportadoras de diferentes tipos de modulação.

3.3.6 Entrelaçador Temporal

O entrelaçador temporal possui a função de inserir atrasos no tempo entre as portadoras dos segmentos. Os atrasos são inseridos de forma que não seja transmitida mais de uma sequência de dados. Os comprimentos de entrelaçamento são independentes entre as camadas dos níveis hierárquicos e por isso podem ser ajustados de maneira ótima para o canal de transmissão. O processo de entrelaçamento gera robustez contra o processo de desvanecimento (ruído impulsivo), quanto maior seu comprimento maior é a sua robustez. Abaixo na figura 4 está ilustrado o processo de entrelaçamento temporal, (SAPIA, 2017) e (MACHADO, 2018).

Figura 4 – Blocos do entrelaçador temporal.

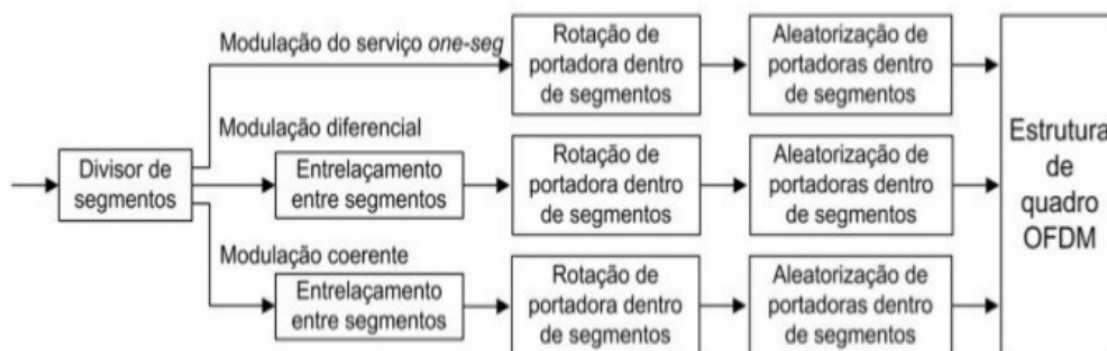


Fonte: (MACHADO, 2018)

3.3.7 Entrelaçador em Frequência

O entrelaçador na frequência é responsável por gerar um embaralhamento nas portadoras de um mesmo segmento. Este processo ajuda a prevenir problemas destrutivos do sinal transmitido pelo ruído com memória. Na Figura 5, tem-se os blocos presentes dentro do bloco de entrelaçamento na frequência, eles têm como função: entrelaçamento dos dados, embaralhamento das frequências e rotação das portadoras de um mesmo segmento. Abaixo na Figura 4 encontra-se o diagrama esquemático do entrelaçador de frequência (MUTTONI, 2017).

Figura 5 – Diagrama em blocos do entrelaçador de frequência.



Fonte: (MUTTONI, 2017)

3.3.8 Adaptador do Quadro OFDM

Este bloco especifica o padrão de agrupamento das portadoras e dos símbolos. O padrão é formado de acordo com a modulação (síncrona ou diferencial) e modo de transmissão, independente desses fatores, o quadro OFDM tem tamanho fixo de 204 símbolos.

No processo de adaptação de quadro são inseridos sinais pilotos no segmento OFDM. Os sinais pilotos contínuos para a modulação diferencial são: *Continuous Pilots* (CP), *Auxiliary Channel* (AC) e *Transmission and Multiplexing Configuration Control* (TMCC). São sinais para informação de controle e de informações adicionais de transporte (MUTTONI, 2017).

3.3.9 IFFT

A IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) é aplicada aos dados da saída do Estruturador de Quadro para formar a modulação OFDM. Os símbolos dessa saída são

compostos por inúmeras portadoras, por exemplo, o modo 3 do ISDB-Tb é formado por 384 portadoras. Grandes vantagens são obtidas quando os coeficientes de Fourier estão agrupados em vetores de tamanho $2N$. Como os símbolos OFDM dos três modos presentes no ISDB-Tb não são de tamanho $2N$, usa-se uma técnica chamada de *Zero Padding* que insere zeros nos quadros OFDM até que se tenha tamanho de $2N$, e assim compatibilizar com as taxas de amostragem da IFFT. Como especificado acima, a modulação OFDM é formada pela IFFT, a equação 2 que representa o sinal OFDM está abaixo (BAMPI, 2014).

$$s_n = \mathcal{F}^{-1}(S_k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_k \cdot e^{j2\pi kn/N}$$

Equação 2 - Representação da IFFT do sinal OFDM.

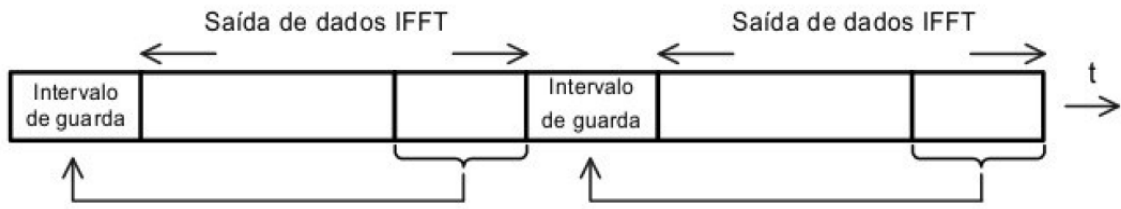
Na equação acima é possível ver que N representa o número total de símbolos, S_k Representa o feixe símbolos complexos. S_n representa o vetor de portadoras virtuais do símbolo OFDM, (MUTTONI, 2017).

3.3.10 Intervalo de Guarda

Logo após passar pelo bloco IFFT, uma cópia de parte do símbolo é adicionada ao seu início, é cópia e chamada de intervalo de guarda, ou prefixo cíclico, e ocorre sem modificar o começo efetivo do próprio símbolo. Ou seja, o tempo de duração do símbolo OFDM (T_s) é igual ao tempo útil do símbolo (T_u), mais o tempo do intervalo de guarda (T_g), (SAPIA, 2017).

Basicamente, a inserção do intervalo de guarda entre cada símbolo do sinal se faz necessária para evitar a interferência intersimbólica. Quanto maior for o intervalo de guarda, mais imune o sinal será a esse tipo de interferência, que é consequência da propagação multipercurso. No entanto, quanto maior o intervalo de guarda, menor é a taxa de transmissão do sinal, pois informações redundantes serão transmitidas no lugar de novos dados. O sistema ISDB-T disponibiliza 4 tipos diferentes quatro valores de intervalo de guarda para cada um dos modos de operação, sendo que os valores podem ser escolhidos separadamente para cada um dos 13 segmentos de transmissão. Abaixo, na figura 6 está representado o processo de inserção do intervalo de guarda (MACIEL LIVIA BATISTA; MOREIRA, 2006).

Figura 6 – Inserção do intervalo de Guarda nos dados do transmissor.



Fonte: (BAMPI, 2014)

Após o sinal OFDM passar pelo bloco IFFT e pelo intervalo de guarda, ele adquire a forma de onda $s(t)$, representada pelas equações 3 e 4 no domínio tempo.

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_c t} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} c(n, k) \Psi(n, k, t) \right\}$$

Equação 3 - Representação analítica do OFDM formado pela IFFT e intervalo de guarda, (MUTTONI, 2017) e (ABNT..., 2007).

e também,

$$\Psi(n, k, t) = \begin{cases} e^{j2\pi \frac{k-K}{T_u} (t - T_g - nT_s)}, & nT_s \leq t < (n+1)T_s \\ 0, & t < nT_s, t \geq (n+1)T_s \end{cases}$$

Equação 4 - Complemento da representação do sinal OFDM na saída do transmissor (MUTTONI, 2017) e (ABNT..., 2007).

Onde os parâmetros das equações possuem o seguinte significado:

- k é o índice da portadora.
- n é o número do símbolo.
- K é o número de portadoras (modo 1: 1405; modo 2: 2809; modo 3: 5617).

- T_s é o tempo de duração do símbolo OFDM
- T_g é o tempo de duração do intervalo de guarda, que será visto mais adiante.
- T_u é o tempo de duração da parte útil do símbolo OFDM.
- f_c é a frequência central do sinal de RF.

3.4 Software GNU Radio

O GNU Radio trata-se de um software livre e de código aberto que possui blocos de processamento de sinais para implementar o SDRs (*Software Defined Radio*). Possui a opção de ser acoplado a um hardware externo, mas pode ser usado como ambiente de simulação, no qual as amostras são geradas no próprio computador. É muito utilizado no meio acadêmico para apoiar pesquisas de comunicações sem fio e em ambientes comerciais para ser utilizado em sistemas de rádio reais, (MUTTONI, 2017) e (SAPIA, 2017). A princípio, pode-se entender melhor o sistema de simulação do GNU Radio, se for feita uma análise sobre seus elementos básicos para a geração de vários sistemas complexos de processamento que são possíveis de desenvolver. Os dois seguintes elementos citados abaixo fazem parte de um sistema de simulação em GNU Radio (MUTTONI, 2017) e (SAPIA, 2017).

3.4.1 Flowgraphs

Os *flowgraphs* (fluxograma) ou diagrama de blocos, é a estrutura de dados mais básica do programa. Esta estrutura pode ser comparada como se fosse uma bancada de trabalho. No interior dos flowgraphs podem ser inseridas amostras de sinal a partir de uma fonte, depois as amostras serão processadas e eventualmente exportadas, seja para enviar a um arquivo, seja em um canal através de transmissão por uma antena (MUTTONI, 2017).

3.4.2 Blocos

O processamento de dados se dá através da concatenação de elementos chamados blocos. Esses mesmos podem ser incorporados a uma gama de blocos funcionais que trazem sua aplicação em default ou podem ser desenvolvidas pelo usuário. Os blocos disponíveis podem implementar elementos padrão, como filtros, codificadores de canal, equalizadores, moduladores, demoduladores, etc (MUTTONI, 2017).

O GNU Radio trabalha com fluxo de dados constante que fazem a transição através de vários blocos de processamento, desde um ponto de origem até um final. Os tipos de dados disponíveis para serem utilizados podem variar desde Bytes, números inteiros ou

complexos. Os blocos possuem diferentes funcionalidades e estas podem variar ao efetuar operações nas amostras, exportar dados para fora do programa, no entorno do mesmo ou pode ter toda uma estrutura de blocos no seu interior (SAPIA, 2017).

O GNU Radio facilita o desenvolvimento de blocos por oferecer o uso de linguagem de programação C++ ou Python para modificar seus dados de forma desejada. Existem basicamente quatro tipos de blocos predefinidos que se diferenciam pela relação dos itens de entrada e saída: blocos decimadores, blocos síncronos, blocos gerais e blocos interpoladores (SAPIA, 2017).

- Blocos decimadores: O número de itens de entrada é igual ao múltiplo da quantidade de elementos da saída.
- Blocos síncronos: É utilizado quando o número de elementos de entrada é igual ao número de elementos de saída.
- Blocos gerais: Não se especifica uma relação entre entrada e saída. Os tipos de blocos são simplificações deste tipo de bloco geral.
- Blocos interpoladores: O número de itens na saída é igual ao múltiplo da quantidade de itens de entrada.

3.4.3 Blocos existentes no GNU Radio Companion

Segundo o site do próprio desenvolvedor, onde se encontram os arquivos para download e os tutoriais do software, é possível que encontrar que GNU Radio vem com uma grande variedade de blocos existentes além dos essenciais já citados. Logo abaixo serão listados os tipos de blocos e suas funções existentes neste software (MUTTONI, 2017) e (SAPIA, 2017) :

Gerador de Formas de Onda: Possui funções como gerador de ruídos, fonte de tensão contínua e também fonte de sinais definidos por funções matemáticas como seno, retangular e dente de serra (SAPIA, 2017). Modulador: É composto por Demodulador AM, Modulação de Fase Contínua, Modulação e Demodulação PSK, Modulação e Demodulação GFSK, Modulação e Demodulação GMSK, Modulação e Demodulação QAM e Recepção de WBFM, Recepção NBFM (SAPIA, 2017) e (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020). Operadores Matemáticos: Composto por Módulo, Adição/Subtração, Multiplicação/Divisão, Integração, Log10, RMS (GNURADIO, 2020).

Filtros: É composto por filtros Passa/ Rejeita Banda, Passa Alto/ Baixo, Filtro IIR, Banco Genérico de Filtros, Filtro de Hilbert, Filtro FIR Decimador, Filtro Cosseno Elevado e Filtro FFT (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020) e (GNURADIO, 2020).

Análise de Fourier: É composto por Transformada Rápida de Fourier (do inglês FFT), Log10 da FFT, Goertzel (Reamostragem), Reamostragem Fracional, Reamostragem Polifásica Arbitrária, Reamostragem Racional (Sincronizadores), Recuperação de Clock MM, Detector de frequência FLL, Detector de Fase PLL, Sincronia de Clock Polifásica (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020) e (GNURADIO, 2020).

Utilizando esses blocos, é possível executar muitas tarefas diferentes, como normalização de sinais, sincronização, medidas e visualização, simplesmente ao conectar um bloco apropriado no fluxograma (diagrama de blocos) de processamento de sinais (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020) e (GNURADIO, 2020). Para o desenvolvimento de blocos podem ser usadas duas linguagens de programação, Python e C++, sendo o último o mais utilizado. Esta forma de desenvolvimento permite implementar sistemas que podem funcionar em tempo real por mais que possam necessitar um processamento de grande taxa de dados. Cada bloco provê uma funcionalidade específica (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020) e (GNURADIO, 2020). Um determinado bloco simples, ao ser agrupado com outros blocos, se comporta como parte de um sistema complexo o qual pode realizar várias funções como moduladores, transmissores de rádio, televisão, etc. GNU Radio Companion se trata de um aplicativo que permite construir a interconexão entre os blocos através de uma interface gráfica, também dando a possibilidade de programar cada bloco individualmente (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020) e (GNURADIO, 2020).

3.5 Rádio Definido por Software (SDR)

Com o passar dos anos, os dispositivos de transmissão e recepção têm se tornado cada vez mais variados e complexos a para cada tipo de sistema de modulação, os hardware utilizados podem variar muito de configuração e projeto, para que possam atender, diferentes potências, faixas de frequência e confiabilidade. Devido a toda essa diversidade e complexibilidade, foi necessário desenvolver circuitos eletrônicos que pudessem funcionar para diversas funcionalidades diferentes e para isso, foram criados os dispositivos SDR.

Os dispositivos SDR (Software Defined Radio) têm como objetivo serem circuitos programáveis, ou seja, o seu hardware pode ser programado de tal forma que possam ser configurados para trabalhar em diversas áreas de telecomunicações. No mercado atual de dispositivos de rádio definido por software existem um grande leque de hardwares disponíveis, com diferentes faixas de frequência, frequência máxima e potência de operação. Normalmente estes hardwares podem operar tanto como transmissores e receptores facilitando muito projetos que estão baseados em sistemas completos de rádio comunicação. A tabela 1 abaixo mostra o exemplo de alguns modelos de SDRs disponíveis no mercado (ETTUS, 2007).

Tabela 1 – Exemplos de *hardwares* SDR disponíveis no mercado.

Nome	Freq. Min. (MHz)	Freq. Max. (MHz)	BW (MHz)	Tx
RTL-SDR	24	1766	3,2	Não
Airspy Mini	24	1700	6	Não
SDRplay RSP1A	0,001	2000	10	Não
HackRF	30	30	20	Sim
MatchStiq	300	3800	28	Sim
BladeRF	300	3800	40	Sim
ADALM-PLUTO	325	3800	20	Sim
USRP B200	70	6000	56	Sim
USRP 2932	400	4400	20	Sim

Fonte: Próprio autor

O transmissor ISDB-T, escolhido para este projeto, possui uma frequência de transmissão de 1,2GHz e uma largura de banda de 6MHz. Portanto, é possível notar na tabela 2 que a partir do quinto modelo de SDR em diante, seria compatível com as características deste projeto. Por outro lado, como este projeto depende da disponibilidade de hardwares encontrados nos laboratórios da universidade, o único disponível que está de acordo com as características, é o módulo USRP 2932 (USRP-2930/2932..., 2019), como mostrado na figura 7.

O dispositivo USRP 2932, possui um hardware que suporta uma largura de banda de 56MHz e uma faixa de frequência de trabalho de 400MHz a 4,4GHz. Por possuir as características de circuito programável, pode trabalhar tanto como transmissor como receptor de sinais de telecomunicação. O dispositivo também conta com um conversor A/D de 12 bits de resolução, que está de acordo com as necessidades do sistema ISDB-T. Ao longo deste projeto, este dispositivo funcionará como transmissor de sinais digitais com características *Full-Seg* com uma TS (*Transmission Stream*) independente (ETTUS, 2007).

Figura 7 – Módulo USRP 2932.



Fonte: (USRP-2930/2932. . . , 2019)

4 EXPERIMENTOS COM ISDB-T

O capítulo de experimentos e resultados, será dividido em três etapas. Na primeira etapa deste capítulo serão descritos os materiais que foram utilizados para realização dos experimentos, como o computador, processador, versão do software de simulação, modelo da módulo USRP, cabos de alimentação e conexões em geral. Cada um dos dados será apresentado através de tabelas organizadas de forma separada para os equipamentos utilizados.

Na segunda etapa deste capítulo serão apresentadas todas as etapas dos experimentos feitos em relação à transmissão padrão ISDB-T. Serão demonstrados aqui todos os blocos do software GNU Radio que serão usados neste projeto demonstrando todos os valores das variáveis de cada um deles e os motivos para sua escolha. Cada variável dos blocos deve ser escolhida de acordo com cálculos matemáticos e tabelas encontradas no referencial teórico, dentro de outros trabalhos relacionados a GNU Radio Companion, padrão ISDB-T e sistemas de comunicação em geral. Também estão incluídos aí manuais descrevendo os dados do USRP (Universal Software Radio Peripheral).

O uso tanto do software GNU Radio Companion para simulações de transmissões do padrão ISDB-T, como do módulo USRP 2932, onde devem ser feitas as emulações do transmissor, são importantes para provar que o desenvolvimento do sistema está de acordo com as teorias mostradas nas referências de estudo deste trabalho. Para tanto, será testado no software GNU Radio, além do transmissor, um receptor com modelo de canal, para comprovar se o sinal que chega no receptor está de acordo com o que seria mostrado em uma transmissão mais próxima da real possível.

O uso do USRP disponível para este projeto é feito através de conexão do módulo, por cabo de Ethernet a um switch que, por sua vez está conectada também por um cabo de Ethernet computador , onde os dados são transferidos para executar a emulação da transmissão do sistema ISDB-T. A comunicação do módulo USRP 2932 com o GNU Radio Companion é feita através de blocos desenvolvidos pelos criadores do software que executam a transferência de dados entre o circuito simulado no software e o circuito que será programado no USRP. Os blocos UHD estão presentes na biblioteca padrão do software GNU Radio, a partir da versão 7 do software, sendo dois tipos de blocos diferentes, um deles sendo UHD USRP Source e o outro UHD USRP Sink. O bloco UHD Source funciona como um transferidor de dados dos blocos de um receptor criado em GNU Radio para a placa do USRP 2932, para que assim, ela funcione emulando o mesmo receptor criado em software. Já o bloco UHD Sink, funciona como uma comunicação de

um transmissor criado no software GNU Radio para que o mesmo circuito também seja emulado no módulo USRP.

No caso deste presente projeto, onde deve ser mostrado a simulação de uma transmissão ISDB-T criado no software GNU Radio, os dois blocos da biblioteca UHD devem ser utilizados, tanto USRP Sink, como USRP Source, pois tais blocos deverão realizar a comunicação do circuito de transmissor e receptor simulados, com os módulos USRP. para transmitir o sinal, enquanto o outro que é programado por um chip FPGA de forma que opere como um transmissor real. Inicialmente, os sinais a serem transmitidos pelo USRP serão medidos através de um analisador de espectro. Entre os sinais analisados serão mostrados os gráficos banda de frequência onde se encontram todos os segmentos das subportadoras.

A terceira etapa deste capítulo está destinada ao desenvolvimento dos experimentos feitos com o software GNU Radio. Nesta última parte será mostrada uma análise dos gráficos das constelações das subportadoras de modulação do tipo 16-QAM, 64-QAM e QPSK que serão mostradas através do bloco QT GUI Constellation Sink juntas no diagrama de constelações do gráfico gerado a partir do software GNU Radio. Além das constelações das subportadoras do sistema de modulação OFDM, é mostrado também, os símbolos dos sinais de portadora piloto aplicados no transmissor para sincronização do quadro OFDM, sincronização de frequência, sincronização do tempo, estimação de canal, identificação do modo de transmissão e correção de ruído de fase, funcionando da mesma forma que o sistema DVB-T desenvolvido na Europa.

Outros resultados a serem analisados na última parte deste capítulo, são os resultados das emulações feitas no módulo USRP, que devem mostradas através do uso de um analisador de espectro onde devem aparecer a banda utilizada no espectro de frequência do canal de RF segmentado do transmissor ISDB-T e também as constelações das subportadoras moduladas através do método OFDM que foi criado no software GNU Radio e depois programado pelo módulo USRP por um chip FPGA contido na placa para se comunicar com o GNU Radio Companion.

4.1 Materiais Utilizados

Os componentes utilizados para os experimentos deste projeto de diplomação estão divididos em software e hardware, estando aqui presentes desde o software utilizado para simulação, o sistema operacional, como também os hardware utilizados para emulações. A lista de materiais utilizados está disposta logo abaixo:

Software:

- Sistema Operacional Linux, Ubuntu 20.04

- *Open Software* de simulação de rádio comunicação, GNU Radio Companion 3.8.5.0, utilizando versão Python 3.8.10.

Hardware:

- *Notebook Samsung Book E30*, Tela 15.6”, Processador *Core i3 10TH GEN*, 4Gbs RAM com memória expandida para 12Gbs de RAM, HD de 1Tbs. Entrada para HDMI, ETHERNET, USB. Fonte de alimentação de 100 - 240V AC , 50/60Hz de entrada e com saída de 19V DC com 2,1A.
- Módulo NI USRP 2932, com faixa de operação de 400MHz a 4.4GHz, capacidade de operação tanto como Tx, quanto Rx. Entrada de Fonte Alimentação de 6V por 3A DC. Três estradas para antenas, uma entrada para cabo de *ETHERNET*.
- Switch de rede com cabos de *ETHERNET* para fazer a interconexão do *NoteBook* com módulo USRP.
- Analisador de Espectro *Agilent Technologies FieldFox N991A* de 6GHz de capacidade, com cabo coaxial para comunicação com o transmissor emulado no USRP.
- Atenuador Variável duplo, *Agilent 8496B*, com potência máxima em RF de 1W, atenuação de até 110dB e range de frequência de até 18GHz para restringir a potência máxima que chega no analisador de espectro.

Abaixo, nas figuras 8, 9 e10, estão apresentadas as imagens dos equipamentos que foram utilizados em laboratório para realizar os experimentos com o sistema de transmissão ISDB-T.

Figura 8 – Foto do analisador de espectro e computador utilizados nos experimentos de laboratório.



Fonte: Próprio autor

Figura 9 – Foto dos USRPs e switch utilizados nos experimentos de laboratório.



Fonte: Próprio autor

Figura 10 – Foto do atenuador variável e dos cabos coaxiais utilizados nos experimentos de laboratório.



Fonte: Próprio autor

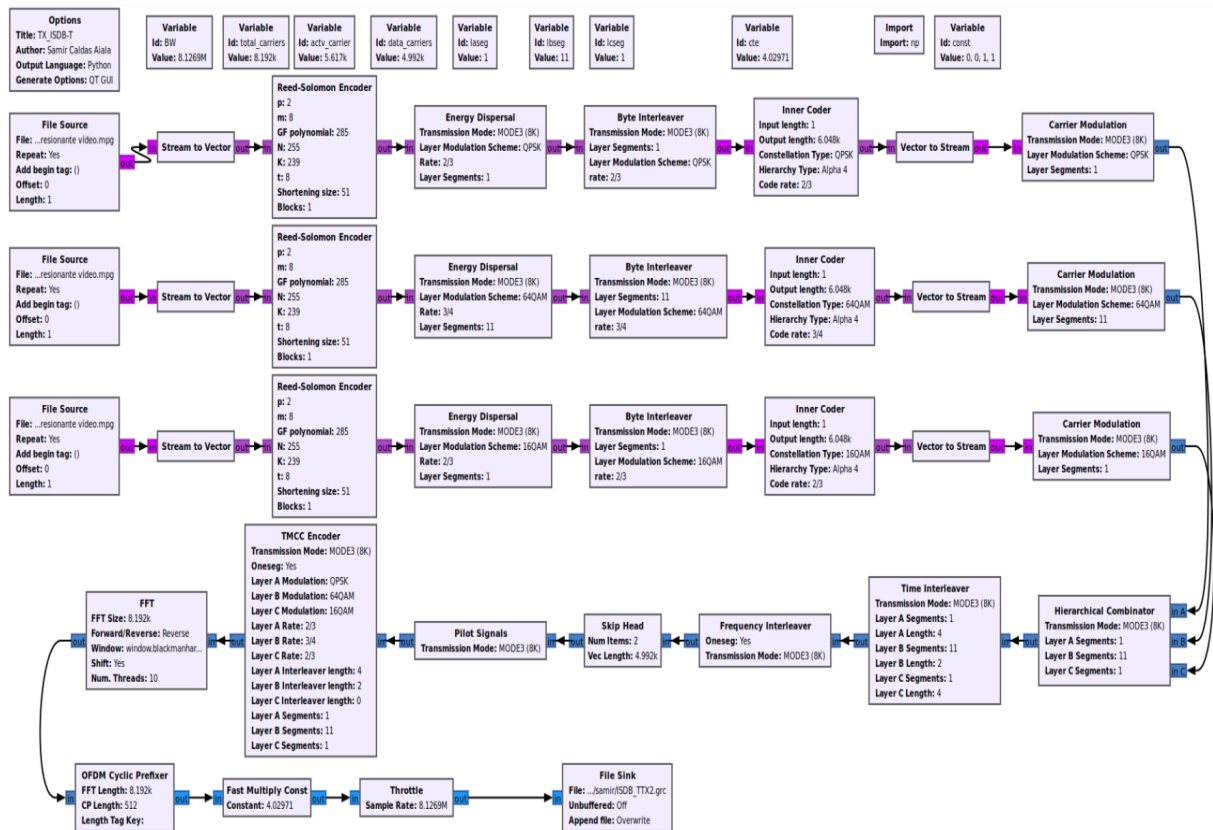
4.2 Experimentos realizados com GNU Radio.

O transmissor ISDB-T com fluxo de transporte de dados independente, mostrado na figura 11 é aquele no qual informações (sinais banda base) diferentes podem ser codificadas de forma independente dentro do transmissor por subportadoras com modulações diferentes. Neste tipo de transmissor ISDB-T é possível transportar até três tipos de informações com taxa de codificação e tipos de modulação diferentes, que podem ser QPSK, 16-QAM e 64-QAM. Os Sinais são codificados de forma isolada até chegarem na etapa de combinação hierárquica onde são transportadas de forma ortogonal, de acordo com o método de modulação OFDM utilizado nesse tipo de transmissor.

Neste projeto, foi escolhido utilizar este modelo transmissor ISDB-T com fluxo de transporte independente (*Independent Transport Stream TS*) para três tipos diferentes de dados em sinal banda base com padrão de codificação MPEG-2. O padrão de codificação MPEG-2, é utilizado para codificar sinais de vídeo em movimento e informações de áudio associadas. Os sinais banda base, como mencionado anteriormente, são modulados em três tipos de modulação diferentes, QPSK, 16-QAM e 64-QAM, com o objetivo de alcançar um número maior possível de capacidade de transmissão, tanto para zonas de alta interferência, como para zonas onde se necessita uma capacidade maior de transmissão, em termos de dados.

Segundo o fluxograma do transmissor no software GNU Radio mostrado na figura 8, as três formas de modulação estão distribuídas ao longo da banda de 6MHz, ocupando cada uma um número determinado de segmentos. Como são no total de 13 segmentos, a divisão é feita de forma que a modulação QPSK ocupe apenas um segmento, a modulação 16QAM deverá ocupar 3 segmentos, enquanto a modulação 64QAM deve ocupar os 9 segmentos restantes, tendo assim, o que chamamos de transmissão ISDB-T Full-Seg independente, pois um dos sinais base é transmitido por apenas um segmento e o outro, através do restante deles.

Figura 11 – Blocos de Tx ISDB-T *full-seg* com três camadas hierárquicas e TS independente representado no software GNU Radio Companion.



Fonte: Próprio autor

Para a construção do transmissor ISDB-T no software GNU-Radio, foram escolhidos parâmetros calculados ou retirados de tabelas e manuais. Primeiramente, será mostrado a imagem para se ter uma visão geral da organização e ligação dos blocos para simulação, depois será dada uma explicação sobre a função de cada um deles dentro do software GNU, explicando a função de seus parâmetros e também os valores de cada um. A tabela 3 abaixo, tem a função de orientar o projetista no momento de escolher os parâmetros mais adequados para o desenvolvimento de um sistema de transmissão de imagem digital padrão ISDB-T. Os dados de convolutional code, definem a taxa de codificação convolutional para cada tipo de modulação, dependendo do modo de operação do transmissor.

Para este trabalho, foi escolhido uma taxa de código de codificação de 2/3 para a modulação QPSK e 16QAM, e uma taxa de codificação de 3/4 para a modulação 64QAM, sendo que cada uma das modulações opera no modo 3 de transmissão. Outro fator que deve ser levado em conta, é o pacote de fluxo de transporte, definido na tabela abaixo

como TSP, estes valores variam de acordo com o tipo de modulação, modo de transmissão e com a taxa do código convolucional.

Tabela 2 – Parâmetros para transmissão ISDB-T.

Carrier Modulation	Convolutional Code	Number of TSPs transmitted (Mode 1,2,3)	Data Rate (kbps)			
			Guard Ratio 1/4	Guard Ratio 1/8	Guard Ratio 1/16	Guard Ratio 1/32
DQPSK QPSK	1/2	12/24/48	280,85	312,06	330,42	340,43
	2/3	16/32/64	374,47	416,08	440,56	453,91
	3/4	18/36/72	421,28	428,09	495,63	510,65
	5/6	20/40/80	468,09	520,10	550,70	567,39
	7/8	21/42/84	491,50	546,11	578,23	595,76
16QAM	1/2	24/48/96	561,71	624,13	660,84	680,87
	2/3	32/64/128	748,95	832,17	881,12	907,82
	3/4	36/72/144	842,57	936,19	991,26	1021,30
	5/6	40/80/160	936,19	1040,21	1101,40	1134,48
	7/8	42/84/168	983,00	1092,22	1156,47	1191,52
64QAM	1/2	36/72/144	842,57	936,19	991,26	1021,30
	2/3	48/96/192	1123,43	1248,26	1321,68	1361,74
	3/4	54/108/216	1263,86	1404,29	1486,90	1531,95
	5/6	60/120/240	1404,29	1560,32	1652,11	1702,17
	7/8	63/126/252	1474,50	1638,34	1734,31	1787,28

Fonte: (MUTTONI, 2017)

4.2.1 File Source (Arquivo fonte)

Esse bloco inicial, representado na figura 12 tem o objetivo de permitir ao simulador utilizar arquivos que, após lidos por esse bloco, possam ser enviados ao próximo bloco no formato adequado. Os arquivos aceitos por esse bloco, são dados não tratados no em formato binário. Para esse projeto foram utilizados dois arquivos de vídeo MPEG2 diferentes para que possam ser transmitidos simultaneamente pelas camadas hierárquicas distribuídas ao longo do sinal OFDM. Na configuração desse bloco se encontram os seguintes parâmetros:

- *Vec. length*: Mostra o tamanho dos itens que sairão do bloco, especificamente dados em bytes.

- *Repeat*: Indica se há necessidade do arquivo ser lido novamente ao chegar no final do ciclo ou não.
- *File*: Esse parâmetro mostra a localização onde se encontra o arquivo que será utilizado pelo software.

Figura 12 – Representação do bloco File Source.



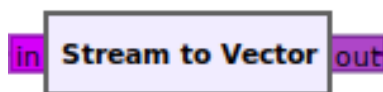
Fonte: Próprio autor

4.2.2 *Stream to Vector*

Este bloco, pertencente à biblioteca do software GNU Radio, tem a função de converter um fluxo de itens/amostras em um fluxo de vetores com um número de itens. Como é possível notar na figura 13, foram utilizados dois blocos de conexão para ligar os blocos com valores diferentes de número de vetores. Os parâmetros existentes neste bloco são:

- Num. itens: Número de itens de entrada consecutivos para concatenar em um único vetor de saída. Para fazer o casamento do número de vetores do bloco *File Source* com o bloco Reed Solomon, foi escolhido o valor de 188 para esse parâmetro. Este valor representa o tamanho
- Vec Length: Parâmetro que determina o comprimento do vetor de saída. O tamanho do vetor para conectar um bloco com outro é 1.

Fonte: (GNURADIO, 2020).

Figura 13 – Representação do bloco *Stream to Vector*

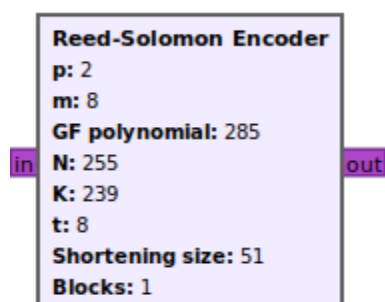
4.2.3 Reed Salomon

Este bloco possui umas das descrições mais complexas entre todos os blocos encontrados no transmissor ISDB-T. Este seguinte bloco, retirado da biblioteca do GNU Radio companion, tem a função de inserir bytes de paridade no final do pacote de dados através do uso da codificação RS.

A codificação RS, como mencionada na etapa de introdução ao sistema ISDB-T, trata-se de um sistema corretor de erros que se utiliza de um polinômio gerado pelo método da álgebra de campos finitos (GF) muito utilizado para correção de erros aleatórios e em rajadas, como os que são provocados por ruído impulsivo. Para este projeto foram utilizados dois codificadores Reed Solomon, uma para cada camada hierárquica, mas pode-se notar na figura 14. Esse parâmetro é essencial para o correto funcionamento do bloco. Os parâmetros utilizados para configurar esse bloco estão logo abaixo, e seus valores podem ser vistos na figura 14.

- *p*- Este parâmetro indica em que módulo serão realizadas as operações utilizadas no código.
- *m*- Neste parâmetro deve ser escrito o número de bits que formarão o símbolo.
- *GF polynom*- Esse é o polinômio gerador (polinômio primitivo do campo finito da teoria de Galois), explicado no capítulo anterior.
- *N*- Número de símbolos na entrada do código.
- *K*- Número de símbolos na saída do código.
- *Shorten size*- Quantidade de símbolos adicionados na entrada e retirados na saída do bloco. Blocos - Número de blocos para serem processados de uma vez.

Fonte: (GNURADIO, 2020).

Figura 14 – Representação do bloco *Reed-Solomon*

4.2.4 *Energy Dispersal* (dispersor de energia)

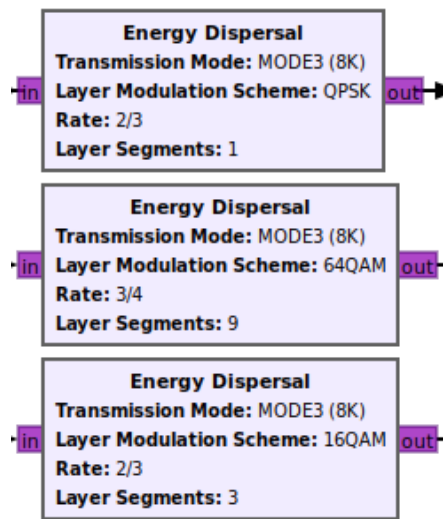
Após o sinal passar pelo codificador Reed Solomon, ele deve entrar pelo dispersor de energia. Este bloco tem a função de fazer o espalhamento de erros de código que podem estar concentrados em cada símbolo para que assim, a correção de erros possa ser feita mais facilmente nas próximas etapas. Este bloco, encontrado na biblioteca do software GNU Radio Companion. O funcionamento deste bloco consiste na geração de uma sequência pseudo aleatória de bits. Este modelo de transmissor ISDB-T possui três dispersores de energia na sua etapa de codificação, um para cada camada hierárquica. Os parâmetros destes blocos estão descritos abaixo e seus valores podem ser vistos na figura 15.

- *Transmission Mode*: Parâmetro que determina o modo de transmissão.
- *Layer Modulation Scheme*: Este parâmetro determina o tipo de modulação utilizada, podendo ser QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dependendo dos requisitos necessários de transmissão.
- *Rate*: Representa a taxa de codificação de uma das camadas hierárquicas.
- *Layer Segments*: Este parâmetro representa o número de seguimento de uma das camadas hierárquicas.

Fonte: (GNURADIO, 2020).

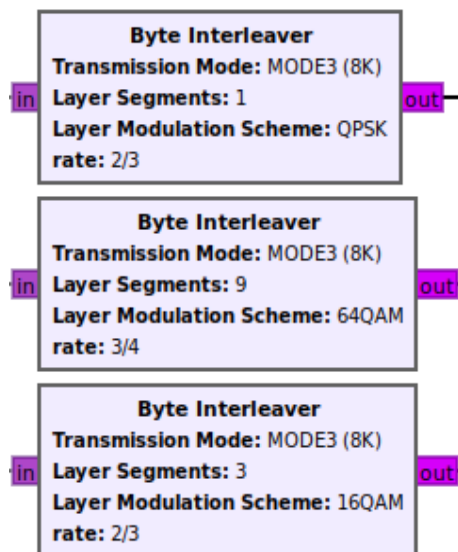
4.2.5 *Byte Interleaver*

Este bloco desenvolvido por (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020), tem a função de basicamente aumentar a capacidade de correção de erros do código Reed Solomon. Esse processo auxilia na redução dos efeitos negativos causados por algum ruído impulsivo e possíveis erros de codificação de blocos anteriores. Por se tratar de um transmissor ISDB-T com TS independente para três sinais base diferentes, foram utilizados neste projeto,

Figura 15 – Representação de dois blocos *Energy Dispersal*.

três Entrelaçadores de Byte, com tipos de modulação, número de segmentos e taxa de codificação diferentes, uma para camada hierárquica A, um para camada hierárquica B, e outro para a camada hierárquica C. A função dos parâmetros existentes neste bloco estão descritas logo abaixo, enquanto que os valores de cada um podem ser visualizados na figura 16.

- *Transmission Mode*: Parâmetro que determina o modo de transmissão. O modo 3 foi escolhido por possuir uma quantidade maior de portadoras totas, sendo neste caso, 8192 portadoras totais.
- *Layer Segment*: Este parâmetro representa o número de seguimento de uma das camadas hierárquicas. Para cada método de modulação foi utilizado uma quantidade de diferente de segmentos, no qual quaat maior o número de segmentos por método de modulação, maior quantidade de portadoras.
- *Layer Modulation Scheme*: Este parâmetro determina o tipo de modulação utilizada, podendo ser QPSK, 16QAM, 64QAM, dependendo dos requisitos necessários de transmissão do quadro OFDM. Estes métodos diferentes de modulação foram escolhidos para obter melhores resultados de transmissão para ambientes tanto com muito atraso multi-caminho, como para receptores em regiões distantes.
- *Rate*: Representa a taxa de codificação de uma das camadas hierárquicas.

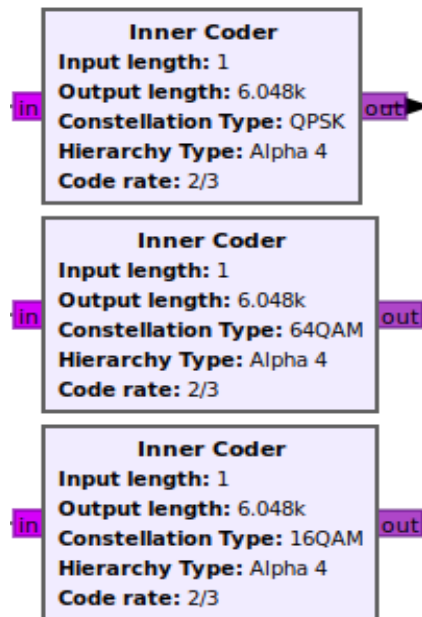
Figura 16 – Representação dos blocos *Byte Interleaver*.

Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.6 *Inner Coder*

Este bloco, encontrado em pacotes de blocos para sistemas de transmissão de imagem digital criados por (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020), desenvolve o papel de um codificador Viterbi, também conhecido como codificador interno. Como todos os blocos anteriores da etapa de codificação do transmissor ISDB-T, foi necessário utilizar três codificadores internos, um para cada camada hierárquica, pois a taxa de dados e codificação são diferentes. Os parâmetros destes blocos estão dados logo abaixo, enquanto que seus valores podem ser vistos na figura 17.

- *Input length*: Parâmetro que determina o comprimento do vetor de entrada do codificador interno.
- *Output length*: Este parâmetro representa a largura da segmentação de banda da modulação OFDM. Este parâmetro é definido pelo tempo de cada símbolo do sinal OFDM, $1008\mu\text{s}$ multiplicado pela largura de banda do sinal OFDM, que é 6MHz, dando assim 6048, que representa a quantidade de portadoras que levam as informações.
- *Constellation Type*: Este parâmetro determina o tipo de modulação utilizado em uma das camadas hierárquicas.
- *Hierarchy Type*: Code rate: Este parâmetro representa a taxa de codificação de uma das camadas hierárquicas.

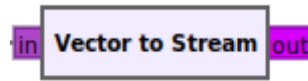
Figura 17 – Representação do bloco *Inner Coder*

Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.7 *Vector to Stream*

Este bloco representado na figura 18, fornecido pela biblioteca do software GNU Radio, tem a função de converter um fluxo de vetores em um fluxo de itens. Para este projeto, foram utilizados dois destes blocos de conversão, sendo um para cada camada hierárquica. Os seus parâmetros e respectivos valores se encontram logo abaixo:

- *Num of Items*: Parâmetro que define o número de itens para cada vetor de entrada. O seu valor é de 6048. O qual é o tamanho do vetor de saída do codificador interno
- *Vector Length*: Parâmetro que define o tamanho do vetor de saída. O valor dado para o casamento dos blocos deve ser igual a 1.

Figura 18 – Representação do bloco *Vector to Stream*

Fonte: (GNURADIO, 2020).

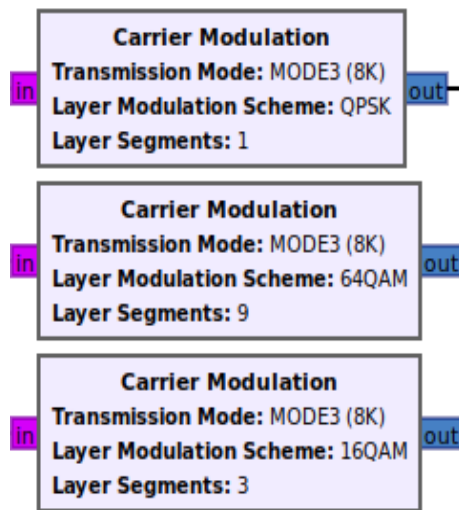
A seguinte etapa do transmissor ISDB-T, trata-se do processo de modulação do sinal banda base após ser codificado. Os sinais que anteriormente estavam sendo transportados de forma separada, agora são então unidos por um combinador hierárquico, onde estarão também posicionados para que cada uma das modulações estejam em seus respectivos números de segmentos que compõem as camadas hierárquicas.

Sobre os blocos que seguem neste módulo do transmissor, pode-se dizer que todos eles possuem os mesmos parâmetros de modulação, mas tais valores podem ser demonstrados em ordem para que fiquem mais organizados.

4.2.8 *Carrier Modulation*

Este bloco, desenvolvido por (QUIMBITA, 2016), executa a modulação das portadoras do sinal OFDM para cada uma das camadas hierárquicas. Os parâmetros deste bloco estão descritos logo abaixo, enquanto que seus valores podem ser vistos na figura 19.

- *Transmission Mode*: Parâmetro que define o modo de transmissão.
- *Layer Modulation Scheme*: Parâmetro que define o tipo de sub portadora OFDM que será utilizado para modulação.
- *Layer Segments*: Parâmetro que define o número de segmentos de uma das camadas hierárquicas.

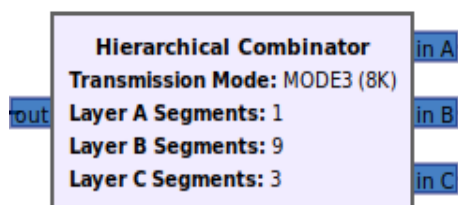
Figura 19 – Representação do bloco *Carrier Modulation*.

Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.9 Hierarchical Combinator

Este bloco, desenvolvido também por (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020), tem a função de um combinador hierárquico, realizando assim, a multiplexação de sinais das diferentes tipos de modulação em um único sinal contendo multiplexadoras. Os parâmetros deste bloco estão descritos logo abaixo e os seus valores podem ser vistos no bloco da figura 20.

- *Transmission Mode*: Parâmetro que determina o modo de transmissão utilizada no sistema OFDM.
- *Layer A, B, C Segment*: Parâmetro que determina o número de segmentos nas camadas hierárquicas A, B e C. Para a camada A foi utilizado 1 segmento e para a camada B os 12 restantes. A camada C não foi utilizada para esse tipo de transmissor ISDB-T.

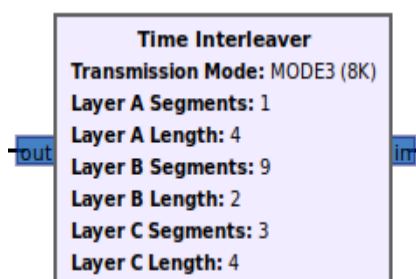
Figura 20 – Representação do bloco *Hierarchical Combinator*.

Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.10 *Time Interleaver*

O bloco Entrelaçador temporal, encontrado em páginas da web de desenvolvedores de sistemas de transmissão de imagem digital para GNU Radio, tem a função de realizar atraso no tempo para os sinais das subportadoras do quadro OFDM. Cada portadora pode receber um valor de atraso independente, dependendo da necessidade de robustez da transmissão. A representação de cada um dos parâmetros, está descrita logo abaixo, enquanto que seus respectivos valores podem ser vistos na figura 21.

- *Transmission Mode*: Parâmetro que define o modo de transmissão, podendo ser Mode 1, Mode 2 ou Mode 3.
- *Layer A, B, C Segment*: Parâmetros que definem o número de segmentos para as camadas hierárquicas A, B e C.
- *Layer A, B, C Length*: Parâmetros que definem o comprimento das camadas hierárquicas A, B e C.

Figura 21 – Representação do bloco *Time Interleaver*.

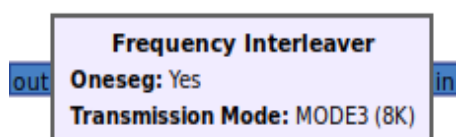
Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.11 *Frequency Interleaver*

Este bloco, desenvolvido também por (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020), tem a função de realizar o embaralhamento das frequências das portadoras para evitar problemas destrutivos do sinal transmitido pelo ruído com memória. Os parâmetros deste bloco estão presentes logo abaixo, enquanto que seus valores escolhidos para esse projeto em específico podem ser vistos na figura 22.

- *Oneseg*: Parâmetro que define se existe uma transmissão Oneseg dentro de todo sinal transmitido. O parâmetro é habilitado simplesmente escolhendo ‘Sim’ ou ‘Não’.
- *Transmission Mode*: Parâmetro que define o modo de transmissão, podendo ser Mode 1, Mode 2 ou Mode 3.

Figura 22 – Representação do bloco *Frequency Interleaver*.



Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.12 *Skip Head*

Este bloco, presente na biblioteca do software GNU Radio, tem a função de pular (desconsiderar) os primeiros N itens /amostras que entram e, a partir de então, faz uma cópia das amostras restantes para a saída. Uma das utilizações mais comuns para este bloco são as execuções de testes de desenvolvimento para sistemas de comunicações ou fontes com metadados ou lixo no início de um conjunto de dados. Os parâmetros deste bloco estão descritos abaixo, enquanto que seus valores podem ser vistos na figura 23.

- *Num Items*: Número de itens/ amostras a serem desconsiderados no início do conjunto de dados.
- *Vector Length*: Representa o tamanho do vetor de saída. No caso, este valor representa as portadoras de dados que existem dentro do valor total de 8192.

Figura 23 – Representação do bloco Skip Head.



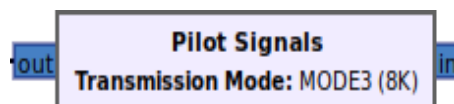
Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.13 Pilot Signals

Este bloco, desenvolvido por (QUIMBITA, 2016), tem a função de adicionar sinais pilotos aos sinais das portadoras, com o intuito de transmitir informações adicionais essenciais para recepção do sinal. O único parâmetro existente nesse bloco, presente na figura 24 é:

- *Transmission Mode*: Parâmetro que define o modo de transmissão, podendo ser Mode 1, Mode 2 ou Mode 3. Para esse projeto foi utilizado o Modo 3 de transmissão.

Figura 24 – Representação do bloco Pilot Signals.



Fonte: (GNURADIO, 2020)

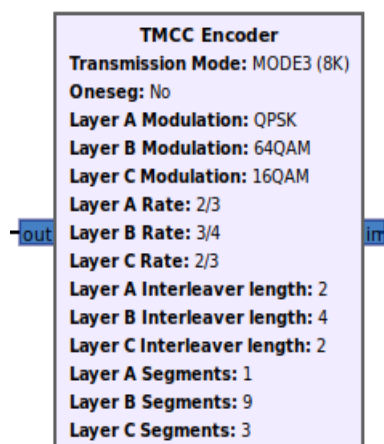
4.2.14 TMCC Encoder

Este bloco, criado por (MORALES GASTON ; INGLÉS, 2020), tem o objetivo de inserir as portadoras TMCC ao símbolos do quadro OFDM para transportar as informações das camadas hierárquicas e informações de controle para que o sinal não sofra problemas de reprodução ao chegar no receptor. Os parâmetros deste bloco estão descritos logo abaixo, já com os valores pertencentes a cada um deles, se encontram na figura 25.

- *Transmission Mode*: Parâmetro que define o modo de transmissão, podendo ser Mode 1, Mode 2 ou Mode 3.

- *Oneseg*: Parâmetro que define se a transmissão vai ser Oneseg ou não. O parâmetro é habilitado simplesmente escolhendo ‘Sim’ ou ‘Não’.
- *Layer A, B, C Modulation*: Parâmetro onde se insere o tipo de modulação das camadas hierárquicas A, B e C. Os tipos de modulação utilizados podem ser QPSK, 64QAM e 16QAM, variando para cada camada hierárquica de acordo com a necessidade de cada projeto.
- *Layer A, B, C Rate*: Parâmetro que define a taxa de codificação da camada hierárquica A, B e C. Estes parâmetros foram escolhidos de acordo com a norma internacional do padrão ISDB-T. O valor da taxa de codificação da camada B foi escolhida para ser maior, ou seja 3/4 devido ao número de dados da camada B ser maior.
- *Layer A, B, C Interleaver length*: Parâmetro que define o comprimento do entrelaçamento da camada hierárquica A, B e C.
- *Layer A, B, C Segment*: Parâmetro onde se insere o número de segmentos da camada hierárquica A, B e C.

Figura 25 – Representação do bloco *TMCC Encoder*.



Fonte: (GNURADIO, 2020)

4.2.15 FFT (Transformada Rápida de Fourier)

Este bloco, disponível na biblioteca do software GNU Radio Companion, tem a função de receber um vetor de números reais ou complexos e calcula a sua FFT (Transformada Rápida de Fourier) ou IFFT (Inversa da Transformada Rápida de Fourier).

Os parâmetros deste bloco presentes na figura 26 são os seguintes: FFT Size: Este parâmetro é utilizado para definir o número de amostras para cada cálculo de FFT, o qual também determina o número de pontos que estarão na saída do bloco visualizando em um diagrama de constelações.

- *Forward/ Reverse*: A partir deste parâmetro é possível selecionar o tipo de transformada rápida de fourier que vai ser utilizada, podendo ser direta ou inversa.
- *Window*: Este parâmetro determina o tipo de janela aplicada para um conjunto de amostras antes que a FFT seja efetuada. O janelamento escolhido foi o retangular por aproveitar uma área maior da banda do sinal OFDM e logo, a potência.
- *Shift*: Com este parâmetro se escolhe adicionar ,ou não, um "FFTShift"(Deslocamento da FFT), ou seja, desloca um componente DC para o centro do espectro, podendo ser visualizado no gráfico do domínio frequência.
- *Num. of Treads*: Define o número de passos que devem ser atribuídos para executar a FFT.

Figura 26 – representação do bloco FFT.



Fonte: (GNURADIO, 2020)

4.2.16 OFDM *Cyclic Prefixer*

Este bloco, pertencente à biblioteca do software GNU Radio, adiciona o prefixo cíclico e uma modulação de pulso em símbolos OFDM. Na entrada do bloco são recebidos sinais de símbolos no domínio tempo. Opcionalmente, os quadros inteiros podem ser processados. Para fazer o sincronismo de transmissão e recepção e eliminar de forma eficiente a interferência intersimbólica, é que se utiliza um prefixo cíclico. Assim, as primeiras N amostras do sinal, se copiam da mesma forma que até o final do sinal. A figura 27 mostra o bloco OFDM Cyclic Prefixer o qual possui apenas uma entrada e uma saída. O bloco possui os seguintes parâmetros:

- *FFT Length*: Comprimento dos símbolos do vetor da transformada rápida de Fourier.
- *CP Length*: Comprimento das amostras do prefixo cíclico.
- *Rolloff*: Comprimento do flanco de decaimento em amostras. Aplica o fator de rolloff ou decaimento no sinal aplicado na entrada do bloco. O número de *rolloff* aplicados ao sinal pode estar entre zero e valor do comprimento das amostras do prefixo cíclico.
- *Length Tag Key*: Parâmetro utilizado para processamento em quadros, a chave do comprimento da Tag (Etiqueta).

Obs: Este bloco tem sua entrada e saída do tipo complexo e normalmente se encontra na saída do bloco FFT (normalmente se o mesmo está configurado para transformada inversa de Fourier).

Figura 27 – Representação do bloco *OFDM Cyclic Prefixer*.



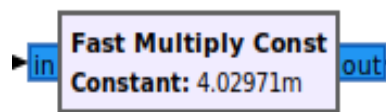
Fonte: (GNURADIO, 2020)

4.2.17 *Fast Multiply Constant*

Este bloco, pertencente à biblioteca padrão do software GNU Radio, tem a função de multiplicar um determinado sinal de entrada por uma constante escalar. O termo “*Fast*” (Rápido) se refere a performance do bloco. Dessa forma é possível melhorar a visualização do sinal na saída do transmissor através dos blocos de visualização gráfica do GNU Radio no caso de sinais de saída com uma amplitude muito pequena. O bloco representado na figura 28 possui os seguintes parâmetros:

- *IO Type*: Esse parâmetro define qual tipo de entrada e saída do bloco deve ser usado de acordo com o tipo do sinal de entrada que deve ser aplicado a esse bloco. Os tipos de entrada e saída devem ser idênticos, pois se trata apenas de uma multiplicação por um escalar e os tipos de I/O utilizados podem ser complexo, inteiro, real ou short.

- *Constant*: Parâmetro onde se insere o valor correto do escalar que deve ser usado para um determinado projeto. Neste projeto, este parâmetro serve para regular a amplitude do sinal de saída, tanto no domínio tempo, como no domínio frequência.
- *Vector Length*: Parâmetro que define o comprimento do vetor do código de entrada do bloco.

Figura 28 – Representação do bloco *Fast Multiply Const*.

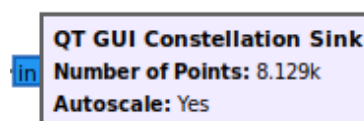
Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.18 QT GUI Constellation Sink.

O seguinte bloco, pertencente à biblioteca do software GNU Radio, tem a função de gerar gráficos de constelações de um simples sinal até múltiplos sinais no domínio complexo. Através deste bloco é possível configurar diversas variáveis para configuração gráfica como, ajuste de escala automática ou manual, cores do gráfico ou tipo de símbolo que será mostrado. Além disso, é possível configurar o tamanho da amostra FFT que pode ser visto logo abaixo na figura 29.

- *Number of Points*: Parâmetro definido para ter o mesmo tamanho da FFT, que tem o valor de 8192.

Figura 29 – Representação do bloco QT GUI Constellation Sink.



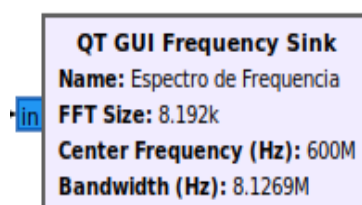
Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.2.19 QT GUI *Frequency Sink*

O seguinte bloco trata-se de um gerador de gráficos para que diversos sinais possam ser mostrados no domínio da frequência ao mesmo tempo e ainda com opção de mostrá-los em cores diferentes. O gráfico mostra o eixo das abscissas representando a frequência do sinal e o eixo das ordenadas representando o ganho do sinal em decibéis (dBm). Os parâmetros deste bloco são basicamente a respeito de configuração gráfica, posição da frequência central de transmissão e largura de faixa do sinal. Os seguintes parâmetros e os seus respectivos valores estão presentes na figura 30.

- *FFTsize*: Parâmetro que define o tamanho da FFT que devem ser computados.
- *Wintype*: Parâmetro que define o tipo de janela que vai ser aplicada no gráfico.
- *Center Frequency*: Parâmetro que define a frequência central do sinal. A frequência central foi escolhida para ser 600MHz que é mesma escolhida para ser a frequência de transmissão, que está dentro da faixa UHF.
- *Bandwidth*: Parâmetro que define a largura de banda do sinal que será mostrado na tela. O valor de 8,1269MHz foi escolhido por ser o valor definido pelo padrão internacional de largura de banda da transmissão ISDB-T.
- *Name*: Parâmetro onde pode se escolher um nome para que apareça no gráfico.
- *GUI Hint*: Parâmetro que arranja da melhor forma possível a interface gráfica do usuário (GUI).

Figura 30 – Representação do bloco QT GUI *Frequency Sink*



Fonte: (GNURADIO, 2020).

4.3 Aplicando modelo de canal AWGN para Receptor ISDB-T

Com o objetivo de simular a transmissão de um sinal OFDM do padrão ISDB-T, foi desenvolvido um modelo de canal e um receptor ISDB-T, através do software GNU Radio. O receptor desenvolvido nesse projeto servirá apenas de auxílio para compreender melhor o comportamento dos sinais transmitidos, sendo assim, o estudo dos blocos do transmissor não será aprofundado neste trabalho.

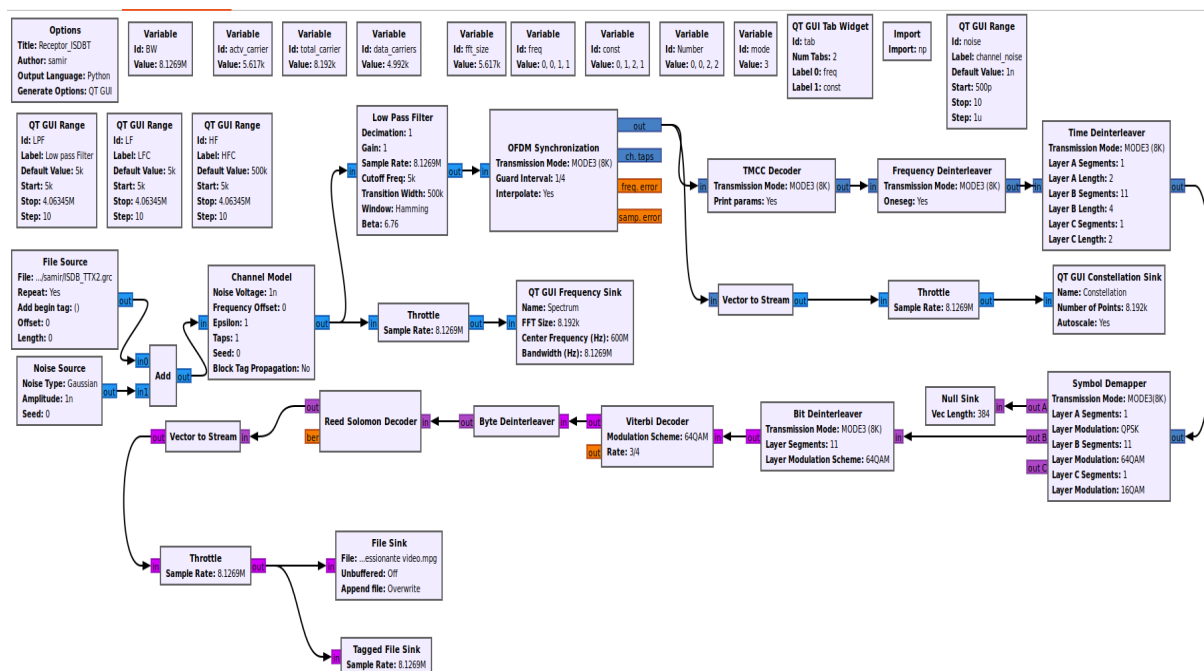
No modelo de canal criado, é possível aplicar sinais do tipo ruído gaussiano para testar como seria de fato as interferências reais existentes em uma transmissão de TV digital. Outro tipo de interferência que pode ser avaliado através do modelo de canal, é a interferência causada por atraso de multicaminho. Através dessa interferência é possível observar o desvanecimento do sinal ao chegar no receptor, devido a atenuação do multicaminho.

4.3.1 Receptor ISDB-T

O receptor desenvolvido para esse projeto, apresentado na figura 31, tem objetivo de servir como confirmação da recepção do sinal enviado através do modelo de canal. Os blocos do receptor possuem basicamente a função inversa dos blocos descritos no transmissor, com a diferença da existência de um sincronizador de quadro OFDM. O bloco sincronizador tem a função de determinar o instante ótimo do sinal OFDM, para tanto, esse processo se divide em quatro estágios diferentes que são o estágio de sincronismo temporal, de frequência, amostragem e quadro OFDM. Basicamente, os blocos do receptor ISDB-T estão divididos em filtragem, sincronização OFDM, Decodificador TMCC, Desentrelaçador temporal e de frequência, separação das camadas hierárquicas, desentrelaçador de bit, decodificadores viterbi e Reed Solomon e desentrelaçador de byte. As variáveis de cada um dos blocos foi escolhido de acordo com os dados definidos para este padrão de comunicação digital.

Dentre os blocos citados acima, um dos mais importantes para melhorar o desempenho do receptor, é o filtro passa-baixa, pois como ele é possível filtrar todas interferências que possam estar acima do valor da banda de transmissão do sinal OFDM. O valor do filtro passa baixo é definido como tendo um valor de frequência mínima de corte maior ou igual a metade da largura de banda do sinal banda base. No caso do nosso receptor, o valor da filtragem foi definido como 2,79MHz, o qual equivale a metade da banda útil do sinal OFDM. A metade da banda é utilizada, pois se considera como que o sinal não esteja sendo transportado por nenhuma portadora, ou seja, a frequência central do sinal OFDM seria zero, já que a outra metade da banda estaria em um valor de frequência negativo.

Figura 31 – Representação de Receptor ISDB-T por blocos do GNU Radio.



Fonte: Próprio autor.

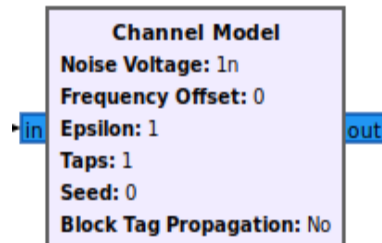
4.3.2 Modelo de Canal

O modelo de de canal existente no software GNU Radio, mostrado na figura 32, possui vários parâmetros que podem ser selecionados para que sejam de valores fixos ou variáveis, dependendo das necessidades do projeto. Os parâmetros encontrados no bloco de modelo de canal serão apresentados abaixo e possuem as seguintes características:

- *Noise Voltage*: Parâmetro que define o nível de ruído em forma de tensão. O valor do parâmetro depende do SNR desejado pelo projetista. O valor de 1nV foi definido para ser o menor valor de ruído possível para ser variado do modelo de canal.
- *Frequency Offset*: Define a frequência de offset normalizada. Quando o valor zero é selecionado, a frequência do sinal não recebe nenhum offset.
- *Epsilon*: O deslocamento de tempo de amostra para emular as diferentes taxas entre os relógios de amostra do transmissor e do receptor.
- *Taps*: Esse parâmetro ativa um filtro FIR para simular um perfil de atraso de multicaminho. O valor padrão é 1+1j, que significa que nenhum multicaminho está simulado.

- *Seed*: Parâmetro que define a semente geradora de números aleatórios para fontes de ruído.

Figura 32 – Representação de um modelo de canal através do bloco do software GNU Radio.



Fonte: Próprio autor.

Para desenvolver o experimento utilizando o modelo de canal, foi necessário foram necessários realizar duas etapas de experimento, a primeira delas foi utilizar o modelo de canal sem adição de ruído e a segunda foi testar o canal com aplicação de ruído branco gaussiano variável para verificar diferentes potências de ruído e também para testar o SNR na recepção do sinal. Na segunda etapa, é necessário testar o circuito com três níveis de ruídos gaussianos diferentes. Primeiro, verificar a distorção dos símbolos do diagrama de constelação para um ruído gaussiano com potência de 2dB, depois para uma potência de 10dB e por fim, com um ruído gaussiano de 16dB. Os valores escolhidos para as potências do ruído gaussiano foram determinados experimentalmente, de acordo com o nível de distorção aplicado ao sinal OFDM.

O diagrama em blocos que realiza o cálculo do SNR se encontra na figura 33 abaixo. Para realizar esse cálculo, foi necessário utilizar amostras da banda útil do sinal OFDM e do ruído gaussiano branco, realizar a conversão dos seus valores complexos em magnitude, aplicar a potência dos sinais por logaritmo e depois subtrair a potência resultante do sinal OFDM pela potência do ruído gaussiano. É importante destacar também que foi utilizado um filtro IIR para suavizar as variações de amplitude do SNR e das potências do AWGN e do espectro OFDM. O diagrama em blocos que realiza o cálculo do SNR pode ser representado pelas seguintes equações 4 e 5 abaixo.

$$SNR_{dB} = 20[\log|A_{OFDM}| - \log|A_{AWGN}|]$$

Equação 5 - Cálculo de SNR do sinal OFDM pelo ganho, (PEREIRA LÍVIA CIRNE; BEZERRA, 2008).

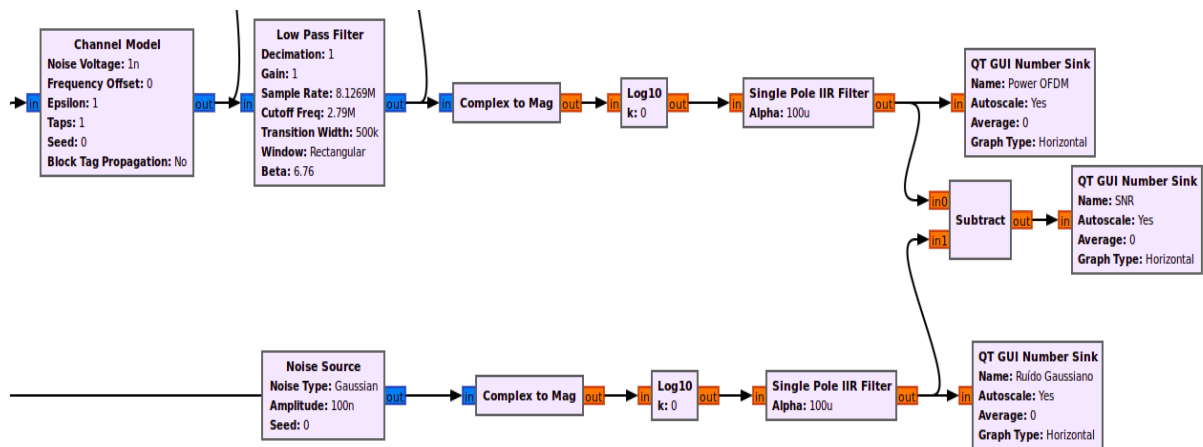
Onde $|A_{OFDM}|$ e $|A_{AWGN}|$ representam as magnitudes do sinal OFDM e do AWGN respectivamente. Por se tratarem de valores de amplitude do sinal OFDM no domínio frequência, se tratam de valores muito pequenos para serem utilizados na escala decimal, e logo, devem estar na forma logarítmica.

Ou ainda, o cálculo do SNR pode ser executado utilizando a potência do sinal OFDM (AKAMINE CRISTIANO; IANO, 2015).

$$SNR_{dB} = (P_{OFDM} - P_{AWGN})[dB]$$

P_{OFDM} e P_{AWGN} representam as potências do sinal OFDM e do AWGN respectivamente.

Figura 33 – Diagrama em blocos do circuito que realiza o cálculo do SNR do sinal OFDM com AWGN.

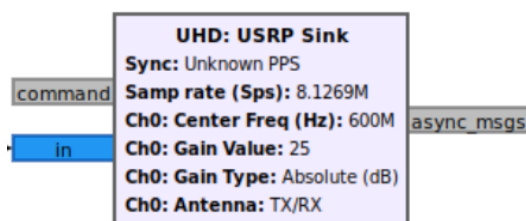


Fonte : Próprio autor.

4.4 Experimentos com USRP.

Para fazer a comprovação das simulações feitas com o software GNU, foi necessário executar uma emulação do sinal de padrão ISDB-T através do módulo USRP, o qual pode ser programado via software para funcionar como um transmissor deste padrão. Para que isso fosse possível, foi necessário usar os materiais descritos na seção 4.1 deste mesmo capítulo. No entanto, para que essas conexões funcionem, foi necessário acrescentar um bloco a mais na saída do transmissor para que, de fato, ocorra uma comunicação do software GNU Radio com o módulo USRP. O bloco utilizado para tal comunicação, se chama UHD: USRP Sink, mostrado na figura 34, e com ele é possível configurar o USRP para que opere como o transmissor simulado no computador.

Figura 34 – Representação do bloco UHD: USRP Sink



Fonte: (GNURADIO, 2020)

Como é possível observar na figura acima, os parâmetros que foram utilizados para realizar a transmissão do USRP, são configurados ainda neste bloco, assim, nenhuma configuração física no equipamento é necessária. Para que seja possível compreender melhor a função e origem de cada um dos parâmetros mais importantes deste bloco, seus dados serão disponibilizados de forma mais organizada na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Parâmetros escolhidos para o bloco UHD: USRP Sink.

Parâmetro	Função	Valor	Origem
Central Frequency (frequência Central).	Determina a frequência central da portadora OFDM.	600MHz	Valor retirado a partir da faixa da transmissão UHF para TV Digital Terrestre no Brasil.
Gain Value (valor de ganho).	Determina o ganho máximo na saída do transmissor USRP.	25dBm	Valor escolhido para que seja inferior ao valor máximo de ganho do analisador de espectro, que está em torno de 27dBm
Sample Rate (taxa de amostragem).	Determina o número de amostras por segundo, o qual é a mesma largura de banda total que será observada.	8,192MHz	Valor escolhido para que a visualização largura de banda total seja relativamente maior que a banda útil do sinal mostrado no domínio da frequência.
Bandwidth (largura de banda)	Largura de banda usada pelo filtro anti-aliasing do USRP.	6MHz	Valor escolhido para que o filtro anti-aliasing possa suavizar a faixa de frequência da banda útil.

Fonte: Próprio autor.

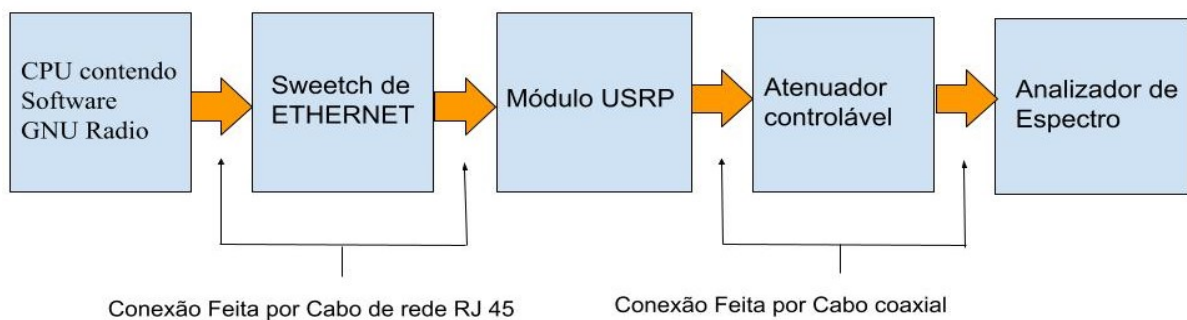
4.4.1 Experimento com Transmissor ISDB-T com Analisador de Espectro.

No momento que o bloco USRP Sink está configurado para realizar a transmissão, é preciso realizar a conexão dos cabos aos equipamentos na forma que funcione corretamente. Para que ocorra a comunicação entre o Computador e o Módulo USRP, é necessário o uso de um switch de rede, que funciona como uma interface onde se pode endereçar o dispositivo desejável para que receba ou envie informações do computador. No caso deste projeto, o USRP 2932 recebe informações do CPU para que funcione como um transmissor ISDB-T, e para isso, se comunica através do switch conectado por cabos de rede do tipo RJ 45.

Na saída do USRP, existem conectores para antenas e cabos coaxiais e é através desta saída que ocorre a transmissão do sinal. Para Realizar a medição do sinal transmitido, foi conectado um analisador de espectro a saída do módulo através de um cabo coaxial e entre os dois, foi usado um atenuador variável, para controlar o ganho máximo do

transmissor, evitando assim, uma sobrecarga de potência na entrada do analisador de espectro. A figura 35, mostra o diagrama em blocos das conexões feitas para executar o experimento em laboratório.

Figura 35 – Representação em blocos das ligações dos equipamentos usados para o experimento de transmissão do padrão ISDB-T utilizando o módulo USRP.



Fonte: Próprio Autor

Devido ao valor de potência de aproximadamente 5dBm que foi programado no USRP, através UHD do software GNU Radio e pelo fato de que o analisador de frequência estar conectado ao transmissor por cabo coaxial, foi necessário usar este atenuador variável para evitar que qualquer pico de ganho possa queimar ou causar algum defeito na entrada do analisador de espectro. Normalmente, o atenuador era selecionado para estar em um valor de atenuação de aproximadamente 20dBm no momento do acionamento do transmissor, depois que o sinal estabilizava, se podia deixar o valor de atenuação em zero. A figura 33 mostra uma foto do atenuador utilizado durante o experimento (WOLFF, 2022).

4.4.2 Experimento com USRPs Tx e Rx

Nestas etapas de experimentos, foi testado o desempenho da comunicação entre um USRP operando como transmissor e outro como receptor. O principal objetivo deste experimento é comprovar o funcionamento de um sinal real em relação às simulações realizadas com GNU Radio utilizando o modelo do canal e com o experimento realizado com cabo coaxial.

A frequência do sinal base e da portadora OFDM utilizados neste experimento, possuem os mesmos valores de 6MHz e 600MHz respectivamente, que foram usados nos experimentos anteriores, para buscar a maior fidelidade possível com uma transmissão

feita em UHF para sinais de rádio radiodifusão terrestre de televisão digital. Para verificar os fatores de ganho e distorção do sinal, foram testadas três distâncias diferentes entre as antenas dos módulos USRPs. primeiramente, foi testada a distância de 1m (um metro) entre as antenas, depois 50cm (cinquenta centímetros) e por último 10cm. O transmissor USRP teve sua potência configurada através do software GNU Radio, para operar no máximo e o receptor configurado da mesma forma.

5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

5.1 Resultados das simulações com GNU Radio

Nesta seção são apresentados os resultados encontrados na simulações feitas com o software GNU Radio Companion, onde estão contidos os gráficos representando o espectro de frequência e do diagrama de constelações de um sinal do sistema OFDM o qual é utilizado para transmissores do padrão ISDB-T. Cada um dos gráficos encontrados neste capítulo terá uma análise detalhada para observar se os parâmetros utilizados e os resultados encontrados na simulação estão de acordo com os possíveis resultados encontrados em sinais reais e também, com a teoria que se encontra por trás do sistema ISDB-T.

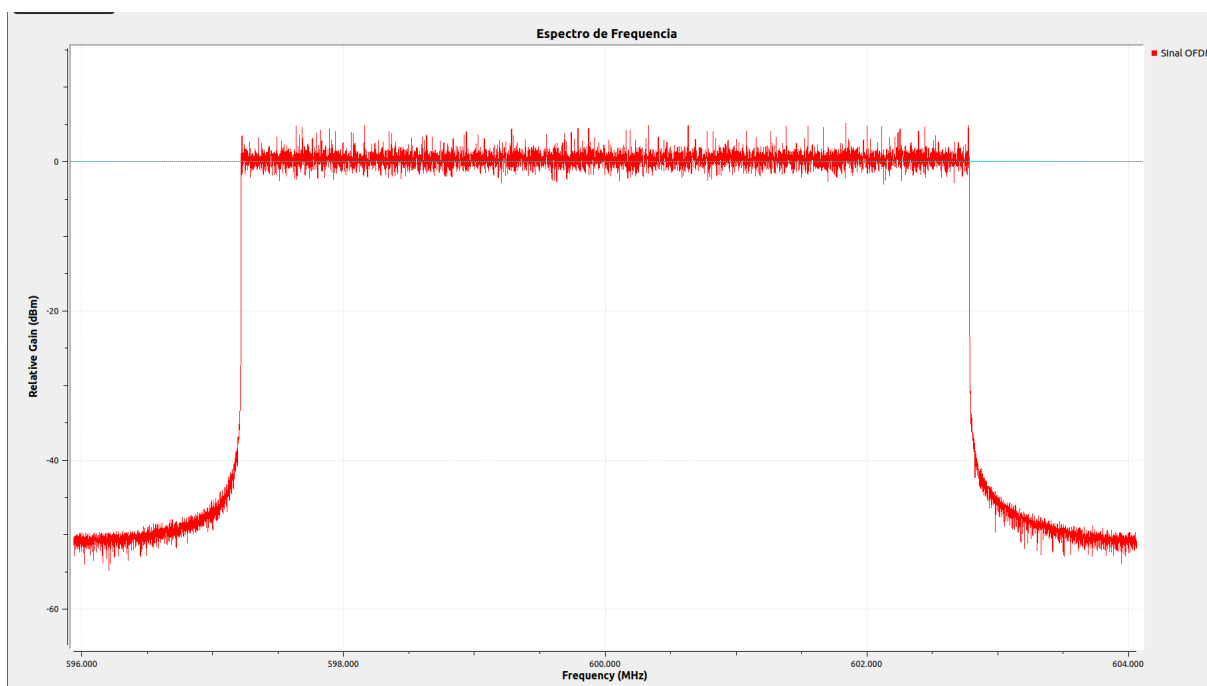
5.1.1 Resultado das Simulações com o Transmissor

Na figura 36 é possível observar o ganho relativo do sinal com espectro de frequência da largura de banda do sinal OFDM simulado com janelamento de FFT retangular, frequência central de 600MHz e uma largura de banda de 6MHz. Estes valores estão dentro do padrão de transmissão terrestre da faixa UHF para televisão digital no Brasil, que está entre 400MHz e 800MHz. Através desta simulação, foi possível observar que a frequência onde se inicia a banda útil do sinal OFDM está em 597,212MHz e a frequência onde termina a banda útil é de 602,79MHz. Ao fazer a subtração dos dois sinais, se encontra o valor de 5,58MHz, que é o mesmo valor da banda útil da modulação OFDM mencionada anteriormente na teoria do sistema ISDB-T.

Além da faixa de frequência, pode ser analisado, através do gráfico gerado pelo bloco QT GUI Frequency Sink do GNU Radio, o valor de ganho máximo que aparece na saída do transmissor que foi simulado. Para faixa de frequência simulada, foi possível encontrar um ganho de aproximadamente 0dBm, o que corresponde a 1mW, um valor de potência que foi definido através da normalização da potência do sinal. A potência do sinal antes da normalização, estava na faixa de -1,5dB, o qual foi corrigido com aplicação do bloco Fast Multiply Constant do GNU Radio.

Outro fator a ser levado em conta, principalmente para análise da frequência útil, foi a utilização de um janelamento de FFT retangular, o qual é mais adequado para obter uma resposta de ganho melhor quando o sinal chega ao receptor. Isso se deve ao fato de a distribuição da frequência ser mais homogênea, que resulta em uma integral com um valor maior de potência, se comparado a um sinal com mesma amplitude mais com janelamento não retangular.

Figura 36 – Espectro de Frequência do canal segmentado do transmissor ISDB-T utilizando janelamento retangular de FFT.

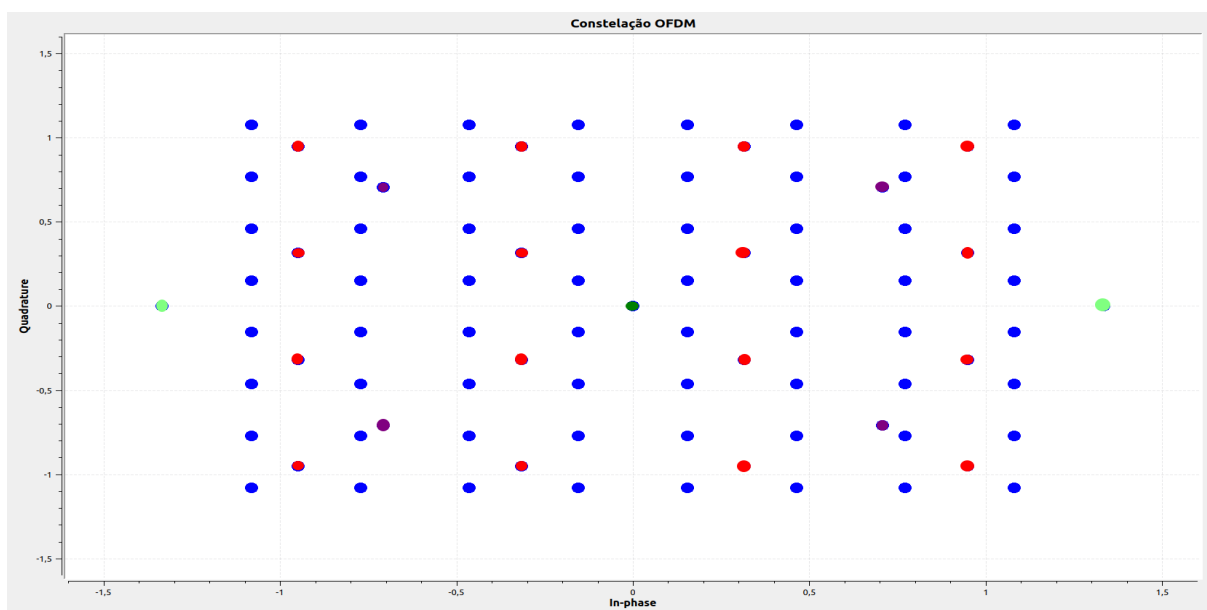


Fonte: Próprio Autor

Outro fator importante para ser analisado também, durante o experimento, é o gráfico gerado pelo bloco QT GUI Constellation Sink, mostrado na figura 37, que mostra os símbolos de todas as constelações, no domínio complexo, existentes ao longo de toda a banda OFDM, pois através dela é possível ver o padrão de espalhamento das modulações das subportadoras. As modulações das camadas hierárquicas utilizadas neste experimento podem ser facilmente visíveis no diagrama de constelações abaixo na figura 37, sendo elas, QPSK, com símbolos em violeta, 64-QAM com símbolos em azul, 16-QAM com símbolos em vermelho e as portadoras piloto com símbolos em verde, as quais as últimas serão utilizadas para gerar um sinal de referência para um determinado receptor e, portanto, se encontram na posição zero, pois não possuem modulação.

Este gráfico em específico, foi retirado da medida feita na saída do bloco TMCC Encoder, para que se possa mostrar todas as constelações de forma clara, pois logo depois do bloco FFT, já não é mais possível devido ao fato de que neste último são acrescentados os símbolos embaralhados na sua saída, os quais representam também o número de amostras para cada cálculo FFT.

Figura 37 – Diagrama de constelação das subportadoras QPSK, 16-QAM, 64-QAM e dos símbolos das portadoras piloto.



Fonte: Próprio autor.

A possibilidade de uso de mais de um tipo de modulação para as subportadoras do sinal OFDM, aumenta a possibilidade do uso de tipos de receptores para diferentes modulações, dependendo da necessidade. No caso deste transmissor ISDB-T independente, é possível transmitir uma mesma informação para receptores diferentes, ou simplesmente enviar informações diferentes para receptores que funcionam com modulações diferentes, dependendo da camada hierárquica que será utilizada na recepção.

Como neste transmissor foram utilizadas as modulações QPSK e 64QAM dentro da banda OFDM, dando um total de duas hierárquicas, dois tipos de receptores diferentes podem ser utilizados para receber informações iguais ou distintas. No caso da Modulação QPSK, ela é usada para apenas um segmento da banda, enquanto que o restante é utilizado pela modulação 64-QAM. Portanto, a modulação 64-QAM utiliza a maior parte da banda, estando essa em torno de 5,15 MHz de um total de 5,58 MHz de banda útil.

Outro fator importante a ser levado em conta, é que as modulações 64-QAM, 16-QAM e QPSK foram escolhidas para que possam cobrir o máximo de transmissões em regiões com canais de transmissão diferentes. No caso da modulação QPSK, ela foi usada pelo fato de ter uma distância grande entre os símbolos e um menor número deles também, nesse caso, sendo um para cada quadrante, diminuindo assim, o risco de ocorrer interferência intersimbólica em casos de propagação com multipercurso. A modulação 16-QAM seria como um intermediário, possuindo uma capacidade de transmissão maior,

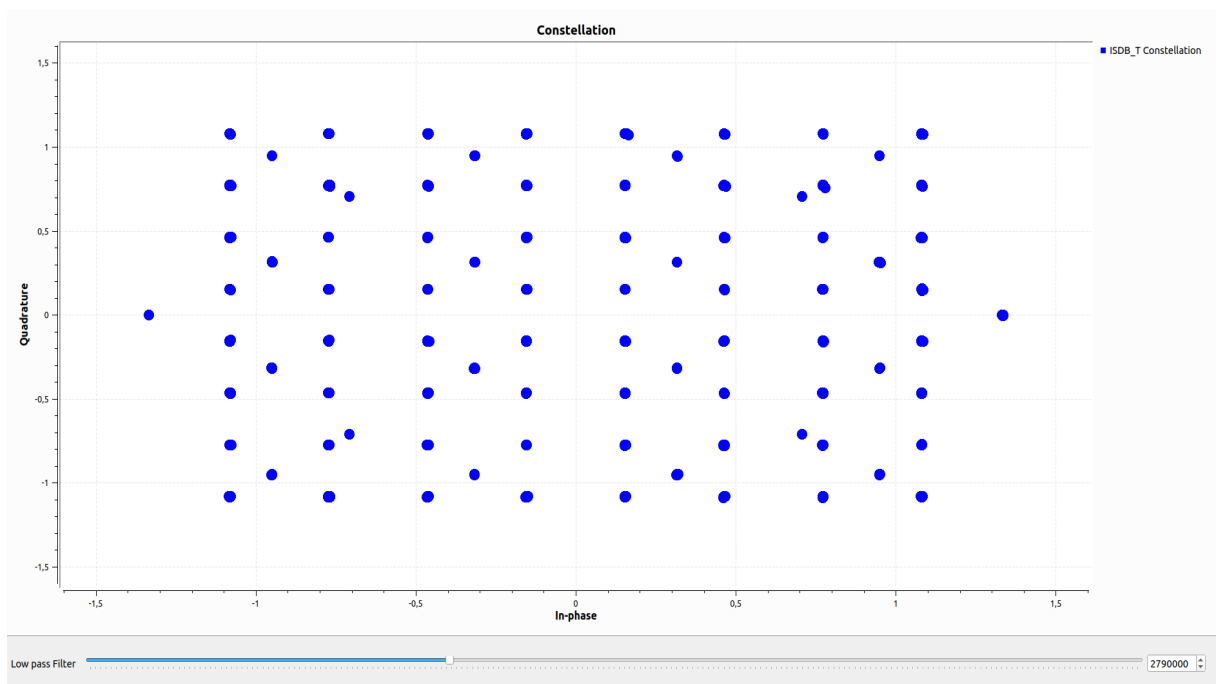
mas ao mesmo tempo possui baixa possibilidade de interferência intersimbólica, pois possui apenas quatro símbolos por quadrante.

5.1.2 Resultado dos experimentos com Receptor utilizando modelo de canal

Os resultados dos experimentos com modelo de canal serão utilizados para demonstrar o comportamento do sinal OFDM ao chegar em um receptor, passando por três tipos de situações diferentes, primeiro passando por um modelo de canal ideal, sem ruído ou qualquer tipo de atraso em frequência ou no tempo, depois passando por um canal com existência de ruído Gaussiano com três níveis de amplitude diferentes, para comparar os níveis de interferência, tanto no diagrama de constelações como no espectro de frequência.

Na figura 38 é possível observar o diagrama de constelações do sinal OFDM com os símbolos das três formas de modulações e mais os símbolos das portadoras piloto, todos sem nenhuma forma de ruído que seja capaz de causar interferência intersimbólica. Assim, pode se dizer que a recepção ocorreu de forma satisfatória se for considerado um modelo de canal ideal.

Figura 38 – Representação do diagrama de constelação do sinal OFDM no receptor ISDB-T através de um modelo de canal sem ruído.

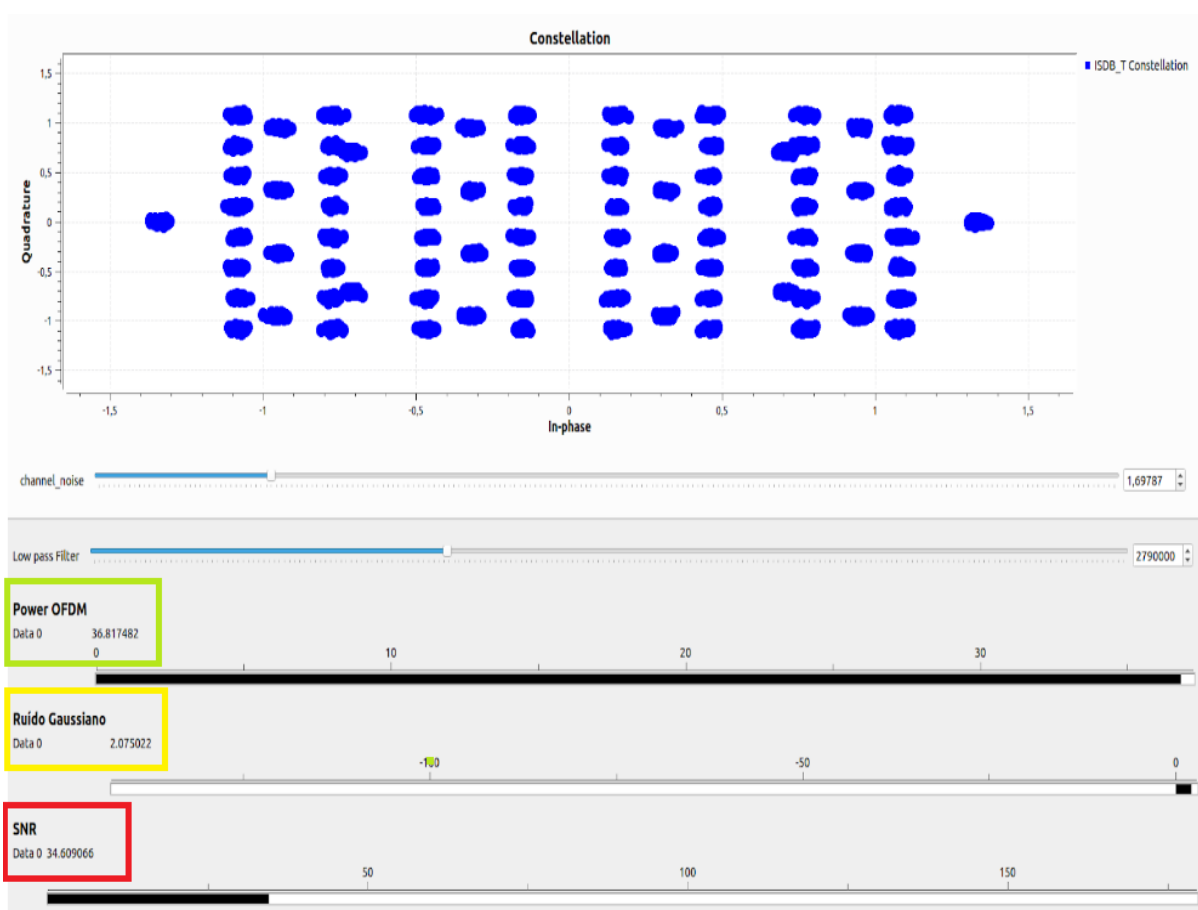


Fonte: Próprio autor

Na figura 38 acima, é possível observar também que o valor selecionado para o filtro passa-baixa, está exatamente de acordo com o mínimo valor possível de filtragem para que a largura da banda útil seja a máxima possível. Com isso também, se pode constatar que a potência recebida útil recebida também é máxima fazendo com que, dessa forma, o diagrama de constelações OFDM não sofra nenhuma distorção.

Para desenvolver a representação de um canal real com interferência de ruídos, foi acrescentado ao modelo de canal uma fonte de ruído branco gaussiano variável, para que seja possível experimentar níveis de ruído diferentes. Com isso, é possível calcular o SNR da transmissão padrão ISDB-T.

Figura 39 – Constelação OFDM na presença de Ruído de aproximadamente 2 dBm, potência do sinal OFDM, Potência do AWGN em dB, e SNR do sinal no modelo de canal.

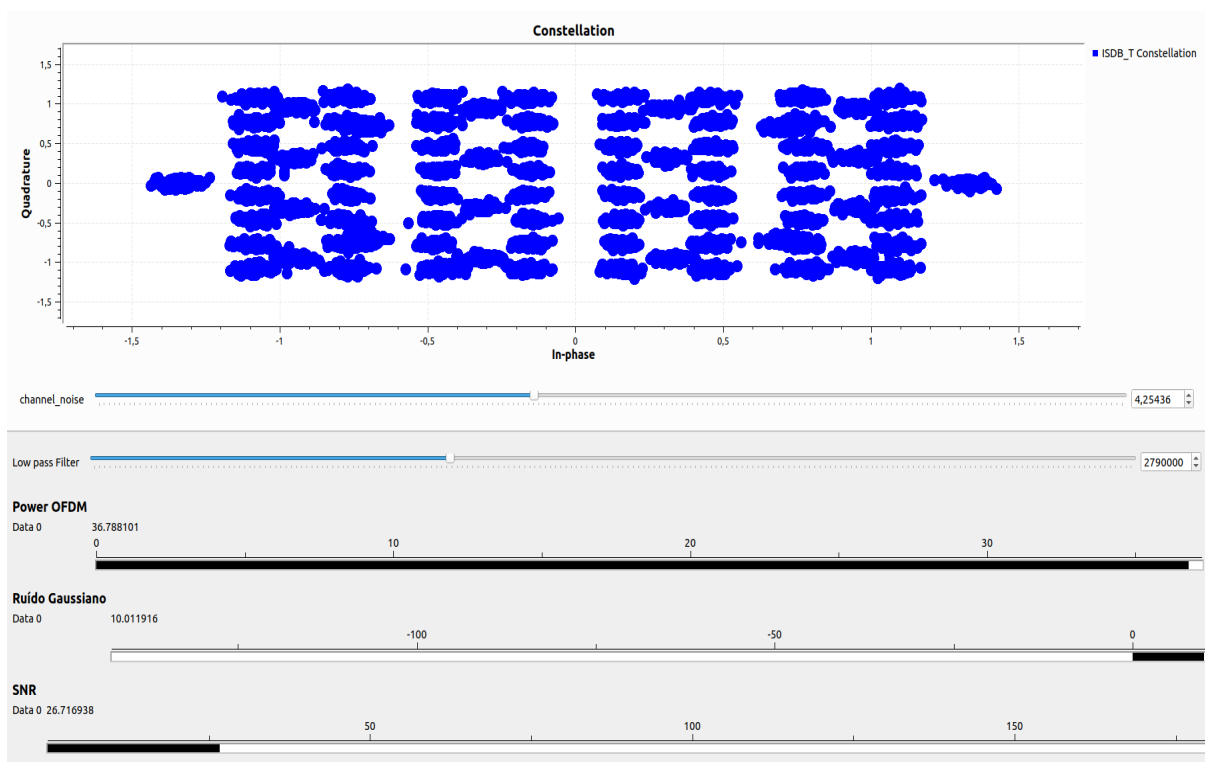


Fonte: próprio autor.

Na figura acima, pode-se observar que as distorções causadas pelo primeiro valor do AWGN no modelo de canal podem causar interferência intersimbólica na constelação OFDM. Isso se deve ao fato de que os símbolos possuem uma proximidade muito grande entre eles, já que se encontram três tipos de modulação diferentes no conjunto de camadas hierárquicas. As camadas que apresentaram, definitivamente, uma interferência intersimbólica na figura acima, são as camadas A e B, onde estão presentes as constelações das modulações QPSK e 64QAM, respectivamente. Os sinais que menos correm o risco de sofrer interferência são os sinais pilotos localizados nas extremidades direita e esquerda do diagrama de constelação.

Além do diagrama de constelações, estão presentes na figura, os valores de potência do sinal OFDM (destacado em verde), com um valor de 36,8175 dBm aproximadamente. Está presente também a potência do AWGN, descrito como Ruído Gaussiano, com um valor simulado de 2,075dBm aproximadamente (destacado em amarelo na figura 39). Na última barra horizontal da figura se encontra o valor de SNR simulado, com um valor aproximado de 34,609 (destacado em vermelho), o que caracteriza uma relação sinal ruído grande o suficiente para que possam existir interferências na transmissão.

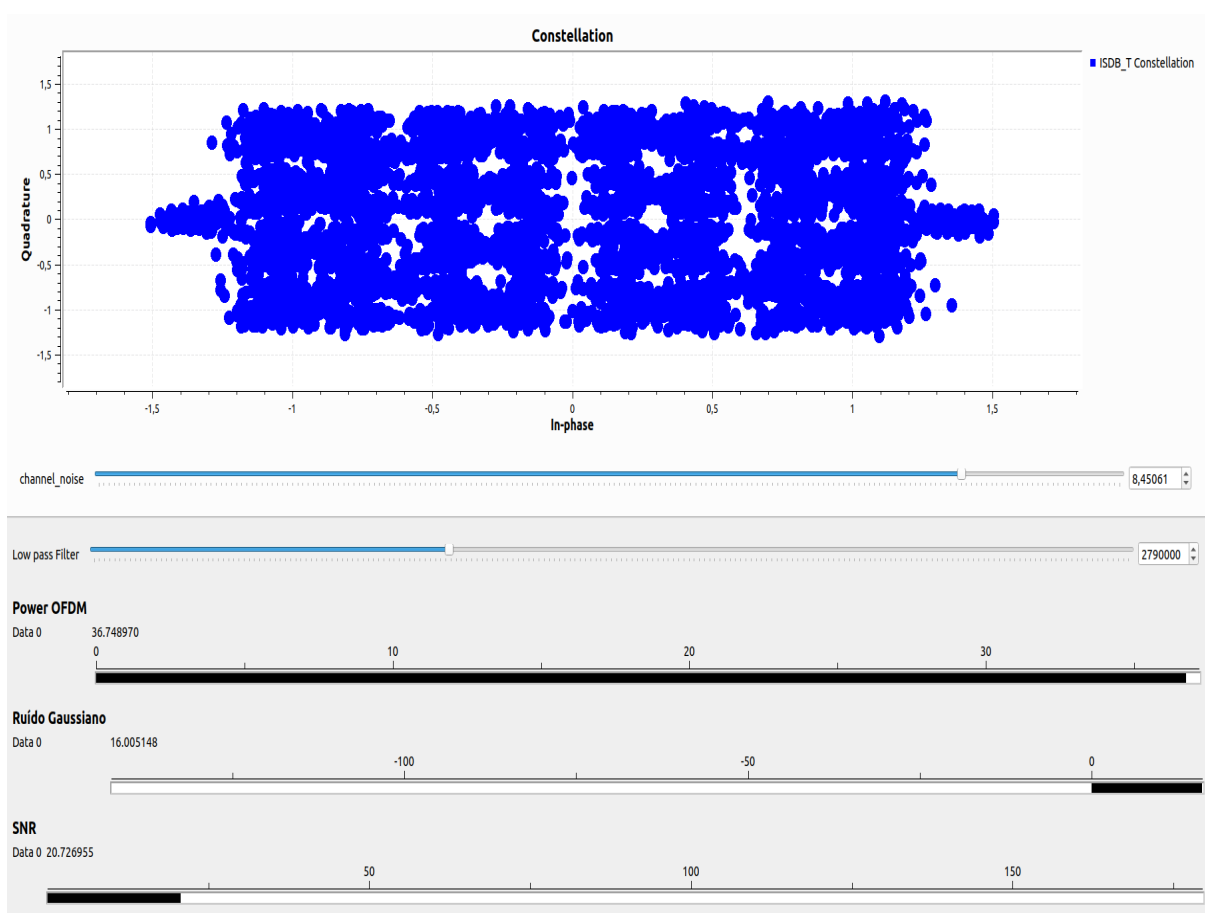
Figura 40 – Constelação OFDM na presença de Ruído de aproximadamente 10dBm, potência do sinal OFDM, Potência do AWGN em dB, e SNR do sinal no modelo de canal.



Fonte: Próprio autor.

Na figura 40, está mostrado o sinal da constelação OFDM apresentando uma interferência causada por um AWGN de 10,02dB aproximadamente. Para este nível de ruído é possível observar uma distorção de 29,57% maior no sinal, pois todos os símbolos de cada uma das camadas hierárquicas estão sofrendo interferência intersimbólica, menos as portadoras pilotos não chegaram a se mesclar com as demais devido a seu distanciamento, porém apresentam muito ruído nos símbolos.

Figura 41 – Constelação OFDM na presença de Ruído de aproximadamente 16dBm, potência do sinal OFDM, Potência do AWGN em dB, e SNR do sinal no modelo de canal.



Fonte: Próprio autor.

No diagrama de constelações da figura 41 acima, é possível notar uma interferência intersimbólica em todos os símbolos, o que caracteriza um ruído que envolve todas as camadas hierárquicas. Com este nível de ruído, muitos receptores reais poderiam apresentar o provável congelamento da imagem.

Após realizar os experimentos com o modelo de canal para diferentes níveis de ruído, foi possível criar a tabela 4, que relaciona o nível de ruído aplicado com os valores de SNR encontrados. Para o primeiro experimento, os dados não foram considerados na tabela, pois os valores de ruído gaussiano branco foram considerados insignificantes para causar distorção nas constelações OFDM .

Tabela 4 – Relação dos valores de SNR simulados , de acordo com o AWGN aplicado a um sinal OFDM com potência de aproximadamente 36,8dBm.

PAWGN [dBm]	SNR
2,075	34,61
10,01	26,71
15,91	20,9

Fonte: Próprio autor.

5.2 Resultados dos experimentos com o módulo USRP 2932.

Nesta última parte dos experimentos é onde se confirma que os resultados encontrados na seção 5.1 estão de acordo com dados reais que podem ser encontrados em um transmissor ISDB-T real. Portanto, aqui será mostrado o resultado da emulação feita em modulador USRP testado no laboratório da universidade que foi inicialmente descrito na subseção 3.4.

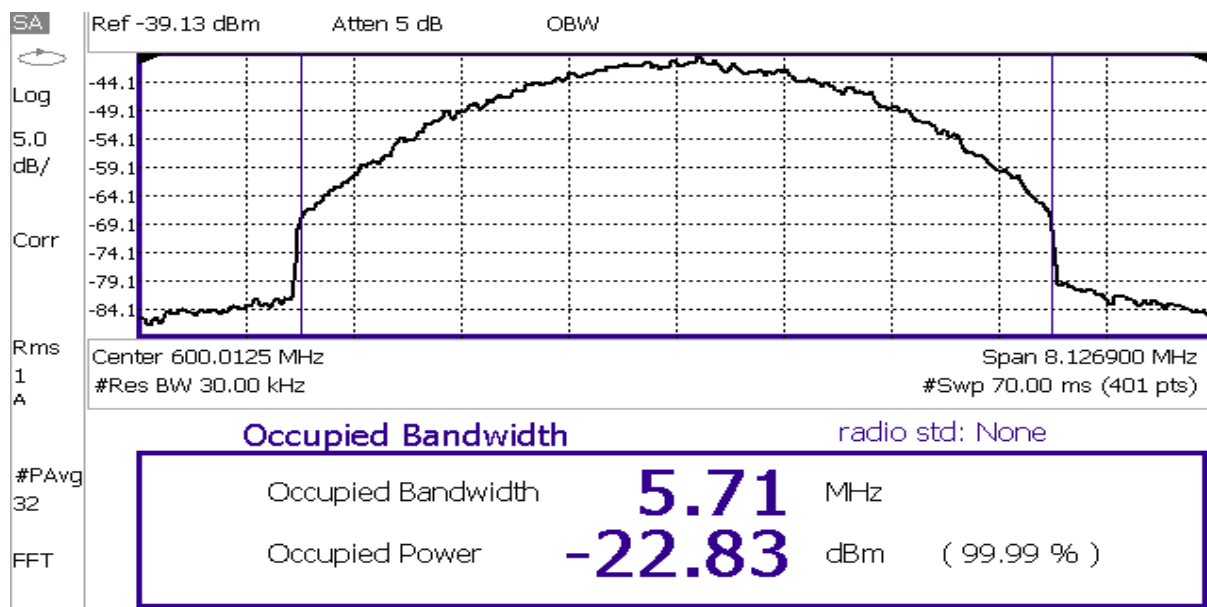
5.2.1 Resultados do Experimento com Transmissor ISDB-T no Analisador de Espectro.

A figura 42 mostra o gráfico do domínio frequência retirado do analisador de espectro com sinal OFDM. De acordo com as configurações selecionadas no menu do analisador de espectro, foi possível disponibilizar vários parâmetros importantes para confirmar o experimento, como frequência central, banda útil, potência útil e número de amostras por segundo. O valor da banda e potência do sinal em frequência que se necessita ser visualizado, pode ser selecionado manualmente pelo menu do analisador de espectro, no qual disponibiliza duas barras verticais que fazem a uma varredura da banda, dependendo da porcentagem da potência útil que é escolhida. Como visto na figura abaixo, a porcentagem da potência está em 99, que é o máximo que pode ser selecionado, com isso, é mostrado toda a banda útil do sinal que está dentro de 5,71MHz, um valor muito próximo daquele simulado no software GNU Radio, que estava em torno de 5,58MHz.

A potência útil encontrada no gráfico é menor que a potência que foi selecionada na saída do transmissor ISDB-T, pois o atenuador variável estava conectado entre o transmissor e o analisador de espectro com um valor de atenuação selecionado para 20dBm e foi selecionado uma atenuação interna, na entrada do analisador, no valor de 5dBm, como pode ser visto abaixo também na parte superior do gráfico. Além disso, é necessário contabilizar as atenuações existentes do cabo coaxial e suas conexões. Então, pode se dizer que o sinal OFDM sofreu uma atenuação de aproximadamente 26dBm, pois a potência de saída do transmissor foi selecionada para 1mW, o que equivale a 0dBm. Essa potência útil encontrada, só não é maior devido ao formato sinusoidal do espectro OFDM utilizado. Esse fato se deve ao uso de um janelamento de FFT não homogêneo, pois a forma mais adequada de janelamento deve ser do tipo retangular, exatamente como este que está presente na figura 42, o qual pôde ser corrigido nos últimos dias da elaboração do projeto de diplomação.

Para se obter uma imagem mais clara do sinal recebido, foi utilizada média quadrática do sinal, menu do analisador, no valor de 32 (trinta e duas) vezes, como pode ser visto o valor Pavg mostrado no canto inferior esquerdo do mostrador.

Figura 42 – Gráfico no domínio frequência do sinal OFDM recebido pelo analisador de espectro.



(Fonte: Próprio autor)

Como o experimento foi feito através de comunicação por cabo coaxial e um conjunto de atenuador variável com o analisador de espectro e não pelo ar livre, tem-se que considerar qual seria a distância percorrida pelo sinal no ar livre para uma frequência de 600MHz, para que a atenuação fosse a mesma apresentada neste experimento. Considerando que o sinal da banda útil que chega no analisador de espectro é -22,83dBm, tem-se um ganho na saída do transmissor de 3,17dBm, considerando o valor de 20dB de atenuação colocado no atenuador variável, mais a atenuação de 5dB selecionada para entrada do analisador de espectro e outras perdas nas conexões dos cabos com aproximadamente 1dB para um comprimento de 2,6m. Sabendo então que a atenuação encontrada entre transmissor e receptor é de 26dB pode-se fazer o cálculo relacionando a mesma atenuação para o espaço livre. Para isso podemos nos basear na equação 5, que representa a atenuação no espaço livre.

$$L = \frac{(4\pi)^2 d^2}{\lambda^2}$$

Equação 5 - Equação de atenuação de ondas eletromagnéticas no espaço livre (GOES, 2022).

No entanto, como as variações são muito grandes e o valor dado está em dBm, devemos utilizar a expressão equivalente na forma logarítmica, dada pela seguinte equação 6.

$$L_{dB} = 10 \log L = 10 \log \left(\frac{(4\pi)^2 d^2}{\lambda^2} \right)$$

Equação 6 - Equação de atenuação de ondas eletromagnéticas no espaço livre em função logarítmica (GOES, 2022).

Dado que o valor da distância d e comprimento de onda λ na expressão acima estão em metros, calculando esse comprimento para a frequência de 600MHz, temos um valor de $\lambda = 0,5m$. Com esses valores, temos que a distância calculada para a mesma atenuação no ar livre, ou seja uma transmissão real de sinal ISDB-T, a equação 6 nos fornece uma distância de aproximadamente 0,794m. Estes valores são válidos em caso hipotético de que a antena utilizada fosse isotrópica, ou seja, idealmente que faz a propagação do sinal em todas as direções com a mesma intensidade de potência.

5.2.2 Resultado do experimento com USRPs Tx e Rx

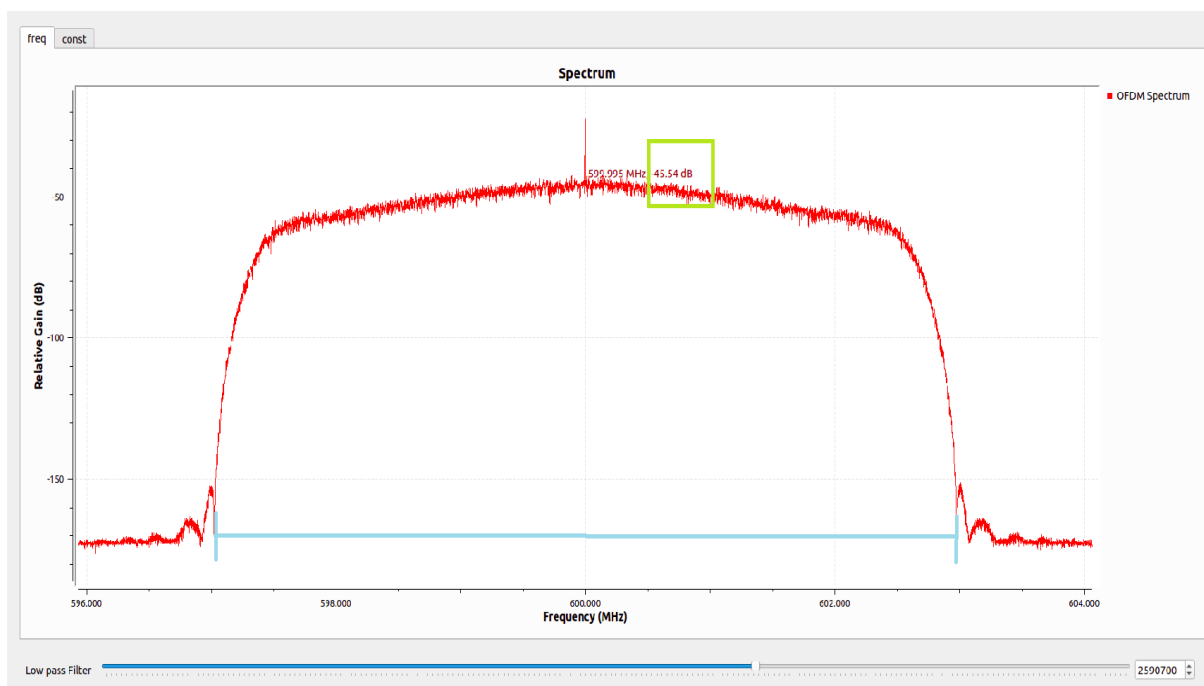
Através dos experimentos realizados com dois USRPs, um operando como transmissor e outro como receptor, com as antenas afastadas nas distâncias de 1m, 0,5m e 0,1m, como já citado na subseção 4.4.2. Conforme as antenas eram aproximadas, o ganho na entrada do receptor ia aumentando, variando aproximadamente 5dB a cada distância selecionada. As antenas Módulos USRPs permaneceram na mesma altura durante todo o experimento para que pudessem estar o mais alinhadas possível e assim, ter um melhor aproveitamento de transmissão.

As distância citadas, foram escolhidas por apresentarem a menor atenuação e menor distorção do sinal. Primeiramente, para a distância de 1m, foi encontrado uma atenuação de 64,37dBm, na segunda medida, para 0,5m, foi encontrado uma valor de 56,02dBm de atenuação. O menor valor de atenuação, foi encontrado colocando as antenas a uma distância de 10cm, para esse este valor, o sinal que chega ao receptor, apresentou uma atenuação de 45,54dBm como destacado em verde na figura 43.

A largura de banda sofreu pouca variação, se mantendo na faixa de 5,6MHz (limites demarcados em azul) e apresentando apenas algumas distorções nas extremidades. Foi possível observar também que a forma do sinal da figura 43 apresenta bastantes variações, comparando ao sinal apresentado no experimento feito com cabo coaxial. Tais variações de forma são devidas às interferências existentes em uma transmissão real, causadas por sinais externos que não foram cortados pelo filtro passa baixo do receptor ISDB-T.

Outro fator que agrava a distorção do sinal, como ocorreu no experimento anterior, é o fato de ter sido utilizado um janelamento de FFT não homogêneo, o que reduz a potência útil máxima do sinal, por ocupar uma área menor do espectro de frequência. Os gráficos dos experimentos com distância maior que 10cm não foram mostrados, pois não era possível visualizar os sinais de forma definida. No entanto, o que deve ser levado em conta é que conforme a distância foi aumentando, as interferências presentes no ambiente da transmissão eram cada vez mais relevantes.

Figura 43 – Espectro de frequência do sinal OFDM transmitido entre módulos USRPs.



Fonte: Próprio autor.

6 CONCLUSÃO

Com base em toda a fundamentação teórica e os resultados encontrados nos experimentos, foi possível constatar que o transmissor ISDB-T apresentou um comportamento muito semelhante tanto nas simulações como nas emulações realizadas em laboratório. Os sinais no domínio frequência apresentaram as mesmas características de largura de banda e frequência central de transmissão, respeitando o padrão UHF de transmissão terrestre no Brasil.

Analisando os blocos transmissor e do receptor desenvolvidos no software GNU Radio de forma isolada, foi possível constatar que todos apresentaram as características encontradas na teoria de transmissão digital, desde o processo de codificação, até a modulação.

Na etapa final dos experimentos, o código gerado no GNU Radio foi descarregado no SDR USRP 2932. O bloco UHD USRP Sink do GNU Radio, executou a comunicação entre o computador e o SDR de forma adequada, demandando apenas que se configurasse o endereço do módulo através de um switch de rede que fez o intermédio entre PC e USRP.

Originalmente, durante o desenvolvimento do projeto, foi utilizado no bloco FFT do software GNU Radio um janelamento do tipo Blackman Harris. Este tipo de janelamento aplica ao sinal uma forma sinusoidal o que não foi o mais adequado em termos de análise de potência e ruído, pois se notou durante o experimento uma sensibilidade maior ao ruído, quando este janelamento havia sido aplicado. Mas tarde, durante as etapas finais do projeto, foi descoberto que o melhor janelamento de FFT que deveria ter sido utilizado para o projeto era o Retangular, devido a característica do sinal ISDB-T, que precisa ter uma distribuição de potência homogênea, para sofrer uma interferência menor aos ruídos externos nos experimentos com USRP e também, os ruídos gaussianos gerados na simulação do modelo de canal.

6.1 Dificuldades encontradas

Durante a elaboração do trabalho, foram encontradas dificuldades em relação a compatibilidade do software GNU Radio e seus pacotes de extensão dos módulos do transmissor ISDB-T que foram necessários para execução dos experimentos de simulação. Por se tratar de um software livre, não existem muitos procedimentos padrão relacionados a versões do software que possam ser utilizadas com alguns módulos criados por desenvolvedores independentes.

A primeira dificuldade foi descobrir que a última versão, a versão 3.10 do software GNU Radio disponível, não era compatível com os flowgraphs desenvolvidos para simular o transmissor, mas sim a versão 3.8, devido a configurações internas no software, como alguns plugins que eram existentes somente nas versões mais antigas. Como a última versão do software é recente a data de publicação deste trabalho, ainda não foram corrigidos muitos destes tipos de problemas que só afetam os que buscam ir além dos pacotes da biblioteca padrão do GNU Radio.

A outra dificuldade, foi encontrar o plugin necessário para que fosse possível rodar a extensão para ISDB-T da biblioteca do software. No entanto, esse problema foi resolvido mais facilmente contatando diretamente o desenvolvedor independente do pacote, que forneceu os dados necessários para solucionar os problemas pendentes.

6.2 Melhorias no projeto

Melhorias neste projeto ainda podem ser aplicadas para aprofundar os experimentos realizados com software GNU Radio e com os SDRs. As melhorias propostas para dar continuação ao projeto são:

- Melhorar o sistema de filtragem do receptor para combater possíveis ruídos externos que não podem ser excluídos com um filtro passa-baixo simples.
- Simular atraso por multicaminho para testar a fidelidade de cada uma das camadas hierárquicas.
- Executar a transmissão de um vídeo através da simulação do software GNU Radio.
- Executar uma transmissão em tempo real através da câmera do computador.
- Aumentar o ganho do receptor para sofrer menos com interferências externas.
- Aprofundar o estudo da relação ao SNR, MER e BER para ter um conhecimento mais completo a respeito deste padrão de transmissão.
- Executar novos experimentos de laboratório com os USRPs utilizando um janelamento de FFT retangular ao invés do padrão de janelamento Blackman-Harris que possui característica sinusoidal.
- Desenvolver um transmissor próprio no GNU Radio, através de linguagem de programação Python e C++, ou outra plataforma de simulação.
- Testar sistema de transmissão ISDB-T em outros modelos de SDR para fazer a comparação de desempenho.

6.3 Contribuições do trabalho

Este trabalho pode servir como contribuição para estudos na área de telecomunicações, sobretudo, no conhecimento de transmissão de imagem digital, mostrando funcionamento, como um todo, do transmissor padrão ISDB-T e de seus blocos, descrevendo etapa por etapa. Com o estudo realizado, também é possível complementar outros trabalhos relacionados, apresentando o sistema de transmissão com uma abordagem diferente dos outros trabalhos do mesmo tema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR; 15601 Televisão digital terrestre - Sistema de transmissão. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 32.

AKAMINE CRISTIANO; IANO, Y. Simulation software for the isdb-tb. modulation system. *SET INTERNATIONAL JOURNAL OF BROADCAST ENGINEERING.*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 64.

BAMPI, M. H. *Implementação do Sistema ISDB-TB de Televisão Digital*. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 19, 23, 31 e 32.

CARDOSO, P. E. D. R. *Avaliação da implementação da tv digital: Propostas regulatórias para melhoria da qualidade do serviço prestado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2018. Citado na página 18.

DINIZ, P. C. A. *Utilização de Rádio Definido por Software para análises de Sinais Aplicados ao Ensino de Engenharia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

ETTUS. *Universal, Software Radio Peripheral*. 2007. Disponível em: <www.ettus.com>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 35 e 36.

GLEDSOON, F. J. L. G. S. *Introdução à televisão digital interativa: arquitetura, protocolos, padrões e práticas*. 2004. Citado na página 16.

GNURADIO. *GNU Radio Wiki*. 2020. Disponível em: <www.gnuradio.org>. Citado 19 vezes nas páginas 18, 34, 35, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60 e 65.

GOES, A. A. *Redes 4G: Propagação*. 2022. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredes4g/pagina_2.asp>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 78.

GUIDO, S. *Princípios de Televisão Digital, PTC2547*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica USP, 2016. Citado na página 16.

HERNÁNDEZ JAVIER; CASTRO, S. *Implementación de un Transmisor ISDB-T Abierto Bajo el Paradigma de Radio Definido por Software*. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 25.

MACHADO, G. O. *Análise de Sinal de Televisão Digital em Patos de Minas utilizando GNU Radio e USRP*. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 14, 28 e 29.

MACIEL LIVIA BATISTA; MOREIRA, M. G. C. *Estudo do Sistema ISDB para radiodifusão digital*. 2006. Citado 3 vezes nas páginas 17, 24 e 31.

MORALES GASTON ; INGLÉS, L. . A. D. *Desarrollo de Transceptor ISDB-T en Radio Definida por Software e Implementación en Hardware Alternativo de Bajo Costo*. 2020. Citado 11 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22, 34, 35, 47, 49, 52, 54 e 55.

MUTTONI, L. *Desenvolvimento de um Receptor ISDB-T 1-Seg através de Rádio Definido por Software*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 2017. Citado 7 vezes nas páginas 20, 30, 31, 32, 33, 34 e 44.

- NATIONAL INSTRUMENTS, C. *Dispositivo de rádio definido por software USRP*. 2022. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/shop/hardware/products/usrp-software-defined-radio-device.html>>. Citado na página 19.
- PEREIRA LÍVIA CIRNE; BEZERRA, E. P. D. A. Televisão digital: do japão ao brasil. culturas midiáticas. *Revista do Programa de Pós-Graduação em Comunicação da Universidade Federal da Paraíba*, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 63.
- QUIMBITA, J. S. P. *Simulación del Sistema de Transmisión y Recepción de la Señal de la Televisión Digital Terrestre Con La Norma ISDB-Tb en Canales con Desvanecimiento para el Análisis de Desempeño de Redes SFN usando MATLAB*. 2016. Citado 4 vezes nas páginas 17, 27, 51 e 55.
- RABAÇA RICARDO; AKAMINE CRISTIANO; DE OLIVEIRA, G. H. M. G.; MACIEL, Y. P. Implementation of ldm/ isdb-t broadcast system using diversity at reception. *Electrical Engineering and Computing Program Mackenzie Presbyterian University*, 2017. Citado na página 22.
- SANTIAGO, N. S. *Inserção de Sequências Pseudoaleatórias no Sistema ISDB-Tb para Identificação de Transmissões em Redes de Frequência Única*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 14, 18, 20, 26 e 28.
- SAPIA, T. M. *Desenvolvimento de Algoritmos de Sincronismo e Estimação de Canal no GNU Radio Companion para o Sistema ISDB-T*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 29, 31, 33 e 34.
- USRP-2930/2932, GETTING STARTED GUIDE, USRP Software Defined Radio Device National Instrumentsl. Citado 3 vezes nas páginas 19, 36 e 37.
- WOLFF, C. *Atenuador*. 2022. Disponível em: <<https://www.radartutorial.eu/17.bauteile/bt09.pt.html>>. Citado na página 67.