

**Universidade Federal do ABC – UFABC**

**JEFFERSON FEITOSA RIBEIRO**

**Análise e Desenvolvimento de um Sistema de DRM  
empregando a Técnica de Rádio Definido por Software**

**SANTO ANDRÉ**

**2020**

JEFFERSON FEITOSA RIBEIRO

**Análise e Desenvolvimento de um Sistema de DRM  
empregando a Técnica de Rádio Definido por Software**

Trabalho de graduação III apresentado à  
Universidade Federal do ABC como  
requisito para graduação.

Prof. Orientador: Dr. Ivan Roberto  
Santana Casella.

SANTO ANDRÉ  
2020

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do ABC  
Elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da UFABC  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ribeiro, Jefferson Feitosa

Análise e Desenvolvimento de um Sistema DRM empregando a  
Técnica de Rádio Definido por Software / Jefferson Feitosa  
Ribeiro. — 2020.

81 fls. : il.

Orientador: Ivan Roberto Santana Casella

Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do  
ABC, Bacharelado em Engenharia de Informação, Santo André,  
2020.

1. DRM. 2. SDR. 3. rádio digital. 4. OFDM. 5.  
telecomunicação. I. Casella, Ivan Roberto Santana. II.  
Bacharelado em Engenharia de Informação, 2020. III.  
Título.



## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO

Ata de Defesa do Trabalho de Graduação em Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC

No dia **29 de Maio de 2020** reuniu-se a banca examinadora do trabalho apresentado como Trabalho de Graduação em Engenharia de Informação de **Jefferson Feitosa Ribeiro**, intitulado: “**Análise e Desenvolvimento de um Sistema DRM empregando a Técnica de Rádio Definido por Software**”. Após a exposição oral, o aluno foi arguido pelos componentes da banca que se reuniram reservadamente, e decidiram atribuir o conceito final **B**.

\_\_\_\_\_  
Orientador  
Prof. Dr. Ivan Roberto Santana Casella

\_\_\_\_\_  
Avaliador 1  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Capovilla

\_\_\_\_\_  
Avaliador 2  
Prof. Dr. Rodrigo Reina Muñoz

## Resumo

O presente trabalho busca estudar o sistema de rádio digital DRM (*Digital Radio Mondiale*) e fazer uma implementação simplificada através de SDR (*Software Defined Radio*). Primeiramente, serão abordados brevemente alguns dos principais padrões de rádio digital existentes. Em seguida, serão discutidos detalhadamente os principais aspectos técnicos da camada física (transmissão e recepção) do padrão do DRM, que utiliza as codificações Reed-Solomon (RS) ou Convolutacional (CONV), a Modulação de Amplitude em Quadratura M-ária (M-QAM) e a técnica de Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (OFDM). Além disso, os detalhes do conteúdo de áudio e dados que são transmitidos.

Para um melhor entendimento do funcionamento básico do sistema de transmissão de áudio do DRM, foi realizado algumas simulações computacionais no MATLAB (Matrix Laboratory) e *Simulink*. Por fim, utilizando os modelos desenvolvidos e analisados como base, junto com o de SDR, para desenvolver uma implementação simplificada do receptor de rádio digital.

Palavras-chave: DRM; rádio digital; comunicação digital; telecomunicação; SDR; OFDM; QAM; comunicação sem fio.

## **Abstract**

This article seeks to study the digital radio system DRM (Digital Radio Mondiale) and a simplified implementation through SDR (*Software Defined Radio*). First, it will be briefly explained about the existing digital radio standards. In addition, the main technical aspects of the physical layer (transmission and reception) of the DRM standard will be discussed in detail, using the Reed-Solomon (RS) or Convolutional (CONV) encodings, the M-ary Quadrature Amplitude Modulation (M-QAM) and the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technique. In addition, the details of the audio content and data that are transmitted.

For a better understanding of the basic operation of the DRM audio transmission system, some computer simulations will be performed in MATLAB (Matrix Laboratory) and Simulink. Finally, the models developed and analyzed as a basis and the SDR will be used to develop a simplified implementation of the digital radio receiver.

Keywords: DRM; digital radio; digital communication; telecommunication; SDR; OFDM; QAM; wireless communication.

## **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Modos de transmissão do DRM.	12
Tabela 2 – Posição das subportadoras do OFDM.	13

## Sumário de figuras

Figura 1 – Banda de operação do DRM.	7
Figura 2 – Funcionamento básico do DRM.	8
Figura 3 – Diagrama de blocos do transmissor do DRM.	10
Figura 4 – Espectro de frequência para as modulações: BPSK, QPSK e 16-QAM.	14
Figura 5 – Temos o seno (fase ou I) e em (b) o cosseno (quadratura ou Q).	15
Figura 6 – Esquema do transmissor e receptor do QAM.	16
Figura 7 – Diagrama de constelação 16-QAM e 64-QAM.	18
Figura 8 – Sistema de portadoras FDM e OFDM.	19
Figura 9 – Diagrama de blocos transmissor OFDM.	20
Figura 10 – Esquema do CP.	21
Figura 11 – Diagrama de blocos transmissor OFDM.	22
Figura 12 – Diagrama de blocos receptor do DRM.	23
Figura 13 – Geração de conteúdo de áudio.	25
Figura 14 – Diagrama de blocos do SDR.	27
Figura 15 – Diferentes tipos de RTL-SDR e sua antena.	28
Figura 16 – Diagrama de blocos de um sistema RTL-SDR.	28
Figura 17 – Gráfico de BER por $E_b/N_0$ para modulação 16-QAM.	30
Figura 18 – Gráfico de BER por $E_b/N_0$ para modulação 64-QAM.	30
Figura 19 – Gráfico de BER por $E_b/N_0$ para modulação 64-QAM com codificação RS.	32
Figura 20 – Gráfico de BER por $E_b/N_0$ para modulação 64-QAM com codificação convolucional.	33
Figura 21 – Gráfico de BER por $E_b/N_0$ para modulação 16-QAM com OFDM.	34
Figura 22 – Gráfico de BER por $E_b/N_0$ para modulação 64-QAM com OFDM.	35
Figura 23 – Gráfico de BER por $E_b/N_0$ para sistema OFDM codificado com RS(62,51) e modulação 64-QAM.	36
Figura 24 – Gráfico de BER por $E_b/N_0$ para sistema OFDM codificado com RS(255,239) e modulação 64-QAM.	37
Figura 25 – Esquema no <i>Simulink</i> para obter espectro de frequências.	38
Figura 26 – Parâmetros do bloco <i>RTL-SDR Receiver</i> .	39
Figura 27 – FFT do sinal recebido.	40
Figura 28 – Espectrograma do sinal recebido.	40
Figura 29 – Diagrama do receptor montado no <i>Simulink</i> .	41
Figura 30 – Analisador de espectro centrado em 80 MHz com gerador de sinais ligado.	42
Figura 31 – Sinal QPSK recebido com RTL-SDR com frequência de 1 kbps no AM300.	43
Figura 32 – Sinal QPSK recebido com RTL-SDR com frequência de 0.25 kbps no AM300.	44
Figura 33 – Diagrama de constelação antes do bloco AGC.	46
Figura 34 – Diagrama de constelação depois de passar pelo AGC.	46
Figura 35 – Diagrama de constelação depois da sincronização completa.	47

Figura 36 – Diagrama do receptor montado no <i>Simulink</i> a partir da documentação do MATLAB.	48
Figura 37 – Diagrama de constelação depois do RCC.	49
Figura 38 – Diagrama de constelação depois da sincronização de símbolo.	49
Figura 39 – Diagrama de constelação depois da sincronização da portadora.	50
Figura 40 – Diagrama de constelação depois do RCC .	50
Figura 41 – Diagrama de constelação depois da sincronização de símbolo.	51
Figura 42 – Diagrama de constelação depois da sincronização de símbolo.	51
Figura 43 – Nuand bladeRf X115.	52
Figura 44 – Diagrama de blocos do transmissor com bladeRF montado no Simulink.	52
Figura 45 – Diagrama de blocos do receptor com bladeRF montado no Simulink.	53
Figura 46 – Diagrama de constelação do sinal transmitido com a bladeRF depois do RCC.	54
Figura 47 – Diagrama de constelação do sinal transmitido com a bladeRF depois da sincronização de símbolo.	55
Figura 48 – Diagrama de constelação do sinal transmitido com a bladeRF depois da sincronização da portadora.	55
Figura 49 – <i>Dongle</i> da RTL-SDR.com.	60
Figura 50 – Pacote para RTL-SDR no MATLAB.	61
Figura 51 – Teste de conexão pós instalação.	61
Figura 52 – Informações do dispositivo obtido através de comando no MATLAB.	62
Figura 53 – Gerador de sinal AM300.	63
Figura 54 – Sinal QPSK com 58 símbolos gerado para o canal I.	64
Figura 55 – Sinal QPSK com 58 símbolos gerado para o canal Q.	65
Figura 56 – Sinal QPSK com 58 símbolos carregado no AM300.	65
Figura 57 – Sinais gerados no domínio do tempo.	66
Figura 58 – Gerador de sinais de RF Agilent N 9310.	67
Figura 59 – Antena utilizada para a transmissão do sinal.	67
Figura 60 – Varredura no espectro de frequências com RTL-SDR no MATLAB.	68
Figura 61 – Gerador de sinais vetoriais SMU200A.	69
Figura 62 – Tela de configuração do gerador de sinais vetoriais SMU200A.	70
Figura 63 – Dados do sinal enviado, com fonte de dados tipo PRBS.	71
Figura 64 – Dados do sinal enviado, com fonte de dados inserida pelo usuário.	71
Figura 65 – Análise do espectro na faixa de transmissão do gerador de sinais vetorial.	72

# Sumário

<b>1. Introdução</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivo</b>	<b>4</b>
<b>3. Padrões de Rádio Digital</b>	<b>5</b>
3.1. DAB	5
3.2. IBOC	6
3.3. ISDB-TsB	6
<b>4. DRM</b>	<b>7</b>
4.1. Funcionamento	8
4.1.1 Processo de Transmissão	9
4.1.2. Processo de Recepção	23
4.2. Conteúdo do DRM	24
4.2.1. Áudio	24
4.2.2. Dados	25
<b>5. SDR</b>	<b>27</b>
<b>6. Simulação e Análise Computacional</b>	<b>29</b>
6.1. Desempenho de Sistemas de Modulação M-QAM em canais AWGN	29
6.2. Desempenho de Sistemas de Modulação 64-QAM em canais AWGN empregando codificação de FEC	31
6.3. Desempenho de Sistemas de Modulação OFDM com modulação M-QAM em canais AWGN	34
<b>7. Desenvolvimento e análise de um receptor Digital simplificado com SDR</b>	<b>37</b>
7.1. Testes iniciais com o RTL-SDR	37
7.2. Recepção de Sinal Digital com Modulação QPSK utilizando Gerador AM300 como transmissor	40
7.3. Recepção de Sinal Digital com Modulação QPSK utilizando o Gerador de Sinal Vetorial (SMU200A) como transmissor	44
7.4. Recepção de Sinal Digital com Modulação QPSK utilizando o Nuand bladeRF como transmissor e receptor	51
<b>8. Conclusão</b>	<b>55</b>
<b>9. Referências Bibliográficas</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>59</b>
A. Instalação do pacotes necessários para o MATLAB	59
B. Usando o gerador AM300 para transmissão do sinal	62
C. Usando gerador de sinais vetoriais SMU200A para transmissão do sinal	68

## 1. Introdução

Atualmente, existe uma grande necessidade da sociedade como um todo de estabelecer comunicação. Em função disto, o volume de informação que trafega pelos canais de comunicação cresce a cada dia.

Com a invenção dos sistemas digitais de telefonia celular e de radiodifusão de áudio e vídeo de alta definição, o crescimento dos números de dispositivos móveis portáteis e a praticidade da comunicação instantânea através da internet, cresce a necessidade de se transmitir cada vez mais a elevadas taxas de bits por um meio de comunicação que normalmente é limitado. Assim, surge um problema a ser abordado mais profundamente quando se deseja transmitir esses dados digitais em canais com largura de banda limitada e compartilhada. (JUNIOR, 2008).

Com esse rápido crescimento da tecnologia, o sistema de rádio tradicional vem ganhando um forte concorrente que são os diversos serviços de *streaming* de música de alta qualidade. O sistema de rádio, tecnologia de transmissão de som por intermédio das ondas eletromagnéticas criada há cem anos, ainda é considerado +interessante, tendo em vista que permite que um equipamento simples e de baixo custo possa atender boa parte das demandas por informação da população. Entretanto, a transmissão de áudio através de sistemas analógicos, como o AM (*Amplitude Modulation*) e FM (*Frequency Modulation*), que possuem uma qualidade de áudio inferior à qualidade que é entregue por esses serviços, além disso, é bastante suscetível a interferência, oriundo do aumento da quantidade de sinais que são transmitidos pelas grandes cidades (PRATA, 2007).

Com isso, surge a necessidade da criação de um sistema de rádio digital que entregue uma boa qualidade de áudio e que não seja tão suscetível a interferências como o sistema analógico. Porém, devido ao compartilhamento do espectro disponível com vários outros sistemas, é necessário um estudo de um padrão que se adequa a determinada localidade, tendo em vista que a banda é utilizada de diferentes formas em cada país (PRATA, 2007).

Um dos padrões de rádio digital que vem sendo estudado é o DRM, que é um acrônimo para o esquema de transmissão de rádio digital da *Radio Digital Mondiale*,

o nome do consórcio que o desenvolveu. O consórcio DRM foi formado em 1998 para definir um novo sistema de áudio digital destinado a projetar um sistema para facilitar a conversão de serviços analógicos em digitais para bandas abaixo de 30 MHz (FISCHER, 2020).

O DRM é um padrão internacional para transmissão digital em bandas de ondas curtas, médias (que incluem transmissão AM) e faixas de frequência de ondas longas. Além da padronização nessas faixas abaixo de 30 MHz, em 2005 o DRM Consortium iniciou o processo de extensão do sistema para faixa VHF (*Very High Frequency*), que também se encontra o FM.

O DRM é um sistema aberto de rádio digital que surgiu na Europa e permite a transmissão de áudio em alta qualidade e dados, além de operar simultaneamente com o sistema de rádio analógico convencional (BEZERRA,2007).

Nos rádios de *hardware* tradicionais, as operações matemáticas necessárias para decodificar e processar os sinais de rádio são realizadas usando circuitos analógicos. Com a evolução da tecnologia, os computadores tornaram-se poderosos o suficiente para executar os cálculos matemáticos necessários em *software*, com isso surge o termo SDR (*Software Defined Radio*). Com isso é possível projetar os sistemas de rádio através do conceito de SDR, pois quase toda a funcionalidade associada à camada física é implementada em *software* usando os algoritmos DSP (*Digital Signal Processing*) e um *hardware* muito pequeno; apenas uma antena e um amostrador capaz de capturar e digitalizar o sinal de rádio (STEWART, 2015).

O RTL-SDR (*Realtek - Software Defined Radio*) é *hardware* que serve como interface física de um SDR de baixo custo, baseado em *dongles* de receptor USB (*Universal Serial Bus*) de TV DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*) que possuem o chip RTL2832U. Em 2012, foi observado que o chip RTL2832U tinha um modo especial que permitia que ele fosse usado como SDR geral em banda larga. Além de possuir um baixo custo, o RTL-SDR tem a vantagem de poder ser utilizado em uma série de aplicações diferentes e de ser compatível com diversas ferramentas para implementação de receptores de rádio baseados na técnica de SDR, como o GNU Radio, MATLAB e *Simulink*.

## 2. Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é estudar o sistema de rádio digital DRM, realizando o desenvolvimento de alguns modelos de simulações no MATLAB, variando alguns parâmetros como o tipo da modulação, codificação e tipo de dados enviados.

A partir disso, realizar uma análise do sistema por meio de simulação computacional, comparando o sistema modelado com o que é esperado teoricamente. Essa comparação é realizada através de critérios utilizados para analisar o desempenho de sistemas digitais, como por exemplo a BER (*Bit Error Rate*) onde é feito a comparação dos bits transmitidos com os recebidos, computando o número de erros e a taxa de erros dos mesmos.

Em seguida, utilizar os modelos desenvolvidos e analisados como base, junto com o de SDR, para desenvolver uma implementação simplificada do receptor de rádio digital.

### 3. Padrões de Rádio Digital

Diferente do sistema de rádio analógico, o sistema de rádio digital não possui um padrão único que é adotado em todo o mundo. Com isso, diversos padrões vêm sendo estudados e testados por diferentes países, onde os critérios para escolha do padrão digital incluem as características do mercado de cada país, qualidade técnica das transmissões, condições de propagação em solo local, ocupação do espectro e compatibilidade dos sinais digitais e analógicos.

Um dos primeiros sistemas de rádio digital foi o DAB (*Digital Audio Broadcasting*) que surgiu por volta de 1995, que não permite o uso simultâneo com o sistema de rádio analógico. Dez anos depois surge o IBOC (*In-Band On-Channel*) que é o atual sistema utilizado nos Estados Unidos, que permite uso simultâneo com o sistema de rádio analógico (AUGUSTIN, 2013).

Já no Japão é utilizado outro padrão, ISDB-TsB (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial, Segmented Band*) que funciona junto com o sistema de TV Digital. Outro sistema é o DRM que é um padrão Europeu, que ainda vem sendo bastante estudado. Esses sistemas serão abordados nos próximos tópicos (AUGUSTIN, 2013).

#### 3.1. DAB

O DAB (*Digital Audio Broadcasting*, em português Transmissão Digital de Áudio) é um sistema que surgiu em 1995 no Reino Unido e vem sendo estudado na Europa pelo grupo Eureka. Esse sistema de transmissão de rádio proporciona um som com qualidade igual à de um CD (*Compact Disc*) e além do envio de áudio, permite o envio de dados, permitindo a transmissão de outros serviços.

Esse sistema normalmente opera Banda III (174–240 MHz) e banda L (1452–1492 MHz), sendo esta última sendo pior para alguns países, pois nos Estados Unidos é destinada ao uso militar e na Espanha para possível uso do 5G (*Fifth Generation*).

Embora o DAB forneça uma boa qualidade de áudio, ele não opera simultaneamente com o sistema analógico de rádio. Um pouco que acaba inviabilizando o seu uso em muitos países (AUGUSTIN, 2013).

### **3.2. IBOC**

O IBOC ou HD Radio (*High Definition Radio*) é um sistema de transmissão de rádio que surgiu por volta dos anos 2000 e foi oficializado pela empresa IBiquity em 2002. Ele permite a transmissão simultânea do rádio digital e do rádio analógico, isso pode produzir sobreposições e, por tanto, perdas qualitativas, além de menor cobertura que a FM.

Ele é bastante utilizado nos Estados Unidos e opera na faixa de frequência de ondas médias (AM) e de 87.5 a 108 MHz (FM). Por se tratar de um sistema fechado, é necessário pagar o uso do sistema devido aos direitos autorais (BARBOSA, 2010).

### **3.3. ISDB-TsB**

O ISDB-TsB é o sistema japonês de rádio digital que foi planejado para funcionar de forma integrada à televisão digital, permitindo a interoperabilidade dos dois sistemas e respectivos serviços.

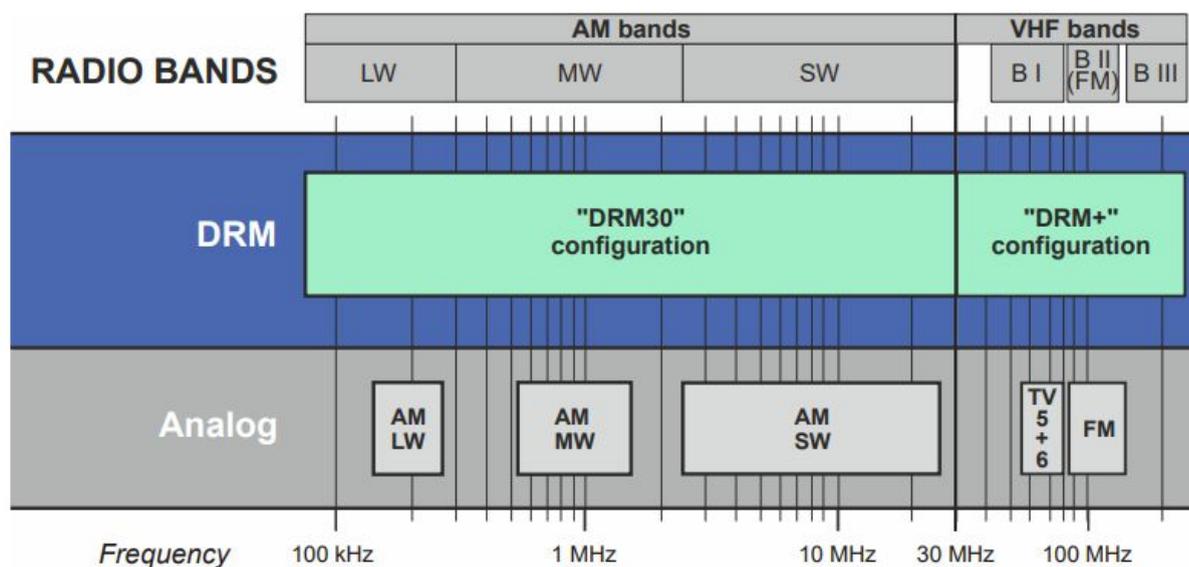
Assim como DAB e o IBOC, o ISDB-TsB transmite áudio em alta qualidade, som parecido com o reproduzido em CD, incluindo serviços de dados como transmissão de textos, imagens e até mesmo vídeo em baixa resolução. Isso é permitido pois as informações são transmitidas em formato digital, então os serviços são limitados de acordo com as capacidades do receptor (BEZERRA, 2007).

O sistema japonês de rádio digital opera dentro da faixa de frequência VHF (90-222 MHz) que seria uma parte do espectro do antigo sistema de televisão analógica.

#### 4. DRM

O DRM é um padrão de rádio aberto e totalmente digital projetado para ser o substituto de alta qualidade do rádio analógico atual nas bandas AM e FM / VHF. Esse padrão é reconhecido mundialmente pela ITU (*International Telecommunication Union*) e pode operar simultaneamente com a transmissão de rádio analógico, dentro dos limites estabelecidos pelos atuais regulamentos de frequência. Isso possibilita uma melhor migração para a tecnologia digital, pois o sistema atual de rádio analógico não precisa ser interrompido ou prejudicado por conta do desenvolvimento do sistema digital (*DRM Consortium, 2013*).

Além da entrega de áudio de alta qualidade, a tecnologia do DRM permite a transmissão de serviços de multimídia e outros tipos de serviços de dados. O padrão do DRM pode ser dividido em dois grupos, onde essa divisão é feita de acordo com a sua banda de operação. Na figura 1, podemos ter visão geral das bandas de frequência onde o DRM opera.



**Figura 1: Banda de operação do DRM.**  
**Fonte: Consórcio DRM e Plataforma DRM Brasil**

O DRM30 foi o primeiro modo de transmissão do DRM que surgiu. Com ele é possível realizar a propagação do sinal de longas, médias ou curtas distâncias

através das bandas de transmissão abaixo dos 30 MHz. Por se tratar de um sistema digital, mesmo transmitindo na faixa do AM, o som que é oferecido possui qualidade alta, chega a ser superior ao FM analógico. O sistema permite que as transmissões do DRM30 coexistam com as atuais transmissões analógicas AM.

Já o DRM+ (*Digital Radio Mondiale Plus*) é a extensão do padrão do DRM para a faixa do VHF (acima de 30 MHz), faixa onde se encontra a transmissão de rádio FM. Ele funciona de forma similar ao DRM30, onde oferece uma alta qualidade de áudio e funciona simultaneamente com o sistema de rádio analógico atual.

#### 4.1. Funcionamento

Na figura 2 podemos ver como é o processo básico de transmissão e recepção do DRM, possuindo similaridades à outros sistemas de Rádio digital.

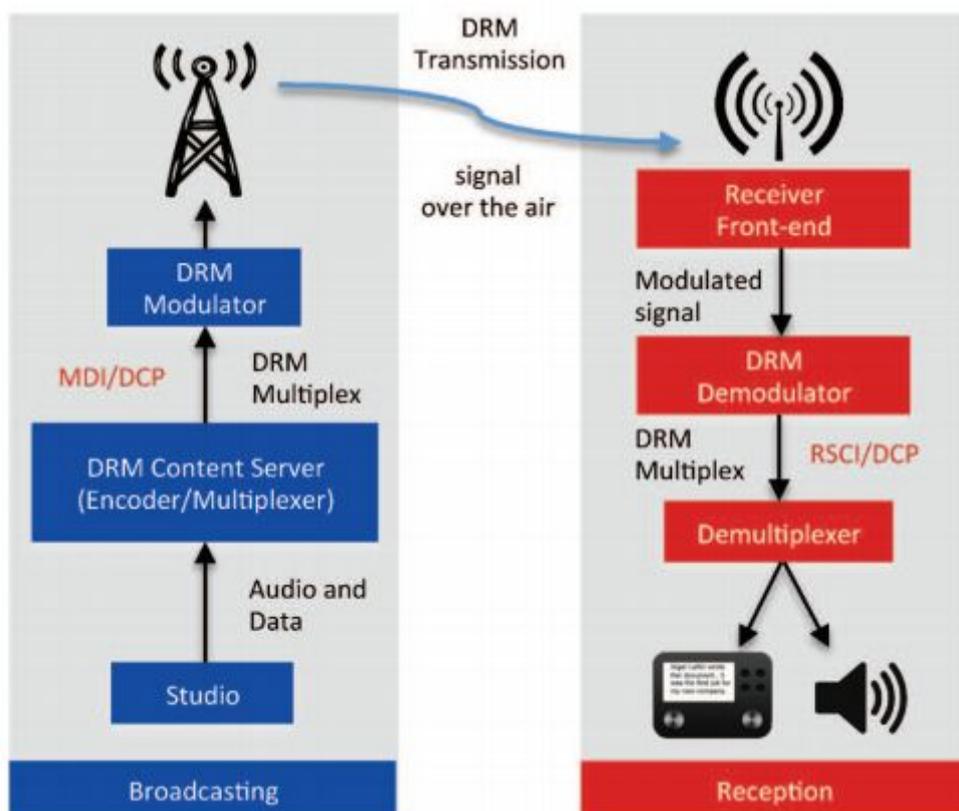


Figura 2: Funcionamento básico do DRM.  
Fonte: DRM Consortium.

Inicialmente o transmissor faz o tratamento do áudio e dos dados em um Servidor Gerador de Conteúdo, onde esses dados e o áudio são codificados e multiplexados para que em seguida possa ser modulado M-QAM e Multiplexado por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM), para que finalmente ele possa ser transmitido, como é apresentado na figura 2.

No receptor é feito todo processo inverso, onde o sinal é captado por uma antena junto com um *hardware*, então esse sinal é demodulado e demultiplexado de acordo com a necessidade do receptor, isto é, se o receptor vai trabalhar apenas com áudio, apenas com dados ou com ambos.

#### 4.1.1 Processo de Transmissão

Inicialmente o transmissor faz o tratamento de áudio e dados no Servidor Gerador de Conteúdo, onde ele trabalha com três fluxos de dados separadamente que em seguida são multiplexados:

- Canal de serviço principal (MSC - *Main Service Channel*);
- Canal de acesso rápido (FAC - *Fast Access Channel*) e o;
- Canal de descrição de serviço (SDC - *Service Description Channel*).

O **MSC** é formado por serviços de dados e áudio codificados, enquanto o **FAC** e o **SDC** transmitem a identificação do serviço e a seleção de parâmetros da transmissão e assegura que os parâmetros de decodificação apropriados sejam selecionados no receptor (SCHORR, 2005).

No FAC é utilizado a modulação QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), e ele é responsável por fornecer informações de seleção de serviço para varredura rápida e parâmetros necessários para iniciar a decodificação multiplex,

No SDC pode ser utilizado tanto modulação QPSK, quanto modulação 16-QAM, pois ele fornece informações para decodificação completa do MSC, atributos dos serviços e fontes alternativas para os mesmos dados.

Por fim, no MSC, onde está o conteúdo de dados e áudio é utilizado modulação M-QAM.

Na figura 3 é possível ter uma visão geral desses processos que ocorrem na transmissão.

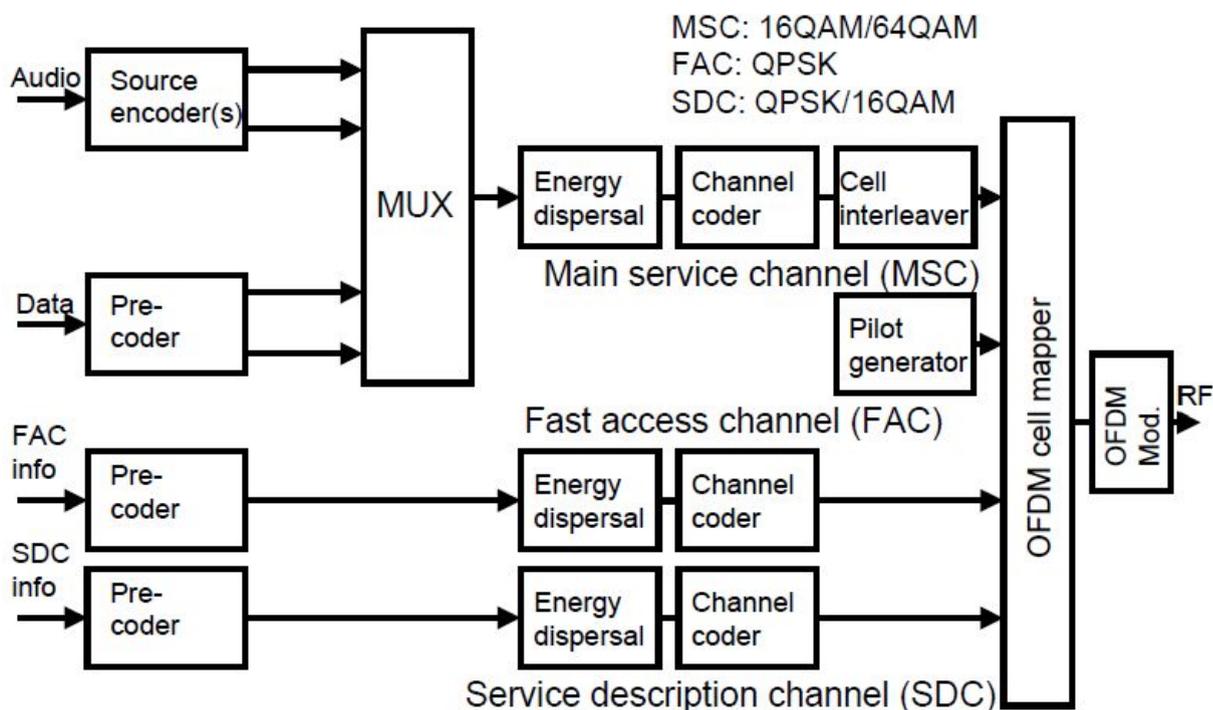


Figura 3: Diagrama de blocos do transmissor do DRM.

Fonte: FISCHER, Digital Video and Audio Broadcasting Technology, 2020.

Como é possível ver no diagrama de blocos da figura 3, antes desses três serviços serem multiplexados e transmitidos, eles são codificados separadamente por esquema de codificação de FEC (*Forward Error Correction*), que tem como objetivo a obtenção de uma BER (*Bit Error Rate*) menor que  $10^{-4}$  no receptor para que o decodificador consiga um áudio quase sem distorções.

Neste processo, a mensagem digital a ser transmitida é codificada através do acréscimo de bits de redundância, definidos pela técnica de codificação de FEC escolhida, aos bits de informação. Nos sistemas de DRM, a codificação de FEC é composta pelas seguintes etapas:

- Dispersão de Energia;
- Codificador de Canal;
- Intercalação (apenas para o MSC).

O primeiro passo é fazer a **dispersão de energia** (*Energy Dispersal*) que tem como objetivo evitar interferências no sinal transmitido, então é inserido uma Sequência Binária Pseudo-Aleatória (PRBS) ao sinal de informação, antes da codificação do canal (FISCHER, 2020).

O **codificador de canal** (*Channel Encoder*) adiciona bits redundantes aos dados de maneira definida, para fornecer um meio para proteção e correção de erros, e define o mapeamento das informações codificadas em M-QAM.

O MSC é então codificado usando um esquema de Codificação Multinível (MLC) com base em parâmetros para intercalação de bits, CONV e dispersão de energia.

O princípio da codificação multinível é a otimização conjunta de codificação e modulação para alcançar o melhor desempenho de transmissão. Isso indica que mais posições de bits propensas a erros no mapeamento QAM obtêm uma proteção mais alta. Os diferentes níveis de proteção são alcançados com códigos convolucionais perfurados ou puncionados (*Punctured Convolutional Coding*), onde o código-mãe possui taxa de 1/6, comprimento (*constraint length*) igual a 7 e formas octais dos polinômios geradores são 133, 171, 145, 133, 171 e 145, respectivamente (ETSI, 2017).

O FAC e SDC são codificados de forma semelhante usando MLC e um esquema de modulação. No caso dos dados é utilizado os códigos RS, que consiste na geração dos símbolos de paridade de uma sequência. O RS é representado na forma  $RS(n,k)$ , onde  $n$  é o número total de símbolos em uma sequência,  $k$  é o número de símbolos úteis de uma sequência,  $t$  é o número de símbolos que o código é capaz de corrigir (ETSI, 2017).

Para a construção do código RS é utilizado as relações apresentadas abaixo:

$$n = 2^m - 1$$

$$k = 2^m - 1 - 2t$$

$$n - k = 2t$$

Na norma G.709 da ITU, mostra que o padrão é utilizar símbolos de 8 bits ( $m=8$ ), o que resulta em  $n=255$ . O código utilizado é o  $RS(255,239)$  ( $k=239$ ). Portanto, existem 16 símbolos de paridade para cada 239 bytes de dados, e a

capacidade de correção é de 8 símbolos em uma seqüência de 255 ( $t=8$ ) (ETSI, 2017).

Por fim, o **Interlaçamento** (*Interleaving*) consiste em reorganizar os dados de modo que a reconstrução final do sinal no receptor seja menos afetada por erros em “rajada”, do que seria caso os dados fossem transmitidos em ordem contínua (FISCHER, 2020).

Depois que os canais são codificados, eles são Multiplexados por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM), porém os parâmetros da modulação depende do cenário de operação, pois o DRM possui diferentes modos de transmissão, onde estão relacionados com os diferentes cenários de propagação de ondas, como é possível ser observado na tabela 1.

Modos	Símbolos QAM	Larguras de Banda (kHz)	Cenário de Operação	
A	16, 64	4.5, 5, 9, 10, 18, 20	Canais gaussianos, com pouco desvanecimento	DRM30
B	16, 64	4.5, 5, 9, 10, 18, 20	Canais seletivos no tempo e em frequência, com maior atraso de propagação	
C	16, 64	10, 20	Igual o cenário do modo B, mas com maior espalhamento Doppler	
D	16, 64	10, 20	Igual o cenário do modo B, mas com maior atraso e espalhamento Doppler	
E	4, 16	100	Canais seletivos no tempo e em frequência, transmitindo acima de 30 MHz	DRM+

**Tabela 1: Modos de transmissão do DRM.**

Fonte: O autor.

O modo A é normalmente utilizado para transmissão local, de ondas longas e médias, principalmente por ondas terrestres sem desvanecimento.

O Modo B para transmissão intracontinental de ondas curtas, principalmente com desvanecimento.

O Modo C para transmissão intercontinental de ondas curtas, principalmente com desvanecimento devido à interferência de propagação de múltiplos caminhos.

O Modo D frequentemente usada em regiões tropicais e resultando em desvanecimento e efeito doppler (SCHORR, 2005).

O Modo E utilizado para transmissões acima de 30 MHz (FM) (SCHORR, 2005).

Como sinal transmitido consiste em uma sucessão de símbolos OFDM, sendo cada símbolo constituído por um intervalo de guarda seguido por uma parte útil do símbolo. Cada símbolo é transmitido com uma dada amplitude e fase, que corresponde a uma subportadora. Cada subportadora é referenciada pelo índice L, onde Y pertence ao intervalo [Lmin Lmax], onde L igual a 0 corresponde à frequência de referência do sinal transmitido (nível DC) (ETSI, 2017).

Então, além do número de símbolos da modulação M-QAM, os modos de operação também afetam na quantidade determinada de subportadoras OFDM. A tabela 2 indica a posição dessas subportadoras, onde os valores de L menor que 0 estão à esquerda do nível referência (nível DC) e  $L > 0$ , à direita.

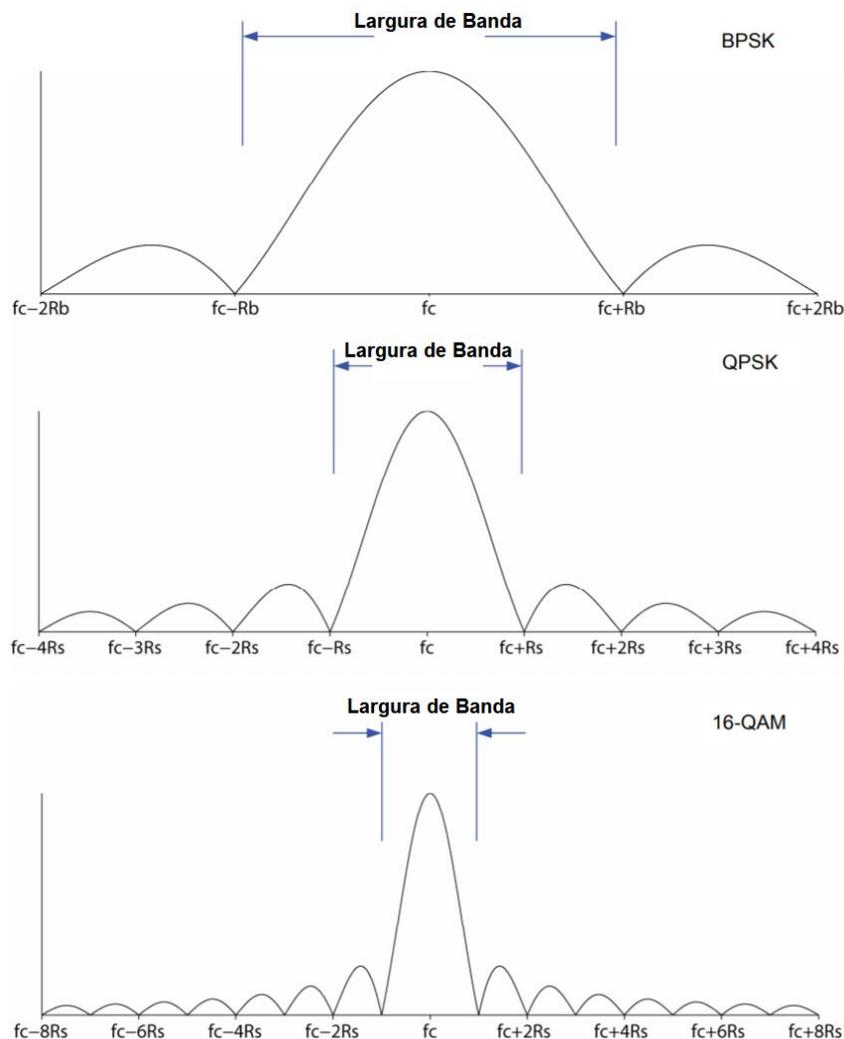
Modos	Subportadora	Largura de banda nominal do sinal (kHz)						
		4,5	5	9	10	18	20	100
A	Lmin.	2	2	-102	-114	-98	-110	-
	Lmax.	102	114	102	114	314	350	-
B	Lmin.	1	1	-91	-103	-87	-99	-
	Lmax.	91	103	91	103	279	311	-
C	Lmin.	-	-	-	-69	-	-67	-
	Lmax.	-	-	-	69	-	213	-
D	Lmin.	-	-	-	-44	-	-43	-
	Lmax.	-	-	-	44	-	135	-
E	Lmin.	-	-	-	-	-	-	-106
	Lmax.	-	-	-	-	-	-	106

Tabela 2: Posição das subportadoras do OFDM.

Fonte: O autor.

## M-QAM

Na modulação M-QAM, dois parâmetros variam de acordo com a informação a ser transmitida, a amplitude e a fase da onda portadora. Essa modulação é bastante utilizada para aplicações de transmissão digital voltada para radiocomunicação, pois é capaz de transportar altas taxas de dados e dependendo da aplicação de desempenho, requer uma maior potência de transmissão e utiliza uma menor largura de banda, conforme a figura 4. Comparado com as modulações lineares como o QPSK e o BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), podemos observar que a modulação 16-QAM, utiliza uma menor largura de banda para transmitir.



**Figura 4: Espectro de frequência para as modulações: BPSK, QPSK e 16-QAM (com taxas de bits iguais).**

Fonte: SKLAR, 2001.

Essa modulação permite que dois sinais sejam transmitidos na mesma banda de frequência, onde as mensagens podem ser separadas no receptor, pois são utilizadas duas portadoras ortogonais, isto é, as duas portadoras são deslocadas na fase em 90 graus (seno e cosseno), moduladas e combinadas. Na figura 5 podemos observar as portadoras antes de serem combinadas (MALBURG, 2004).

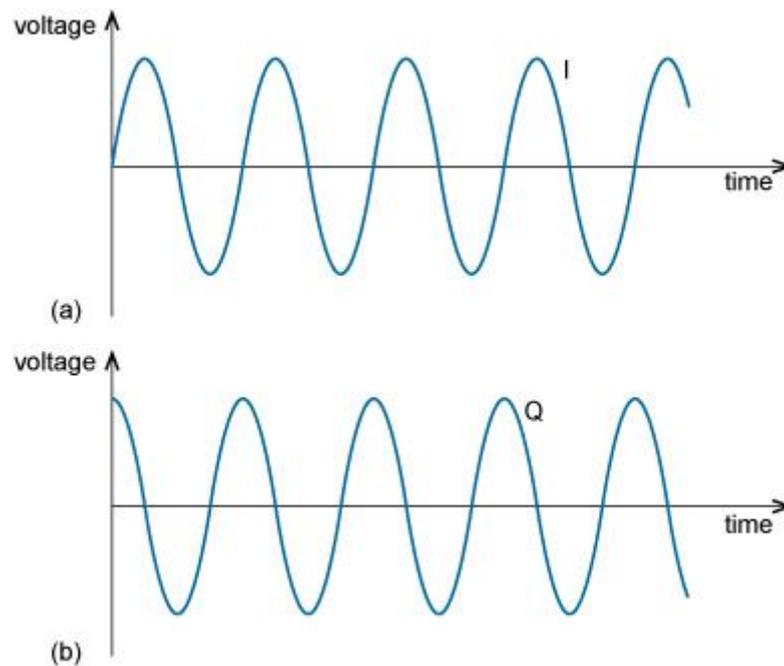


Figura 5: Em (a) temos o seno (fase ou I) e em (b) o cosseno (quadratura ou Q).

Fonte: SKLAR, 2001.

O sinal modulado e combinado é dado por:

$$s(t) = m_1(t)\cos(\Omega_c \cdot t) + m_2(t)\sen(\Omega_c \cdot t) \quad (1)$$

onde  $m_1$  e  $m_2$  são as mensagens.

Pensando na forma fasorial da equação 1, temos a soma de dois fasores perpendiculares um ao outro, então escrevendo a equação nessa forma:

$$s(t) = \Re \left\{ (m_1(t) \cdot e^{j0} + m_2(t) \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}}) e^{j\Omega_c t} \right\} \quad (2)$$

A mensagem enviada pode ser escrita com uma parte real e outra imaginária, como mostra equação 3.

$$m_1(t)e^{j0} + m_2(t)e^{-j\frac{\pi}{2}} = m_1(t) - jm_2(t) \quad (3)$$

Com isso a informação das mensagens podem ser facilmente recuperadas no receptor, como mostra na figura 6, ao multiplicar o sinal recebido por um cosseno gerado localmente e passar por um filtro passa-baixas, temos a informação  $m_1(t)$  e ao multiplicar o sinal recebido por um cosseno gerado localmente e deslocado em  $90^\circ$  (o que resulta em um seno) e passar por um filtro passa-baixas, é possível obter a informação  $m_2(t)$  (SKLAR, 2001).

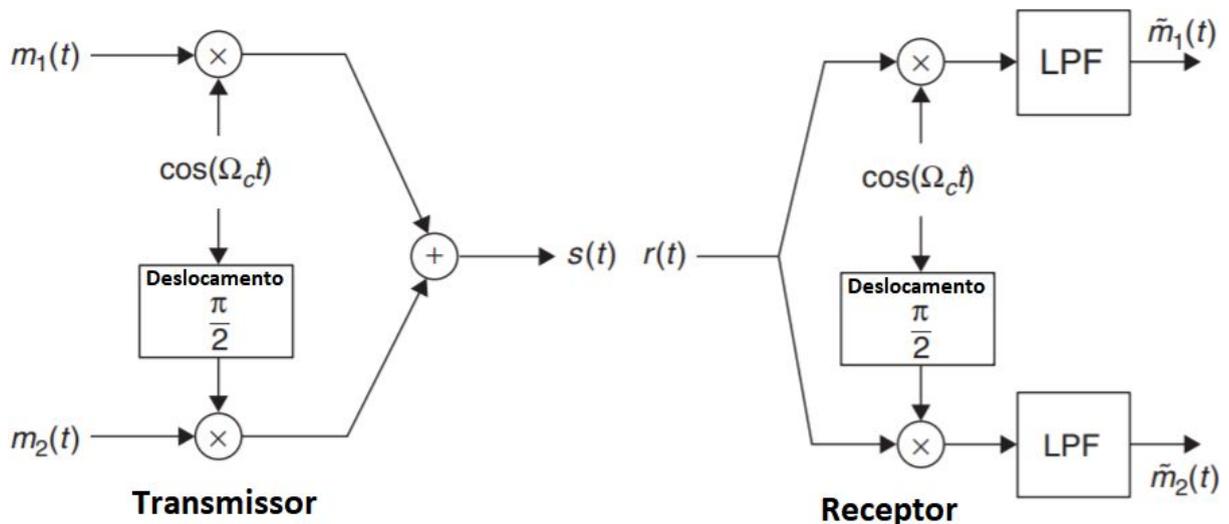


Figura 6: Esquema do transmissor e receptor do M-QAM.

Fonte: SKLAR, 2001.

No caso de um sistema de modulação digital, as informações são transmitidas em uma série de amostras, cada uma ocupando um intervalo de tempo uniforme. Durante cada amostra, a onda portadora tem uma amplitude e fase, as quais são restritas a um número finito de valores.

Para um sistema de modulação digital, a equação 1 pode ser reescrita, substituindo  $m_1(t)$  e  $m_2(t)$  por  $d_I(t)$  e  $d_Q(t)$ .

$$s(t) = d_I(t)\cos(\Omega_c \cdot t) + d_Q(t)\sen(\Omega_c \cdot t) \quad (4)$$

Como é possível ver na equação 4,  $d_I(t)$  e  $d_Q(t)$  representam os níveis de amplitude, que são pulsos discretos que ocupam um intervalo de tempo uniforme. A amplitude pode ser escrita de acordo com a equação 5 e 6.

$$d_I(t) = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} \cdot a_i \quad (5)$$

$$d_Q(t) = \sqrt{\frac{2E_0}{T}} \cdot b_i \quad (6)$$

Os valores  $a_i$  e  $b_i$ , apresentados na equação 5 e 6 são valores independentes entre si e podem assumir os valores  $\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(L-1)$ , onde  $L$  representa o número de bits que é enviado por símbolo, que é dado por  $L = \sqrt{M}$ , e  $M$  é o número de diferentes símbolos que a modulação possui.

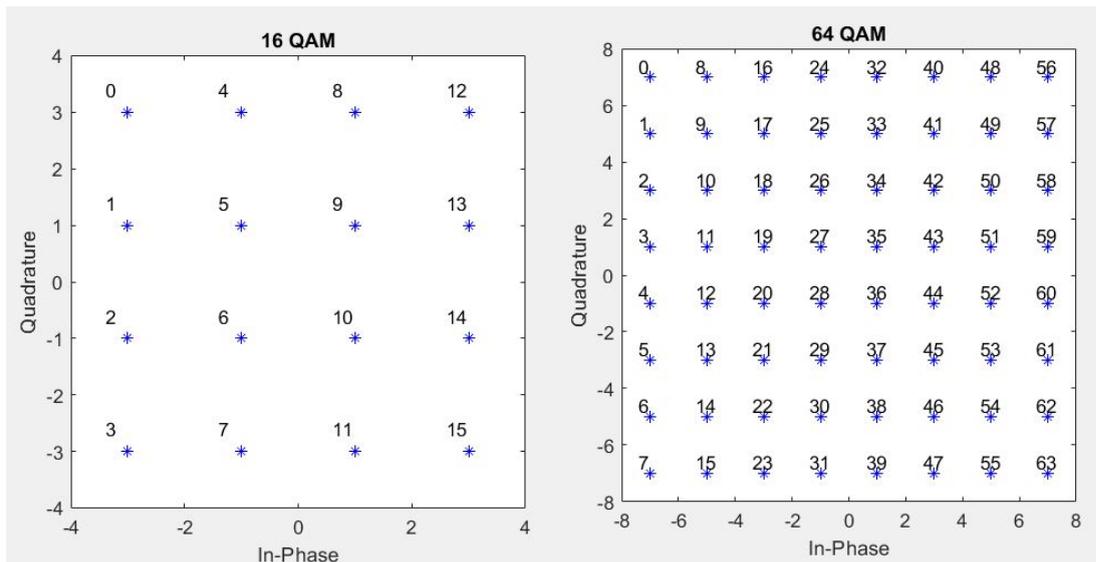
No caso de uma modulação 16-QAM por exemplo, existem 16 diferentes combinações de fase e amplitude, então é possível afirmar que existem 16 símbolos diferentes que podem ser enviados, com isso  $M$  é igual a 16. Cada símbolo representa uma combinação 4 bits, pois o valor  $L = \sqrt{16}$  que é igual 4. Então  $a_i$  e  $b_i$  pode assumir os valores mostrados na equação 7.

$$\{a_i, b_i\} = \begin{bmatrix} (-3, 3) & (-1, 3) & (1, 3) & (3, 3) \\ (-3, 1) & (-1, 1) & (1, 1) & (3, 1) \\ (-3, -1) & (-1, -1) & (1, -1) & (3, -1) \\ (-3, -3) & (-1, -3) & (1, -3) & (3, -3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Portanto, cada amostra representa um dentre um número finito de símbolos, que por sua vez representam um ou mais dígitos binários (bits) de informações. Cada símbolo é codificado como uma combinação diferente de amplitude e fase da portadora, de modo que cada símbolo pode ser representado no diagrama.

O diagrama de constelação é uma representação pictórica que mostra todos os símbolos de modulação possíveis como um conjunto de pontos de constelação. A posição de cada ponto no diagrama mostra a amplitude e a fase do símbolo correspondente. Cada ponto de constelação corresponde a uma combinação de bits diferente, caso do 16-QAM, são 4 bits por símbolo (MALBURG, 2004).

Desta forma, os símbolos podem ser mapeados em um diagrama de constelação retangular, onde um eixo representa a componente em fase do sinal e o outro, sua componente em quadratura, sendo que cada símbolo possui uma distância e fase específica da origem, como é possível ser visto na figura 7.



**Figura 7: Diagrama de constelação 16-QAM (esquerda) e 64-QAM (direita).**

**Fonte: O autor.**

A modulação 16-QAM possui 16 símbolos, onde esses símbolos são distribuídos de forma retangular e uniforme no diagrama e cada símbolo representa 4 bits. No caso de 64-QAM, cada símbolo representa 6 bits, o que implica em uma maior taxa de transmissão.

## OFDM

Sistemas de transmissão de portadora única apresentam alta interferência intersimbólica para taxas elevadas de transmissão e requerem equalizadores adaptativos para compensar os efeitos do canal e, quanto maior a taxa de dados, mais complexos devem ser os equalizadores (FUKUDA, 2016).

A multiplexação OFDM é caracterizada por um agrupamento de múltiplas subportadoras ortogonais para a transmissão dos dados. Esta técnica funciona dividindo a quantidade total de dados entre subportadoras independentes que, por estarem agrupadas de forma ortogonal, têm reduzida a possibilidade de interferirem entre si, permitindo a transmissão simultânea em todas as subportadoras, o que diminui a interferência intersimbólica e aumenta a capacidade de transmissão de dados.

O sistema do DRM usa OFDM, onde todos os dados, produzidos a partir do áudio codificado digitalmente e dos sinais de dados associados, são partilhados para transmissão através de um grande número de portadoras paralelas (ortogonais entre si) com modulação M-QAM.

Baseado no conceito da técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*) que possibilita transmitir diversos sinais simultaneamente em um mesmo meio físico e cada sinal possui sua banda bem definida, o OFDM possui as subportadoras igualmente espaçadas, de modo que cada uma delas tenha um máximo localizado em pontos de cruzamentos de zero do espectro das demais, como podemos ver na figura 8.

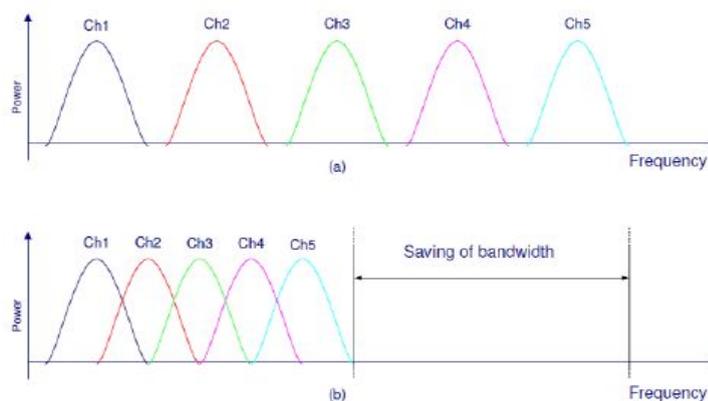
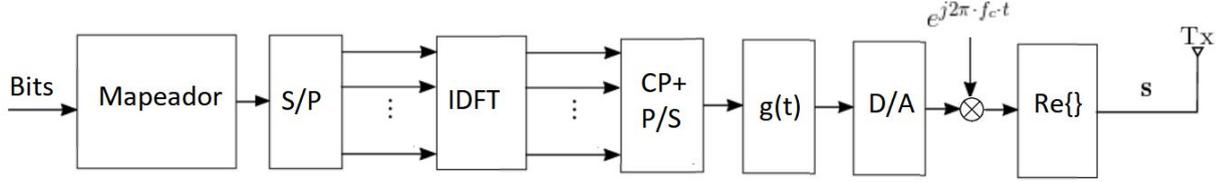


Figura 8: Sistema de portadoras FDM (superior) e OFDM (inferior).

Fonte: FUKUDA, 2016.

Todas as etapas da técnica de transmissão de OFDM pode ser visto no diagrama de blocos que está na figura 9.



**Figura 9: Diagrama de blocos do transmissor OFDM.**

Fonte: O autor.

Como é possível observar na figura 9, o transmissor OFDM mapeia a mensagem binária em uma sequência de símbolos das constelações (M-QAM no caso do DRM), depois passam por um conversor Serial-Paralelo onde são convertidos em  $N$  sinais paralelos. Cada um dos  $N$  sinais são então alocados em diferentes subportadoras ortogonais, onde a duração de cada símbolo é  $NT_s = T_{sym}$  (devido a conversão Serial-Paralelo),  $T_s$  é o tempo de símbolo anterior à conversão e  $T_{sym}$  é o tempo de símbolo posterior à conversão. Na equação 8, temos o  $l$ -ésimo símbolo OFDM com a  $k$ -ésima subportadora  $f_k$  (MIMO-OFDM, 2010).

$$\psi_{l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})}, & 0 < t \leq T_{sym} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (8)$$

Denotando  $X_l[k]$  como o  $l$ -ésimo símbolo transmitido pela  $k$ -ésima subportadora,  $l = 0, 1, 2, \dots, \infty$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , o sinal OFDM no domínio do tempo pode ser representado conforme a equação 9 (MIMO-OFDM, 2010).

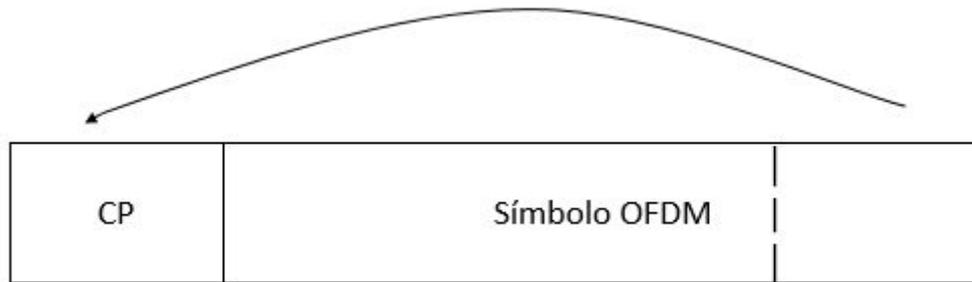
$$x_l(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})} \quad (9)$$

O sinal OFDM da Equação (9) pode ser amostrado em  $t = lT_{sym} + nT_s$  com  $T_s = \frac{T_{sym}}{N}$  e  $f_k = \frac{k}{T_{sym}}$ , levando ao correspondente símbolo OFDM de tempo discreto como (MIMO-OFDM, 2010):

$$x_l[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi kn/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (10)$$

É possível notar que a equação (10) é a IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) de  $N$  pontos de um sinal M-QAM e pode ser computada com o algoritmo de IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*).

No caso de canais multipercurso, é comum utilizar uma técnica de adição CP (*Cyclic Prefix*). O CP consiste em copiar as últimas amostras de um símbolo OFDM e colocá-las na frente do símbolo (MIMO-OFDM, 2010). A figura 10 demonstra o símbolo com o CP:



**Figura 10: Esquema de CP.**

**Fonte: LENHARO, 2010.**

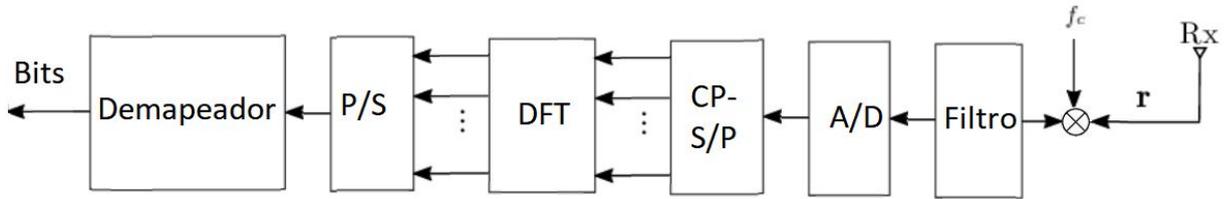
Se o tempo do CP for maior que a maior duração do canal, mesmo que haja a sobreposição de um trecho do símbolo, ao remover a informação do prefixo cíclico, se obtém toda a informação do símbolo no receptor, sem interferência intersimbólica (MIMO-OFDM, 2010).

Então para realizar a transmissão desse sinal é calculada a IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) e depois é feita a inserção do CP, o sinal é convertido de digital para analógico para ser enviado pelo canal de transmissão.

O sinal transmitido por ser descrito matematicamente conforme a equação (11) (MIMO-OFDM, 2010):

$$y_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})}, \quad lT_{sym} < t \leq lT_{sym} + nT_S \quad (11)$$

No receptor o sinal passa por um filtro, que possui largura de banda ajustada de acordo com faixa de transmissão e, logo em seguida, é feito todo o processo inverso do transmissor, como podemos observar na figura 11. Onde o sinal é convertido de analógico para digital, é feita a remoção do CP e ele é convertido de serial para paralelo, de modo que possa ser calculada a DFT (*Discrete Fourier Transform*) das portadoras. Por fim o sinal é convertido de paralelo para serial, para que possa ser demodulado de acordo com a modulação necessária.



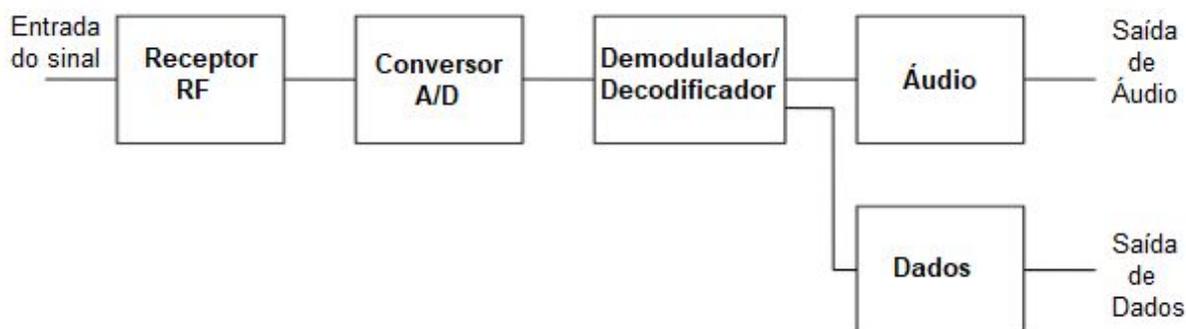
**Figura 11: Diagrama de blocos do receptor OFDM.**  
**Fonte:O autor.**

Matematicamente, cada subportadora pode ser demodulada usando a equação 12. Esta expressão permite isolar cada subportadora e, pela ortogonalidade entre elas, é possível demodular o conteúdo de uma subportadora sem a interferência das outras componentes do sinal.

$$\frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{k-i}{T_{sym}} t} dt = \begin{cases} 1, & \forall k = i, k \in \mathbb{Z} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (12)$$

#### 4.1.2. Processo de Recepção

O processo de recepção do DRM é semelhante ao de transmissão, porém funciona de forma contrária, como é possível visualizar na figura 12.



**Figura 12: Diagrama de blocos Receptor do DRM.**  
Fonte: O autor.

Inicialmente uma interface física faz a recepção do sinal de RF (*Radio Frequency*), no qual é feita a conversão do sinal analógico em digital. Durante a demodulação/decodificação é importante o receptor do DRM obter as informações do canal FAC pois ele fornece informações de seleção de serviço para varredura rápida e parâmetros necessários para iniciar a decodificação multiplex. Além disso o SDC fornece informações para decodificação completa do MSC e atributos dos serviços.

Com essas informações o sinal é decodificado e demodulado de acordo com o modo de transmissão que foi utilizado. A seleção de serviço fica por conta do receptor, ele deve fornecer os serviços disponíveis ao usuário, isto é, se ele deseja serviço de áudio e os diferentes tipos de serviços de dados.

O sistema do DRM foi desenvolvido com o objetivo de promover o desenvolvimento de receptores de baixo custo. E como é visto na figura 12, é necessário um front-end apenas para a recepção do sinal analógico, depois disso, todo processamento pode ser feito através do computador. Então existem várias implementações de DRM em execução em DSP e estão disponíveis no mercado. Além disso, o DRM possui alguns pontos em comum com o sistema de rádio digital

DAB, especialmente na parte de codificação de áudio e dados, e isso possibilitou o uso de SDR para criação de receptores do DRM.

## **4.2. Conteúdo do DRM**

No DRM o sinal transmitido pode ser formado somente por áudio, somente por dados ou uma mistura de áudio e dados, isso depende do modo de operação e da necessidade de transmissão. Porém, algumas normas são estabelecidas no envio de dados e áudio, onde existe um conteúdo que é obrigatório a ser transmitido ou uma norma a ser adotada.

### **4.2.1. Áudio**

O sistema do DRM utiliza a mais recente tecnologia de codificação de áudio do MPEG (*Moving Picture Experts Group*), o xHE-AAC (*Extended High-Efficiency Advanced Audio Coding*). O xHE-AAC pode codificar um canal de áudio com uma baixa taxa de bits e uma boa qualidade, por exemplo 6kbps mono e áudio estéreo a 12kbps. Além disso, o DRM ainda mantém a compatibilidade com a codificação de áudio AAC (*Advanced Audio Coding*) para continuar o suporte com versões anteriores (ETSI, 2017).

No caso de ser utilizada a versão anterior do codec, é necessário utilizar a combinação de codificação PS (*Parametric Stereo*) e SBR (*Spectral Band Replication*).

O PS é um algoritmo de compactação com perdas que é utilizado para transmissão de áudio estéreo em uma largura de banda menor, onde o áudio estéreo é convertido para mono e transmitido junto com algumas informações que permite a sua reconstrução na receptor, no qual ele é convertido novamente em estéreo (ETSI, 2017).

O SBR é uma tecnologia usada na codificação de áudio para aumentar a eficiência da codificação de áudio em taxas de bits mais baixas. Em taxas de bits mais baixas, um codificador de áudio não terá bits suficientes disponíveis para codificar as frequências mais altas. SBR é uma tecnologia para recriar as

frequências mais altas a partir das frequências mais baixas codificadas, juntamente com algumas informações adicionais.

O SBR usa o fato de que as frequências mais altas geralmente são harmônicas das frequências mais baixas (ETSI, 2017).

Como podemos ver na figura 13, o DRM é compatível tanto com o xHE-AAC quanto com o codificador AAC, junto com PS e SBR. No caso do xHE-AAC, o PS e o SBR já estão inclusos internamente.

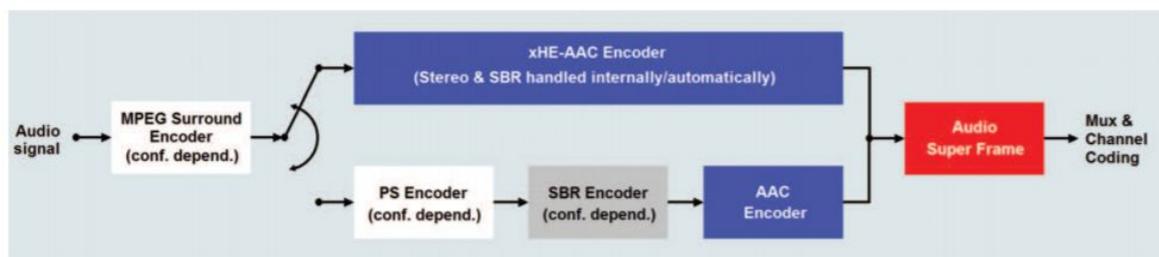


Figura 13: Geração de conteúdo de áudio.

Fonte: DRM Consortium.

#### 4.2.2. Dados

Alguns elementos são obrigatório para a transmissão de dados no DRM, são eles:

- **Service ID (Identificação do Serviço):** O *Service ID* do DRM é um identificador exclusivo que é atribuído a todos os programas do DRM. É responsabilidade do emissor atribuir um ID exclusivo a cada um de seus serviços do DRM. Os valores de ID de serviço do DRM são normalmente atribuídos pelas autoridades nacionais. O *Service ID* ativa o mecanismo AFS (sinalização de frequência alternativa) e permite que um receptor encontre e identifique o programa selecionado, mesmo que sua frequência tenha mudado. Ele não é usado pelo ouvinte para seleção de serviço ou programa, nem é mostrado nos displays de receptor do consumidor (DRM Consortium).

- **Service Labelling (Rotulação de Serviço):** O ouvinte é informado sobre o serviço selecionado através do nome do programa (*DRM Service Labelling*). O *DRM Service Labelling* é o principal mecanismo de identificação e seleção de programas do ouvinte, enquanto as informações sobre a frequência de transmissão atual ou mesmo o padrão de transmissão podem não ser divulgadas pelos receptores de rádio digital modernos (DRM Consortium).

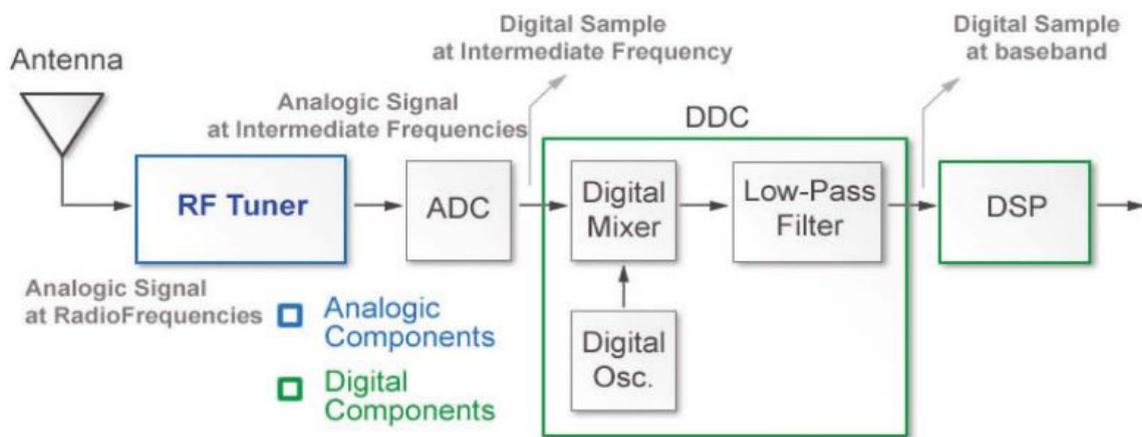
Outros elementos são opcionais, porém são normalmente estão presente na transmissão de dados no DRM, são eles:

- **Programme Type (Tipo de Programa):** Deve ser informado o tipo de programa que está passando e com isso é possível realizar a seleção de um serviço através do gênero do programa, por exemplo, notícias, rock ou drama. O DRM suporta a sinalização opcional de 29 tipos de programas comuns para serviços de áudio (DRM Consortium).

## 5. SDR

O SDR é um termo genérico que se refere a um sistema de rádio no qual quase toda a funcionalidade associada à camada física é implementada em *software* usando algoritmos de DSP (STEWART, 2015).

Na Figura 14 é possível observar que o receptor SDR ideal seria formado por um *hardware* muito pequeno; apenas uma antena e um amostrador de alta velocidade capaz de capturar e digitalizar uma ampla faixa de frequências de rádio.



**Figura 14: Diagrama de blocos do SDR.**  
Fonte: FERNÁNDEZ, 2017.

Partindo desse conceito, surgiu no mercado o RTL-SDR, que é um dispositivo USB de baixo custo e fácil de usar que recebe sinais de rádio RF. Originalmente, esses dispositivos foram projetados para serem usados como receptores DVB-T, mas foi descoberto que eles poderiam ser usados como SDRs genéricos (STEWART, 2015).

Neste modo, eles são capazes de receber qualquer sinal no alcance de seu tuner; não apenas os sinais de televisão digital que eles foram projetados para receber. Atualmente no mercado existem diversos tipos desses aparelhos e na figura 15 temos alguns exemplos.

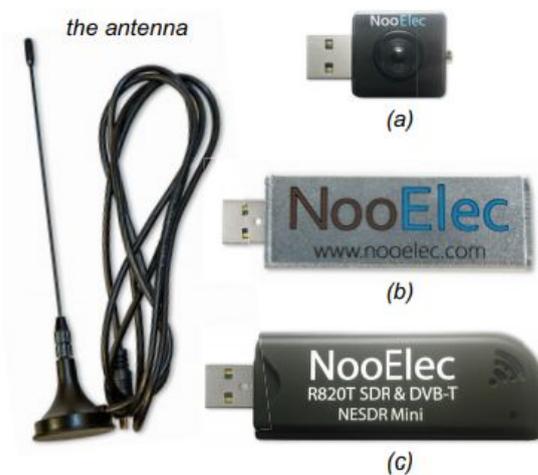


Figura 15: Diferentes tipos de RTL-SDR e sua antena.

Fonte: STEWART, 2015.

Na figura 16 mostra o esquema de funcionamento do RTL-SDR. Ele funciona em tempo real com o *software* de simulação MATLAB e é composto por uma antena e um *hardware* RTL-SDR que faz todo o tratamento necessário para que ele possa ser trabalhado no MATLAB. O dado pode ser áudio, vídeo, imagem ou mensagens. Então através de um computador com o MATLAB instalado é possível reproduzi-los (STEWART, 2015).

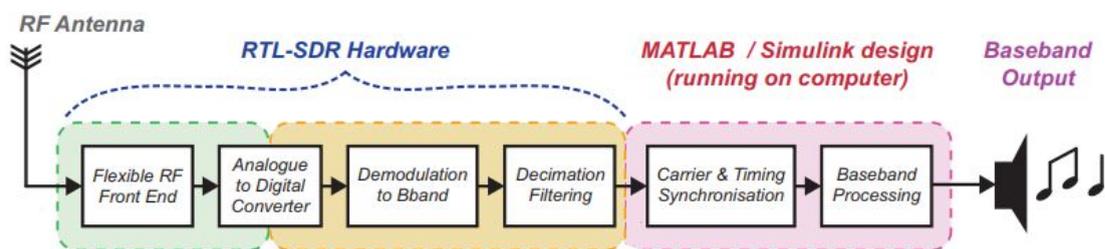


Figura 16: Diagrama de blocos de um sistema RTL-SDR.

Fonte: STEWART, 2015.

## 6. Simulação e Análise Computacional

Para um melhor entendimento do funcionamento básico do sistema de transmissão de áudio do DRM, foi realizado algumas simulações simplificadas no MATLAB e *Simulink*. Na simulação será utilizado um arquivo de áudio WAV (*Waveform Audio File Format*) de demonstração oferecido pelo próprio MATLAB chamado de *handel.wav*, que é um trecho de áudio de *The Messiah Hallelujah* de Handel.

Primeiramente esse arquivo de áudio é lido através do MATLAB e armazenado em um vetor, onde os valores lidos são decimais. Em seguida, os valores contido nos vetores são convertidos para binário, para que possa ser transmitido, esse vetor possui 1170160 bits, que serão enviados e analisados de acordo com cada sistema simulado. O modelo de canal adotado nas simulações é o AWGN (*Additive White Gaussian Noise*), que foi escolhido apenas para efeito de simulação.

### 6.1. Desempenho de Sistemas de Modulação M-QAM em canais AWGN

A primeira simulação é de um sistema simples onde arquivo de áudio é lido e convertido para um sinal digital, através da amostragem e da quantização, e em seguida ele é modulado conforme a modulação utilizada no DRM, sendo a primeira 16-QAM. Depois de modulado esse sinal é transmitido por um canal com ruído do tipo AWGN.

No receptor ele é demodulado e em seguida calculado a BER ou taxa de erro de bit que é uma medição onde se avalia a quantidade de bits com erro dentro de uma transmissão. O BER está diretamente relacionado a relação  $E_b/N_0$  (energia de bit por densidade espectral de potência de ruído), pois quanto menor o nível de ruído menores serão as distorções e conseqüentemente menores serão as proporções de bits com erro.

Então na simulação, é calculado o valor da BER para diferentes valores de  $E_b/N_0$  (que varia de 0 dB até 12 dB) e criado um gráfico que compara o valor teórico, o valor a partir de dados aleatórios gerados pelo MATLAB (no qual são enviados  $10^7$  bits) e dados gerados a partir do arquivo de áudio.

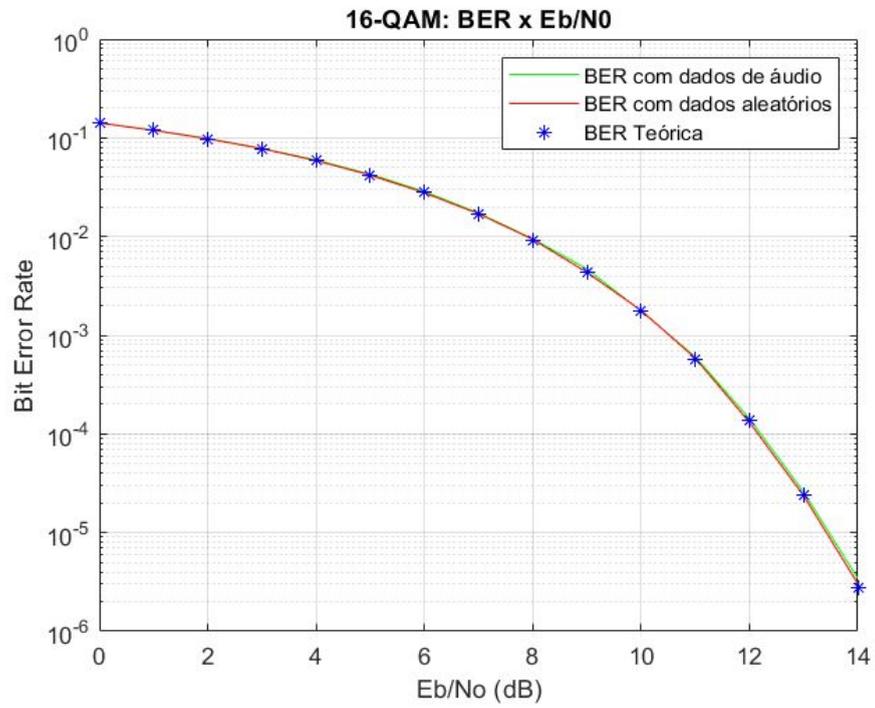


Figura 17: Gráfico de BER por Eb/No para modulação 16-QAM.

Fonte: O autor.

O mesmo é feito para as modulação 64-QAM, como podemos ver na figura 18.

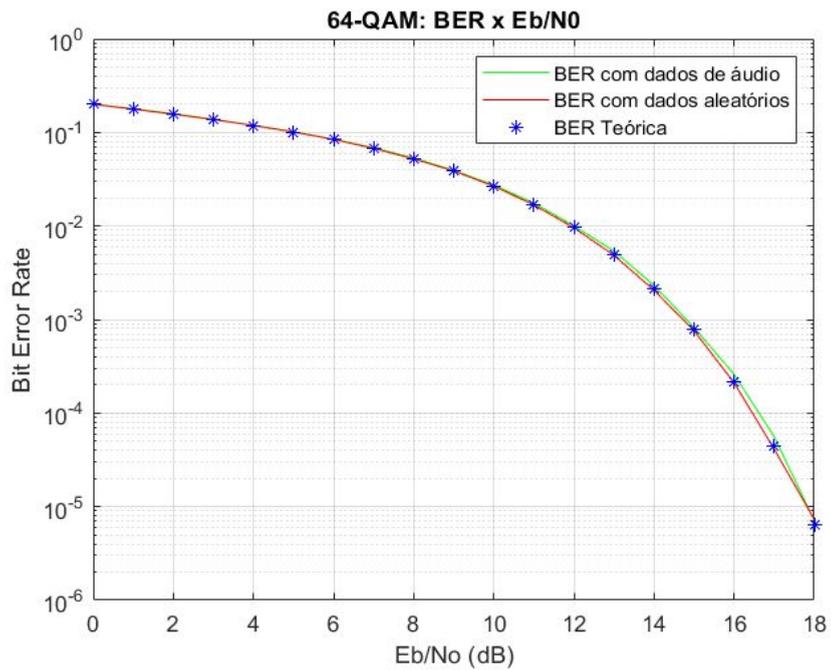


Figura 18: Gráfico de BER por Eb/No para modulação 64-QAM.

Fonte: O autor.

Também foi utilizado uma curva com dados gerados aleatoriamente, que possui mais bits ( $10^7$  bits), para ter a precisão desejada.

Na figura 17 temos a modulação 16-QAM e uma das curvas foi obtida com valores lidos de um arquivo de áudio. Para essa curva o valor de  $E_b/N_0$  para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 10.5 dB. Já na figura 18 temos a modulação 64-QAM, o valor de  $E_b/N_0$  para a mesma curva e para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 14.7 dB.

Com isso, é possível observar que a modulação 16-QAM possui uma taxa de erro de bit bem menor se comparado com o 64-QAM. Isso se dá pois na medida que o número de símbolos aumenta, a taxa de erro também aumenta. Isso ocorre pois na medida que o número de símbolos  $M$  aumenta, é carregado um número maior de bits e isso aumenta a propagação de erro.

O esquema de modulação principal escolhido para o DRM foi o 64-QAM, ainda que com o custo de uma diminuição da qualidade de som, pois o 16-QAM oferece uma maior resistência às interferências, como foi possível observar na simulação anterior, o 64-QAM pode transmitir uma maior quantidade de símbolos.

## **6.2. Desempenho de Sistemas de Modulação 64-QAM em canais AWGN empregando codificação de FEC**

A segunda simulação funciona de forma parecida com a anterior, porém agora é utilizado codificação de FEC, que tem como objetivo a obtenção de uma BER menor. Essa simulação apesar de não ser um modelo representativo do DRM, ela vai permitir realizar uma análise do efeito da codificação na BER, então será utilizada outros parâmetros de codificação apenas para efeito de demonstração.

Inicialmente, será utilizado o código RS, que consiste na geração dos símbolos de paridade de uma sequência. Como o RS é representado na forma  $RS(n,k)$ , onde  $n$  é o número total de símbolos em uma sequência e  $k$  é o número de símbolos úteis de uma sequência. No DRM, o RS é utilizado para a codificação de dados.

Para essa simulação será utilizada a modulação 64-QAM, que possui 64 símbolos, onde esses símbolos são distribuídos de forma retangular e uniforme no

diagrama e cada símbolo representa 6 bits ( $m=6$ ) e o código precisa ser capaz de corrigir 6 símbolos.

Com isso, temos que o valor de  $m$  é igual a 6, então aplicando nas relação abaixo, temos:

$$n = 2^6 - 1 = 63$$

$$k = 2^m - 1 - 2(6) = 51$$

Então foi usado código Reed-Solomon RS(63,51), com uma variação do  $E_b/N_0$  de 1 dB a 15 dB, de modo que seja possível observar a BER até  $10^{-6}$ .

Com isso, no receptor é calculado o valor da BER para diferentes valores de  $E_b/N_0$  e criado um gráfico que compara o valor calculado na simulação (codificado), o valor teórico e o valor sem codificação, como mostra a figura 19.

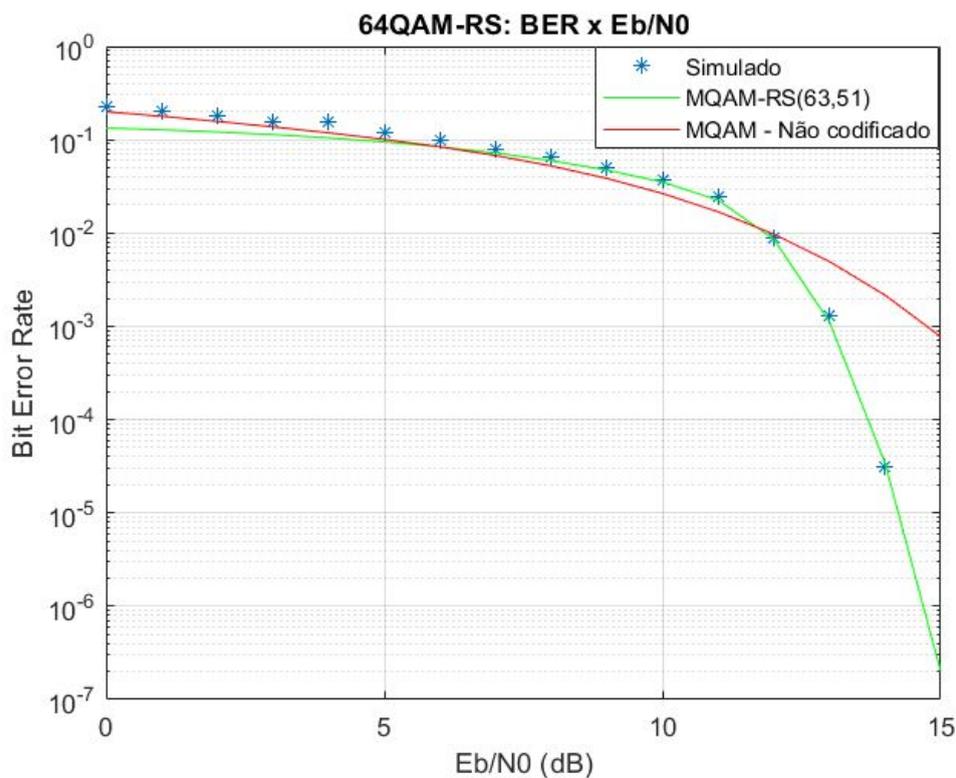


Figura 19: Gráfico de BER por  $E_b/N_0$  para modulação 64-QAM com codificação RS(63,51).

Fonte: O autor.

Na figura 19 temos o gráfico BER por  $E_b/N_0$  para a modulação 64-QAM com com codificação RS(62,51), onde o valor de  $E_b/N_0$  para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 13 dB. Já na figura 18 temos a modulação 64-QAM sem codificação, no qual valor de  $E_b/N_0$  para a mesma curva e para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 14.7 dB.

É possível observar no gráfico obtido que quanto maior o valor de  $E_b/N_0$  melhor é a performance do código corretor de erros. Além disso, foi possível melhorar o desempenho de transmissão, uma vez que o número de bits recebidos errados foi menor que o valor apresentado para o sistema sem codificação.

O DRM também utiliza codificação convolucional para transmissão do canal MSC, então será realizada uma simulação utilizando esse tipo de codificação. Como o intuito dessa simulação é apenas analisar o efeito da codificação na BER, então será utilizado parâmetros de codificação apenas para efeito de demonstração. A taxa de codificação utilizada é de  $2/3$ , com comprimento (*constraint length*) igual a [5 4] e uma matriz geradora de polinômio [23 35 0 ; 0 5 13]. Os valores de  $E_b/N_0$  variam de 0 a 16, de modo que seja possível observar a BER até  $10^{-6}$ , como é possível observar na figura 20.

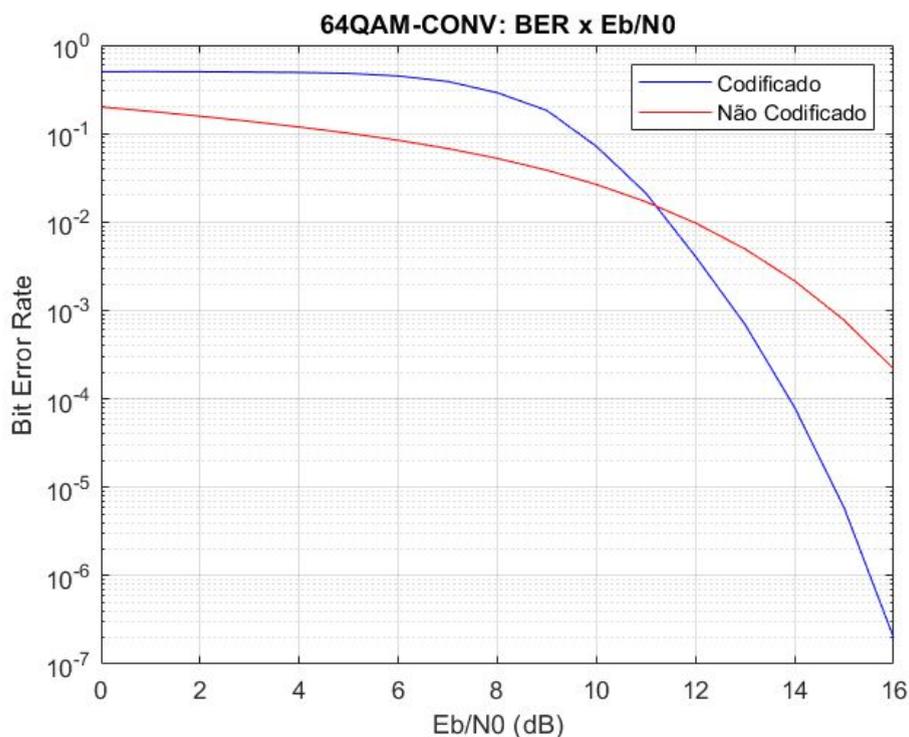


Figura 20: Gráfico de BER por  $E_b/N_0$  para modulação 64-QAM com codificação convolucional.

Fonte: O autor.

Na figura 20 temos o gráfico BER por  $E_b/N_0$  para a modulação 64-QAM com codificação convolucional, onde o valor de  $E_b/N_0$  para uma BER de  $10^{-3}$  é igual

a 12.8 dB. Já na figura 18 temos a modulação 64-QAM sem codificação, no qual valor de  $E_b/N_0$  para a mesma curva e para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 14.7 dB.

Assim como ocorreu com a codificação RS, a convolucional melhorou o desempenho de transmissão, uma vez que o número de bits recebidos errados foi menor que o valor apresentado para o sistema sem codificação.

### 6.3. Desempenho de Sistemas de Modulação OFDM com modulação M-QAM em canais AWGN

Nessa simulação do sistema OFDM, não será utilizado um sinal de áudio, apenas dados aleatórios gerados pelo MATLAB.

O sistema de modulação que será considerado é o 16-QAM onde é utilizado 128 subportadoras e CP de tamanho 32. As simulações foram realizadas para canais AWGN, com isso número de subportadoras não influencia no desempenho do sistema e, sem perda de generalidade e com o intuito de simplificar e uniformizar as simulações, foram adotadas um de 128 subportadoras e CP de tamanho 32.

Novamente, no receptor é calculado o valor da BER para diferentes valores de  $E_b/N_0$  e criado um gráfico que compara o valor calculado na simulação com o valor teórico.

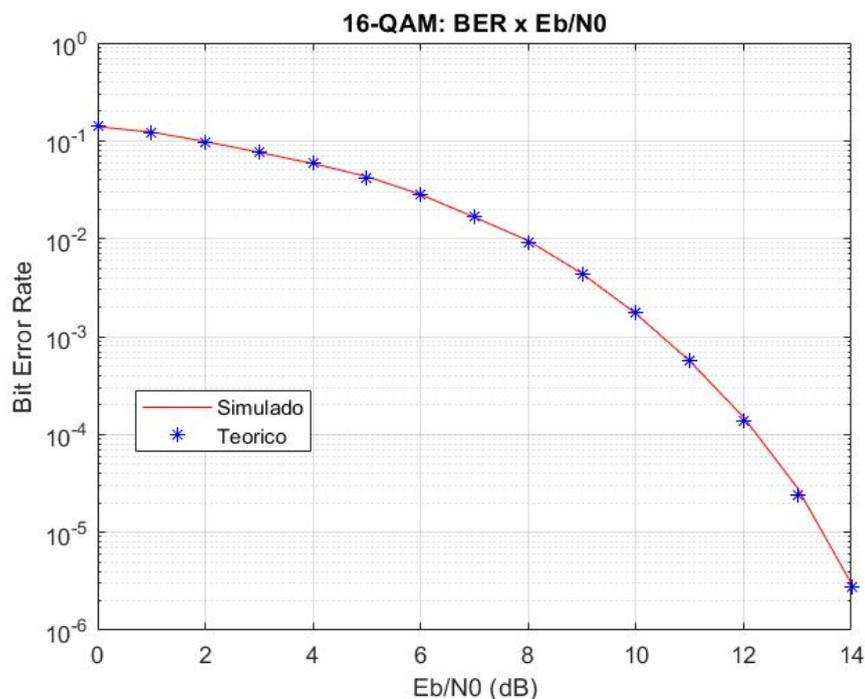


Figura 21: Gráfico de BER por  $E_b/N_0$  para modulação 16-QAM com OFDM.

Fonte: O autor.

Como o modo de operação B do DRM também suporta a modulação 64-QAM, foi realizado a mesma simulação utilizando 64-QAM, 128 subportadoras e CP igual a 32, como podemos ver na figura 22.

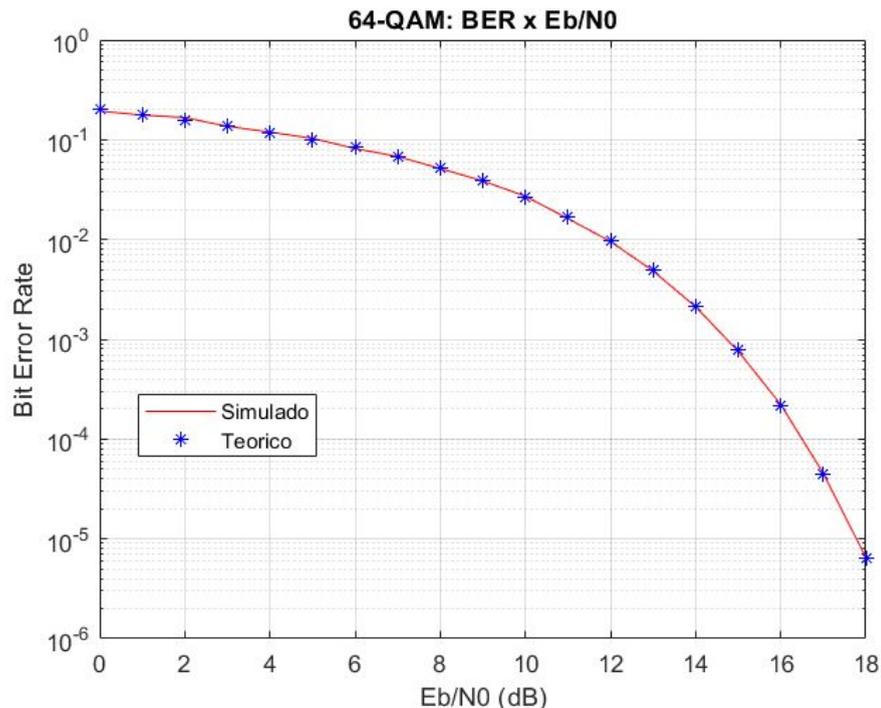


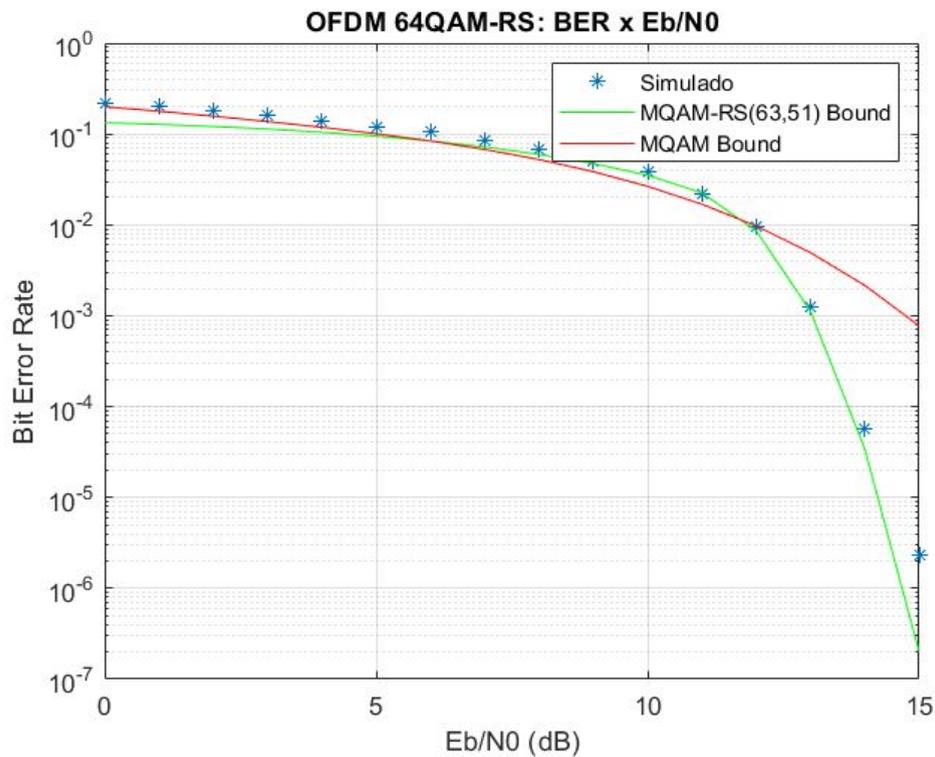
Figura 22: Gráfico de BER por Eb/No para modulação 64-QAM com OFDM.

Fonte: O autor.

Na figura 21 temos a modulação 16-QAM onde o valor de Eb/No para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 10.5 dB. Já na figura 22 temos a modulação 64-QAM, o valor de Eb/No para a mesma curva e para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 14.6 dB.

Com isso, é possível observar que a curva obtida através da simulação segue a curva teórica e está coerente com o valor obtido nas simulações realizadas na seção 6.1.

Uma forma de melhorar a performance desse sistema OFDM, seria por meio da codificação, conforme foi realizado na seção 6.2. Então utilizando a modulação 64-QAM, que foi escolhida para ser codificada pois apresentou ser mais suscetível a erros que a modulação 16-QAM, será aplicada a codificação RS(63,51), conforme mostra a figura 23. Para os parâmetros do OFDM foi considerado o modo de operação B do DRM que possui 128 subportadoras e CP igual a 32.



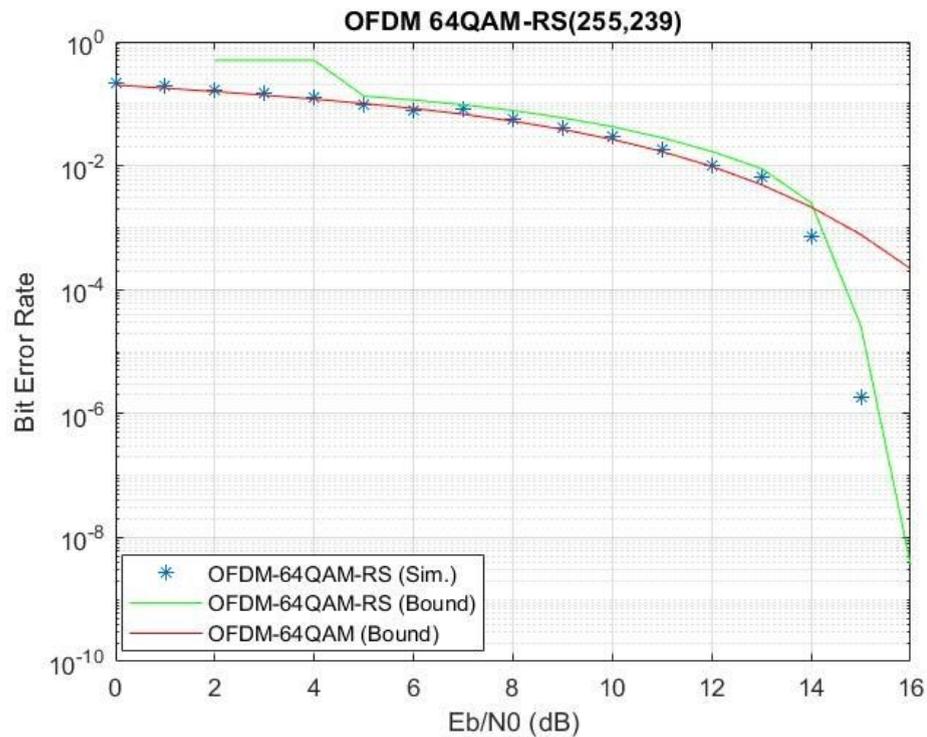
**Figura 23: Gráfico de BER por Eb/No para sistema OFDM codificado com RS(62,51) e modulação 64-QAM.**

Fonte: O autor.

Na figura 23 temos o gráfico BER por  $E_b/N_0$  do sistema OFDM com modulação 64-QAM e codificado com RS(62,51), onde o valor de  $E_b/N_0$  para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 13 dB. Já na figura 22 temos o sistema OFDM com modulação 64-QAM e sem codificação, no qual valor de  $E_b/N_0$  para a mesma curva e para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 14.6 dB.

Com isso, foi possível observar que a codificação do sistema OFDM melhorou desempenho de transmissão, uma vez que o número de bits recebidos errados foi menor que o valor apresentado para o sistema sem codificação.

Agora utilizando os parâmetros de codificação RS(255,239), o mesmo que é utilizado para dos dados dos DRM e mantendo os parâmetros do OFDM com 128 subportadoras e CP igual a 32, temos o gráfico de BER na imagem 24.



**Figura 24: Gráfico de BER por  $E_b/N_0$  para sistema OFDM codificado com RS(255,239) e modulação 64-QAM.**

Fonte: O autor.

Na figura 24 temos o gráfico de BER por  $E_b/N_0$  do sistema OFDM com modulação 64-QAM e codificado com RS(255,239), onde o valor de  $E_b/N_0$  para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 13.84 dB. Já na figura 22 temos o sistema OFDM com modulação 64-QAM e sem codificação, no qual valor de  $E_b/N_0$  para a mesma curva e para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 14.6 dB. Por fim, na figura 23 temos o gráfico de BER por  $E_b/N_0$  do sistema OFDM com modulação 64-QAM e codificado com RS(62,51), onde o valor de  $E_b/N_0$  para uma BER de  $10^{-3}$  é igual a 13 dB.

Para uma BER de  $10^{-3}$  a codificação RS(62,51) apresentou um resultado um pouco melhor que a codificação RS(255,239). Porém, a medida com que o valor de  $E_b/N_0$  vai aumentando, a codificação RS(255,239) vai se aproximando do resultado da codificação RS(62,51), até que a partir de 17 dB a codificação RS(255,239) fica melhor a codificação RS(62,51).

## 7. Desenvolvimento e análise de um receptor Digital simplificado com SDR

Para a implementação de um modelo prático simplificado que demonstre o conceito de um receptor de rádio digital genérico, foi desenvolvido um receptor utilizando o MATLAB/*Simulink* e um dispositivo USB RTL-SDR. Nos seguintes testes não será feito um modelo representativo do DRM, porém será possível realizar uma análise de um receptor de rádio digital genérico através de modulações digitais como a QPSK, que será apresentado a partir da seção 7.2.

### 7.1. Testes iniciais com o RTL-SDR

Com todos os drivers instalados e configurados corretamente, conforme apresentado no apêndice A, foi montado inicialmente um sistema inicial no *Simulink* que adquire e exibe os espectro dos sinais de RF que são transmitidos, com frequência central de 100 MHz e ganho de 50 dB. Então até o momento, não está sendo utilizada nem um tipo modulação específica. O objetivo é apenas utilizar o RTL-SDR para fazer uma varredura no espectro.

Através desse sistema simples representado na figura 25, foi possível entender como sintonizar a frequência central do RTL-SDR através do *Simulink* e também como ter controle do ganho do RTL-SDR.

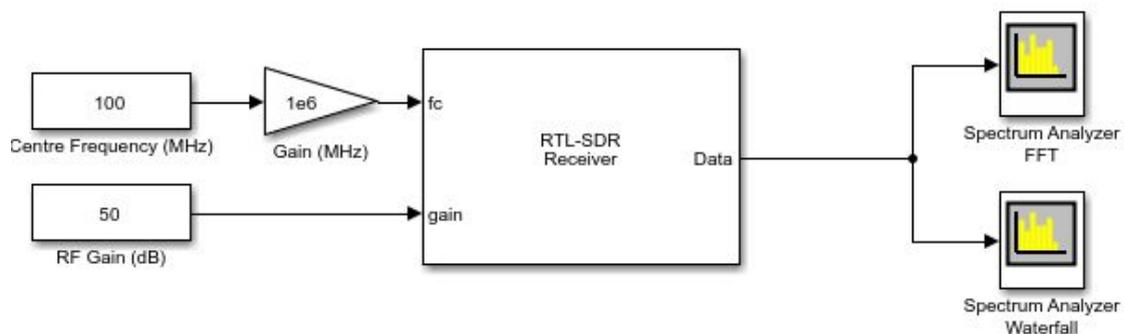
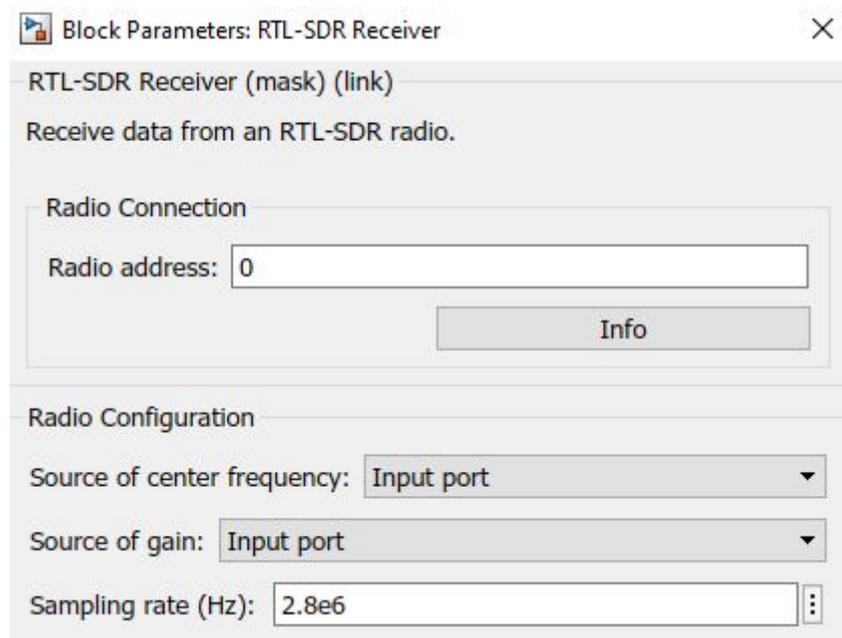


Figura 25: Esquema no *Simulink* para obter espectro de frequências.

Fonte: O autor.

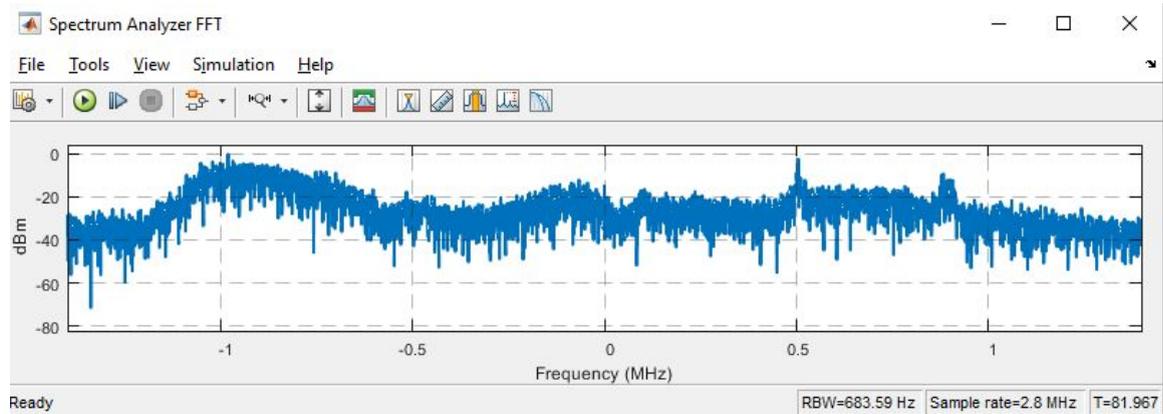
O bloco *RTL-SDR Receiver* é usado para configurar o RTL-SDR e também é a fonte através da qual os sinais de RF recebidos entram no modelo *Simulink*. Como é possível verificar na figura 26, o bloco RTL-SDR é ajustado para o valor do bloco de *Centre Frequency (MHz)* e o ganho do sintonizador é aplicado de acordo com o valor de *RF Gain (dB)*. Os sinais recebidos pelo RTL-SDR é um fluxo de amostras de dados complexos de 8 bits, com isso essas amostras de I-Q são enviadas pela porta de saída *Data* do bloco *RTL-SDR Receiver* como um sinal complexo.



**Figura 26: Parâmetros do bloco *RTL-SDR Receiver*.**

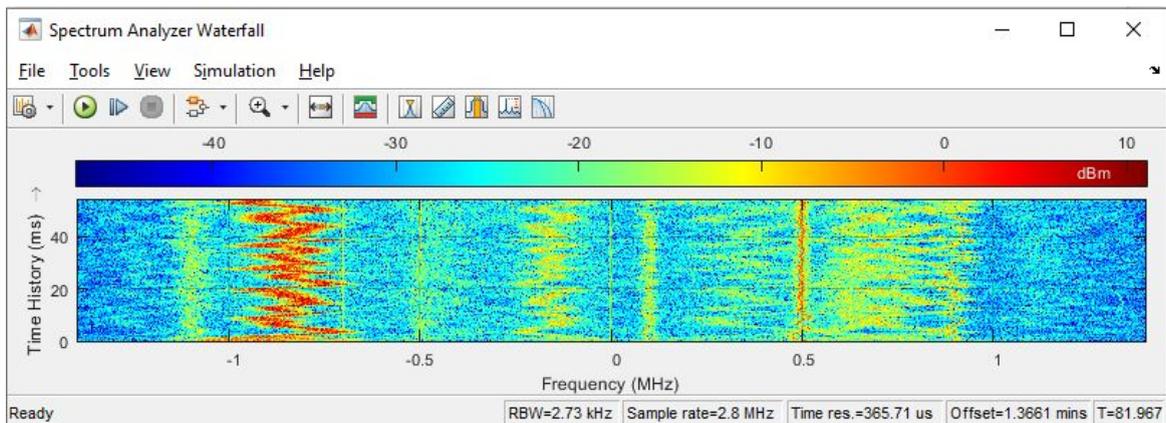
**Fonte: O autor.**

O sinal é enviado para dois blocos do *Spectrum Analyzer*. O primeiro é configurado para mostrar FFT do sinal recebido, que terá uma largura de banda em MHz. O segundo *Spectrum Analyzer* está configurado para mostrar um espectrograma e terá a mesma largura de banda que o primeiro. Após executar o esquema, são gerados dois gráficos, figura 27 e 28, que mostra os respectivos espectros.



**Figura 27: FFT do sinal recebido.**

**Fonte: O autor.**



**Figura 28: Espectrograma do sinal recebido.**

**Fonte: O autor.**

O RTL começa a captar os dados e a partir do momento que ele captura 4000 amostras, com isso o gráfico do espectro começa a ser plotado e atualiza de acordo com a aquisição de novos dados. Com a frequência central de 100 MHz, que é a frequência que será utilizada para o primeiro teste de recepção digital.

## 7.2. Recepção de Sinal Digital com Modulação QPSK utilizando Gerador AM300 como transmissor

Para realizar a implementação de um receptor utilizando RTL-SDR, foi necessário elaborar um transmissor de sinal QPSK, conforme é mostrado no apêndice B. Com isso, foi projetado um receptor no *Simulink*, com o auxílio do livro *Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR* (STEWART, 2015).

O diagrama montado no *Simulink* pode ser visto na figura 29, onde ele é composto pelo bloco *RTL-SDR Receiver* que é usado para configurar o RTL-SDR e também é utilizado para captar os sinais de radiofrequência e enviar para o modelo no *Simulink*. Nele é ajustado a faixa de frequência de 80 MHz para recepção, com ganho de sintonizador igual a 3 dB. Os sinais recebidos pelo RTL-SDR é um fluxo de amostras de dados complexos de 8 bits, com isso essas amostras de I-Q são enviadas pelo porta de saída *Data* do bloco *RTL-SDR Receiver* como um sinal complexo.

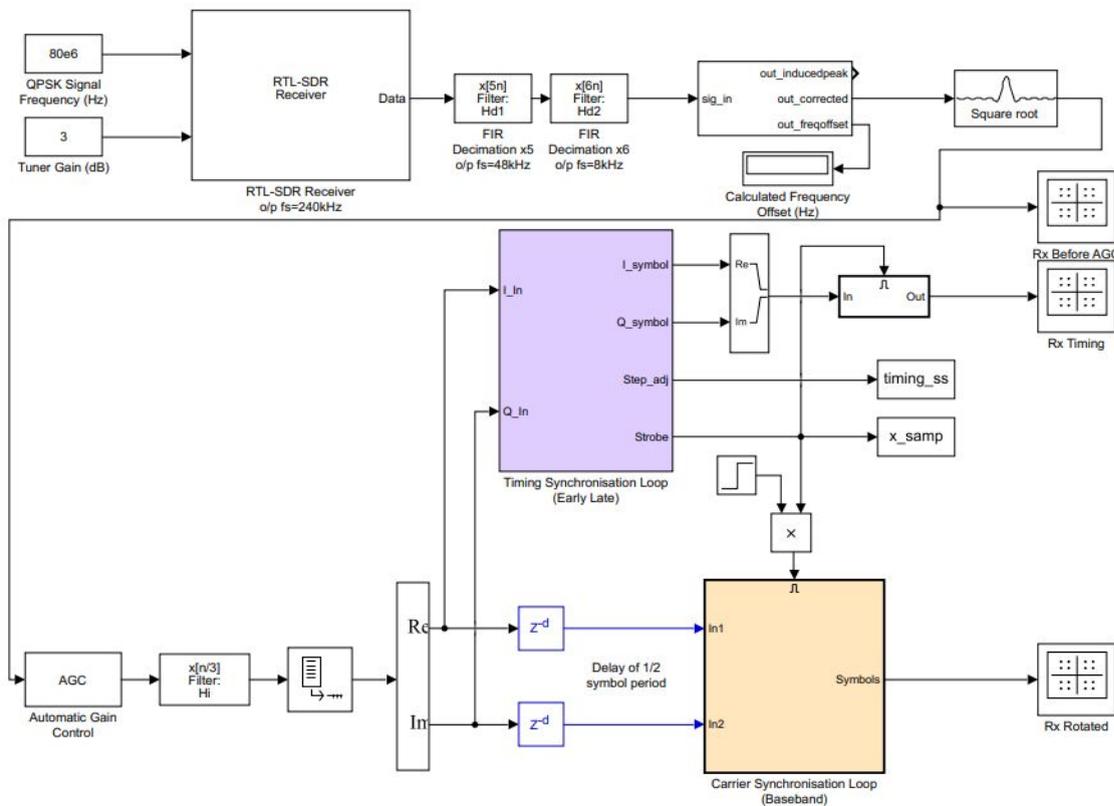


Figura 29: Diagrama do receptor montado no *Simulink*.

Fonte: O autor.

A saída da porta *Data* do bloco *RTL-SDR Receiver* entra no bloco *FIR Decimation* que é utilizado para fazer a decimação (*Downsampling*) para reduzir a taxa de amostragem do sinal por um fator inteiro. No primeiro bloco o fator é 5 e no outro o fator é 6 garantindo que não ocorra *aliasing*. Em seguida passa por um bloco que calcula e faz a correção do erro de frequência.

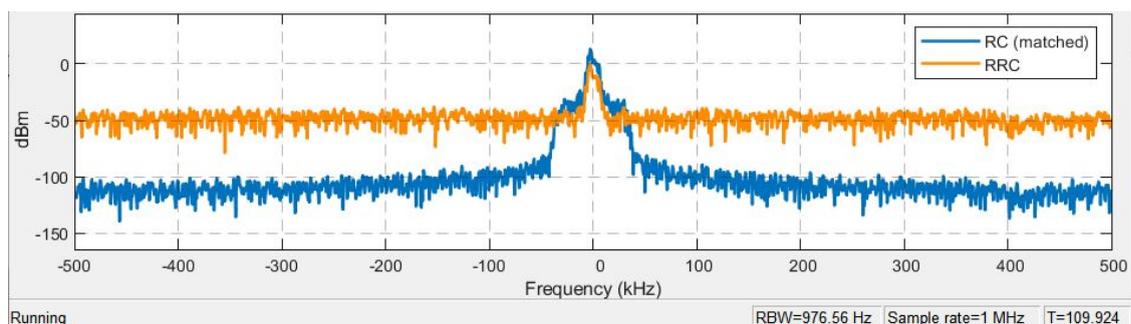
Esses dados passam por um filtro de RRC (Root Raised Cosine) com o mesmo fator de roll off do sinal gerado no transmissor, que é de 0.5, e a mesma taxa de símbolos do transmissor, que é de 1 ksps.

Então, no momento que o sinal é recebido, começa a ser gerado em tempo real o diagrama de constelação e as transições dos símbolos. Depois é gerado um gráfico do sinal recebido separado em fase e quadratura.

Com isso, o sistema prático foi montado com os seguintes parâmetros, que foram ajustados na prática de forma a obter o melhor sincronismo:

- Ganho RTL: 3 dB;
- Potência do gerador de sinais Agilent: -10 dBm;
- Frequência do gerador de sinais Agilent: 80 MHz;
- Frequência de gerador AM300: 17Hz;
- Separação entre antenas de TX e RX: 60 cm;
- Taxa de símbolos do transmissor: 1 ksps;
- Taxa de símbolos no receptor: 1 ksps;

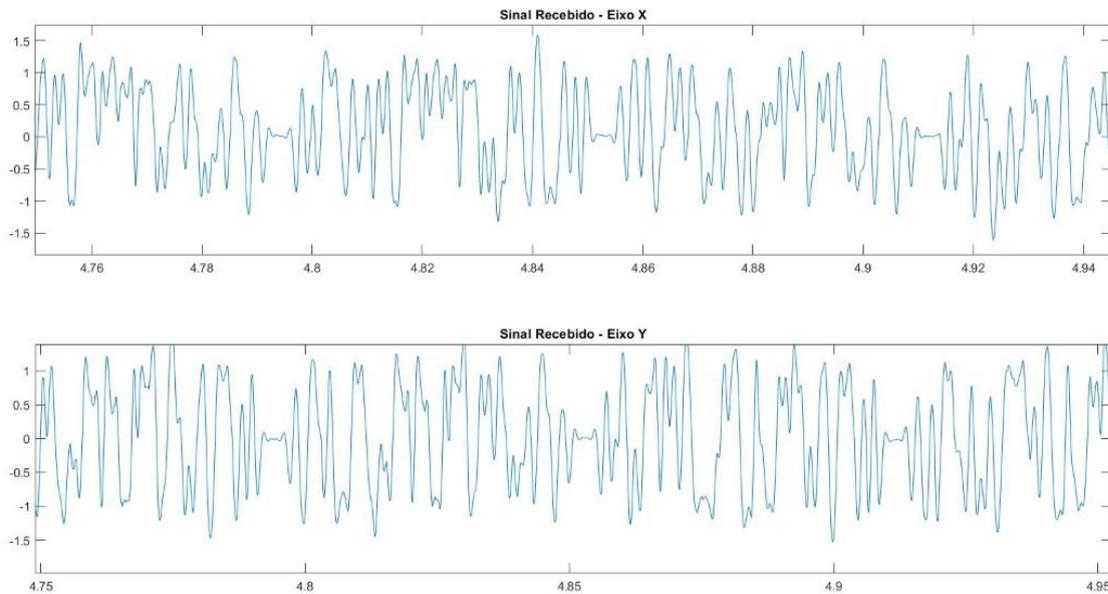
Ao começar a transmitir com o Agilent e utilizar o bloco de analisar o espectro do *Simulink* junto com o RTL-SDR, centrado em 80 MHz, já é possível notar uma mudança, conforme a figura 30.



**Figura 30: Analisador de espectro centrado em 80 MHz com gerador de sinais ligado.**

**Fonte: O autor.**

Ao iniciar a simulação do esquema que foi apresentado na figura 29, obtemos os sinais separados de acordo com os eixos, como mostra na figura 31.



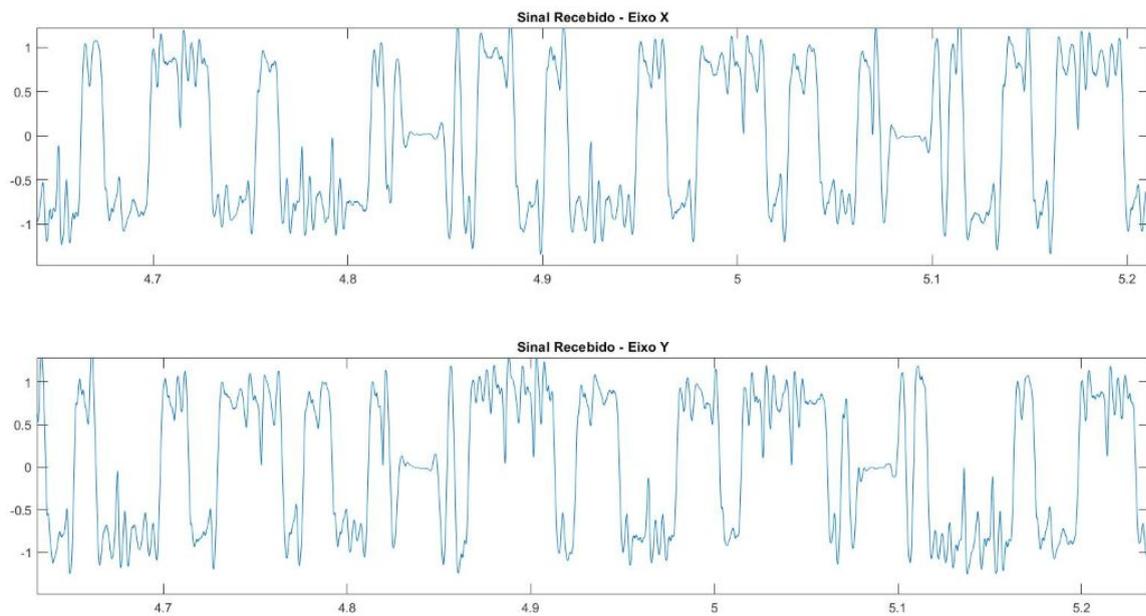
**Figura 31: Sinal QPSK recebido com RTL-SDR com taxa de 1 ksps no AM300.**

**Fonte: O autor.**

Os sinais recebidos são visualmente semelhante ao sinal gerado pelo AM300, que é apresentado na figura 34, mesmo com algumas distorções em alguns pontos.

Como foi realizado a medida entre o período de símbolos através do scope do osciloscópio, e pelo fato de estar sendo utilizado um filtro RRC, dependendo dos símbolos, uma pequena variação pode mudar significativamente o valor do período de símbolo que foi calculado.

Então, com o esquema do *Simulink* rodando, foi alterado a frequência no AM300 para verificar o comportamento do diagrama de constelação e com taxa de 0.25 ksps, foi possível obter um sinal de recepção que se assemelha mais ainda com o sinal transmitido, como é possível ver na figura 32.



**Figura 32: Sinal QPSK recebido com RTL-SDR com taxa de 0.25 kbps no AM300.**

**Fonte: O autor.**

Tanto o sinal, quanto os valores recebidos com taxa de 0.25 kbps se aproximaram mais do sinal transmitido através do AM300. Ao realizar os mesmos testes para um sinal com 10 símbolos, não foi possível obter resultados satisfatórios, pois como são poucos símbolos, o receptor precisa ficar sincronizando diversas vezes, pois quando ele consegue uma referência, o gap entre os frames começa a ser transmitido e ele necessita sincronizar novamente quando começa a receber o frame com 10 símbolos.

### **7.3. Recepção de Sinal Digital com Modulação QPSK utilizando o Gerador de Sinal Vetorial (SMU200A) como transmissor**

Os sinais gerados no AM300 são sequências sucessivas de símbolos que são colocadas umas depois das outras periodicamente e separadas por frames zeros. Esse frame de zeros apresentou no diagrama de constelação cruzamentos por zero sempre que ocorria a mudança de frames.

Por conta dessa limitação no uso do AM300, foi necessário utilizar outro equipamento para fazer a transmissão do sinal QPSK e verificar o comportamento do diagrama de constelação do sinal recebido, então também foi realizado testes utilizando o gerador de sinais vetorial, conforme é mostrado no apêndice C.

O esquema do receptor foi projetado no *Simulink*, igual o apresentado na seção 7.2 (Figura 29), com o auxílio do livro *Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR* (STEWART, 2015). Além disso, no transmissor está configurado a entrada de dados como PRBS, onde os bits enviados são gerados aleatoriamente.

Com isso, o sistema prático foi montado com os seguintes parâmetros, que foram ajustados na prática de forma a obter o melhor sincronismo:

- Ganho RTL: 3 dB;
- Potência do gerador de sinais vetorial: 0 dBm;
- Frequência do gerador de sinais vetorial: 80 MHz;
- Separação entre antenas de TX e RX: 40 cm;

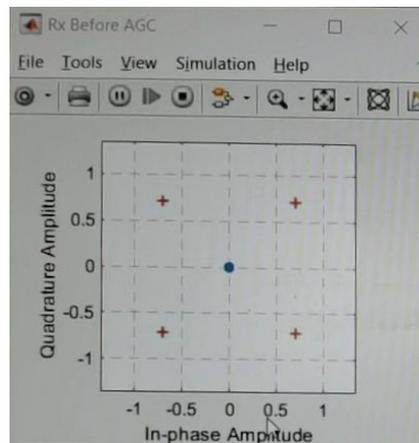
Assim como o transmissor, o receptor possui um filtro de Raiz de cosseno levantado (Root Raised Cosine) com o mesmo fator de roll off de 0.5, e a mesma taxa de símbolos do transmissor.

Então, no momento que o modelo é iniciado e o sinal é recebido, começa a ser gerado em tempo real três diagramas de constelação, onde mostra a transição dos símbolos.

O primeiro diagrama de constelação que é mostrado na figura 33. Ele permite determinar a força do sinal recebido antes de passar pelo bloco AGC (*Automatic Gain Control*) que é um bloco que ajusta adaptativamente o ganho para obter um nível de sinal constante na saída. O tamanho da circunferência da constelação

plotada indica se é necessário ajustar o ganho do transmissor ou do RTL para ajudar no processo do AGC (STEWART, 2015).

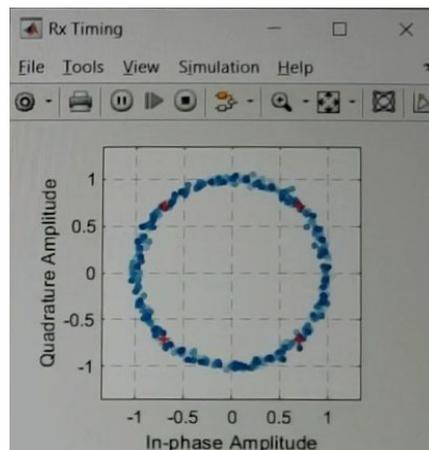
Então se a circunferência for muito grande, será necessário diminuir o ganho do transmissor ou do receptor pois o sinal de entrada está saturado, no caso da circunferência ser muito pequena no diagrama da constelação, será necessário aumentar o ganho do transmissor ou receptor. Para referência, o diagrama mostrado na figura 33 é um bom exemplo para ter um bom desempenho do AGC.



**Figura 33: Diagrama de constelação antes do bloco AGC.**

**Fonte: O autor.**

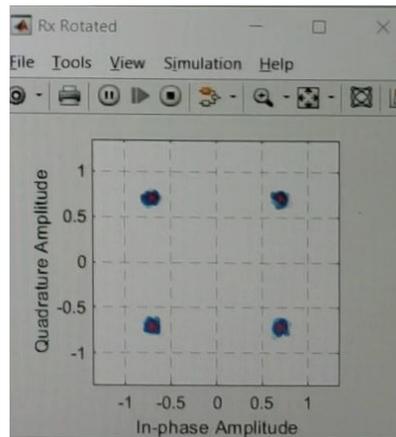
Depois que o sinal passar pelos estágios do AGC e da sincronização de tempo, é possível visualizar outro diagrama de constelação que mostra o sinal girando, que é *Rx Timing* como é possível ver na figura 34. Como o sinal gira rapidamente, no momento da captura da imagem, aparece como se fosse uma circunferência.



**Figura 34: Diagrama de constelação depois de passar pelo AGC.**

**Fonte: O autor.**

Finalmente, quando o sinal passa pelo estágio de sincronização da portadora, é plotado o gráfico *Rx Rotated* que mostra quatro grupos que agora estão situados estaticamente em torno dos marcadores de referência, como mostra a figura 35.



**Figura 35: Diagrama de constelação depois da sincronização completa.**

**Fonte: O autor.**

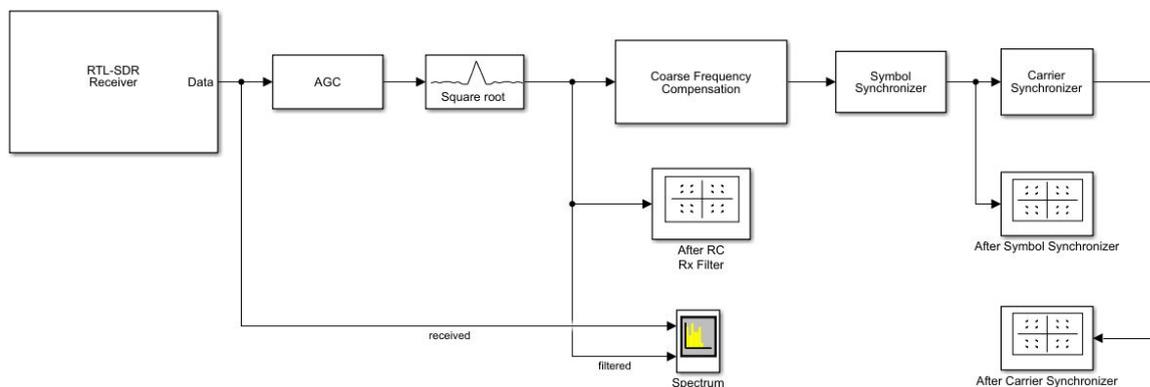
Ao projetar o receptor no *Simulink* baseado no esquema do livro do Stewart (Figura 29), foi possível observar que o modelo além de ser sensível a frequência, ele também é sensível ao ganho. O receptor só conseguia sincronizar perfeitamente o sinal recebido, como mostra na figura 35, ao conseguir encontrar o nível ideal de potência no transmissor. Ao variar um pouco, para mais ou menos, o receptor perdia totalmente o sincronismo.

Devido a essa limitação, foi necessário realizar a implementação de outro modelo no *Simulink* com sincronização de tempo e portadora. Na documentação do MATLAB possui um exemplo voltado para simulações (MATLAB,2019). A partir desse modelo, foi acrescentado o bloco do RTL e configurado com frequência central de 80 MHz e potência de 0 dBm, conforme é apresentado na figura 36.

O receptor é composto pelo AGC assim como no modelo anterior, ele é responsável por ajustar adaptativamente o ganho para obter um nível de sinal constante na saída. Depois os dados passam por um filtro RCC com o intuito de diminuir a interferência intersimbólica, com fator roll off igual a 0,5. Por conta de uma limitação do RTL, ele possui um pequeno erro de frequência associado a ele, então é necessário fazer uma compensação de frequência aproximada, onde o bloco

*Coarse Frequency Compensation* estima um desvio de frequência aproximado do sinal recebido e o corrige.

O bloco *Symbol Synchronizer* é responsável pelo ajuste na temporização, que implementa uma PLL (*Phase Locked Loop*, que é um sistema que gera a partir de um sinal de entrada, um sinal de saída com frequência e fase instantâneas em sincronismo com o sinal amostrado) para corrigir o erro de temporização no sinal recebido. O *Carrier Synchronizer* realiza outro ajuste de fase e frequência, só que dessa vez é um ajuste mais fino.



**Figura 36: Diagrama do receptor montado no *Simulink* a partir da documentação do **MATLAB**.**

**Fonte: O autor.**

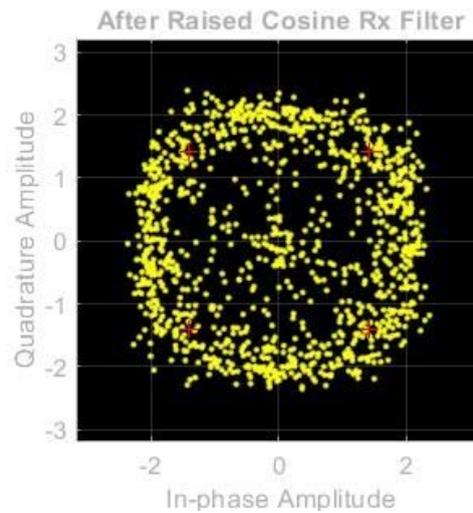
O experimento foi realizado tanto com os dados gerados aleatoriamente com o gerador de sinal vetorial, quanto com os dados no modo Pattern, que são os bits configurados pelo usuário, nesse caso seria a sequência [0101 1011 0011 1001 0110 1100]. Além disso, as outras configurações do modelo são:

- Ganho RTL: 3 dB;
- Potência do gerador de sinais vetorial para PRBS: -59 dBm;
- Potência do gerador de sinais vetorial para PATTERN: -50 dBm;
- Frequência do gerador de sinais vetorial: 860 MHz;
- Separação entre antenas de TX e RX: 30 cm;

Assim como o transmissor, o receptor possui um RCC com o mesmo fator de roll off de 0.5, e a mesma taxa de símbolos do transmissor.

Os primeiros três diagramas são os bits gerados aleatoriamente pelo transmissor. O primeiro diagrama de constelação, na figura 37, mostra o sinal logo

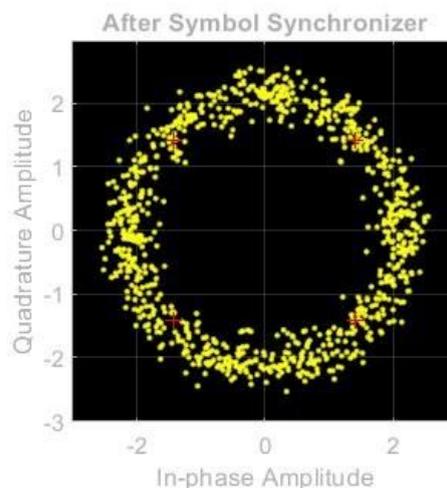
após o AGC e o RCC, é possível visualizar a circunferência aberta, pela atuação do AGC e com alguns pontos dentro da circunferência.



**Figura 37: Diagrama de constelação depois do RCC.**

**Fonte: O autor.**

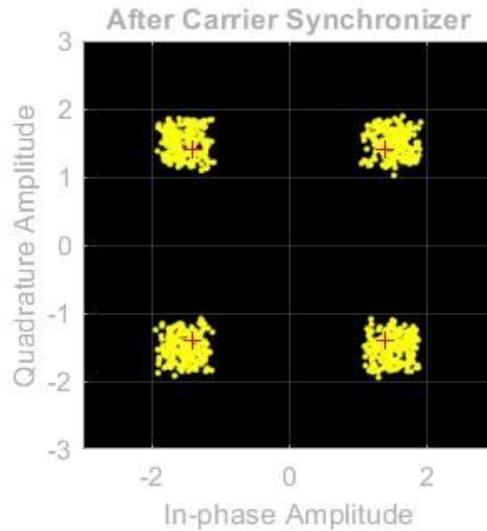
O segundo diagrama de constelação, na figura 38, mostra o sinal logo após bloco *Coarse Frequency Compensation* que faz a correção no erro de frequência e o bloco *Symbol Synchronizer* é responsável pelo ajuste de temporização. Já é possível verificar a circunferência aberta, pois os pontos estão girando em sentido anti-horário rapidamente.



**Figura 38: Diagrama de constelação depois da sincronização de símbolo.**

**Fonte: O autor.**

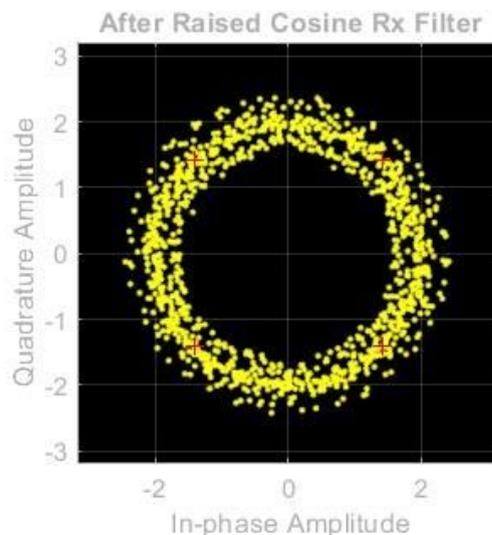
E por fim, na figura 39, com a compensação do deslocamento de frequência residual e o deslocamento de fase, é possível visualizar perfeitamente o diagrama de constelação da modulação QPSK.



**Figura 39: Diagrama de constelação depois da sincronização da portadora.**

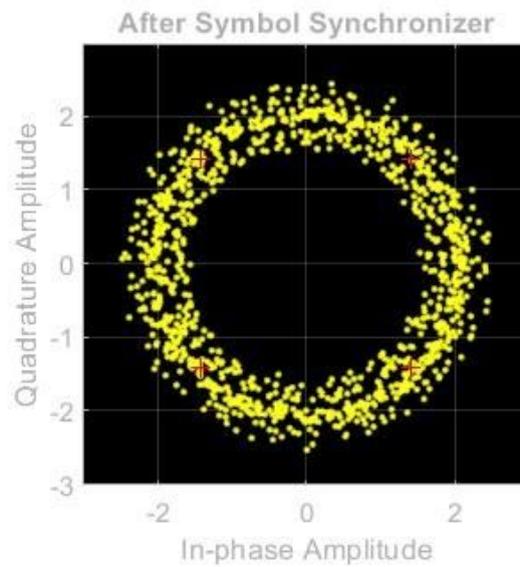
**Fonte: O autor.**

O mesmo teste foi realizado mas agora com a sequência de bits [0101 1011 0011 1001 0110 1100], que foi determinada pelo usuário. Como a sequência de bits é pequena, já é possível perceber os pontos ao redor dos pontos de referência, assim que passa pelo filtro, parecido com o diagrama após a correção de frequência e tempo como é possível verificar nas figuras 40 e 41.



**Figura 40: Diagrama de constelação depois do RCC, com sequência de bits personalizada.**

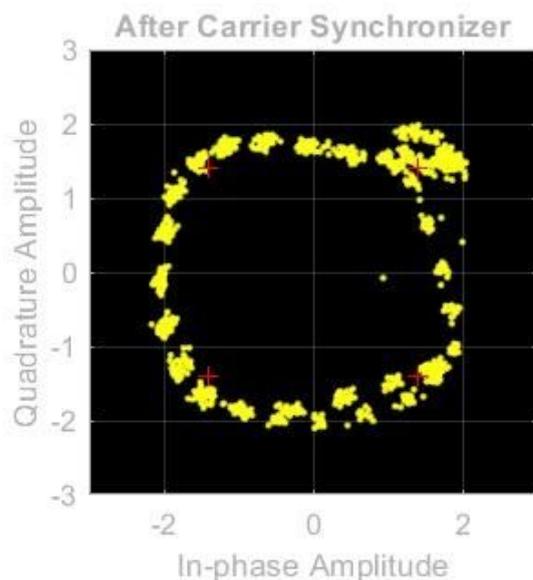
**Fonte: O autor.**



**Figura 41: Diagrama de constelação depois da sincronização de símbolo, sequência de bits personalizada.**

**Fonte: O autor.**

Na figura 42, é possível notar uma leve distorção no diagrama. Isso ocorreu pois a sequência de bits não é tão grande, então o diagrama fica girando no sentido anti-horário e alternando a quantidade de pontos em cada ponto de referência, isso ocorre na transição de bits da sequência.



**Figura 42: Diagrama de constelação depois da sincronização de símbolo, sequência de bits personalizada.**

**Fonte: O autor.**

#### 7.4. Recepção de Sinal Digital com Modulação QPSK utilizando o Nuand bladeRF como transmissor e receptor

Uma outra forma de realizar a transmissão de dados é através da Nuand bladeRF, que assim como o RTL, é um SDR projetado para permitir que estudantes e entusiastas da RF explorem a comunicação sem fio e para fornecer aos profissionais uma plataforma versátil de desenvolvimento. A diferença da bladeRF para o RTL, além da sua maior largura de banda, ela também pode ser utilizada para realizar a transmissão e a recepção de dados.

O modelo utilizado é o X115, como mostra a figura 43, e pode ser utilizado na faixa de 300 MHz a 3,8 GHz sem a necessidade de módulos adicionais. Pode ser utilizado tanto *software* de código aberto, como o GNURadio, quando ferramentas pagas que é o caso do MATLAB/*Simulink*. Todo o *software* utilizado na bladeRF como o seu firmware e HDL estão disponíveis no GitHub.



Figura 43: Nuand bladeRf X115.

Fonte: Manual digital do equipamento.

Como a bladeRF é compatível com o *Simulink*, foi criado um modelo para servir como transmissor QPSK, como é observar na figura 44.

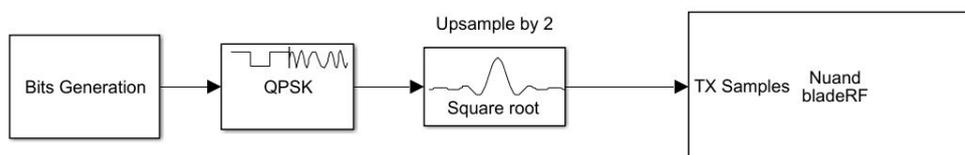
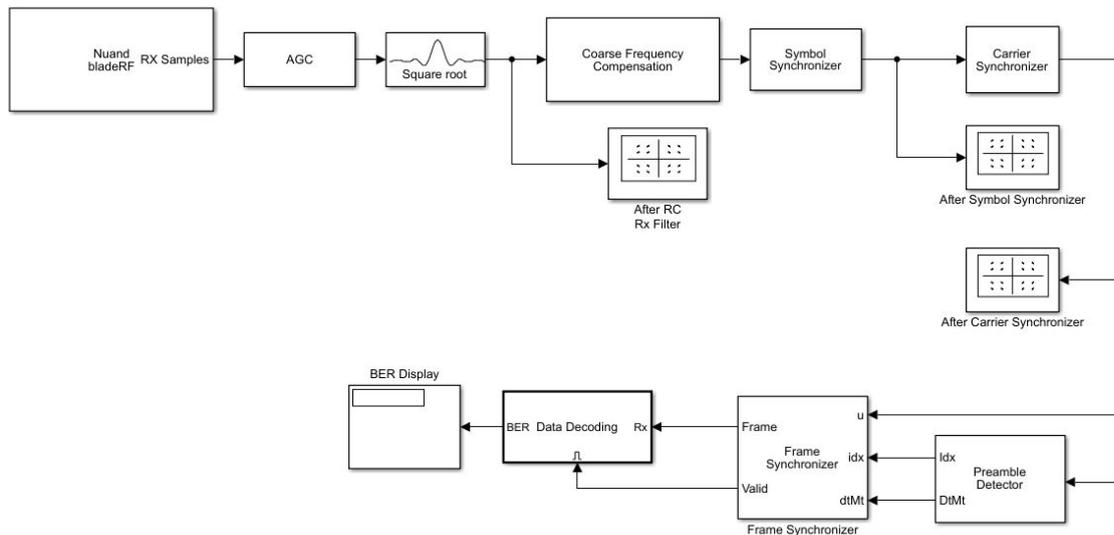


Figura 44: Diagrama de blocos do transmissor com bladeRF montado no *Simulink*.

Fonte: O autor.

O receptor montado no *simulink* é baseado no receptor que foi utilizando o RTL, como é possível ver na figura 45.



**Figura 45: Diagrama de blocos do receptor com bladeRF montado no Simulink.**

Fonte: O autor.

O transmissor foi configurado para operar na frequência de 860 MHz, com ganho de 20 dB, os símbolos modulados são dobrados pelo filtro de transmissão de cosseno elevado com um fator de roll-off 0,5. A taxa de saída do filtro de cosseno elevado é definida como 100k amostras por segundo, com uma taxa de símbolos de 50k símbolos por segundo. Além disso, o bloco de geração de bits do transmissor usa uma variável *workspace* do MATLAB como a carga útil de um quadro. Cada quadro contém 100 mensagens 'Hello world ####' e um cabeçalho. Os primeiros 26 bits são bits de cabeçalho, um código Barker de 13 bits.

Já o receptor estava com na mesma faixa de frequência, 860 MHz, com um ganho de 40 dB e com filtro raiz de cosseno levantado com fator roll-off igual a 0,5 e configurado com uma taxa de símbolos de 50k símbolos por segundo. Uma diferença do modelo usado anteriormente é que ele possui um bloco de decodificação de dados, para decodificar a mensagem enviada.

Assim como no exemplo com RTL, o primeiro diagrama de constelação, na figura 46, mostra o sinal logo após o AGC e o Filtro raiz de cosseno levantado,

porém dessa vez são várias circunferências, lado a lado que formam uma figura simétrica.

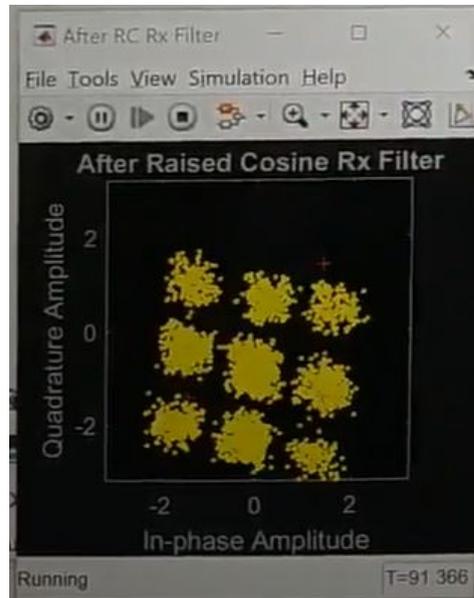


Figura 46: Diagrama de constelação do sinal transmitido com a bladeRF depois do RCC.

Logo após bloco *Coarse Frequency Compensation* que faz a correção no erro de frequência e o bloco *Symbol Synchronizer* é responsável pelo ajuste de temporização. Já é possível verificar a circunferência aberta, pois os pontos estão girando em sentido anti-horário rapidamente.

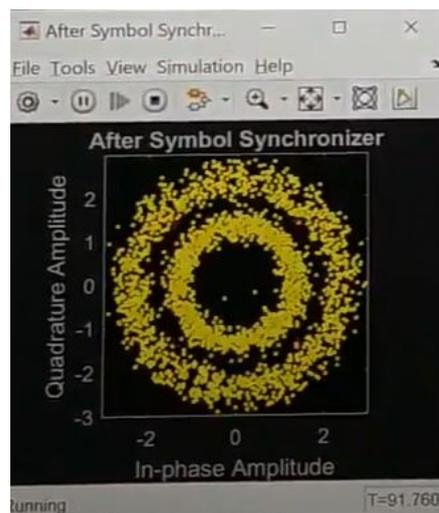
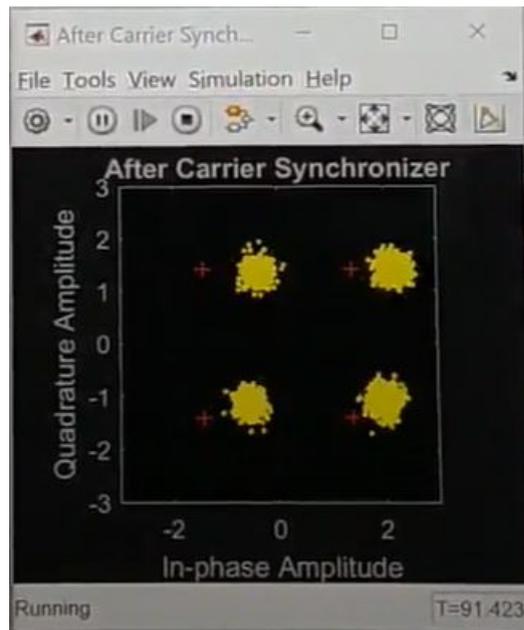


Figura 47: Diagrama de constelação do sinal transmitido com a bladeRF depois da sincronização de símbolo.

Fonte: O autor.

E por fim, na figura 48, com a compensação do deslocamento de frequência residual e o deslocamento de fase, é possível visualizar o diagrama de constelação da modulação QPSK, pouco deslocado à direita.



**Figura 48: Diagrama de constelação do sinal transmitido com a bladeRF depois da sincronização da portadora.**

**Fonte: O autor.**

O modelo desenvolvido no *Simulink*, a partir do exemplo fornecido pelo MATLAB para USRP, se mostrou bastante eficaz. Pois mesmo utilizando transmissores e receptores diferentes foi possível realizar a demodulação do sinal QPSK e plotar corretamente o seu diagrama de constelação.

E no exemplo apresentado nessa seção, o receptor possui um bloco de decodificação de dados, onde é possível visualizar a mensagem que foi enviada a partir a através da bladeRF.

## 8. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo analisar o uso do sistema de rádio digital do DRM. O rádio ainda tem uma grande importância para a sociedade, pois ele é um sistema aberto, acessível a todas as pessoas e pode se adaptar às transformações tecnológicas. Agora com o surgimento de diversas ferramentas, como a internet, é importante acompanhar o avanço dessa tecnologia evoluindo da forma analógica para a digital, algo que ainda não ocorreu em muitos lugares, inclusive no Brasil.

Através da visão teórica do funcionamento do padrão de rádio digital DRM e das análises feitas neste trabalho, esse sistema de rádio digital mostrou possuir um grande potencial e pode ser uma opção interessante para o Sistema Brasileiro de Rádio Digital, uma vez que o Brasil ainda não adotou um sistema de rádio digital e o DRM funciona simultaneamente com o sistema de rádio analógico convencional. Isso possibilitaria uma transição mais gradual e segura, pois seria possível continuar usando o sistema convencional e testar o DRM sem problemas.

Além disso, como não existem fabricantes de receptor do DRM no Brasil, uma alternativa seria o uso de SDR para os testes iniciais. Como foi possível observar com esse trabalho, o RTL é um exemplo de SDR, onde o *hardware* serve como interface física de um rádio definido por *software* de baixo custo e que possibilita a criação de um receptor de rádio e ele também poderia ser aplicado ao DRM. Nos resultados obtidos foi possível demodular um sinal QPSK através do *Simulink* utilizando o RTL e isso pode ser feito com outras ferramentas, que é o caso do GNU Radio.

Em novas linhas de estudo, seria interessante realizar o desenvolvimento de um sistema receptor acústico completo do DRM, com todas as etapas de recepção, utilizando por exemplo o RTL ou algum outro tipo de SDR que faça a interface física de um receptor de rádio digital.

## 9. Referências Bibliográficas

AUGUSTIN, Kouassi N'da Koffi. Da rádio analógica à rádio digital: quais as perspectivas para a África Ocidental Francesa?. Dissertação de Mestrado em Informação, Comunicação e Novas Mídias, apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, 2013.

BARBOSA, Ronald. Rádio Digital – FM HD Radio e DRM+. Revista SET, 2010. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

BEZERRA, Patrícia Rangel Moreira. Implantação do Rádio Digital no Brasil: Testes, Impacto e Perspectivas. Intercom – Sociedade Brasileira de Estudos Interdisciplinares da Comunicação, 2007. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

CASELLA, Ivan Roberto Santana. Roteiro do Experimento de Projeto de Sistemas de Comunicação – Geração de Sinais com o AM300, Outubro de 2013.

CHO, Yong Soo; KIM, Jaekwon; YANG, Won Young; KANG, Chung G. MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB. 1ª edição. Editora Wiley, 2010.

Consórcio DRM e Plataforma DRM Brasil. Planejamento produtivo e de negócios para o Brasil. 2012. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

DRM Consortium. DRM Introduction and Implementation Guide, 2013. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

DRM Consortium. Minimum Receiver Requirements for DRM receivers operating below 30 MHz (DRM30), 2017. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

ETSI - EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. Digital Radio Mondiale (DRM): System Specification, 2017. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

FERNÁNDEZ, José Raúl. Software Defined Radio: Basic Principles and Applications. Revista Facultad de Ingeniería, 2017. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

FISCHER, Walter. Digital Video and Audio Broadcasting Technology: A Practical Engineering Guide. 4ª edição. Editora Springer, 2020.

FUKUDA, Rafael. Sistema de Comunicação OFDM: da Fundamentação Conceitual à Implementação em Plataforma DSP. Universidade Estadual de Londrina, 2016.

IFSC: Instituto Federal de São José - Wiki. Rádio Digital DAB. Disponível em: <[https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Rádío\\_Digital\\_DAB](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Rádío_Digital_DAB)>. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

ITU: International Telecommunication Union. Implementation considerations for the introduction and transition to digital terrestrial sound and multimedia broadcasting. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

JUNIOR, Alvaro Bufarah. O rádio diante das novas tecnologias de comunicação: uma nova forma de gestão, 2008. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

LENHARO, Renan Eduardo. Análise e Aspectos de Implementação de Sub-Sistemas de Comunicação Guiados pela Rede Elétrica. Trabalho apresentado à Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos necessários para a conclusão do curso de Engenharia Elétrica, 2010.

MALBURG, Maria Moura. Trabalho Final de Redes I - Modulação. Universidade Federal Do Rio De Janeiro Departamento De Engenharia Eletrônica, 2004. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

MARTINS, Lúcio. Radiodifusão Local em 26 MHz usando o Sistema DRM. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica, 2008.  
Acessado em: 07 de janeiro de 2020.

PRATA, Nair. Tecnologia, um divisor de águas na história do rádio. Intercom – Sociedade Brasileira de Estudos Interdisciplinares da Comunicação, 2007.  
Acessado em: 02 de agosto de 2019.

SCHORR, T.; DITTRICH, A.; SAUER-GREFF, W.; URBANSKY, R. Diorama - An Open Source Digital Radio Mondiale (DRM) Receiver using MATLAB. Workshop Proceedings of IEEE Signal Processing, 2005.

STEWART, Robert; BARLEE, Kenneth; ATKINSON, Dale; CROKETT, Louise. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. 1ª edição. Editora Strathclyde Academic Media, 2015.

SKLAR, Bernard. Digital Communications Fundamentals and Applications, Second Edition, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall Inc., 2001

STREMLER, Ferrel G., Introduction to Communications Systems, Second Edition, Reading, Mass., Addison-Wesley, 1982.

## APÊNDICE

### A. Instalação do pacotes necessários para o MATLAB

No MATLAB, é necessário a instalação do pacote *Communications Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio*. Esse pacote permite usar um dispositivo USB RTL-SDR como um periférico independente para receber sinais de radiofrequência em tempo real, ele está disponível a partir da versão R2013b do MATLAB.

O RTL-SDR possui o chip Realtek RTL2832U, que fornece amostras de I-Q através da interface USB. É possível receber e demodular vários sinais de radiofrequência em uma ampla faixa de frequência. O modelo utilizado é o V3 da RTL-SDR.com, como podemos ver na figura 49, que possui um sintonizador R820T2 que permite receber sinais de radiofrequência entre a faixa de 500 kHz e 1766 MHz (acima de 1200 MHz é necessário refrigeração externa para o *dongle*).



Figura 49: *Dongle* da RTL-SDR.com.

Então o primeiro passo para desenvolver o receptor é a instalação dos pacotes e drivers necessários para o MATLAB. A versão que foi utilizada é a versão R2018a.

Acessando o menu *Get Add-ons* na aba *Home* do MATLAB e ao pesquisar o pacote *Communications Toolbox Support Package for RTL-SDR Radio*, temos o resultado apresentado na figura 50, então basta clicar em instalar e aceitar os termos de uso que a instalação iniciará.

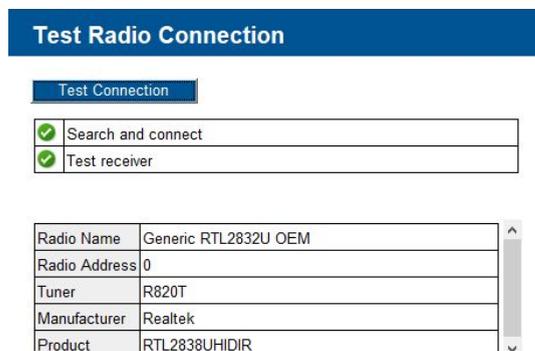


**Figura 50: Pacote para RTL-SDR no MATLAB.**

Fonte: O autor.

No fim da instalação, será aberto um assistente de configuração que solicita a instalação dos drivers, no qual é aberta uma janela do Zadig, então basta inserir o *dongle* na entrada USB na máquina e selecionar o modelo (no caso apareceu "RTL2830U") e clicar em "Install Driver"

Em seguida, será realizado os teste dos drivers instalados como mostra a figura 51, clicando em *Test Connection*



**Figura 51: Teste de conexão pós instalação.**

Fonte: O autor.

Após a instalação do pacote de suporte RTL-SDR, é adicionado ao suporte do MATLAB o objeto *comm.SDRRTLReceiver* e o bloco *Simulink* do receptor RTL-SDR que fica disponível para uso no navegador da biblioteca *Simulink*, com isso é possível fazer um teste na aba de comando do MATLAB, através dos comandos:

```
hwinfo = sdrinfo
hwinfo = sdrinfo(Address)
hwinfo = sdrinfo('0');
```

Isso retorna o status do RTL-SDR, como temos na figura 52, com informações como o Sintonizador (*Tuner*), Chipset, Ganho, amostragens e dentre outras informações, o que indica que o MATLAB já reconhece o dispositivo e ele está pronto para uso.

```
hwinfo =  
  
    RadioName: 'Generic RTL2832U OEM'  
    RadioAddress: '0'  
    RadioIsOpen: 0  
    TunerName: 'R820T'  
    Manufacturer: 'Realtek'  
    Product: 'RTL2838UHIDIR'  
    GainValues: [29x1 double]  
    RTLCrystalFrequency: 28800000  
    TunerCrystalFrequency: 28800000  
    SamplingMode: 'Quadrature'  
    OffsetTuning: 'Disabled'
```

**Figura 52: Informações do dispositivo obtido através de comando no MATLAB.**

**Fonte: O autor.**

## B. Usando o gerador AM300 para transmissão do sinal

Para realizar a implementação de um receptor utilizando RTL-SDR, foi necessário elaborar um transmissor de sinal QPSK em banda base e para isso foram utilizados dois equipamentos:

- Gerador de Sinal AM300 da Rohde & Schwarz;
- Gerador de Sinais de Radiofrequência Agilent N9310A.

Na figura 53, temos o gerador de Sinal AM300 que possui capacidade de gerar de formas de onda arbitrárias e pode ser utilizado para diversas aplicações. Ele possui dois canais, com uma taxa de amostragem de 100 MS/s e memória de forma de onda de 256000 pontos por canal. É possível utilizar os dois canais ao mesmo tempo, com isso é possível gerar sinais I-Q.

Além disso, é possível criar sinais arbitrários através do MATLAB ou qualquer outro *software* que permita a geração de arquivos com dados das amostras do sinal num formato compatível com o equipamento (CASELLA, 2013).



**Figura 53: Gerador de sinal AM300.**

**Fonte: Manual digital do equipamento.**

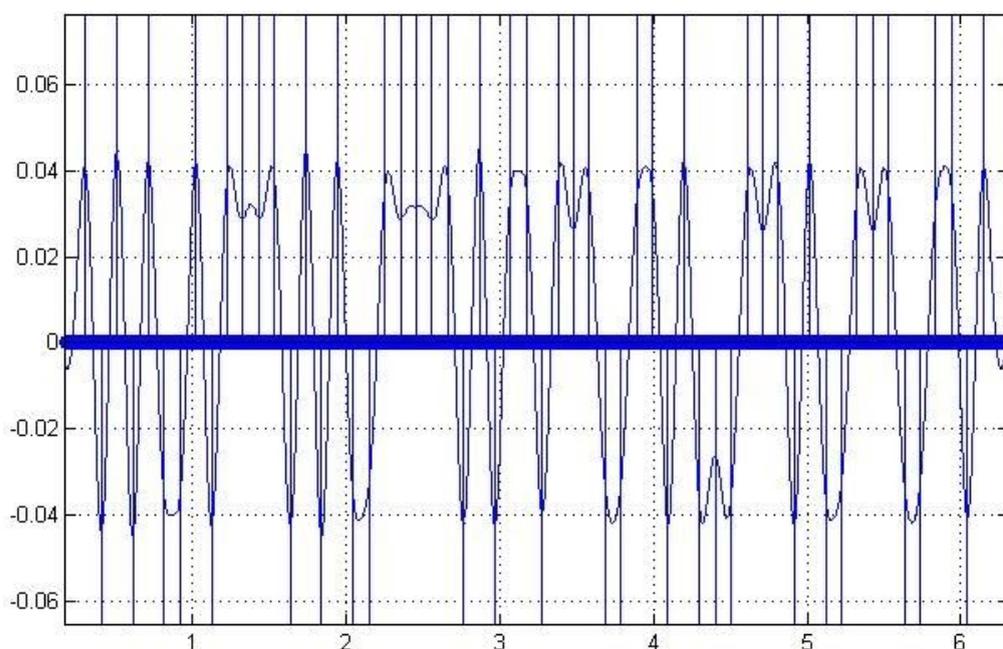
Então para implementação do transmissor será utilizado o MATLAB para gerar os arquivos para o AM300, através de uma solução proposta por Stepan Matejka, onde é possível usar um template de script em MATLAB para a geração direta de arquivos AM3 (CASELLA, 2013).

Devido a uma limitação do equipamento AM300, os sinais gerados devem possuir  $2^{16}$  amostras. Por conta disso, foram geradas sequências sucessivas de

símbolos que são colocadas umas depois das outras periodicamente e não combinadas como se fossem uma única sequência. Com isso cada sequência pode ser considerada como um frame de símbolos, onde esses frames são separados por sequência de zeros.

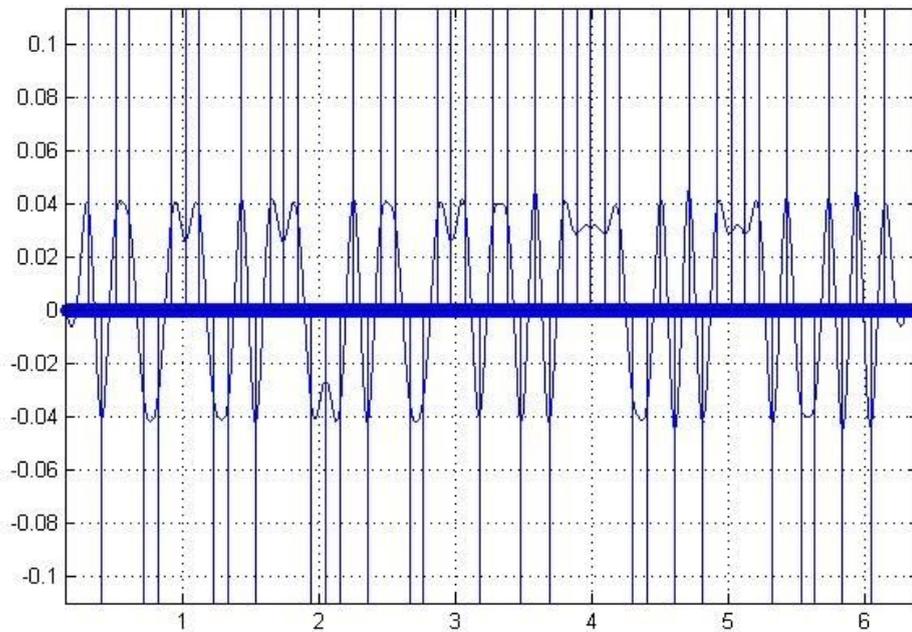
Para os testes iniciais, foram geradas amostras com 58 símbolos por frame, onde esse símbolos são gerados aleatoriamente através do MATLAB. Além disso, é utilizado um filtro de Raiz Cosseno Levantado (*Root Raised Cosine* ou *RCC*) com o intuito de diminuir a interferência intersimbólica, com alfa = 0.5.

Como foram gerados dois arquivos, sendo um o canal I e o outro o canal Q, então foi gerado dois códigos onde é variado apenas o valor dos símbolos gerados, como é possível verificar nas figuras 54 e 55. Com isso são gerados dois arquivos para o AM300, que são enviados para o equipamento através de um pendrive.



**Figura 54: Sinal QPSK com 58 símbolos gerado para o canal I.**

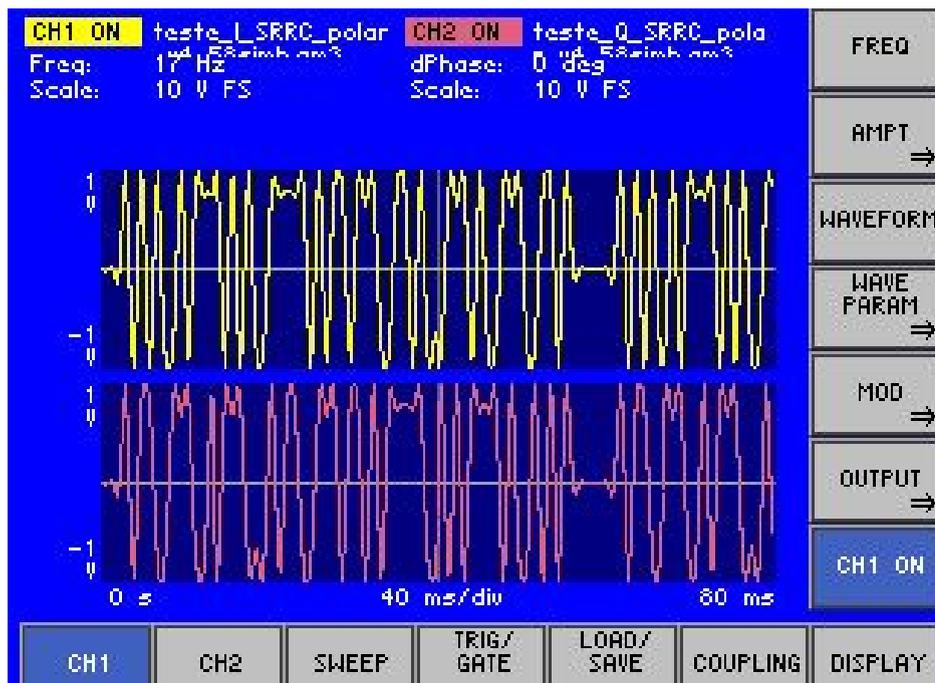
**Fonte: O autor.**



**Figura 55: Sinal QPSK com 58 símbolos gerado para o canal Q.**

Fonte: O autor.

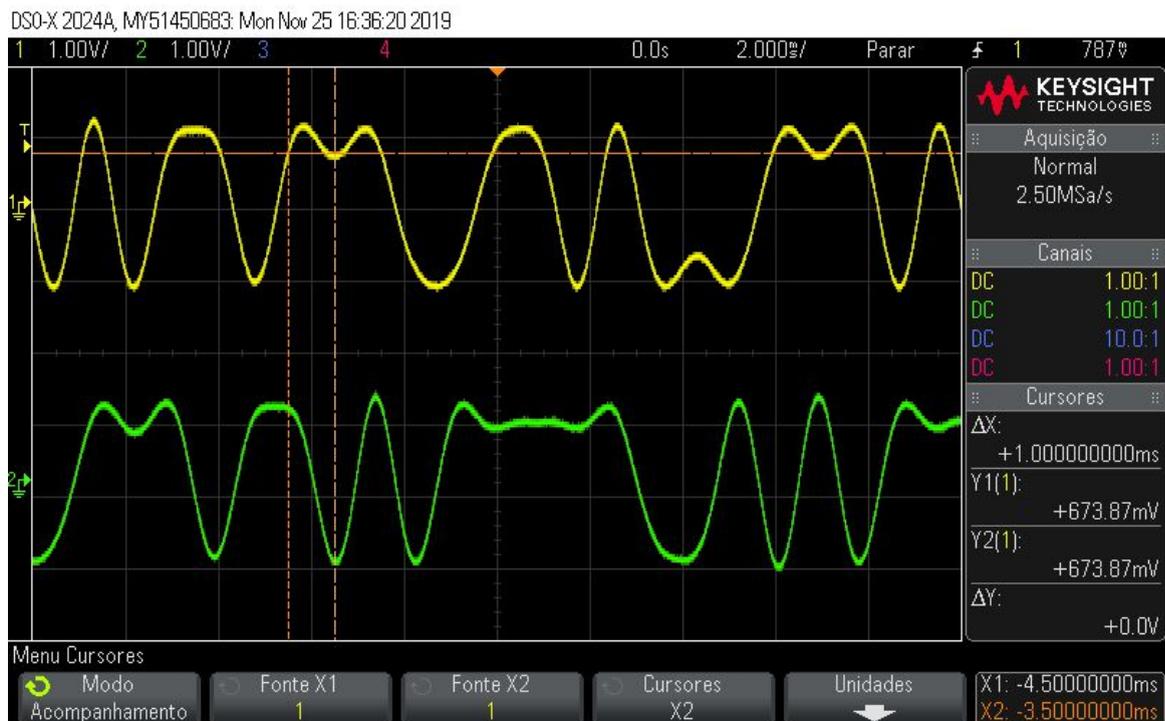
No AM300, com os dois arquivos gerados através do MATLAB dentro do pendrive, foi selecionado o modo Waveform Arbitrary no canal 1 e através do menu Load/Save foi carregado o arquivo no formato am3 para o canal I. O mesmo foi feito para o canal 2, porém foi carregado o segundo arquivo criado através do MATLAB, como é possível verificar na figura 56.



**Figura 56: Sinal QPSK com 58 símbolos carregado no AM300.**

Fonte: O autor.

Em seguida saídas dos canais 1 e 2 do gerador de sinais AM300 foram ligadas às entradas do osciloscópio para verificar os sinais no domínio do tempo e verificar a taxa de símbolos que está sendo enviada. A frequência dos dois canais foi ajustada de modo que o tempo entre os símbolos fosse de 1 ms. Com o auxílio do osciloscópio foi possível obter 1 ms com a frequência de 17 Hz no AM300, como é possível ver na figura 57, o intervalo de símbolo é de 1 ms, como isso temos que a taxa de símbolo é o inverso, levando ao valor de 1 ksp/s.



**Figura 57: Sinais gerados no domínio do tempo.**

**Fonte: O autor.**

Como o sinal que está sendo gerado através do AM300 já foi verificado e medidos através do osciloscópio, as saídas dos canais 1 e 2 do gerador AM300, foram desconectadas do osciloscópio e conectadas às entradas I e Q do gerador de RF N9310A, apresentado na Figura 58, para a geração de um sinal QPSK Modulado.



**Figura 58: Gerador de sinais de RF Agilent N9310.**

**Fonte: Manual digital do equipamento.**

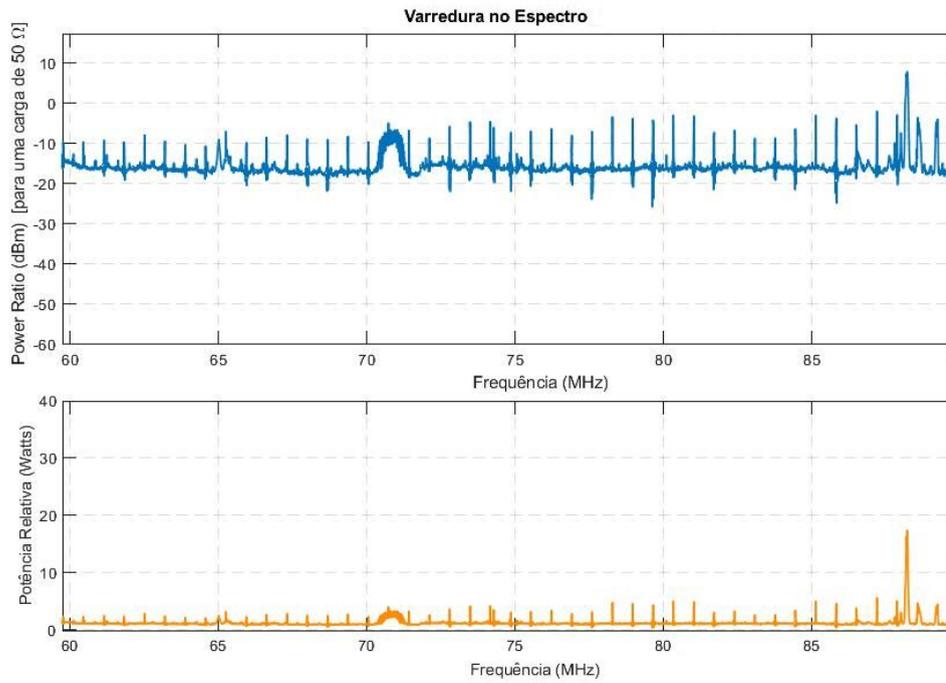
Para a transmissão do sinal foi utilizado uma Antena Telescópica, modelo J2043 da JBM que pode ser vista na figura 59, que foi desenvolvida para ser utilizada com analisadores de espectro para monitoramento de sinal de RF e pode ser utilizada pelo gerador de sinais N9310. Ela possui impedância de 50Ω e pode ser utilizada na faixa de frequência de 60 a 1900 MHz.



**Figura 59: Antena utilizada para a transmissão do sinal.**

**Fonte: Manual digital do equipamento.**

Para ajustar os parâmetros do Agilent N9310, foi levado em conta em qual banda de frequência esse sinal seria transmitido. Então foi realizada uma varredura de frequência com o RTL-SDR junto com o MATLAB, de 60 MHz a 100 MHz e o resultado obtido pode ser visualizado na figura 60.



**Figura 60: Varredura no espectro de frequências com RTL-SDR no MATLAB.**

**Fonte: O autor.**

Como a faixa de 80 MHz está livre, então o Agilent foi configurado para transmitir nessa faixa de frequência com amplitude de -10 dBm.

### C. Usando gerador de sinais vetoriais SMU200A para transmissão do sinal

O modelo do gerador de sinais vetoriais utilizado é o SMU200A da Rohde & Schwarz, que está na figura 61. Ele possui opções de transmitir nas faixas de frequência de 100 kHz a 2,2 GHz / 3 GHz / 4 GHz / 6 GHz.



**Figura 61: Gerador de sinais vetoriais SMU200A.**

**Fonte: Manual digital do equipamento.**

A interface que ele apresenta ao usuário é bastante intuitiva, como apresentada na figura 62, onde o fluxo do sinal de banda base para a saída de RF é mostrado no formato de diagrama de blocos e cada bloco representa uma unidade funcional do instrumento. Nem todo bloco precisa ser utilizado, os blocos utilizados na simulação precisam ser habilitados e ficam com a cor azul. O sinal gerado pode ser visto de relance, incluindo se é afetado por ruído gaussiano branco aditivo ou outras deficiências.

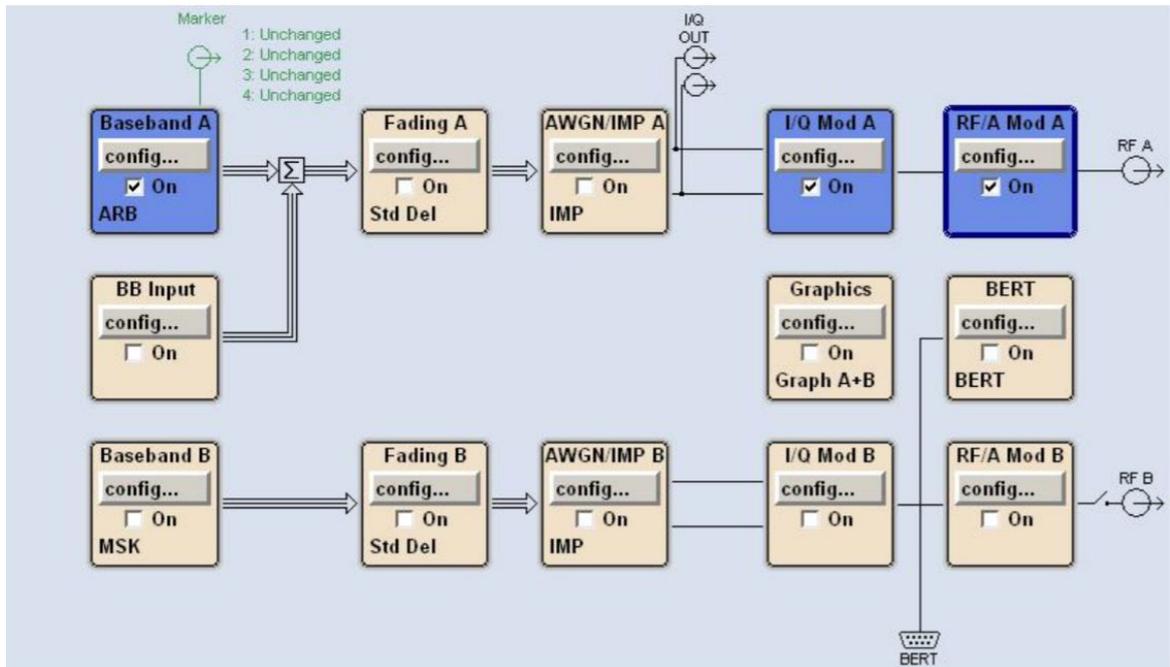


Figura 62: Tela de configuração do gerador de sinais vetoriais SMU200A.

Fonte: Manual digital do equipamento.

Para o teste inicial os blocos habilitados do transmissor seguem a figura 29, com os blocos **Baseband**, **I/Q Mod A** e **RF/A MOD A** habilitados. Os blocos foram configurados para o tipo de modulação QPSK, com uma taxa de símbolos de 100 ksym/s e com filtro Raiz Cosseno Levantado (*Root Raised Cosine* ou *RCC*) com o intuito de diminuir a interferência intersimbólica, com alfa = 0.5.

O tipo de fonte de dados a serem transmitidos foram alternados entre dois tipo, o PRBS (*Pseudorandom binary sequence* ou Sequência binária Pseudo Aleatória em português) que é uma sequência binária gerada a partir de um algoritmo determinístico, como mostra a figura 63.

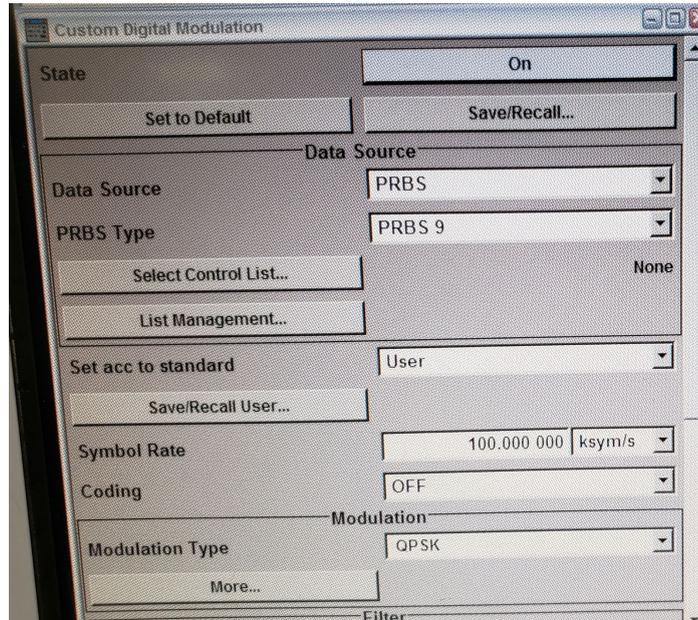


Figura 63: Dados do sinal enviado, com fonte de dados tipo PRBS.

Fonte: O autor.

O outro tipo de dados enviados é uma sequência binária escolhida pelo próprio usuário, que é a sequência [0101 1011 0011 1001 0110 1100] como mostra na figura 64.

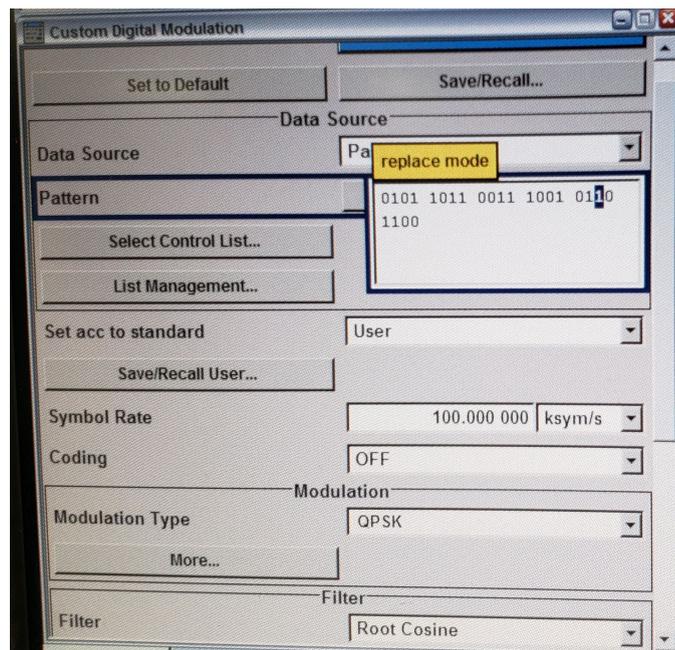


Figura 64: Dados do sinal enviado, com fonte de dados inserida pelo usuário.

Fonte: O autor.

O sinal é transmitido utilizando novamente uma Antena Telescópica com impedância de  $50\Omega$ , modelo J2043 da JBM que pode ser vista na figura 59, que apesar de ter sido desenvolvida para ser utilizada com analisadores de espectro para monitoramento de sinal de RF, ela também pode ser utilizada pelo gerador de sinais vetoriais, desde que seja utilizada na faixa de frequência de 60 a 1900 MHz.

Foi mantida a mesma faixa de transmissão, que é de 80 MHz e potência de 0 dBm. Antes de receber o sinal com o RTL, foi utilizado um analisador de espectro para visualizar o sinal transmitido pelo gerador de sinais vetoriais, conforme a figura 65.

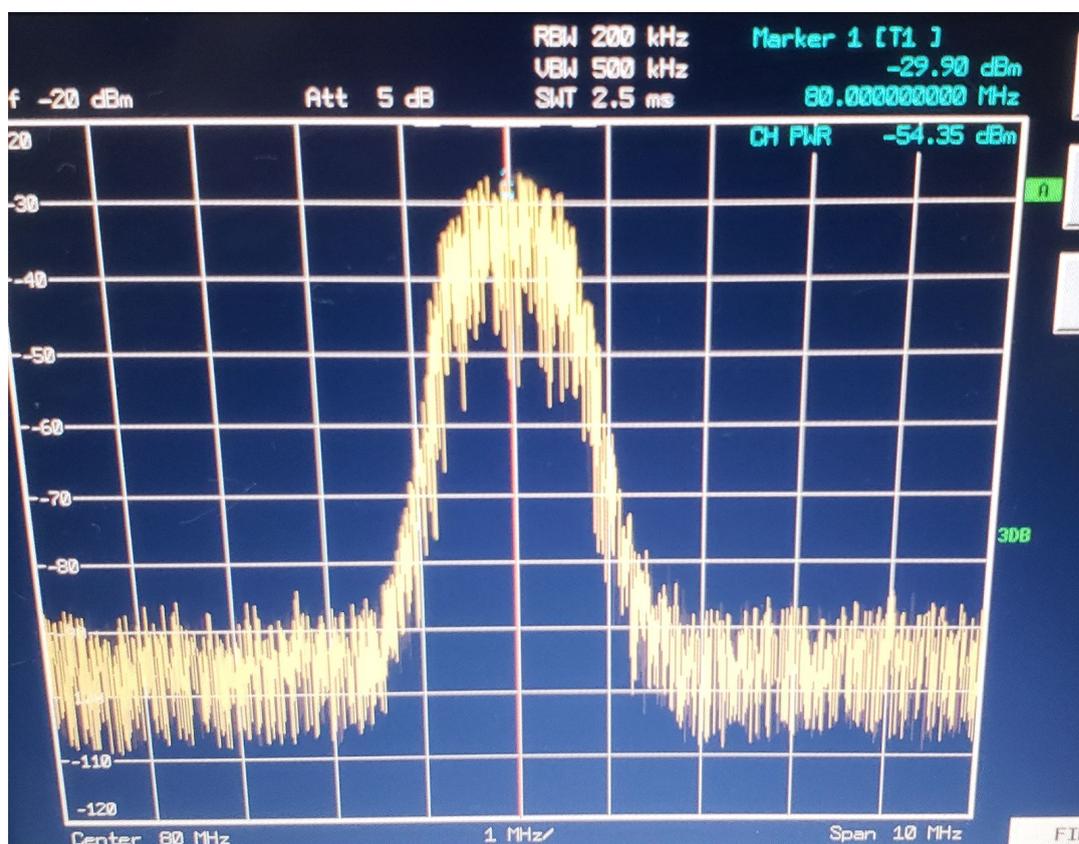


Figura 65: Análise do espectro na faixa de transmissão do gerador de sinais vetorial.

Fonte: O autor.