

Relatório Comunicações Digitais - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM)

Gabriel Williams Silva de Mendonça (17/0143121), Felipe Rodrigues Sobrinho (17/0141764), João Marcelo Almeida de Macedo (17/0106080)

I. INTRODUÇÃO

Orthogonal frequency-division multiplexing, conhecida como OFDM, é um tipo de modulação digital. É uma modulação bastante popular em comunicação de banda-larga, usada em aplicações como redes *wireless*, 4G e 5G. O sinal nessa modulação é dividido em vários canais de banda estreita em frequências diferentes, onde as frequências das subportadoras são ortogonais na duração de um período de símbolo, podendo se adaptar a diferentes condições de canal sem uma equalização complexa no domínio do tempo. A modulação e demodulação são desenvolvidas através da transformada direta e inversa de Fourier de um sinal discreto (DFT), ao se considerar o espaço dos sinais complexos. O algoritmo mais eficiente para a realização da transformada computacionalmente é o algoritmo *fast fourier transform* (FFT).

A modulação OFDM possui diversas vantagens, como por exemplo sua simples equalização, rápida implementação por conta da FFT, baixa interferência intersimbólica devido a ortogonalidade das subportadoras, maior eficiência espectral pelo maior tempo de símbolo por subportadora e alta flexibilidade pela possibilidade do uso dividido do espectro. Esta modulação também possui suas desvantagens, como altos níveis fora de banda e a necessidade de uma boa sincronização. Entretanto, esses problemas conseguem ser mitigados em níveis aceitáveis pelas técnicas conhecidas atualmente.

II. OFDM: VISÃO GERAL

O equivalente em banda básica do OFDM é:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{N-1} X_k e^{j2\pi kt/T}, \quad -T_g \leq t < T \quad (1)$$

Sendo X_k os símbolos, uma sequência de números complexos representação símbolos em banda básica BPSK, QPSK ou QAM. T_g representa o intervalo de guarda para evitar interferência intersimbólica. O espaçamento de $1/T$ entre as subportadoras garante sua ortogonalidade no período de símbolo. Um sequência de símbolos OFDM é [1]:

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(t - kT) \quad (2)$$

III. CONDIÇÃO DE ORTOGONALIDADE ENTRE SÍMBOLOS

Considere dois índices de frequência diferentes α e β para as frequências lineares normalizadas. Para garantir a ortogonalidade, o produto interno das exponenciais complexas devem ser 0, visto que os símbolos no caso serão constantes:

$$\sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{\alpha}{N} n} e^{j2\pi \frac{\beta}{N} n} = 0 \quad (3)$$

Unindo as exponenciais, temos:

$$\sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{(\alpha-\beta)}{N} n} = 0 \quad (4)$$

O índice n pode ser interpretado como elevando a exponencial complexa. Dessa forma, o somatório atua como uma progressão geométrica de razão $e^{j2\pi(\alpha-\beta)/N}$ e N número de termos. A soma de uma progressão geométrica nessas condições é então igual a:

$$\frac{e^{j2\pi \frac{(\alpha-\beta)}{N} N} - 1}{e^{j2\pi \frac{(\alpha-\beta)}{N}} - 1} \quad (5)$$

Sendo $\alpha - \beta$ um número inteiro, então o numerador será sempre zero independente da escolha de α e β . O denominador, entretanto, só será zero se os dois índices de frequência foram iguais, uma opção desconsiderada na escolha dos mesmos.

IV. CANAIS

V. EQUALIZADORES

VI. IMPLEMENTAÇÕES E RESULTADOS

A implementação da simulação da comunicação utilizando o esquema OFDM foi feita utilizando o software GNU Radio Companion, em sua versão 3.9.8.

A arquitetura implementada pode ser vista na figura 1. Esta é uma arquitetura básica de implementação de um esquema de modulação OFDM utilizando a transformada rápida de Fourier.

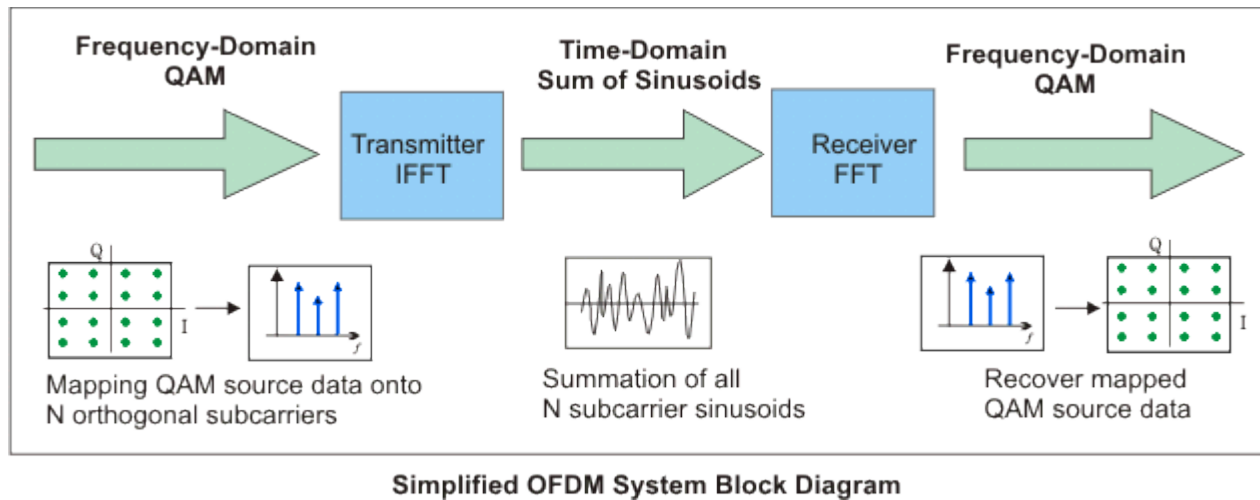
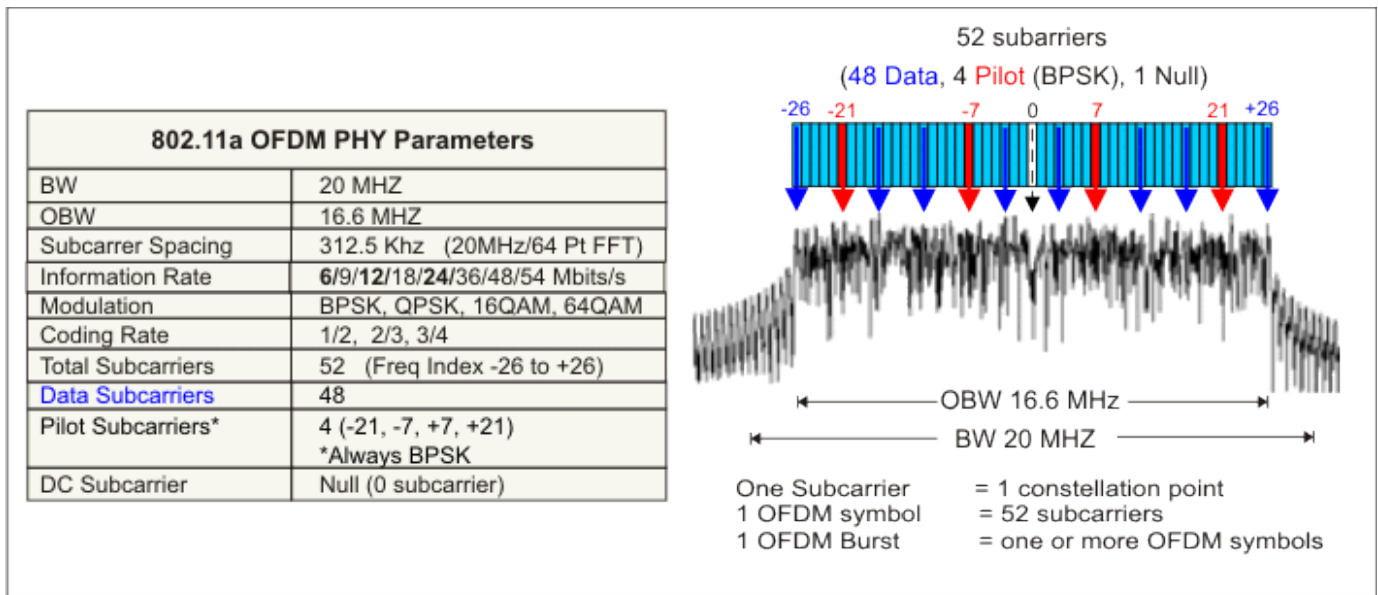


Figura 1. Diagrama em blocos básico da implementação de um esquema de modulação OFDM utilizando a transformada rápida de Fourier direta (FFT) e a sua inversa (IFFT).

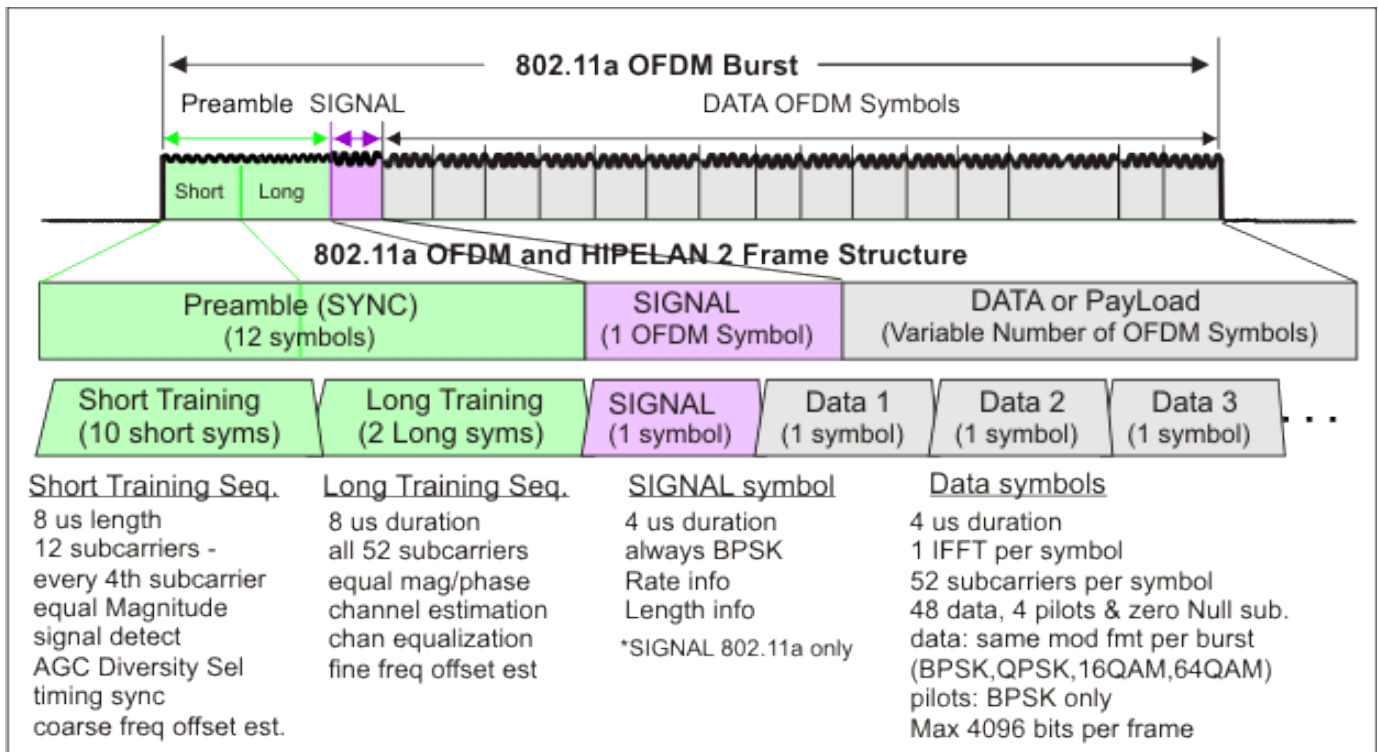
Para que seja seguido um padrão de implementação, foi escolhido como fonte de parâmetros o padrão de transmissão sem fio 802.11a na taxa de 6 Mbps, definido em 1999. Tal padrão opera com uma largura de banda de 20 MHz, com uma banda útil de 16,6 MHz; a banda restante é dividida para espaçamento entre as subportadoras, como bandas de guarda. Como será utilizado uma transformada de Fourier com um tamanho de 64, então a largura de banda de 20 MHz é dividida em 64 sub portadoras, o que corresponde a um espaçamento de 312.5 KHz. Neste protocolo há 4 tipos de modulação, sendo BPSK, QPSK, 16QAM e 64QAM. O total de subportadoras utilizadas são 52, sendo que apenas 48 são portadoras para a transmissão de dados e 4 são portadoras para a transmissão dos tons pilotos utilizados na sincronização. As subportadoras pilotos, por sua vez, devem ser mandatoriamente moduladas com o esquema BPSK. Estas considerações iniciais podem ser vistas sumarizadas na figura 2.



802.11a OFDM Physical Parameters

Figura 2. Divisão espectral do protocolo de comunicação 802.11a.

Cabe agora entender a formatação do *frame* OFDM para a taxa escolhida de 6 Mbps. Como visto anteriormente, são alocadas 48 subportadoras para os dados, e 4 para os pilotos, que em conjunto formam o *payload*. As outras 12 subportadoras são alocadas com um preâmbulo contendo 10 símbolos curtos e 2 símbolos longos para a realização da estimação do canal, e com isso a equalização. Os símbolos curtos são para obter uma estimativa grosseira da frequência para sincronização, enquanto os sinais longos são para um ajuste fino. O campo de sinal é transmitido utilizando a modulação BPSK exclusivamente, e contém as informações o tamanho, o tipo de modulação e a taxa de dados.



802.11a and HIPERLAN/2 Frame Structure

Figura 3. Visão geral sobre a formação do frame OFDM no protocolo 802.11a.

A. Transmissor OFDM

O transmissor implementado utilizando o GNU Radio pode ser visto na figura 4. Há duas fontes de sinal para a modulação: uma onda dente e serra com período e frequência bem definidos, e um áudio no formato WAV. Note que o *Vector Source* necessita de um bloco *Throttle* para limitar a taxa de envio de dados abaixo da taxa máxima permitida pela CPU, o que levaria a aquecimento da CPU e má utilização dos recursos computacionais; de outra forma, o áudio apenas precisa de uma sobre amostragem, o que é feito utilizando o bloco *Rational Resampler*, já que a taxa do áudio já possui um fluxo de dados limitado inferior à taxa de amostragem definida em 100 ksamples/s. O áudio, no entanto, possui uma variação entre -1 e 1, necessitando de ser realizada uma conversão para bytes, que por sua vez toma apenas os valores inteiros de um número de ponto flutuante, efetivamente truncando-o. Portanto, é preciso realizar uma soma por 1 e uma multiplicação por 128, para que a excursão do sinal possa ser traduzida para byte.

Tendo a fonte do sinal conhecida, a limitação do tamanho do pacote é feita por meio do bloco que realiza a inserção da *tag* de tamanho no stream de dados, chamado *Stream to Tagged Stream*. Tendo feito isso, o dado é ramificado em dois caminhos: a rota do *payload* e a rota do *header*. A rota do *header* é marcada pela adição do CRC no fim do dado original, seguido de um formatador de protocolo, que basicamente analisa o pacote gerado e calcula o *header*. O *header* dispõe sobre quais e quantas subportadoras são tons piloto, índice de modulação e insere *tags* de comprimento de pacote. O *header* é modulado utilizando o esquema BPSK. A rota do *payload* apenas realiza um reempacotamento dos bits de 2 bits por byte (com *zero-padding* nos 6 bits restantes), que por sua vez são mapeados como símbolos QPSK ($\pi/4$). Tais rotas são novamente concatenadas em uma rota única a partir de um bloco de multiplexação sequencial. Neste momento, o que se têm são os símbolos em cada posição de frequência correspondendo às posições do *buffer* da IFFT.

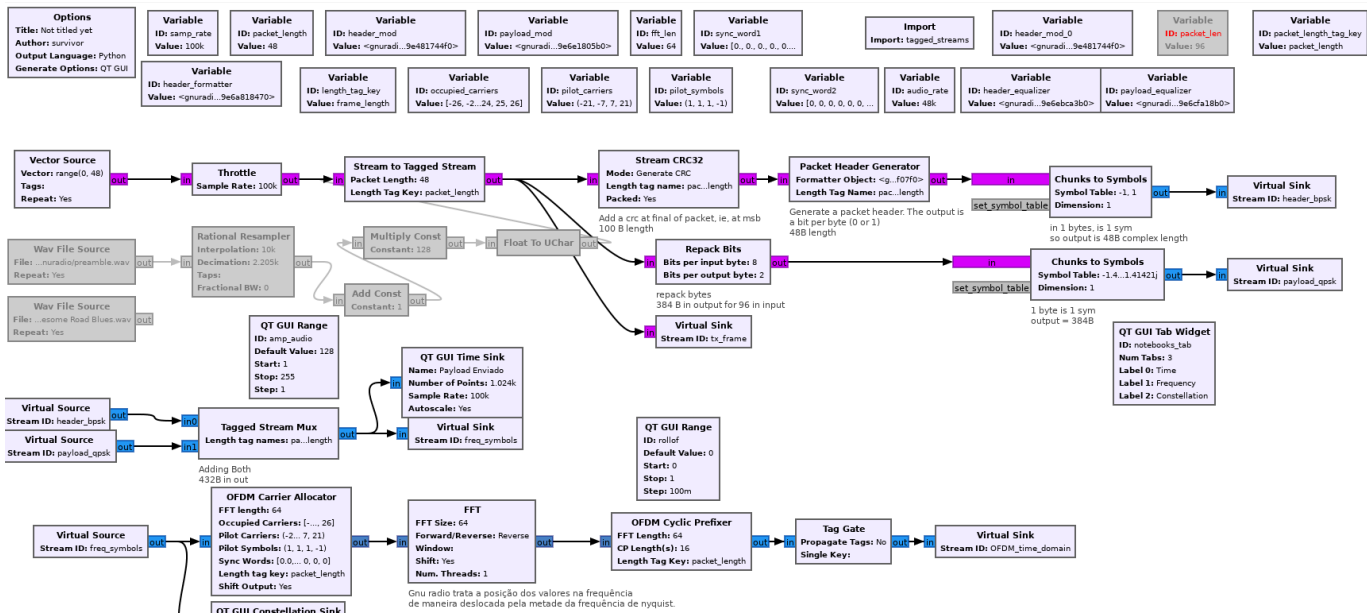


Figura 4. Transmissão implementada utilizando o GNU Radio.

Após a união das rotas, temos os dados de interesse que queremos enviar. É feita agora a alocação dos dados nas subportadoras definidas, e então é feita a transformada rápida de Fourier inversa, o que resulta agora no sinal em domínio temporal OFDM. Vale dizer, que os blocos OFDM funcionam considerando que as transformadas de Fourier já estão deslocadas em frequência, onde a frequência central é o nível DC.

O sinal então passa pelo canal, que implementa um meio seletivo em frequência, com valores arbitrados pelos estudantes. Apesar do requisito de utilização do modelo de canal CDL para MIMO, não foi possível realizar tal implementação a tempo.

B. Receptor OFDM

Após ser afetado pelo canal, é iniciado a etapa de recepção do canal, como pode ser visto na figura 5 e 6. A figura 5 mostra o processo inicial de recepção e equalização do canal a partir da análise do *header*. A primeiro passo é entrar por meio do sincronizador de frequência OFDM, que detecta o sinal de chegada a partir do prefixo cíclico e então consegue estimar o *offset* de frequência, alimentando o demultiplexador. A sincronia é feita a partir do preâmbulo pelo algoritmo de Schmidl-Cox, já implementada no GNU Radio. O demultiplexador por sua vez realiza a separação entre o *header* e o *payload* em duas rotas novamente. Enquanto o *payload* contém os dados que se quer transmitir, o *header* contém informações sobre as sequencias de treinamento para equalização do canal, onde tais são utilizadas para realimentar o bloco de demultiplexação.

Os dados passam por uma etapa de equalização, onde é utilizado a equalização *direct forcing*, por isso a realimentação é necessária para realizar a estimação do canal a partir dos preâmbulos definidos no protocolo 802.11a.

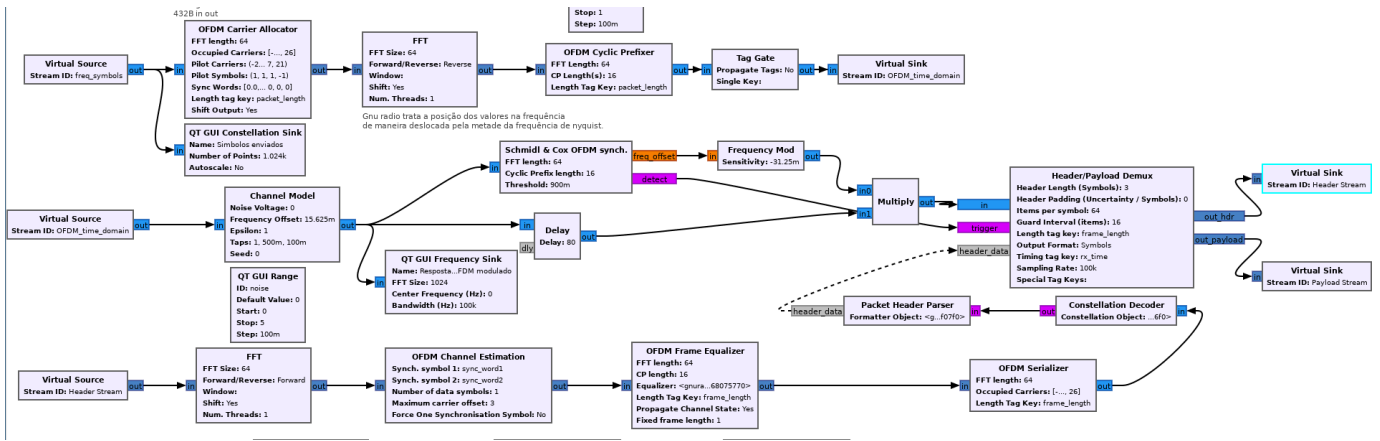


Figura 5. Extração do header e estimação do canal.

A extração do *payload* é feita de maneira semelhante à estimação do *header*. O primeiro passo é realizar a transformada rápida de Fourier direta. O segundo passo é realizar a equalização do frame, o que é feito também por meio do equalizador *direct forcing*. Após ter sido feita a equalização do canal, é feito então a serialização, ou seja, os dados são passados de paralelo para serial contendo uma tag que indica o tamanho dos dados. Essa serialização também inclui a correção das posições dos bits nas exatas posições da constelação. Após isso os símbolos demodulados novamente em formato de bits, reempacotados, e então a informação final pode ser lida.

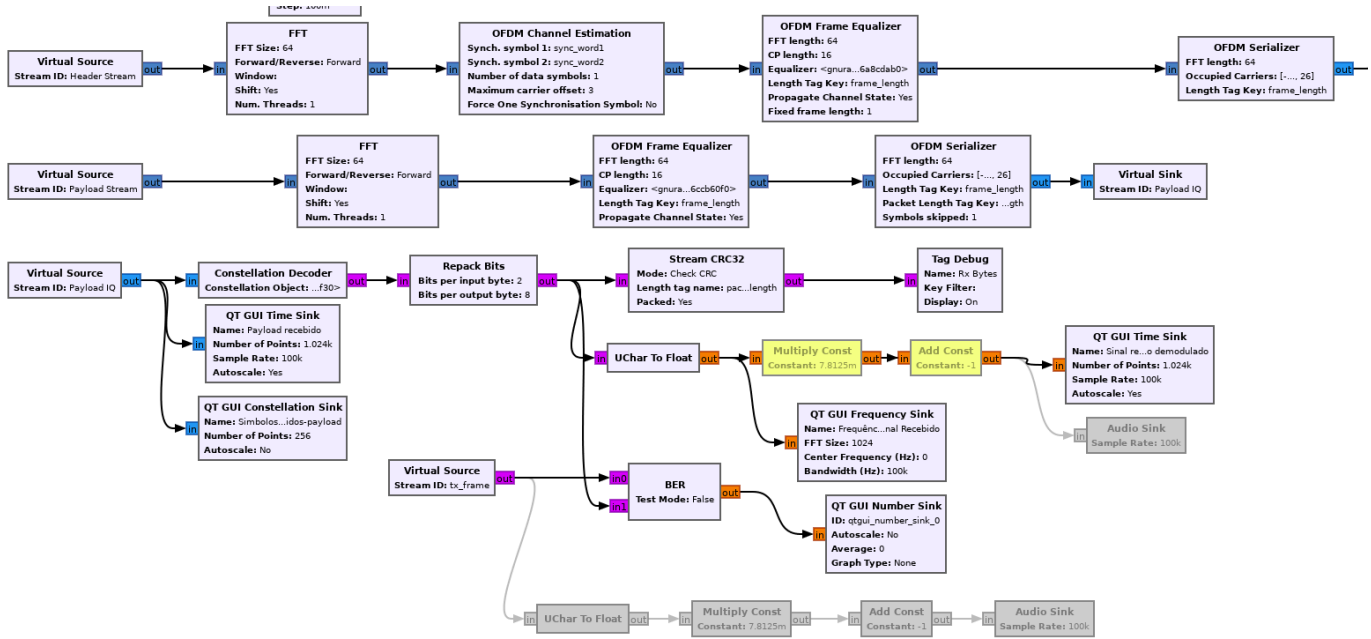


Figura 6. Decodificação OFDM e extração do payload.

VII. RESULTADOS

O primeiro resultado de interesse é a modulação OFDM no tempo, que pode ser vista na figura 7. O primeiro resultado é referente ao dado recebido e demodulado, que nesse caso foi um dente de serra. O segundo gráfico é referente ao *payload* modulado em QPSK recebido, e o terceiro é referente ao *payload* enviado. Note que este último já é composto pelo *header* modulado em BPSK e o *payload*, modulado em QPSK.

O segundo resultado de interesse é a resposta frequencial. Note que o sinal recebido é espalhado em frequência, por se tratar de um dente de serra, logo as subportadoras são em formato de uma função sinc. A resposta em frequência do sinal OFDM modulado pode ser visto no gráfico logo abaixo. Tal está comportando todo o sinal OFDM mais o prefixo cíclico.

O último resultado de interesse é o comportamento da constelação, que pode ser visto na figura 9. Observe que há poucas ou nenhuma distorção no sinal recebido. Como dito anteriormente, o bloco de serialização OFDM já realiza a compensação da constelação de tal forma que os pontos ao final estão fortemente atrelados às posições canônicas do QPSK. No gráfico abaixo, pode ser visto o formato do envio do sinal, onde além da modulação QPSK, também pode ser vista a constelação da modulação BPSK característica do sinal *header*.

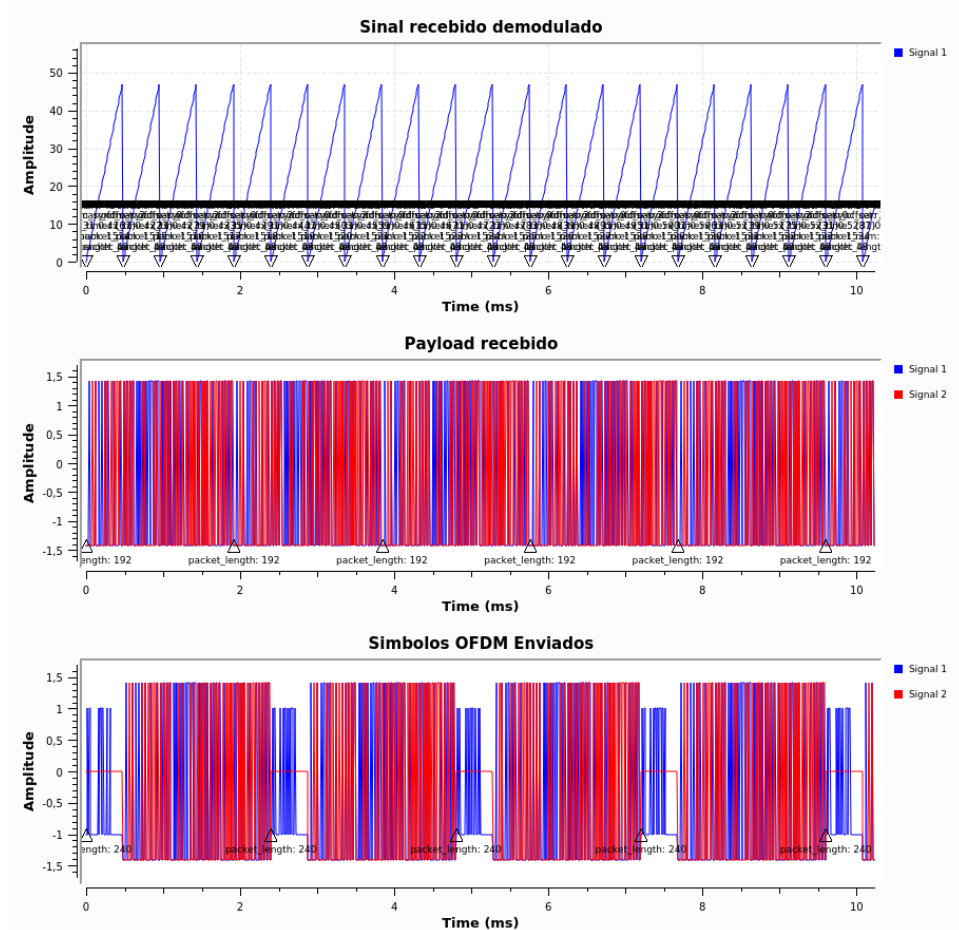


Figura 7. Resultado da modulação e demodulação no tempo.

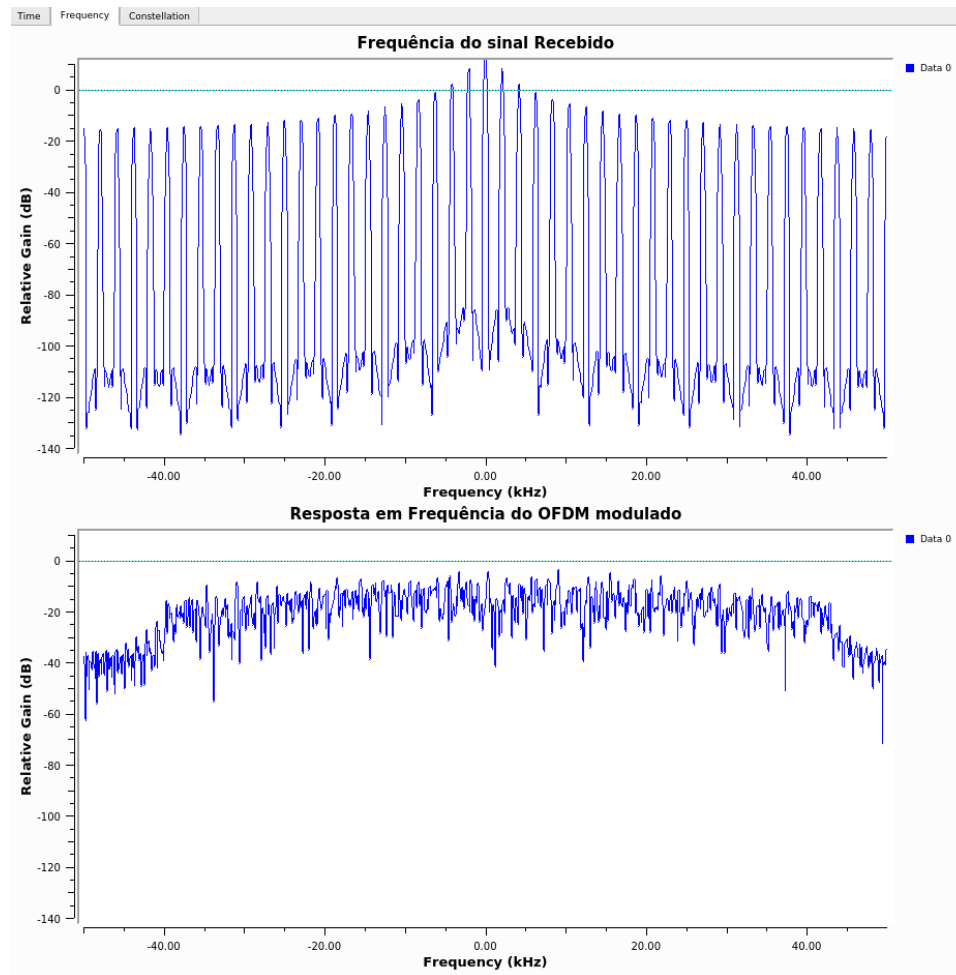


Figura 8. Resultado da análise frequencial do sinal recebido e do sinal OFDM.

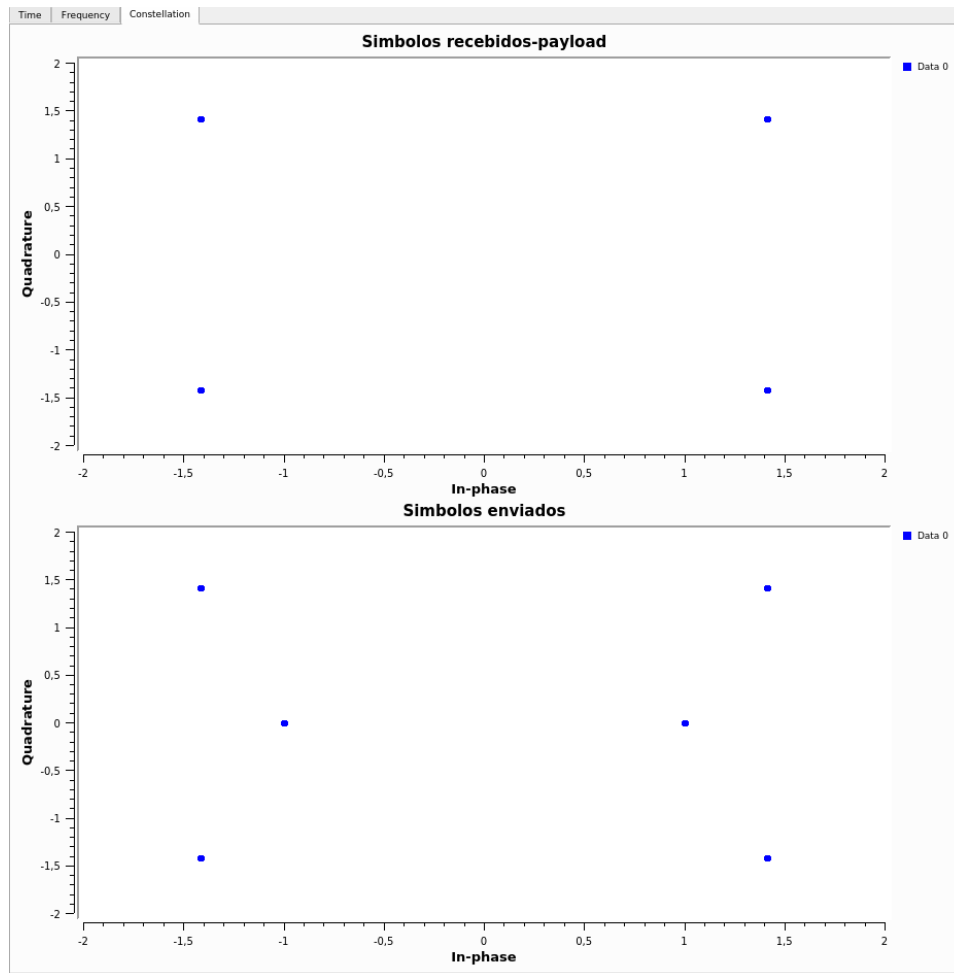


Figura 9. Resultado da observação da constelação recebida e enviada.

VIII. CONCLUSÃO

A transmissão foi realizada com sucesso. O software GNU Radio foi bastante útil na montagem da modulação, visto que os blocos pré-prontos necessitavam apenas de ajustes nos parâmetros para que se encaixasse no modelo.

A modulação OFDM apresentou resultados satisfatórios nos experimentos realizados. Alguns dados como o curva de BER não puderam ser traçados para realizar a análise comparativa da efetividade do protocolo sobre diferentes situações de canal devido ao formato de operação do GNU rádio, cujos os dados são dados em fluxo contínuo (stream). Entretanto, ao final, foi possível estabelecer um bom entendimento sobre os conceitos e funcionamentos de toda a cadeia do tráfego de esquema de modulação e demodulação OFDM.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Khosla, *OFDM Modulation Technique and its Applications: A Review*. International Conference on Innovations in Computing, 2018.