

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA
CAMPUS SÃO JOSÉ

ARTHUR CADORE MATUELLA BARCELLA

**SIMULAÇÃO DE TRANSMISSOR E RECEPTOR PTT-A3 PARA
APLICAÇÕES NO SISTEMA DE SATÉLITES ARGOS-3**

SÃO JOSÉ

2025

Arthur Cadore Matuella Barcella

Simulação de Transmissor e Receptor PTT-A3 para Aplicações no
Sistema de Satélites ARGOS-3

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Santa Catarina, para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Telecomunicações

Orientador: Prof. Roberto Wanderley da Nóbrega, Dr.

Coorientadora: Prof. Richard Demo Souza,
Dr.

São José

2025

Arthur Cadore Matuella Barcella

Simulação de Transmissor e Receptor PTT-A3 para Aplicações no
Sistema de Satélites ARGOS-3

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Santa Catarina, para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

São José, 16 de abril de 2025.

Prof. Roberto Wanderley da Nóbrega, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Professor Fulano, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Professora Fulana, Dra.
Instituto Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim, e me ensinaram a sonhar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e incentivando a seguir em frente. Vocês são a minha base e a razão pela qual busco sempre o melhor.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Professor Robertinho, pela orientação e apoio durante todo o processo de elaboração deste trabalho. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para o meu aprendizado e crescimento acadêmico.

Agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina, que me proporcionou uma formação sólida e de qualidade, e a todos os professores que contribuíram para o meu aprendizado.

Agradeço também aos meus colegas de curso, que compartilharam comigo momentos de aprendizado e crescimento. Juntos, enfrentamos os desafios e celebramos as conquistas.

“Sempre que te perguntarem se podes fazer um trabalho, respondas que sim e te ponhas em seguida a aprender como se faz.” (NOME, ANO)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e simulação de um sistema de modulação e demodulação, utilizando os padrões da terceira geração do sistema de satélites ARGOS-3. Este padrão é utilizado em Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) voltadas ao monitoramento ambiental, e emprega técnicas de comunicação digital, como modulação QPSK, codificação convolucional e embaralhamento de dados, com o objetivo de aumentar a confiabilidade do enlace de satélite. A metodologia adotada envolve o estudo de especificações do padrão de comunicação, a estrutura dos datagramas transmitidos pelas PCDs e a implementação, em ambiente simulado, dos blocos responsáveis pela transmissão e recepção digital. O conjunto de simulações vai desde a geração da portadora pura, passando pela palavra de sincronismo e codificação da mensagem do usuário, até a demodulação e recuperação dos dados transmitidos.

Palavras-chave: Comunicação por satélite; PTT-A3; ARGOS-3; Modulação digital;

ABSTRACT

The objective of this work is to develop and simulate a modulation and demodulation system based on the standards of the third generation of the ARGOS-3 satellite system. This standard is used in Data Collection Platforms (DCPs) designed for environmental monitoring and employs modern digital communication techniques such as QPSK modulation, convolutional coding, and data scrambling, aiming to increase the robustness of the satellite communication link. The adopted methodology involves a detailed study of the communication standard specifications, the structure of the datagrams transmitted by the DCPs, and the implementation, in a simulated environment, of the blocks responsible for digital transmission and reception. The proposed simulation set covers the entire chain, from the generation of the continuous wave (CW) carrier, through the synchronization word and user message encoding, to the demodulation and recovery of the transmitted data.

Keywords: Satellite Communication; PTT-A3; ARGOS-3; Digital modulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa das PCDs distribuídas pelo território nacional	19
Figura 2 – Satélites para coleta de dados ambientais	21
Figura 3 – Estrutura do quadro de transmissão ARGOS-3	23
Figura 4 – Comparação de portadora pura e sinal modulado	24
Figura 5 – Estrutura do datagrama ARGOS-3	25
Figura 6 – Agrupamento de sensores no payload do datagrama	27
Figura 7 – Diagrama de blocos do transmissor ARGOS-3	29
Figura 8 – Diagrama de blocos do codificador convolucional ARGOS-3	30
Figura 9 – Embaralhador de dados para o ARGOS-3	31
Figura 10 – Codificação de linha dos vetores I e Q	32
Figura 11 – Modulação de pulso dos canais I e Q	33
Figura 12 – Diagrama de blocos do modulador QPSK	33
Figura 13 – Modulação em banda passante dos canais I e Q	34
Figura 14 – Diagrama de blocos do receptor ARGOS-3	35
Figura 15 – Componentes I e Q após demodulação	36
Figura 16 – Componentes I Q após filtragem passa baixa	37
Figura 17 – Componentes I e Q após filtragem casada	38
Figura 18 – Amostragem das componentes I e Q	39
Figura 19 – Comparação dos vetores I e Q decididos com vetores transmitidos	39
Figura 20 – Diagrama de blocos do Desembaralhador ARGOS-3	41
Figura 21 – Comparação de BER vs E_b/N_0 utilizando codificação convolucional	42
Figura 22 – Streambits do datagrama ARGOS-3	43
Figura 23 – Multiplexação com preâmbulo	44
Figura 24 – Codificação de linha	44
Figura 25 – Resposta ao impulso - Pulso RRC	45
Figura 26 – Resposta ao impulso - Pulso Manchester	45
Figura 27 – Modulação de pulso dos canais I e Q	46
Figura 28 – Modulação em banda passante canais I e Q	46
Figura 29 – Fase e Constelação do sinal modulado $s(t)$	47
Figura 30 – Comparação de portadora pura e sinal modulado	47
Figura 31 – Adição de multiplas transmissões no canal	48
Figura 32 – Adição de ruído ao canal	49
Figura 33 – Diagrama de waterfall do canal	50
Figura 34 – Detecção de componentes no espectro com base em P_t	50
Figura 35 – Diagrama de waterfall de detecção do canal	51
Figura 36 – Diagrama de waterfall de decisão do canal	51

Figura 37 – Demodulação banda base dos canais I e Q	52
Figura 38 – Filtragem passa baixa dos canais I e Q	53
Figura 39 – Filtragem casada dos canais I e Q	54
Figura 40 – Vetor de amostras esperadas para sincronismo com I e Q	54
Figura 41 – Módulo de correlação entre I e Q e vetor de sincronismo	55
Figura 42 – Sincronização de I e Q com vetor de sincronismo	55
Figura 43 – Amostragem dos canais I e Q em T_b a partir de τ	56
Figura 44 – Constelação dos canais I e Q filtrados e amostrados	56
Figura 45 – Decodificação convolucional dos canais I e Q	57
Figura 46 – Comparação BER vs SNR - ARGOS3 e QPSK	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados meteorológicos da PCD 31855 (10/10/2007 - 11/10/2007)	26
Quadro 2 – Comprimento em bits para cada tamanho de mensagem (T_m)	27
Quadro 3 – Comprimento da cauda (bits '0') para cada tamanho de mensagem	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD9361 *Analog Devices 9361 - RF Transceptor.*

ARGOS *Advanced Research and Global Observation Satellite.*

ARGOS-2 *ARGOS v2 Communication Standard.*

ARGOS-3 *ARGOS v3 Communication Standard.*

CBERS *China-Brazil Earth Resources Satellites.*

CBERS-1 *China-Brazil Earth Resources Satellite 1.*

CBERS-4 *China-Brazil Earth Resources Satellite 4.*

CCSDS *Consultative Committee for Space Data Systems.*

CNES *Centre National d'Études Spatiales, França.*

ETR *Estações Terrenas de Recepção.*

FFT *Fast Fourier Transform.*

FPGA *Field Programmable Gate Array.*

Hamming *Hamming Distance.*

INPE *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.*

IoT *Internet of Things.*

LPF *Low-Pass Filter.*

Manchester *Manchester Encoding.*

MF *Matched Filter.*

MLD *Maximum Likelihood Decoding.*

NASA *National Aeronautics and Space Administration.*

NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration.*

NRZ *Non-Return-to-Zero.*

PCD *Plataformas de coleta de dado.*

PM *Phase Modulation.*

PTT-A2 *ARGOS v2 Communication Standard PTT.*

PTT-A3 *ARGOS v3 Communication Standard PTT.*

PTT-ZE variação do PTT-A3 *Zero-Energy.*

QPSK *Quadrature Phase-Shift Keying.*

RRC *Root Raised Cosine.*

SBCDA Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais.

SCD-1 Satélite de Coleta de Dados 1.

SCD-2 Satélite de Coleta de Dados 2.

SDR *Software Defined Radio.*

SINDA Sistema Integrado de Dados Ambientais.

SNR *Signal-to-Noise Ratio.*

Zynq-7000 família de FPGA arquitetura ARM.

LISTA DE SÍMBOLOS

A Amplitude do sinal modulado.

α Fator de roll-off do filtro RRC, $\alpha = 0.8$.

BER Bit Error Rate.

B_m Sequência de bits do comprimento de mensagem, $(0 \leq T_m < 8)_{10}$ (ARGOS-3).

bps Bits per second.

I In-phase component.

Q Quadrature component.

d_{free} Distância livre do código convolucional, $d_{free} = 10$ (ARGOS-3).

$d_I(t)$ Sinal modulado em banda base, canal I .

$d'_I(t)$ Sinal demodulado em banda base, canal I .

$d_Q(t)$ Sinal modulado em banda base, canal Q .

$d'_Q(t)$ Sinal demodulado em banda base, canal Q .

$d'_X(t)$ Sinal filtrado (filtragem passa baixa), canal I .

$d'_Y(t)$ Sinal filtrado (filtragem passa baixa), canal Q .

E_b/N_0 Energy per bit to noise power spectral density ratio.

f_c Carrier frequency, ≈ 401.65 MHz (ARGOS-3).

f_n f_c randômica selecionada pela PCD, $401.620 \leq f_n \leq 401.650$ MHz (ARGOS-3).

f_s Frequênciade amostragem, $f_s = 128$ KHz.

G_0 Vetor gerador correspondente ao, canal I , $G_0 = [121]_{10}$ (ARGOS-3).

G_1 Vetor gerador correspondente ao, canal Q , $G_1 = [91]_{10}$ (ARGOS-3).

$g(t)$ Resposta ao impulso do filtro de formatação.

$g(-t)$ Resposta ao impulso do filtro de formatação invertido (filtro casado).

$h(t)$ Resposta ao impulso do filtro passa baixa.

$I[n]$ Sequência de símbolos, canal I .

$I'[n]$ Sequência de símbolos decididos, canal I .

I_{PCD} Número da PCD, $(0 \leq I_{PCD} < 1048575)_{10}$ (ARGOS-3).

$I'(t)$ Sinal filtrado (filtragem casada), canal I .

k Índice de frequênciade espectro de frequênciade segmento de sinal.

kHz Kilohertz.

m Índice de amostra do segmento de sinal.

MHz Megahertz.

n Índice de amostra/símbolo.

N_b Número de blocos, $0 < N_b < 9$ (ARGOS-3).

PCD_{ID} Identificador da PCD, número da PCD + bits de checksum.

ϕ_0 Desvio de fase inicial do sinal modulado.

P_m Bit de paridade do campo B_m .

$P_n[k]$ Potência do espectro de frequênciade segmento de sinal.

P_t Valor de potência de *threshold* para detecção de portadora.

$Q[n]$ Sequência de símbolos, canal Q .

$Q'[n]$ Sequência de símbolos decididos, canal Q .

$Q'(t)$ Sinal filtrado (filtragem casada), canal Q .

R_b Rate bit, 400 bps (ARGOS-3).

R_{PCD} Bits de checksum do Identificador da PCD.

$r(t)$ Ruído *AWGN*, em função de tempo t .

$S_I[n]$ Sequência de preâmbulo do, canal I .

$S[n]$ Sequência de preâmbulo, $S[n] = 2BEEEEBF_{16}$, (ARGOS-3).

$S_Q[n]$ Sequência de preâmbulo do, canal Q .

$s(t)$ Sinal modulado em banda passante, em função de tempo t .

t Vetor de Tempo.

τ Delay inicial para decisão de símbolos.

T_b Tempo de bit, $T_b = 1/R_b$.

T_m Tamanho da mensagem.

n Index do segmento de sinal.

u_t Vetor de entrada do codificador convolucional.

$v_t^{(0)}$ Saída do codificador convolucional correspondente a G_0 .

$v_t^{(0)''}$ Sequência de bits desembaralhados, canal I .

$v_t^{(1)}$ Saída do codificador convolucional correspondente a G_1 .

$v_t^{(1)'}$ Sequência de bits desembaralhados, canal Q .

W Largura de banda do sinal modulado, definido como $W = (1 + \alpha)/T_b$.

$x_i(t)$ Portadora cossenoide utilizada na modulação do, canal I .

$X[n]$ Sequência de bits embaralhados, canal I .

$x_n[m]$ Segmento de sinal de $s(t)$ amostrado no tempo.

$X_n[k]$ Espectro de frequência do segmento de sinal.

$X'[n]$ Sequência de bits decididos após decodificação de linha, canal I .

$Y[n]$ Sequência de bits embaralhados, canal Q .

$Y'[n]$ Sequência de bits decididos após decodificação de linha, canal Q .

$y_q(t)$ Portadora senoidal utilizada na modulação do, canal Q .

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
1.2	ORGANIZAÇÃO DE TEXTO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	COLETA DE DADOS SBCDA VIA SATÉLITE	21
2.1.1	Constelação Catarina	22
2.2	EVOLUÇÃO DO SISTEMA ARGOS	22
2.3	ESPECIFICAÇÕES DO PADRÃO PTT-A3	23
2.3.1	Portadora pura	23
2.3.2	Palavra de sincronismo	24
2.3.3	Datagrama	25
2.4	ESTRUTURA DE UM DATAGRAMA ARGOS-3	25
2.4.1	Dados de aplicação	26
2.4.1.1	<i>Sensores</i>	26
2.4.1.2	<i>Blocos de dados</i>	26
2.4.2	Tamanho de mensagem	27
2.4.3	Identificador da PCD	28
2.4.4	Bits de fim de mensagem	28
2.5	TRANSMISSOR PTT-A3	28
2.5.1	Codificador convolucional	29
2.5.2	Embaralhador	30
2.5.3	Codificação de Linha	31
2.5.4	Modulação de Pulso	32
2.5.5	Modulação em banda passante	33
2.6	RECEPTOR PTT-A3	34
2.6.1	Detecção de portadora	35
2.6.2	Demodulador banda base	36
2.6.3	Filtragem passa baixa e filtragem casada	37
2.6.4	Filtragem casada	37
2.6.5	Decisão de símbolos	38
2.6.6	Decodificador de linha	40
2.6.7	Desembaralhador	40
2.6.8	Decodificador convolucional	41

3	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	43
3.1	CADEIA DE TRANSMISSÃO	43
3.1.1	Sequência de transmissão	43
3.1.2	Modulação de pulso RRC e Manchester	45
3.1.2.1	<i>Pulso RRC e Manchester</i>	45
3.1.2.2	<i>Modulação de pulso dos canais I e Q</i>	46
3.1.3	Modulação em fase em quadratura (QPSK)	46
3.1.3.1	<i>Adição de portadora pura</i>	47
3.2	CANAL E ADIÇÃO DE RUÍDO	48
3.2.1	Modelo de canal	48
3.2.2	Geração de ruído AWGN	49
3.3	DETECÇÃO DE PORTADORA	50
3.3.1	Segmentação do sinal recebido	50
3.3.2	Detecção de componentes no espectro	50
3.3.3	Decisão de componentes detectadas	51
3.3.4	Segmentação do sinal recebido para recepção	52
3.4	CADEIA DE RECEPÇÃO	52
3.4.1	Demodulação banda base	52
3.4.2	Filtragem	53
3.4.3	Sincronização de símbolos	54
3.4.4	Decisão de símbolos	56
3.4.5	Recuperação do Datagrama	57
4	CONCLUSÃO	58
	Referências	59
	APÊNDICE A – BER VS SNR	61

1 INTRODUÇÃO

O uso de tecnologias de comunicação via satélite tem se mostrado fundamental para aplicações de *Internet of Things* (IoT) em cenários remotos, especialmente no monitoramento ambiental, oceânico e meteorológico, através de plataformas equipadas com sensores, as chamadas Plataformas de coleta de dado (PCD), que são capazes de transmitir pequenas quantidades de dados periodicamente para satélites de órbita baixa (Centenaro *et al.*, 2021; Fraire; Céspedes; Accettura, 2019).

Dentre os sistemas internacionais voltados para esse tipo de aplicação, destaca-se o *Advanced Research and Global Observation Satellite* (ARGOS)¹, criado em 1978 por meio de uma cooperação entre o *Centre National d'Études Spatiales*, França (CNES), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Desde seu desenvolvimento, o sistema ARGOS tem passado por constantes evoluções, trazendo novos padrões de transmissão e modulação como os formatos *ARGOS v2 Communication Standard PTT* (PTT-A2), *ARGOS v3 Communication Standard PTT* (PTT-A3) e variação do PTT-A3 *Zero-Energy* (PTT-ZE), para aprimorar a eficiência espectral e a confiabilidade do enlace com o satélite.

No Brasil, o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (SBCDA)², desenvolvido e operado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), emprega a tecnologia ARGOS. O SBCDA utiliza satélites em órbita baixa, como os Satélite de Coleta de Dados 1 (SCD-1), Satélite de Coleta de Dados 2 (SCD-2) e os satélites da série *China-Brazil Earth Resources Satellites* (CBERS), para coletar dados transmitidos por PCD instaladas em todo o território nacional (Rodrigues, 2018; Duarte *et al.*, 2021).

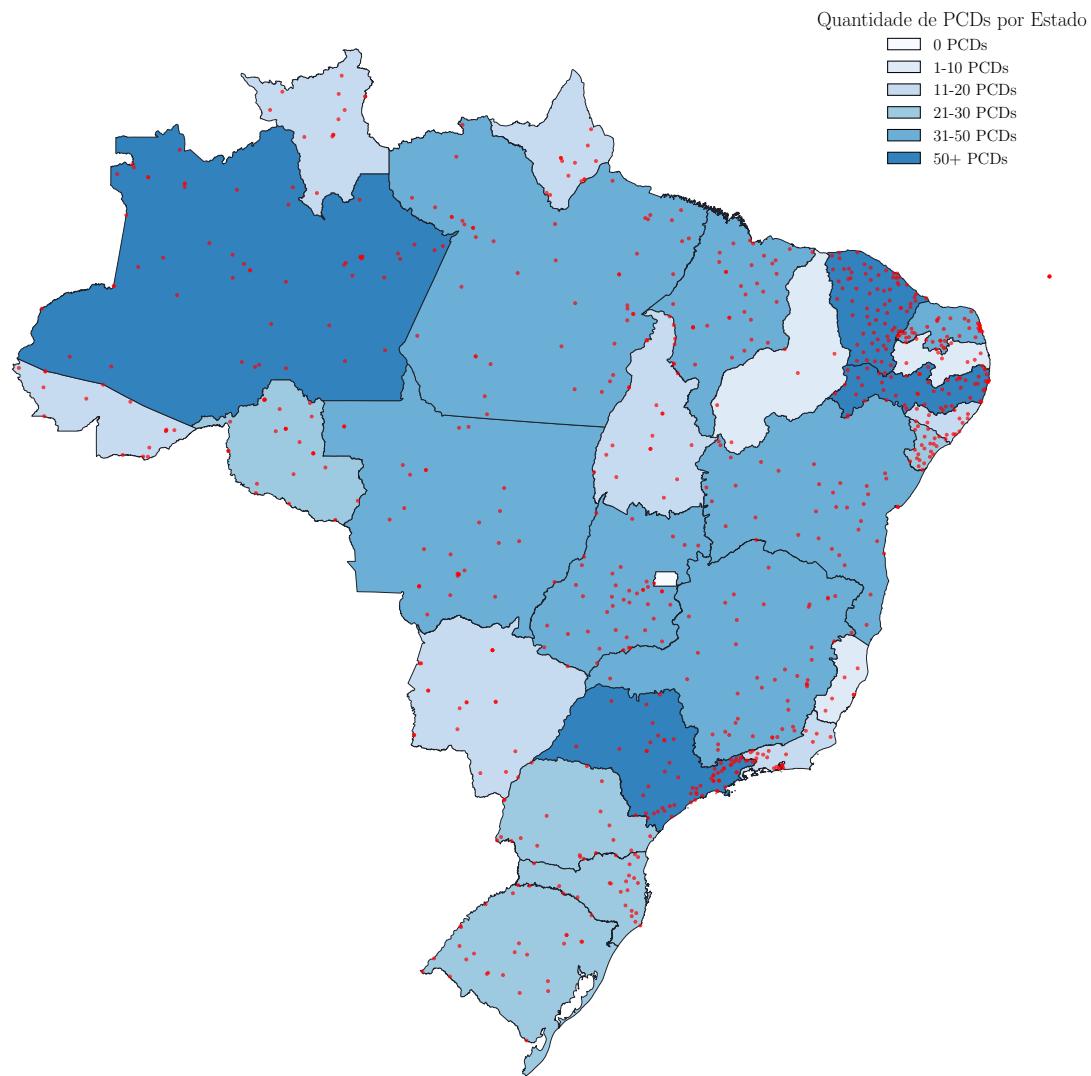
De acordo com dados do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA)³, atualmente é possível realizar a inspeção dos dados de 1030 pontos ativos de coleta distribuídos pelo país, cuja distribuição geográfica é apresentada na Figura 1 (Silva; Almeida, 2022).

¹ <https://www.argos-system.org/>

² <https://www.gov.br/aeb/pt-br/acoes-e-programas/aplicacoes-espaciais/dados-ambientais>

³ <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/>

Figura 1 – Mapa das PCDs distribuídas pelo território nacional



Grande parte dessas PCD é compatível com o padrão *ARGOS v2 Communication Standard* (ARGOS-2), implantado a partir de 1993. Esses dispositivos, entretanto, operam com tecnologias de hardware e software limitadas à época de sua instalação, apresentando restrições quanto à eficiência espectral, robustez contra interferências e capacidade de transmissão de dados. Diante da evolução das demandas de comunicação, da necessidade de aprimorar o desempenho do sistema e da dificuldade na aquisição dos componentes legados para montagem do hardware compatível com ARGOS-2, o *ARGOS v3 Communication Standard* (ARGOS-3) foi desenvolvido.

O sistema ARGOS-3 introduziu o uso de transmissores do tipo PTT-A3 que empregam técnicas digitais mais avançadas, como modulação *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK), codificação convolucional e embaralhamento de dados, visando maior robustez frente a desvanecimentos e erros de rajada. Esses avanços também motivaram o desenvolvimento de novos transmissores e receptores compatíveis com o padrão PTT-A3 (CNES,

2006).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a simulação de um modulador/demodulador compatível com o padrão PTT-A3, conforme as especificações do sistema ARGOS-3, contribuindo para a formação de massa crítica com domínio técnico sobre os elementos do sistema, a fim de criar melhores condições para que futuros esforços de modernização das PCD do SBCDA possam ser conduzidos.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal a simulação e análise de um sistema de modulação e demodulação compatível com o padrão PTT-A3, utilizado no sistema de satélites ARGOS-3.

1.1.1 Objetivo geral

Simular um sistema de modulação e demodulação compatível com o padrão PTT-A3 do sistema de satélites ARGOS-3.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral proposto, este trabalho foi estruturado em uma série de etapas com metas técnicas bem definidas. Os objetivos específicos foram organizados de modo a contemplar a compreensão teórico/prática do padrão de comunicação ARGOS-3. São eles:

- Estudar o padrão de comunicação ARGOS;
- Simular a cadeia de transmissão do padrão PTT-A3;
- Simular o efeito da adição de ruído;
- Simular a detecção de múltiplas portadoras;
- Simular a recepção e demodulação do sinal;
- Simular a sincronização de quadros.
- Simular a montagem e interpretação do datagrama.

1.2 ORGANIZAÇÃO DE TEXTO

O conteúdo deste trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão do projeto. Já o Capítulo 3 descreve o desenvolvimento e as etapas na execução do projeto.

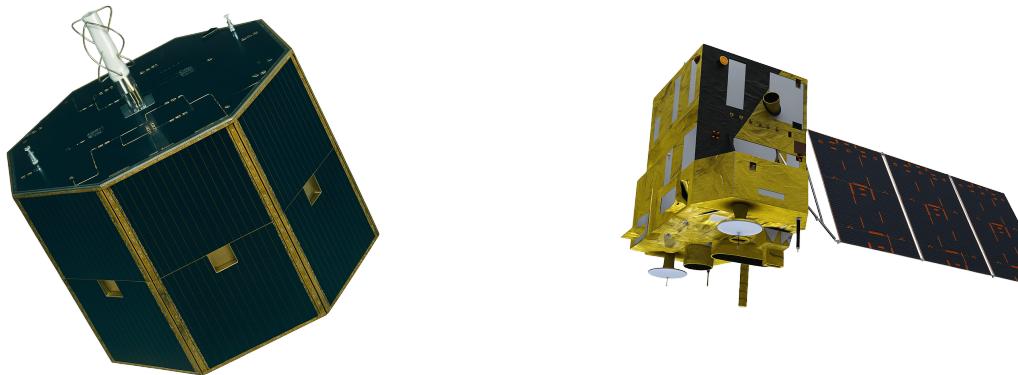
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta conceitos e fundamentos teóricos para o desenvolvimento deste trabalho. São apresentados tópicos relacionados a comunicação por satélites, evolução do sistema ARGOS, e técnicas de modulação, codificação e sincronização envolvidas no padrão PTT-A3. O objetivo é fornecer uma base de conhecimento para a compreensão dos requisitos técnicos e operacionais do sistema de comunicação proposto.

2.1 COLETA DE DADOS SBCDA VIA SATÉLITE

A comunicação por satélites desempenha um papel fundamental na coleta e disseminação de dados ambientais em escala regional e global. No contexto brasileiro, essa função é desempenhada pelo SBCDA, operado pelo INPE. O SBCDA é composto pelos satélites SCD-1, SCD-2 e *China-Brazil Earth Resources Satellite 1* (CBERS-1) até *China-Brazil Earth Resources Satellite 4* (CBERS-4) apresentados na Figura 2 abaixo, que orbitam a aproximadamente 750 km de altitude, recebendo informações transmitidas por PCD espalhadas pelo território nacional (Lima, 2021).

Figura 2 – Satélites para coleta de dados ambientais



Satélite SCD-1

Satélite CBERS-4

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Massa	115 kg	Massa	1 980 kg
Potência Elétrica	110 W	Potência Elétrica	2 300 W
Vida útil	4 anos	Vida útil	3 anos
Altitude média	≈ 750 km	Altitude média	≈ 778 km
Inclinação orbital	25°	Inclinação orbital	98,54°
Período orbital	99,7 min	Período orbital	100,32 min

Esses satélites recebem sinais transmitidos pelas PCD na faixa de frequência UHF (401,62 a 401,65 *MHz*) e os retransmitem para as Estações Terrenas de Recepção (ETR)

localizadas em solo, nas faixas de Banda-S (2267,5 MHz). Como operam em órbitas baixas, esses satélites realizam aproximadamente 14 revoluções por dia sobre o território nacional, o que permite ampla cobertura espacial.

Apesar da ampla cobertura, a comunicação com satélites de órbita baixa apresenta um grande desafio técnico, sendo a necessidade de visada simultânea entre a PCD transmissora e o satélite, o que limita a janela de transmissão e impõe restrições na coleta contínua de dados. Além disso, o movimento relativo entre a PCD e o satélite provoca o chamado efeito Doppler, responsável por deslocamentos na frequência do sinal recebido, podendo atingir até $\pm 79,4\ kHz$. Esse desvio precisa ser compensado para garantir a correta demodulação do sinal (Rae, 2005; Rodrigues, 2018).

A confiabilidade do enlace também é impactada por fatores como atenuação no espaço livre, ruídos térmicos, e variações atmosféricas. Para compensar esses fatores, são necessárias técnicas específicas de modulação, sincronização, codificação de dados e planejamento de enlace, de modo a garantir a confiabilidade das mensagens transmitidas.

2.1.1 Constelação Catarina

A Constelação Catarina é um projeto nacional baseado no uso de nanossatélites em órbita baixa, para atuar como um novo braço operacional do SBCDA. A Constelação Catarina é composta por pequenos satélites integrados com *Software Defined Radio* (SDR), capazes de receber sinais transmitidos pelas PCD no padrão ARGOS-2, com planos futuros de migração para o padrão ARGOS-3 (Gomes, 2024).

Diferentemente dos satélites tradicionais, os nanosatélites da Constelação Catarina são projetados para realizar a decodificação e o armazenamento dos dados a bordo, o que permite superar a limitação de visada simultânea entre satélite e ETR, ampliando a cobertura do sistema (Rodrigues, 2018).

A arquitetura dos satélites que compõem a constelação é baseada na integração do transceptor *Analog Devices 9361 - RF Transceptor* (AD9361) com uma *Field Programmable Gate Array* (FPGA) da família de FPGA arquitetura ARM (Zynq-7000), formando uma plataforma de SDR altamente flexível¹. Essa configuração permite a reconfiguração remota do hardware, o que é especialmente importante para futuras atualizações de protocolo ou migração para novos padrões de comunicação, como o PTT-A3.

2.2 EVOLUÇÃO DO SISTEMA ARGOS

O ARGOS-2, base do SBCDA desde 1993, utiliza transmissores do tipo PTT-A2, baseados em modulação analógica *Phase Modulation* (PM) com codificação Manchester. Essa versão se mostrou eficiente por muitos anos, mas suas limitações logo se tornaram

¹ <https://www.argos-system.org/wp-content/uploads/2023/01/ARTIC-Chipset-AnSem-Info-sheet.pdf>

evidentes, especialmente no que diz respeito à robustez frente a ruído, à largura de banda ocupada e à necessidade de visada simultânea entre PCD e satélite para a ETR (CNES, 2006).

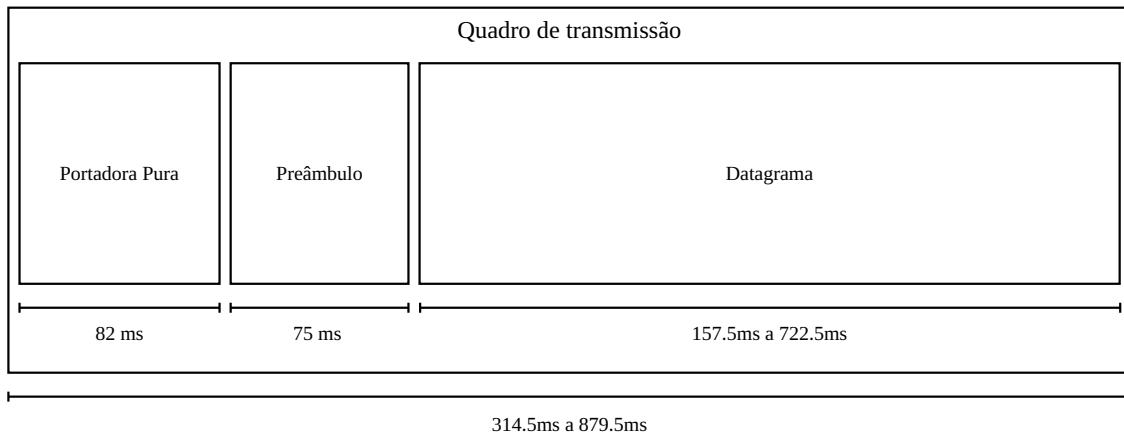
A evolução desse sistema levou ao desenvolvimento do ARGOS-3, que introduziu novas técnicas digitais de comunicação. Essa nova geração incorporou transmissores do tipo PTT-A3 e PTT-ZE, os quais se destacam pela adoção de modulação QPSK, codificação convolucional e embaralhamento de dados, resultando em maior confiabilidade na transmissão e maior eficiência espectral. Além disso, o ARGOS-3 permite o armazenamento e retransmissão de mensagens a bordo do satélite para a ETR (Lima, 2021; Rodrigues, 2018).

2.3 ESPECIFICAÇÕES DO PADRÃO PTT-A3

O transmissor do tipo PTT-A3 é um dos formatos definidos na terceira geração do sistema ARGOS, projetado para oferecer maior robustez na transmissão e maior eficiência na utilização do espectro de frequência.

A estrutura de um quadro PTT-A3 é composta por três campos principais, sendo eles: portadora pura, palavra de sincronismo (préâmbulo) e datagrama. Na Figura 3, a estrutura é apresentada de forma detalhada, considerando que a taxa de transmissão R_b é de 400 bps CNES (2006).

Figura 3 – Estrutura do quadro de transmissão ARGOS-3

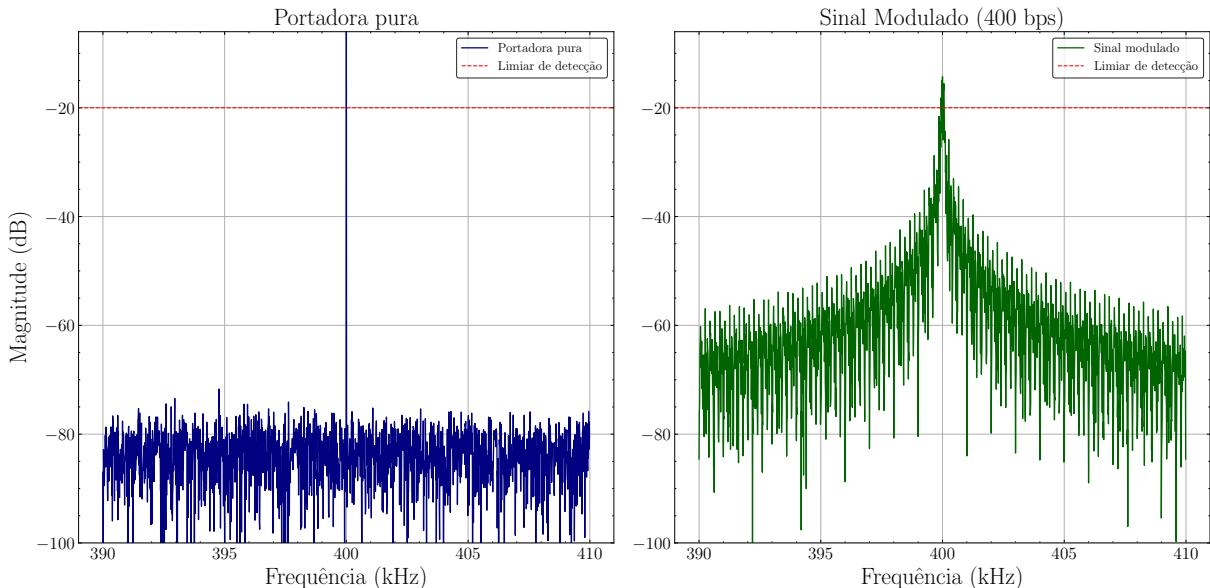


2.3.1 Portadora pura

A sequência de transmissão do quadro inicia-se com a portadora contínua ou pura, com duração de 82 ± 2 ms. Durante essa etapa a portadora não transmite dados modulados e é utilizada pelo receptor apenas para realizar a detecção do sinal, bem como para facilitar o processo de sincronização de frequência e fase da portadora.

A Figura 4 apresenta o sinal da portadora pura no espectro em comparação com o sinal modulado. Nota-se que quando apenas a portadora pura é transmitida, o espectro do sinal é concentrado em uma única frequência, sem componentes laterais. Já o sinal modulado apresenta componentes laterais que se estendem ao redor da frequência da portadora f_c , formando uma banda de uso do espectro mais ampla (CNES, 2006).

Figura 4 – Comparação de portadora pura e sinal modulado



O processo de detecção do sinal realizado pelo receptor monitora a presença de sinal que ultrapassa um determinado limiar, dessa forma é fundamental que no receptor o sinal esteja o mais concentrado e com a maior *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) possível no momento da detecção, para que a frequência da portadora, f_c , seja identificada corretamente (CNES, 2006).

2.3.2 Palavra de sincronismo

Logo após a portadora pura, é transmitida uma palavra de sincronismo de 30 bits (correspondente a 15 símbolos QPSK), cuja função é auxiliar na identificação do início da mensagem codificada, possibilitando a sincronização para decisão. Essa sequência é conhecida e fixa entre transmissor e receptor, no caso do PTT-A3 sendo $S = 2\text{BEEEEBF}_{16}$, o que permite alinhar corretamente a decisão e identificar o início do bloco de dados úteis. (CNES, 2006)

A sequência $S[n]$ é separada em dois vetores distintos, $S_I[n]$ e $S_Q[n]$, por meio de uma intercalação simples de seus bits. O processo de intercalação consiste em distribuir os bits de forma alternada entre os canais $S_I[n]$ e $S_Q[n]$, resultando em duas sequências de 15 bits cada, que serão transmitida como preâmbulo (CNES, 2006), usando a sequência padrão do ARGOS-3 podemos representar como

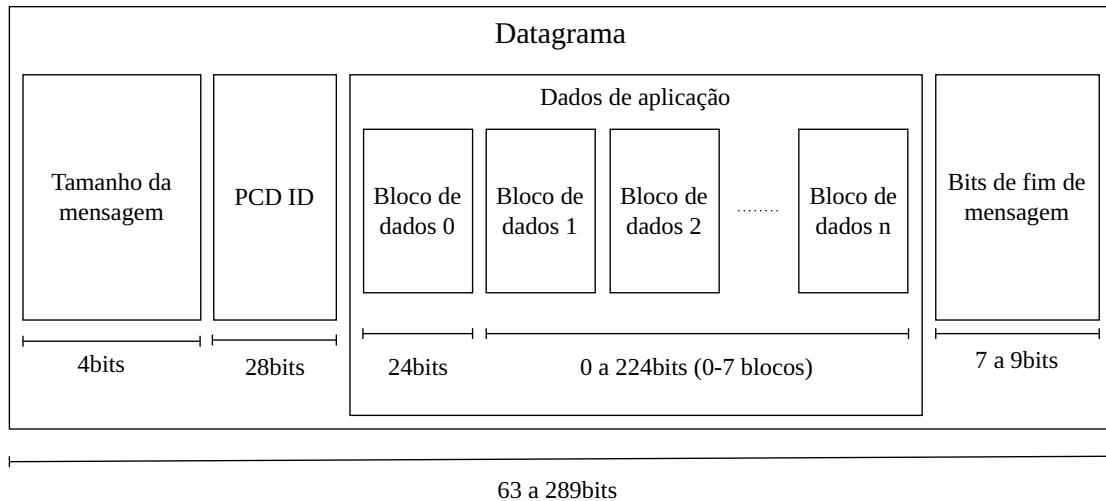
$$\begin{aligned} S_I[n] = [S_0, S_2, S_4, \dots, S_{28}] &\mapsto S_I[n] = [1111, 1111, 1111, 111] \\ S_Q[n] = [S_1, S_3, S_5, \dots, S_{29}] &\mapsto S_Q[n] = [0011, 0101, 0100, 111] \end{aligned} \quad (2.1)$$

Importante destacar que esta palavra não é codificada convolucionalmente ou embaralhada, sendo adicionada ao início do vetor de bits de cada canal após esses blocos. (CNES, 2006).

2.3.3 Datagrama

Após o envio da palavra de sincronismo, inicia-se a transmissão dos dados modulados. Esses dados são organizados segundo a estrutura definida pelo datagrama do padrão ARGOS-3, que contém os campos responsáveis pela identificação da plataforma, carga útil de dados e controle de finalização, conforme apresentado na Figura 5 (CNES, 2006).

Figura 5 – Estrutura do datagrama ARGOS-3



2.4 ESTRUTURA DE UM DATAGRAMA ARGOS-3

O datagrama transmitido no padrão ARGOS-3 possui uma estrutura bem definida, composta por campos de dados do usuário, que carregam as informações provenientes dos sensores da PCD, e por campos de cabeçalho, responsáveis por identificar a estação transmissora e informar o comprimento total da mensagem. Esses campos incluem o identificador da PCD, o número de blocos de dados e um bit de paridade, que auxilia na verificação de integridade da informação. Essa organização permite que o sistema receptor interprete corretamente o conteúdo transmitido e associe os dados recebidos à plataforma correspondente.

2.4.1 Dados de aplicação

A primeira etapa na montagem do datagrama consiste na coleta dos dados de aplicação, isto é, os dados que efetivamente contêm informação dos sensores a serem transmitidos da PCD para o satélite.

2.4.1.1 Sensores

Cada sensor presente nas PCD gera um valor de oito bits correspondente à variável monitorada, possibilitando assim 256 (2^8) níveis de monitoramento para cada sensor. A PCD pode ser equipada com diferentes sensores, de acordo com o cenário de instalação e os parâmetros ambientais de interesse.

Entre os sensores comumente utilizados, destacam-se os de direção do vento ($^\circ$), precipitação (mm), pressão atmosférica (mB), radiação solar acumulada (MJ/m²), temperatura do ar ($^\circ\text{C}$), umidade relativa (%), e velocidade do vento (m/s). Por exemplo, os dados ² coletados da PCD 31855 são mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados meteorológicos da PCD 31855 (10/10/2007 - 11/10/2007)

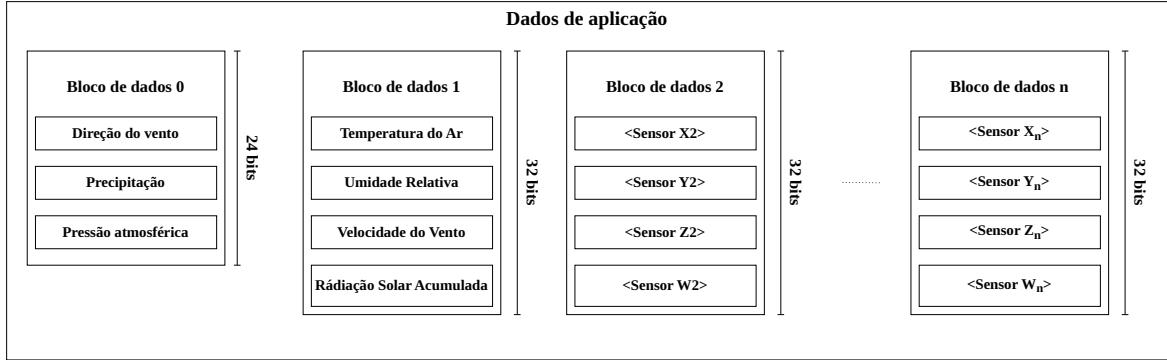
DataHora	DirVento	Precip.	PressãoAtm	RadSolAcum	TempAr	UmidRel	VelVento
2007-11-10 21h	0	0	945.5	2.3	30.8	25.6	0
2007-11-10 18h	0	0	943.8	8.75	36.5	20.8	0
2007-11-10 15h	0	0	947.3	9.72	33.6	28.8	0
2007-11-10 12h	0	0	950.1	4.98	28.0	51.2	0
2007-11-10 09h	0	0	949.3	0.17	20.9	60.8	0
2007-11-10 06h	0	0	947.8	0.00	21.8	52.8	0
2007-11-10 03h	0	0	948.0	0.00	23.5	40.0	0
2007-11-10 00h	0	0	948.4	0.00	21.9	35.2	0
2007-11-09 21h	0	0	946.1	0.48	30.8	20.8	0
2007-11-09 18h	0	0	945.1	9.13	36.3	16.0	0
2007-11-09 15h	0	0	948.4	10.13	34.5	22.4	0
2007-11-09 12h	0	0	950.9	3.44	28.5	46.4	0

2.4.1.2 Blocos de dados

Os dados dos sensores são agrupados em conjuntos denominados ‘blocos de dados’ contendo quatro sensores por bloco, conforme ilustrado na Figura 6. Assim, cada bloco de dados possui 32 bits ($4 \cdot 8$ bits), sendo o valor mínimo de um bloco de dados para montar um datagrama PTT-A3 (exceto o primeiro bloco que possui apenas 24 bits de comprimento). Para o caso específico em que a PCD irá transmitir apenas um bloco, ela poderá abrigar apenas três sensores. Caso haja mais de um bloco, o comprimento é dado por $24 + (N_b - 1) \cdot 32$ bits CNES (2006).

² <http://sinda.crn.inpe.br/PCD/SITE/novo/site/historico/action.php>

Figura 6 – Agrupamento de sensores no payload do datagrama



2.4.2 Tamanho de mensagem

O campo de tamanho de mensagem T_m é utilizado para informar ao receptor quantos blocos de dados estão sendo transmitidos no datagrama, este campo é formado pelo número de blocos em formato binário B_m e pelo bit de pariedade P_m para fechar uma seção de 4 bits. Como cada bloco possui 32 bits (exceto o primeiro), é possível determinar o comprimento total dos dados de aplicação de $B_m = (N_b - 1)_2$. O número de blocos N_b , pode variar de um a oito, resultando no comprimento esperado de bits no receptor para cada caso, conforme o Quadro 2 abaixo.

Quadro 2 – Comprimento em bits para cada tamanho de mensagem (T_m)

Nº de Blocos	Nº de Bits	B_m	P_m	T_m
1	24	000	0	0000
2	56	001	1	0011
3	88	010	0	0100
4	120	011	1	0111
5	152	100	0	1000
6	184	101	1	1011
7	216	110	0	1100
8	248	111	1	1111

Conforme apresentado acima, para cada valor de B_m , um valor de P_m é calculado. O bit de paridade é calculado de forma a garantir que o número total de bits '1' na mensagem seja par, e é dado por

$$P_m = \begin{cases} 1, & \text{se } \left[\sum_{i=0}^{B_m} b_i = 0 \right] \bmod 2 \\ 0, & \text{se } \left[\sum_{i=0}^{B_m} b_i = 1 \right] \bmod 2 \end{cases}. \quad (2.2)$$

Ao final, o campo de tamanho de mensagem T_m é formado pela concatenação do valor de B_m e P_m , resultando em um campo de 4 bits CNES (2006).

2.4.3 Identificador da PCD

O identificador da PCD, PCD_{ID} , é um campo de 28 bits presente na estrutura da mensagem do usuário no formato PTT-A3. Ele é utilizado para identificar de forma única a PCD que está transmitindo a mensagem, sendo essencial para o correto encaminhamento e associação dos dados recebidos no centro de controle do sistema ARGOS, CNES (2006).

O PCD_{ID} é formado por um número de 20 bits, I_{PCD} , seguido por oito bits R_{PCD} de redundância calculados através da soma (checksum) dos bits do identificador, conforme

$$R_{PCD} = \left(\sum_{i=0}^{19} I_{PCD} \cdot 2^i \right) \bmod 256 , \quad (2.3)$$

$$PCD_{ID} = I_{PCD} \oplus R_{PCD} . \quad (2.4)$$

É importante destacar que a proteção contra erros nesse campo é assegurada de forma indireta pelo uso da codificação convolucional aplicada à mensagem como um todo, além da redundância oferecida pelo número de repetições da mensagem ao longo da passagem do satélite.

2.4.4 Bits de fim de mensagem

Ao final do datagrama, são inseridos entre sete e nove bits '0' com a finalidade de limpar o registrador do codificador convolucional, dando o encerramento da sequência codificada. A quantidade de bits de fim de mensagem adicionados depende do comprimento total da mensagem do usuário, conforme apresentado na Quadro 3. Apesar de não carregar dados úteis a nível de aplicação, esses bits são fundamentais para o correto funcionamento do processo de decodificação (CNES, 2006).

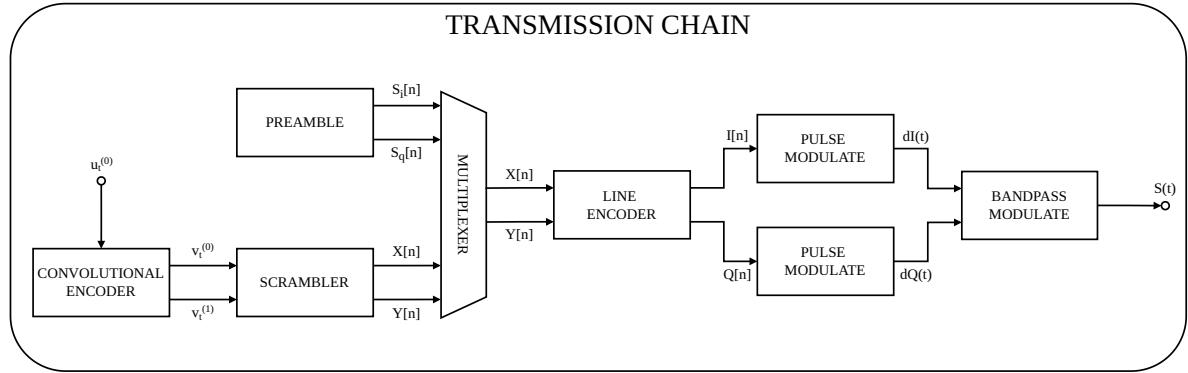
Quadro 3 – Comprimento da cauda (bits '0') para cada tamanho de mensagem

Nº de Blocos	Bits Aplicação	Bits Datagrama	Nº bits "0"
1	24	56	7
2	56	88	8
3	88	120	9
4	120	152	7
5	152	184	8
6	184	216	9
7	216	248	7
8	248	280	8

2.5 TRANSMISSOR PTT-A3

Na Figura 7 ilustra-se o diagrama de blocos do transmissor PTT-A3. Cada bloco é responsável por uma etapa da transmissão, desde a montagem do datagrama até a modulação em banda passante e a transmissão do sinal $s(t)$.

Figura 7 – Diagrama de blocos do transmissor ARGOS-3



2.5.1 Codificador convolucional

Antes da transmissão, os dados do datagrama precisam ser codificados, e esse processo é realizado através de um codificador convolucional. Essa técnica de codificação aplica uma operação lógica sobre uma janela deslizante de bits de entrada u_t , gerando uma sequência de saída com redundância controlada. Diferente da codificação por bloco, onde os dados são processados em blocos fixos, a codificação convolucional considera a sequência contínua de bits, combinando o bit atual com um número fixo de bits anteriores através de vetores geradores (Shu, 2011).

A taxa de codificação utilizada no padrão PTT-A3 é $R = 1/2$, o que significa que para cada bit de dados de entrada u_t , são gerados dois bits de saída, um no canal I e outro no canal Q , aumentando a redundância e melhorando a capacidade do sistema de detectar e corrigir erros. Para a codificação convolucional, são utilizados vetores geradores G_0 e G_1 , de acordo com o padrão CCSDS 131.1-G-2 (CNES, 2006). A representação binária dos vetores geradores é dada por

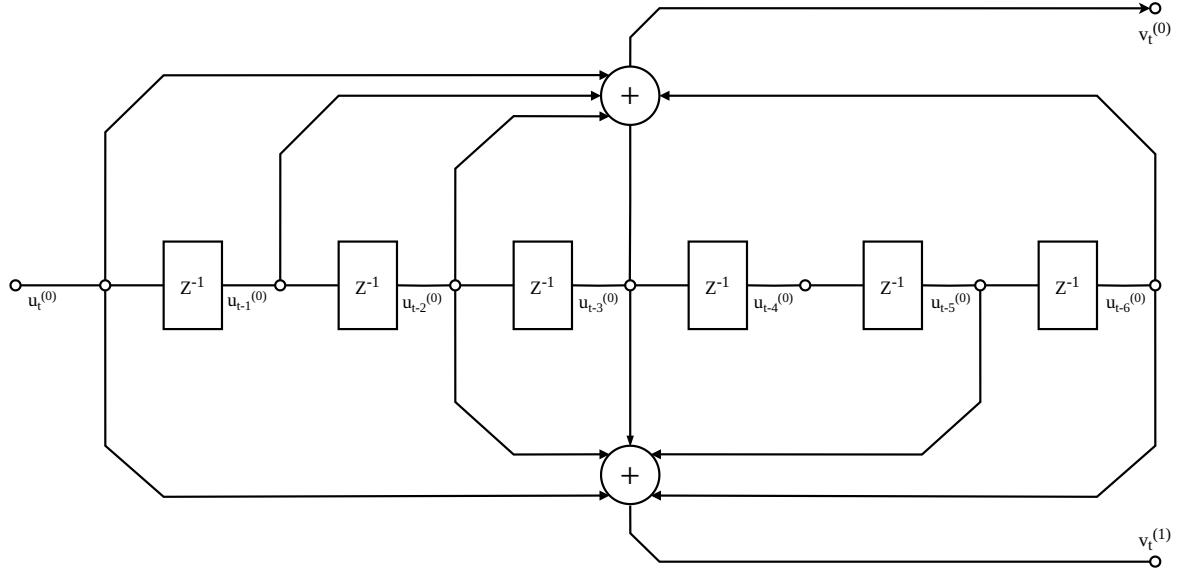
$$\begin{aligned} G_0 &= 121_{10} \quad \mapsto \quad G_0 = [1, 1, 1, 1, 0, 0, 1] \\ G_1 &= 091_{10} \quad \mapsto \quad G_1 = [1, 0, 1, 1, 0, 1, 1]. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Os vetores geradores são utilizados para definir a estrutura do registrado do codificação convolucional aplicada à sequência de entrada u_t , resultando nas saídas $v_t^{(0)}$ e $v_t^{(1)}$, que correspondem, respectivamente, aos canais I e Q utilizados posteriormente na modulação QPSK. Essa operação pode ser representada por uma multiplicação vetorial entre uma janela deslizante de sete bits da entrada e a matriz formada pelos vetores geradores, conforme

$$\begin{bmatrix} v_t^{(0)} & v_t^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{(t)} & u_{(t-1)} & u_{(t-2)} & u_{(t-3)} & u_{(t-4)} & u_{(t-5)} & u_{(t-6)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2.6)$$

que pode ser representada de forma equivalente pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 8 (CNES, 2006).

Figura 8 – Diagrama de blocos do codificador convolucional ARGOS-3

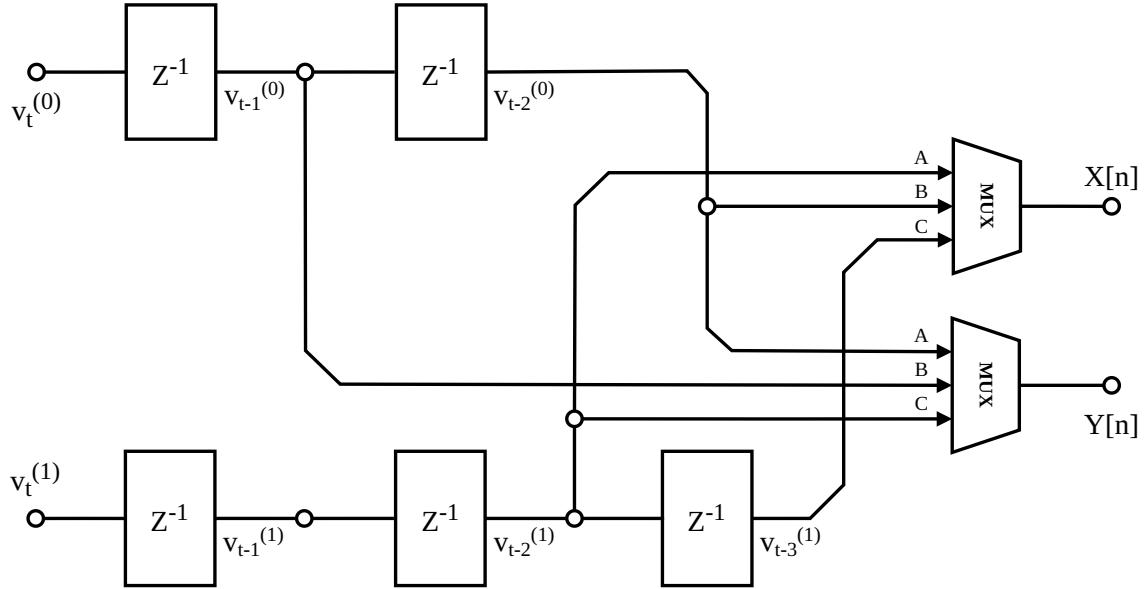


2.5.2 Embaralhador

Após a codificação convolucional, os vetores de saída $v_t^{(0)}$ e $v_t^{(1)}$ são embaralhados para evitar padrões repetitivos, formando os vetores embaralhados $X[n]$ e $Y[n]$. O processo de embaralhamento é essencial para aumentar a robustez do sinal contra interferências e ruídos em rajada, pois os dados são espalhados ao longo da transmissão.

O embaralhador é utilizado para garantir que os dados sejam melhor distribuídos diminuindo a correlação entre os bits de forma a aumentar a aleatoriedade antes da modulação QPSK, o que permite atingir uma melhor característica espectral. Esse processo pode ser representado pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 9 (CNES, 2006; Rodrigues, 2018).

Figura 9 – Embaralhador de dados para o ARGOS-3



2.5.3 Codificação de Linha

Em seguida, os vetores de bits embaralhados $X[n]$ e $Y[n]$, já multiplexados com os vetores de preâmbulo $S_I[n]$ e $S_Q[n]$, precisam ser convertidos em vetores de simbolos, para isso é aplicada uma codificação de linha. O vetor $X[n]$ é codificado utilizando a técnica *Non-Return-to-Zero* (NRZ), enquanto o vetor $Y[n]$ é codificado utilizando a técnica *Manchester Encoding* (Manchester) (CNES, 2006).

A codificação NRZ é realizada removendo a componente DC da sequência de entrada, ou seja, no vetor $X[n]$ cada bit '1' é representado por '+1' e cada bit '0' é representado por '-1'. Esse processo pode ser descrito pela expressão

$$I[n] = \begin{cases} +1, +1, & \text{se } X[n] = 1 \\ -1, -1, & \text{se } X[n] = 0, \end{cases} \quad (2.7)$$

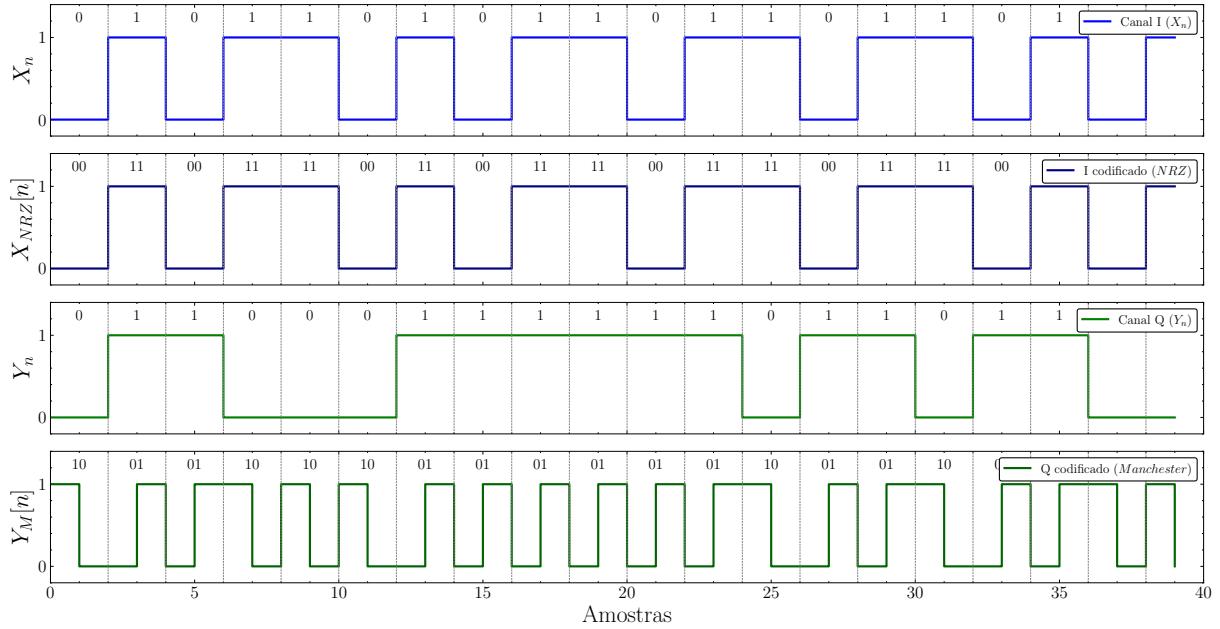
resultando em um vetor de saída $I[n]$, neste caso com o dobro do comprimento do vetor de entrada (para manter o mesmo comprimento do vetor $Q[n]$).

Para o vetor $Y[n]$, é aplicada a codificação Manchester, onde cada bit de entrada é representado por dois simbolos de saída, alternando entre '-1' e '+1'. A codificação Manchester é utilizada para garantir que haja transições de nível no sinal mesmo em sequências longas de bits iguais, essas transições refletem em mais trocas de simbolos na modulação QPSK. Esse processo pode ser descrito pela expressão

$$Y[n] = \begin{cases} +1, -1, & \text{se } Y[n] = 1 \\ -1, +1, & \text{se } Y[n] = 0 \end{cases}, \quad (2.8)$$

resultando assim em um vetor de saída $Q[n]$ codificado em Manchester.

Figura 10 – Codificação de linha dos vetores I e Q



2.5.4 Modulação de Pulso

Uma vez com os vetores de simbolo $I[n]$ e $Q[n]$, é aplicada a modulação de pulso, isto é, os vetores de simbolo são superamostrados, em função de f_s e filtrados para formar uma sequência contínua de símbolos ao longo de t , onde cada bit de informação é transmitido durante um período de tempo $T_b = 1/R_b$ (tempo de bit), definido com base na taxa de bit R_b (CNES, 2006).

Para aplicar a modulação de pulso e gerar os sinais analógicos $d_I(t)$ e $d_Q(t)$, os vetores de simbolo são multiplicados com um pulso com resposta ao impulso $g(t)$. A formatação é dada por

$$d'_I(t) = \sum_n I[n] \cdot g(t - nT_b) \quad \text{e} \quad d'_Q(t) = \sum_n Q[n] \cdot g(t - nT_b) \quad , \quad (2.9)$$

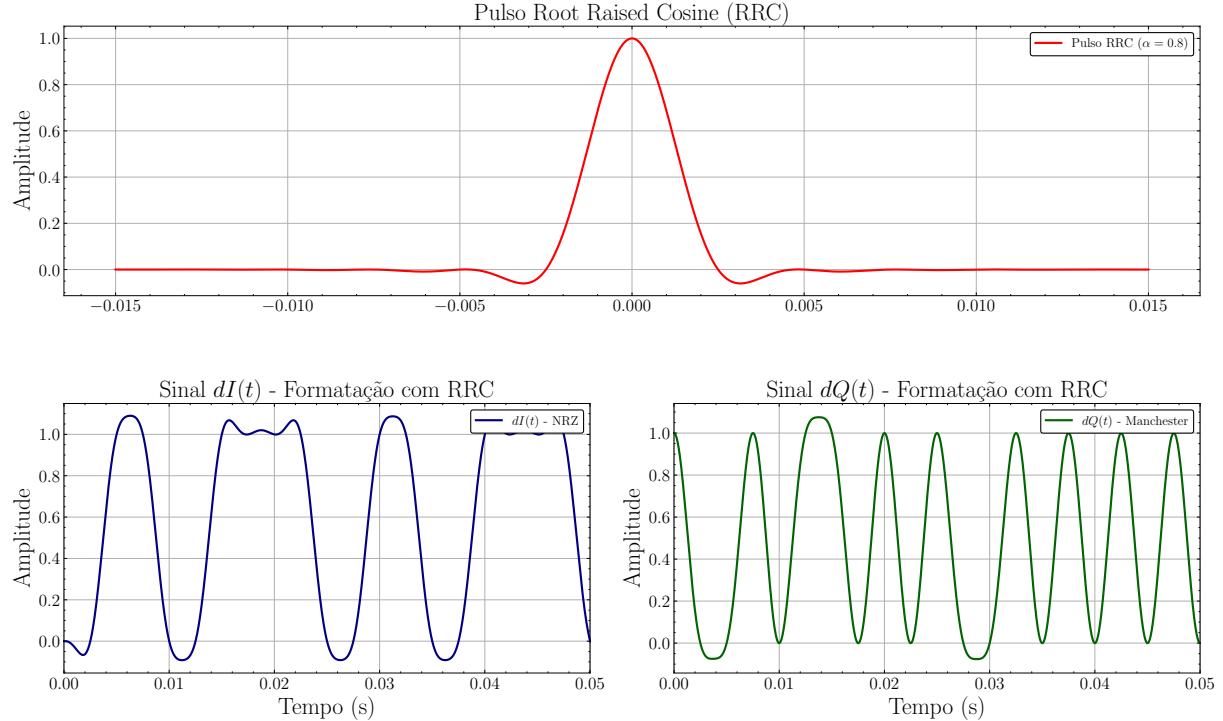
onde é utilizado um pulso $g(t)$ do tipo (*Root Raised Cosine (RRC)*)), definido por

$$g(t) = \frac{(1 - \alpha)\text{sinc}((1 - \alpha)t/T_b) + \alpha(4/\pi) \cos(\pi(1 + \alpha)t/T_b)}{1 - (4\alpha)^2} \quad (2.10)$$

onde α é o fator de roll-off do pulso, que controla a largura de banda W do sinal modulado. Quanto maior o α , mais suave é a transição entre os símbolos, mas também maior é a largura de banda ocupada (Sklar, 1988).

A formatação dos vetores $I[n]$ e $Q[n]$ é ilustrada na Figura 11, onde a resposta ao impulso $g(t)$ é apresentada em conjunto com os sinais $d_I(t)$ e $d_Q(t)$.

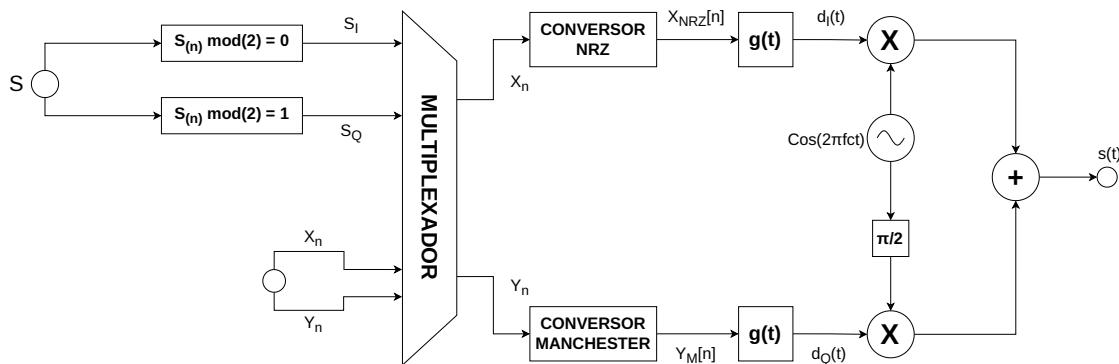
Figura 11 – Modulação de pulso dos canais I e Q



2.5.5 Modulação em banda passante

Uma vez com os pares de sinal $d_I(t)$ e $d_Q(t)$ correspondentes a cada canal, pode-se realizar a modulação em banda passante para transmissão do sinal $s(t)$. Na Figura 12 é ilustrado o diagrama de blocos do modulador QPSK (CNES, 2006).

Figura 12 – Diagrama de blocos do modulador QPSK



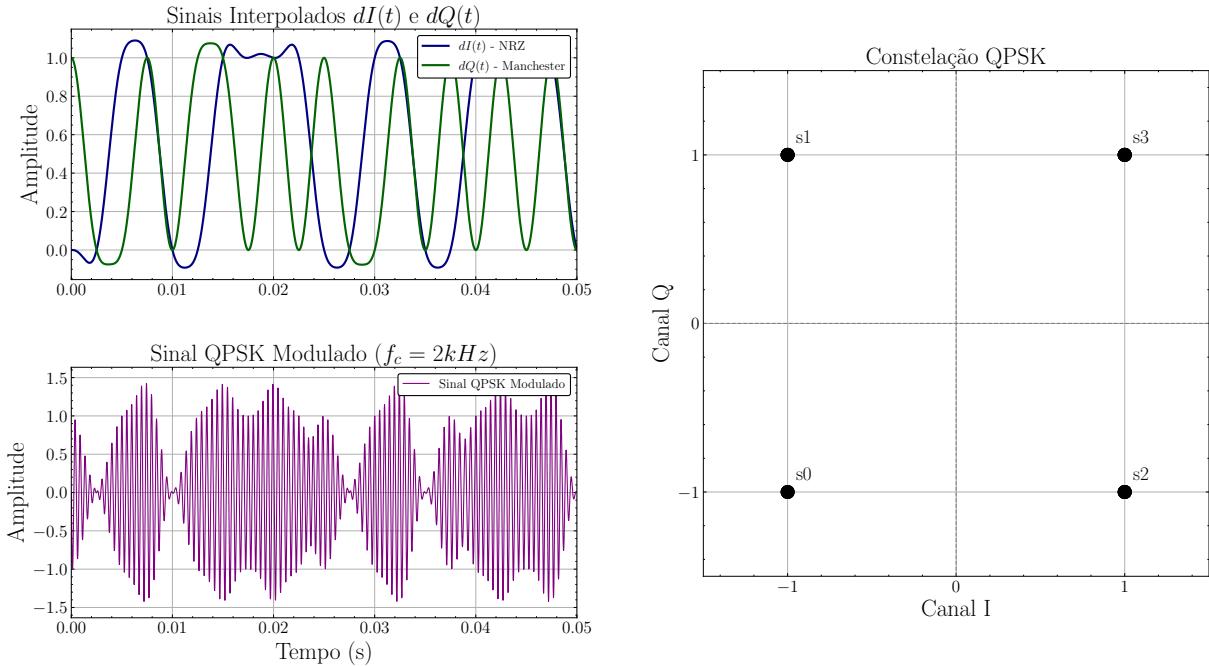
No processo de modulação QPSK, o sinal em fase $d_I(t)$ é multiplicado por uma componente cossenoidal em frequência f_c e o sinal em quadratura $d_Q(t)$ é multiplicado por uma componente senoidal em f_c , seguindo a expressão

$$s(t) = Ad'_I(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_0) - Ad'_Q(t) \sin(2\pi f_c t + \phi_0) , \quad (2.11)$$

onde A é a amplitude do sinal modulado, f_c é a frequência da portadora, em torno de $401,625 MHz$ e ϕ_0 é o desvio de fase inicial do sinal, que é considerado como zero ($\phi_0 = 0$).

A Figura 13 ilustra o processo de modulação IQ, mostrando os sinais $d_I(t)$ e $d_Q(t)$ e a constelação resultante dos símbolos QPSK no plano complexo, onde cada ponto representa um símbolo modulado.

Figura 13 – Modulação em banda passante dos canais I e Q

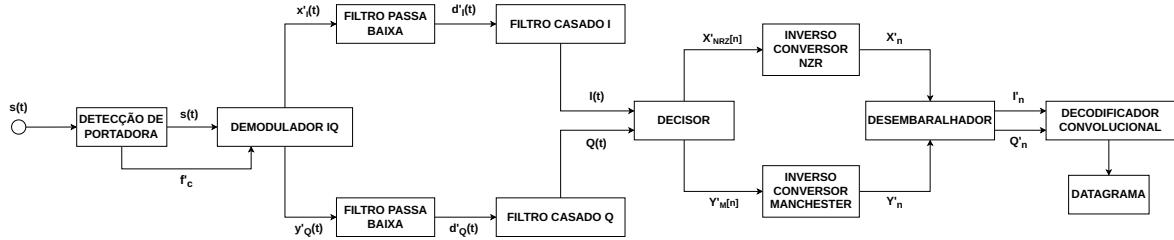


A constelação QPSK na Figura 13 é composta por quatro pontos, cada qual representando um símbolo distinto. Os símbolos são mapeados de acordo com os pares de bits $d_I(t)$ e $d_Q(t)$. Após a transmissão, o sinal $s(t)$ é somado a um vetor de ruído $r(t)$ para simular as condições reais no momento da recepção.

2.6 RECEPTOR PTT-A3

Como a transmissão dos dados das PCD não segue uma estrutura de canais discretos, ou seja, cada PCD seleciona uma frequência f_n dentro da faixa de 401,62 a $401,65MHz$ e realiza a transmissão. Dessa forma, o receptor no satélite necessita de um mecanismo de detecção de portadora para avaliar as candidatas de f_c , podendo assim demodular o sinal.

Figura 14 – Diagrama de blocos do receptor ARGOS-3



2.6.1 Detecção de portadora

Para realizar a detecção da portadora, o sinal recebido acrescido de ruído deve ser inicialmente amostrado e dividido em segmentos discretos $x_n[m]$ no tempo. O satélite ARGOS realiza a decisão do sinal a cada 10ms, esse processo é definido por

$$x_n[m] = s(mT_n) , \quad (2.12)$$

onde $x_n[m]$ representa o segmento de sinal, $s(t)$ é o sinal recebido, m é o índice de amostra do segmento de tempo e n é o tempo de amostragem, definido como $T_n = f_s * 10\text{ms}$, onde f_s é a frequência de amostragem do sistema.

Em seguida, aplica-se a *Fast Fourier Transform* (FFT) no vetor $x_n[m]$, obtendo-se o espectro de frequência do sinal amostrado $X_n[k]$, conforme a expressão

$$X_n[k] = \sum_{m=0}^{N-1} x_n[m] e^{-j2\pi km/N} . \quad (2.13)$$

A partir das amostras de $X_n[k]$, se calcula a potência em cada componente de frequência, para obter os valores $P_n[k]$, conforme

$$P_n[k] = |X_n[k]|^2 . \quad (2.14)$$

Em seguida, para cada índice k do espectro calculado, é feita uma comparação com um limiar pré-definido P_t , conforme foi apresentado anteriormente na Figura 4. Caso a potência $P_n[k]$ seja maior que P_t , a frequência é registrada pois existe a possibilidade de que uma portadora f_n esteja presente naquela frequência.

Por fim, no próximo segmento, $X_{n+1}[k]$, o sistema verifica se a frequência registrada no segmento anterior persiste, ou seja, se a potência de k também é maior que o limiar P_t , caso positivo, o sistema considera que a frequência f_n é a portadora f_c do sinal recebido e instância a cadeia de recepção passando f_c como parâmetro.

2.6.2 Demodulador banda base

Para realizar a demodulação do sinal $s(t)$ recebido retornando as componentes $d'_X(t)$ e $d'_Y(t)$ em banda base, o sinal $s(t)$ é multiplicado por duas portadoras ortogonais, $x_i(t)$ para demodular o canal I e $y_q(t)$ para demodular o canal Q . Assumindo sincronismo perfeito, o processo de demodulação para o canal I pode ser expresso como

$$d'_X(t) = s(t) \cdot x_I(t) = \left[A \cdot d'_I(t) \cos(2\pi f_c t) - A \cdot d'_Q(t) \sin(2\pi f_c t) \right] \cdot 2 \cos(2\pi f_c t) \quad (2.15)$$

$$d'_X(t) = \underbrace{A \cdot d'_I(t)}_{\text{Banda base}} + \underbrace{\left[A \cdot d'_I(t) \cos(4\pi f_c t) - A \cdot d'_Q(t) \sin(4\pi f_c t) \right]}_{\text{Dobro da frequência } f_c}, \quad (2.16)$$

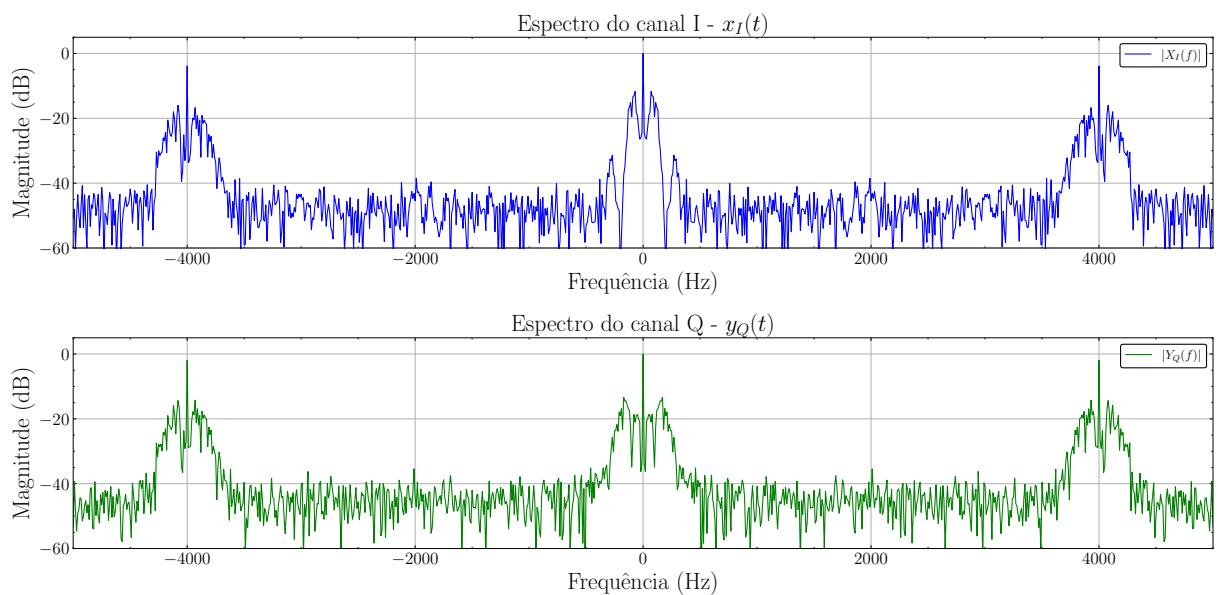
onde $d_I(t)$ é o sinal banda base. O mesmo processo é realizado para o canal Q , que isola o sinal em quadratura $d_Q(t)$ da seguinte forma

$$d'_Y(t) = s(t) \cdot y_Q(t) = \left[A \cdot d'_I(t) \cos(2\pi f_ct) - A \cdot d'_Q(t) \sin(2\pi f_ct) \right] \cdot 2 \sin(2\pi f_ct) \quad (2.17)$$

$$d'_Y(t) = \underbrace{A \cdot d'_Q(t)}_{\text{Banda base}} + \underbrace{\left[A \cdot d'_Q(t) \cos(4\pi f_c t) + A \cdot d'_I(t) \sin(4\pi f_c t) \right]}_{\text{Dobro da frequência } f_c} . \quad (2.18)$$

A Figura 15 ilustra o processo de demodulação dos canais I e Q , onde os sinais multiplicados por $x_i(t)$ e $y_q(t)$ são apresentados no espectro, mostrando a presença dos sinais em banda base e as componentes de alta frequência resultantes da multiplicação com as portadoras (considerando um $f_c = 2kHz$). (CNES, 2006)

Figura 15 – Componentes I e Q após demodulação

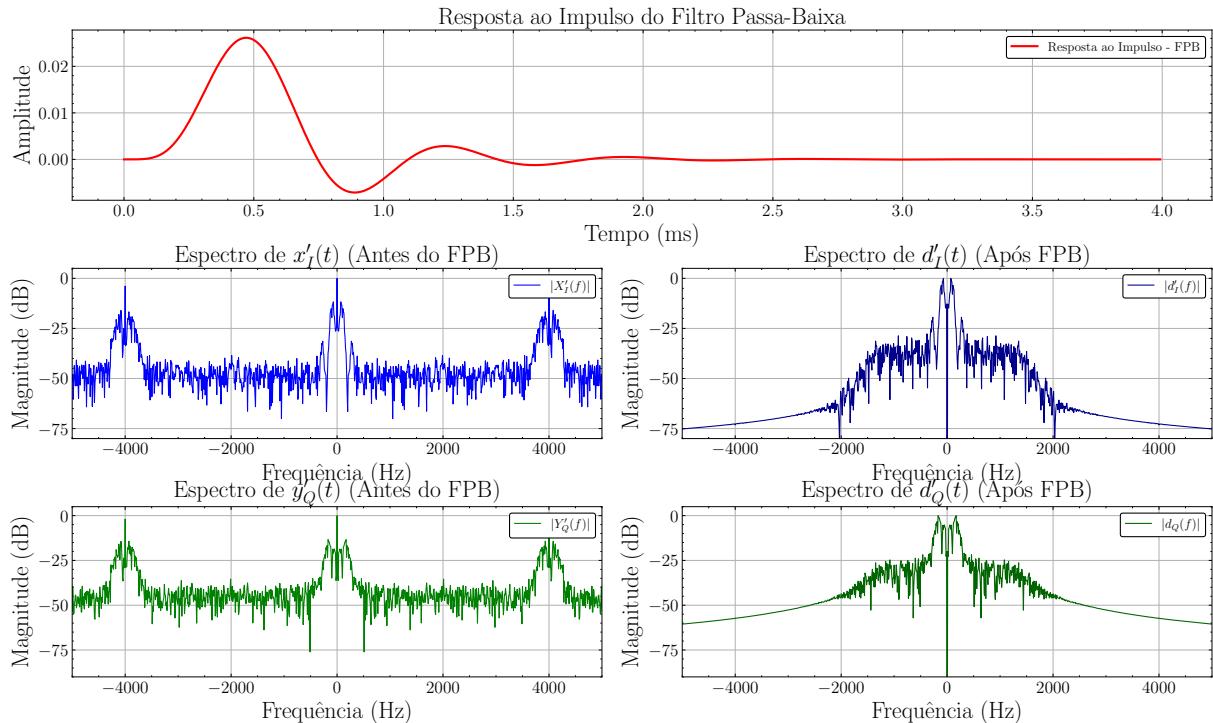


2.6.3 Filtragem passa baixa e filtragem casada

Para isolar os sinais em banda base $d'_I(t)$ e $d'_Q(t)$, é necessário aplicar um *Low-Pass Filter* (LPF), para isso utiliza-se um filtro Butterworth (6^a Ordem) com frequência de corte de 1,5 kHz, com resposta ao impulso $h(t)$, que remove as componentes de alta frequência em $2 \cdot f_c$ resultantes da multiplicação de demodulação realizada anteriormente (Rodrigues, 2018).

A Figura 16 apresenta o espectro dos sinais $d'_I(t)$ e $d'_Q(t)$ antes e após a filtragem passa-baixa, bem como a resposta ao impulso $h(t)$ do filtro, onde é possível observar a remoção das componentes de alta frequência, deixando apenas os sinais em banda base.

Figura 16 – Componentes I Q após filtragem passa baixa



2.6.4 Filtragem casada

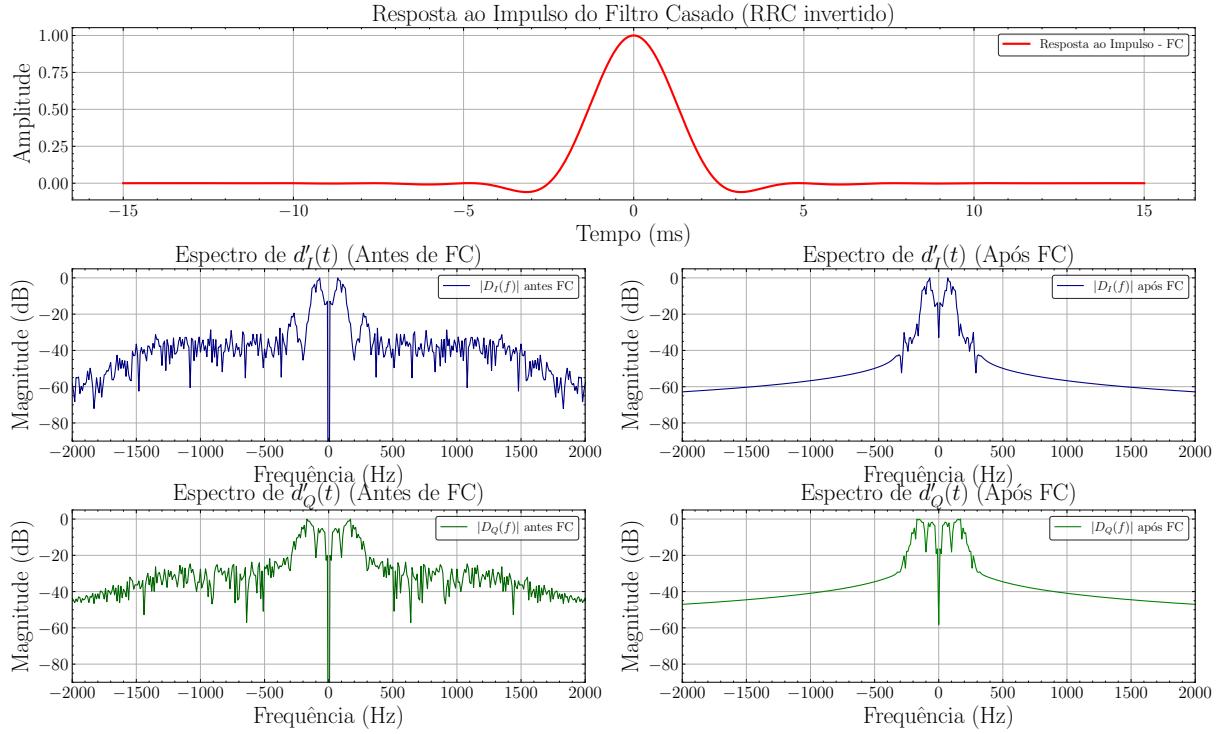
Os sinais $d'_I(t)$ e $d'_Q(t)$ em banda base, e já filtrados por um LPF, passam por um filtro casado *Matched Filter* (MF), que é utilizado para maximizar a relação sinal-ruído (SNR). O filtro casado é ajustado para coincidir com o inverso do pulso $g(-t)$ utilizado na formatação do sinal na transmissão (Sklar, 1988).

O filtro casado é aplicado aos sinais $d'_I(t)$ e $d'_Q(t)$ através da expressão

$$I'(t) = d_I(t) * g(-t) \quad \text{e} \quad Q'(t) = d_Q(t) * g(-t) . \quad (2.19)$$

A Figura 17 apresenta o espectro dos sinais $I'(t)$ e $Q'(t)$ após a filtragem casada, onde é possível observar a melhoria na relação sinal-ruído e a remoção de componentes indesejadas.

Figura 17 – Componentes I e Q após filtragem casada



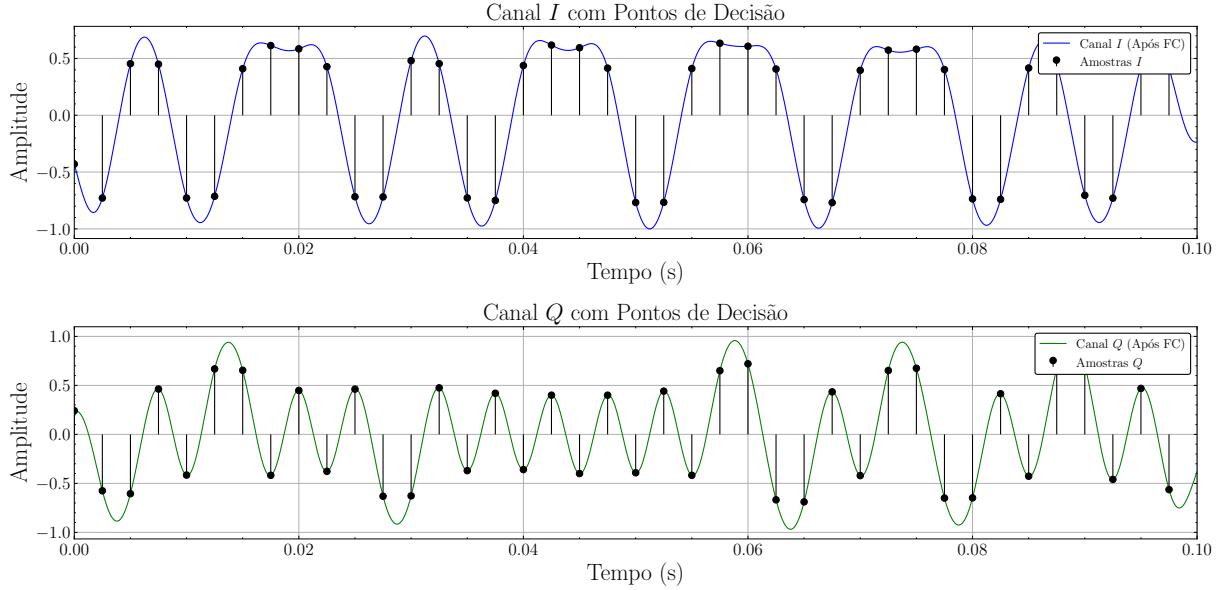
2.6.5 Decisão de símbolos

Uma vez com os sinais $d'_I(t)$ e $d'_Q(t)$ filtrados, considerando sincronismo perfeito, o próximo passo é a decisão dos sinais em instantes de T_b (instante ótimo de decisão) a partir de um delay inicial τ , para recuperar os símbolos transmitidos. O processo de decisão pode ser expresso como

$$I'[n] = d'_I(n \cdot T_b + \tau) \quad \text{e} \quad Q'[n] = d'_Q(n \cdot T_b + \tau) \quad , \quad (2.20)$$

onde n é o índice de amostra, T_b é o tempo de bit $1/R_b$ e τ é o atraso inicial da decisão. A Figura 18 apresenta os sinais amostrados $I'[n]$ e $Q'[n]$.

Figura 18 – Amostragem das componentes I e Q

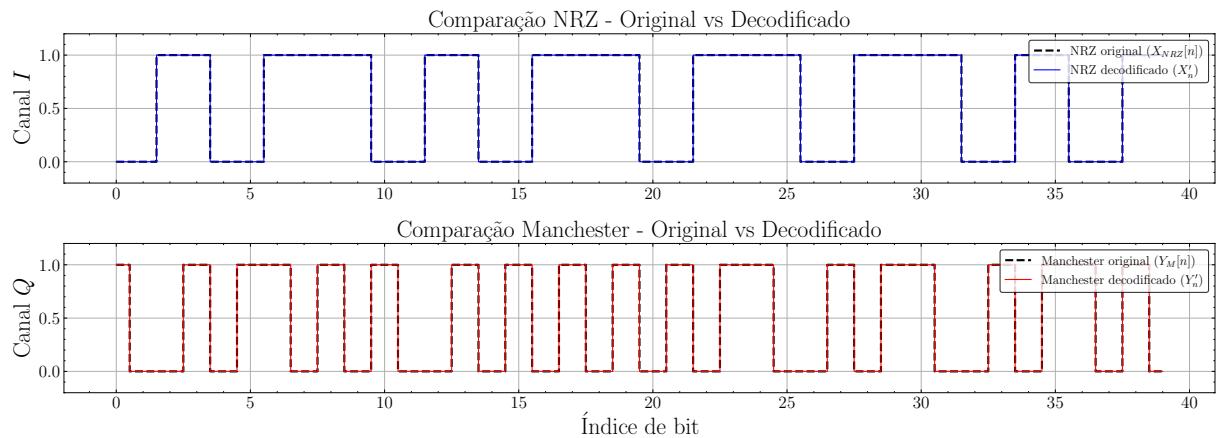


Os valores amostrados $I'[n]$ e $Q'[n]$ são então decididos, isto é, quantizados para valores discretos, correspondendo aos símbolos transmitidos. O mapeamento dos pares pode ser expressado como

$$I'[n] = \begin{cases} +1, & \text{se } I'[n] \geq 0 \\ -1, & \text{se } I'[n] < 0 \end{cases}, \quad Q'[n] = \begin{cases} +1, & \text{se } Q'[n] \geq 0 \\ -1, & \text{se } Q'[n] < 0 \end{cases}, \quad (2.21)$$

onde $I'[n]$ e $Q'[n]$ são os vetores simbolo. A Figura 19 apresenta os simbolos decididos nos vetores $I'[n]$ e $Q'[n]$ após o processo de quantização, em comparação com os vetores originais $I[n]$ e $Q[n]$ transmitidos.

Figura 19 – Comparação dos vetores I e Q decididos com vetores transmitidos



2.6.6 Decodificador de linha

Após a decisão dos símbolos, os vetores $I'[n]$ e $Q'[n]$ precisam ser convertidos de volta para a representação original dos bits. Para isso, são aplicadas as técnicas de decodificação de linha inversas às utilizadas na transmissão: NRZ para o canal I e Manchester para o canal Q . A decodificação NRZ é realizada mapeando os valores '+1' para o bit '1' e '-1' para o bit '0', conforme

$$X'[n] = \begin{cases} 1, & \text{se } I'[n] = +1 \\ 0, & \text{se } I'[n] = -1 \end{cases}, \quad (2.22)$$

resultando no vetor de bits $X'[n]$ correspondente ao canal I . O mesmo processo é aplicado ao canal Q , onde a decodificação Manchester mapeia os pares de valores '+1,-1' para o bit '1' e '-1,+1' para o bit '0', conforme

$$Y'[n] = \begin{cases} 1, & \text{se } Q'[n] = +1, -1 \\ 0, & \text{se } Q'[n] = -1, +1 \end{cases}, \quad (2.23)$$

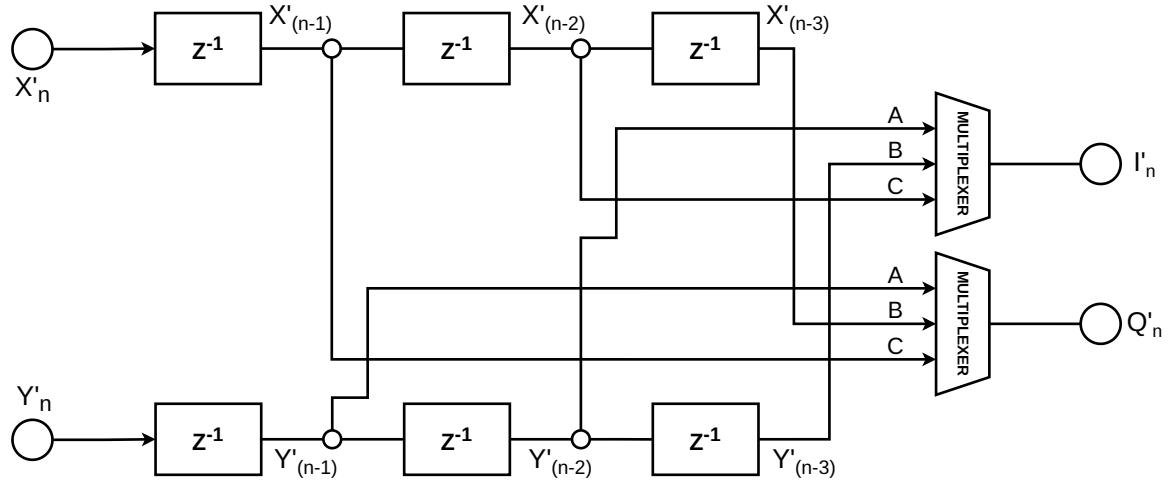
resultando no vetor de bits $Y'[n]$ correspondente ao canal Q .

2.6.7 Desembaralhador

Após o processo de decodificação de linha, os dados vetores de bits $X'[n]$ e $Y'[n]$ ainda encontram-se embaralhados, então é necessário realizar o desembaralhamento para restaurar a sequência original dos bits antes da decodificação convolucional (CNES, 2006).

O desembaralhador utiliza a mesma estrutura lógica do embaralhador, porém executando a operação inversa de reorganização dos bits, com base em regras posicionais dependentes do índice dos bits n . A Figura 20 apresenta o diagrama de blocos do desembaralhador utilizado no PTT-A3, que refaz a ordenação dos bits após a demodulação (Rodrigues, 2018).

Figura 20 – Diagrama de blocos do Desembaralhador ARGOS-3



O processo de desembaralhamento retorna os vetores de bit, $v_t^{(0)'} e v_t^{(1)'}$, que correspondem aos dados codificados nos canais I e Q , respectivamente.

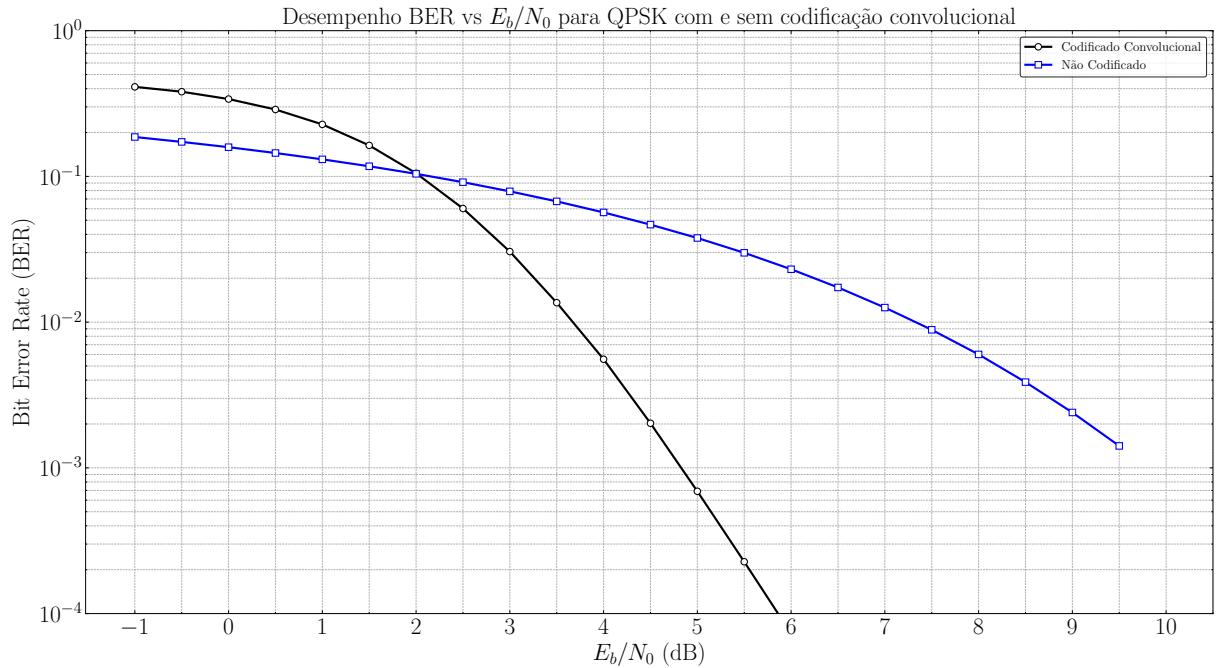
2.6.8 Decodificador convolucional

Após o desembaralhamento, os vetores $v_t^{(0)'} e v_t^{(1)'}$ estão prontos para a decodificação convolucional. O algoritmo mais popularmente utilizado para essa etapa é o algoritmo de Viterbi, que implementa a decodificação *Maximum Likelihood Decoding* (MLD) para códigos convolucionais, calculando o caminho mais provável através de *Hamming Distance* (Hamming) para a mensagem recebida em relação à mensagem possível (CNES, 2006; Rodrigues, 2018).

No padrão ARGOS-3, o código convolucional utilizado segue o padrão *Consultative Committee for Space Data Systems* (CCSDS) 131.1-G-2, que, por sua vez, possui uma distância livre conhecida de $d_{free} = 10$. Quanto maior for o valor de d_{free} , maior será a robustez do código e sua capacidade de detectar e corrigir erros.

Assim, conforme o comparativo ilustrado na Figura 21 entre a transmissão QPSK sem codificação e com codificação convolucional, o uso desta técnica na transmissão do sinal permite operar em valores de E_b/N_0 menores em relação a não utilização do codificador, para a BER visada pelo sistema, permitindo uso em ambientes com maior ruído para a mesma taxa de erro desejada.

Figura 21 – Comparação de BER vs E_b/N_0 utilizando codificação convolucional



3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta a implementação do sistema de comunicação digital proposto, detalhando cada etapa do processo, desde a geração dos bits até a recuperação do datagrama no receptor. A seguir, são descritas as principais componentes do sistema, incluindo a cadeia de transmissão, o canal de comunicação com ruído adicionado, a detecção de portadora e a cadeia de recepção.

3.1 CADEIA DE TRANSMISSÃO

teste

3.1.1 Sequência de transmissão

Figura 22 – Streambits do datagrama ARGOS-3

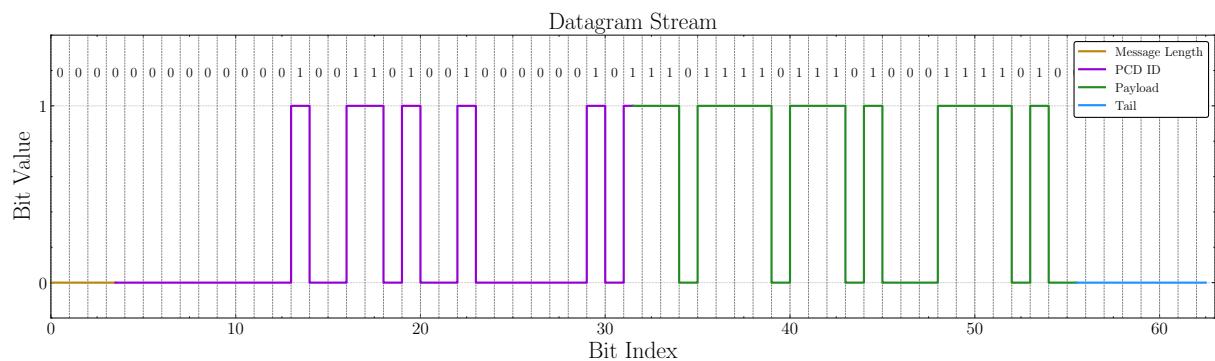


Figura 23 – Multiplexação com preâmbulo

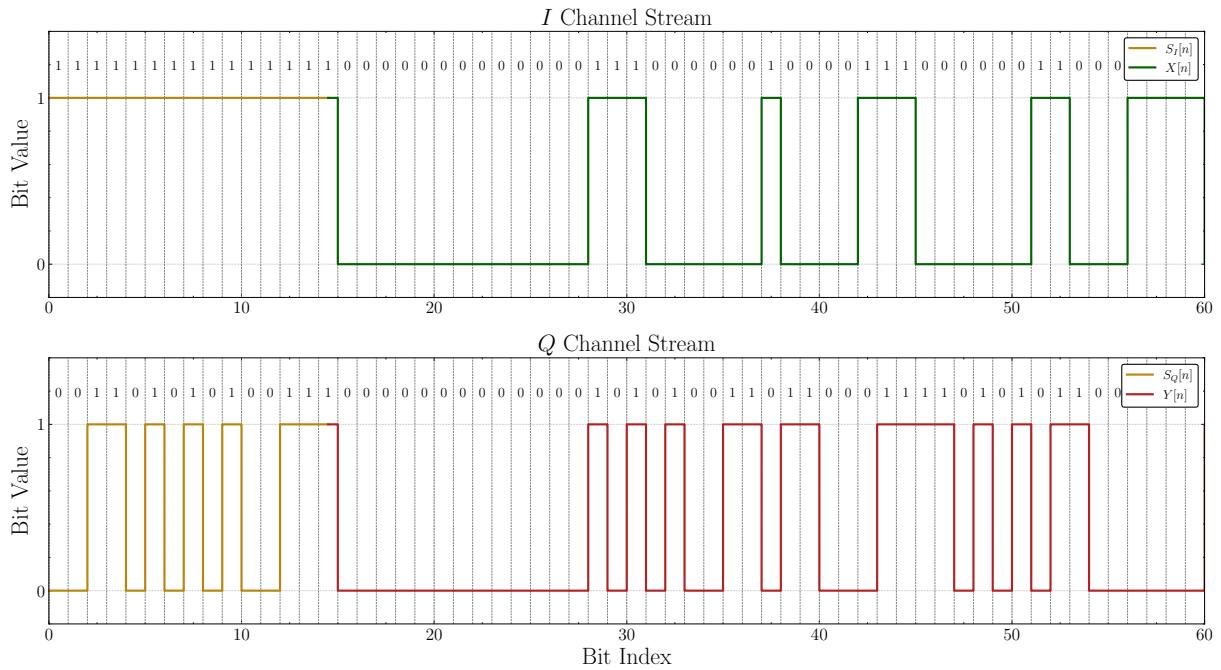
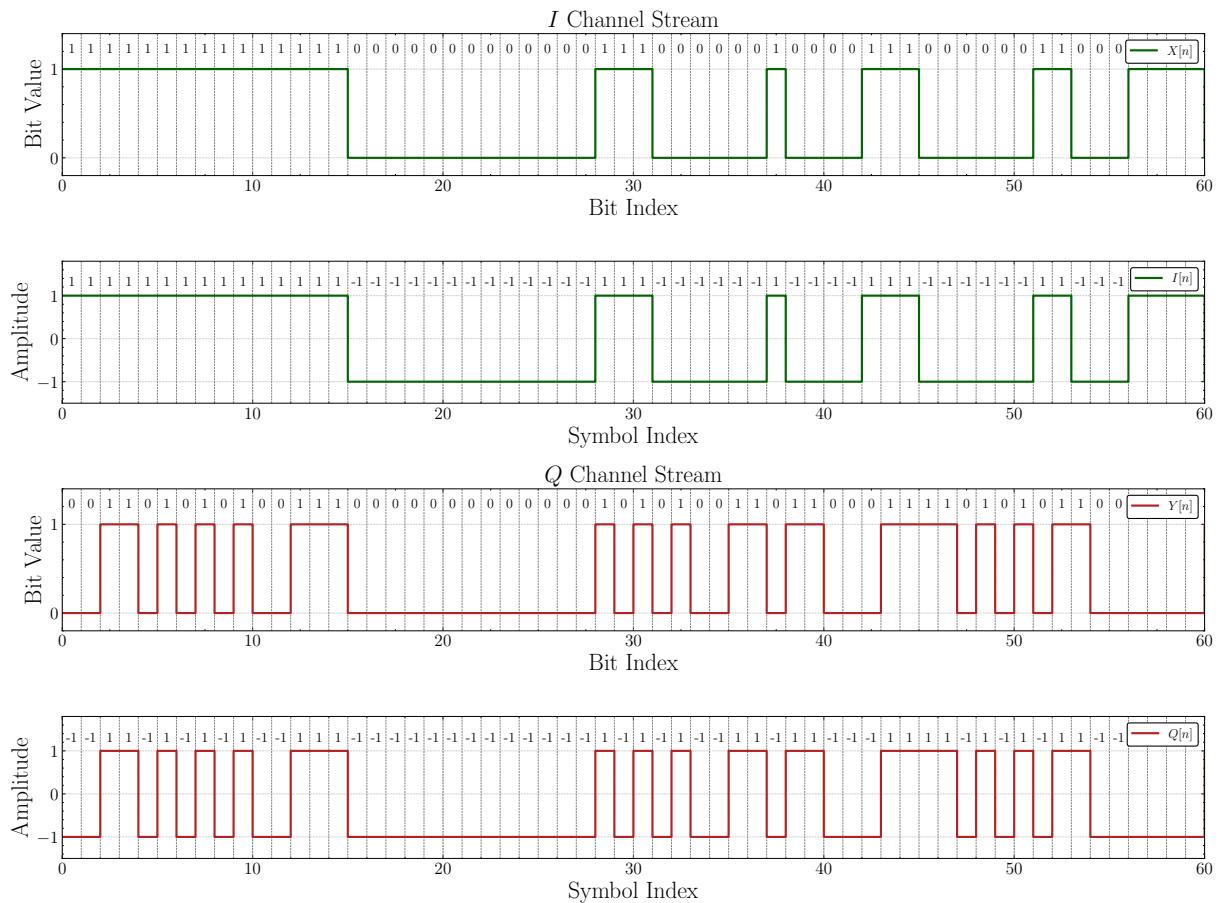


Figura 24 – Codificação de linha



3.1.2 Modulação de pulso RRC e Manchester

3.1.2.1 Pulso RRC e Manchester

Figura 25 – Resposta ao impulso - Pulso RRC

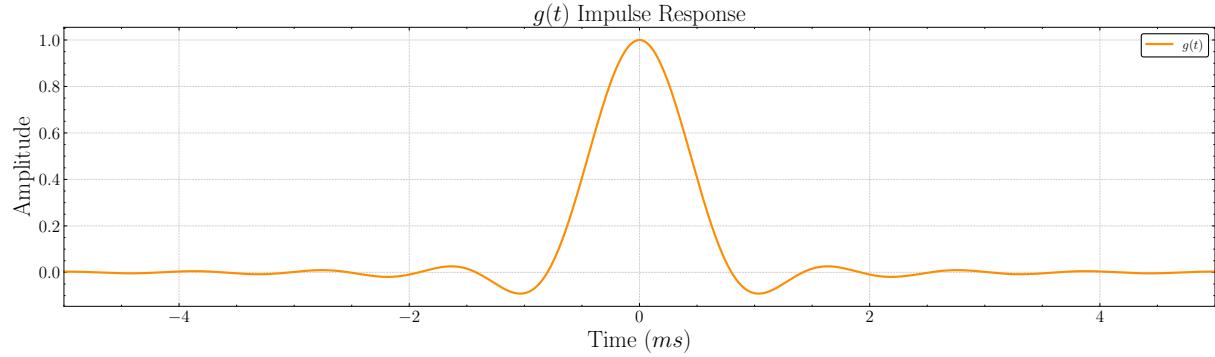
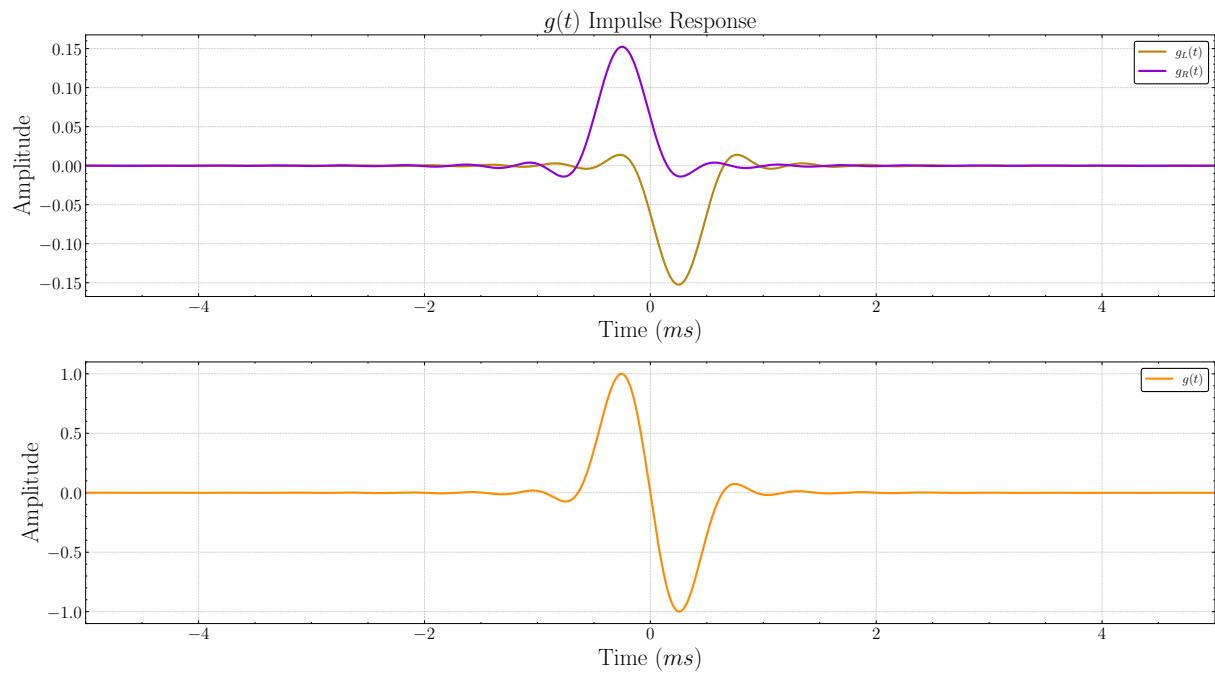
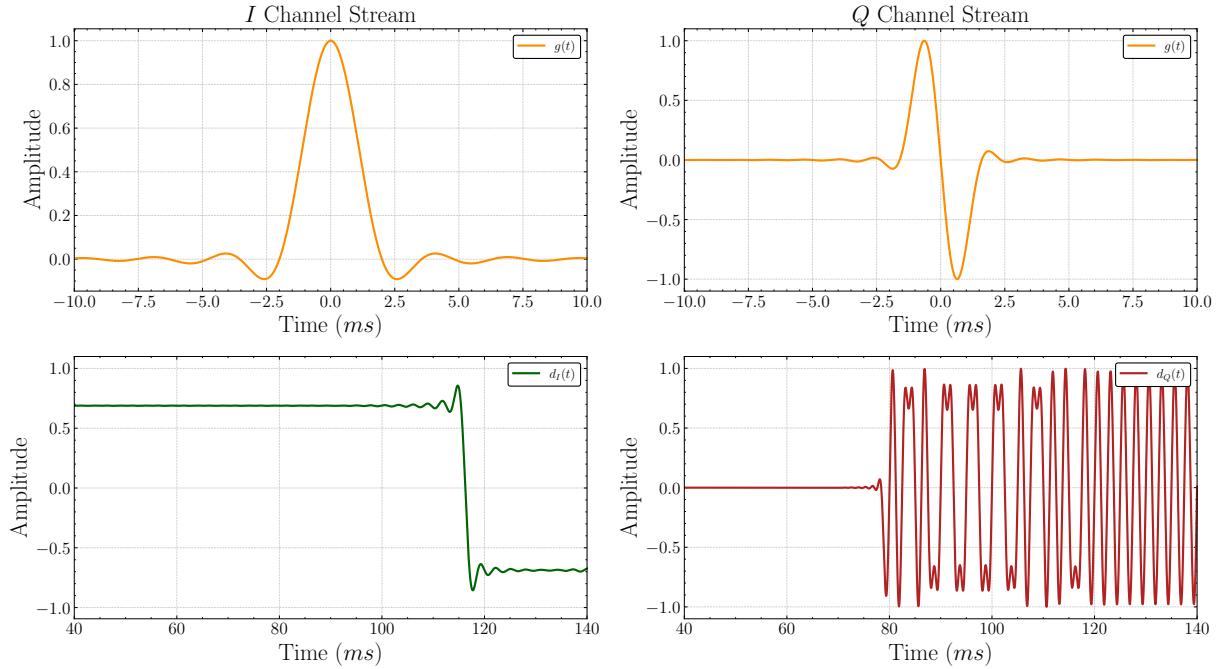


Figura 26 – Resposta ao impulso - Pulso Manchester



3.1.2.2 Modulação de pulso dos canais I e Q

Figura 27 – Modulação de pulso dos canais I e Q



3.1.3 Modulação em fase em quadratura (QPSK)

Figura 28 – Modulação em banda passante canais I e Q

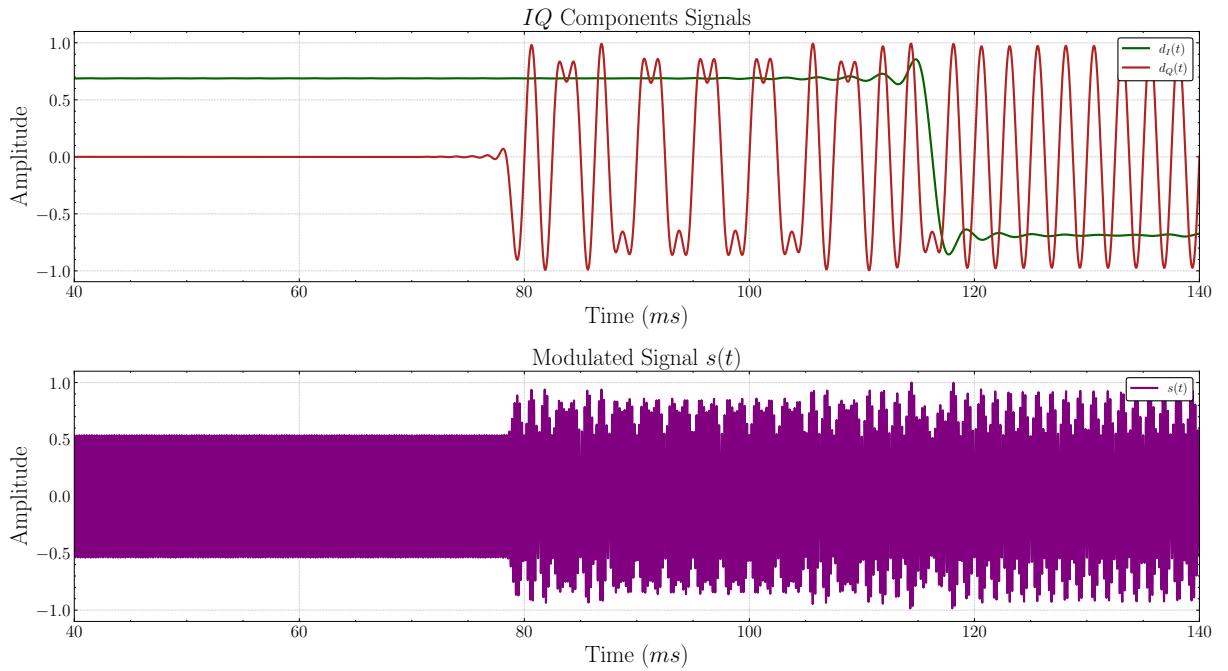
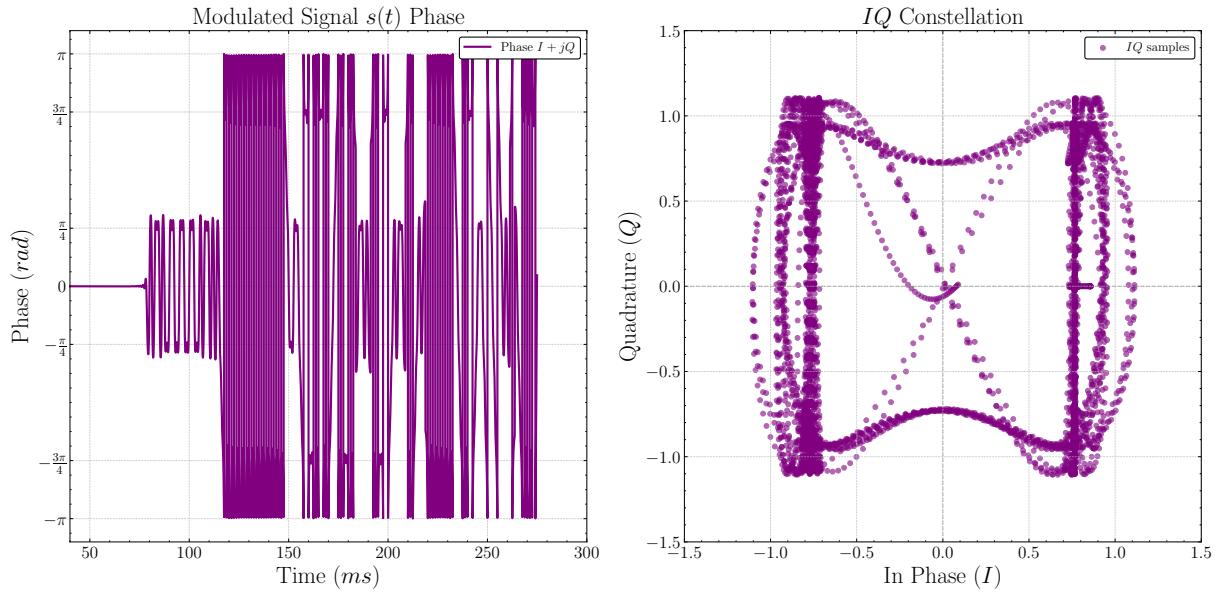
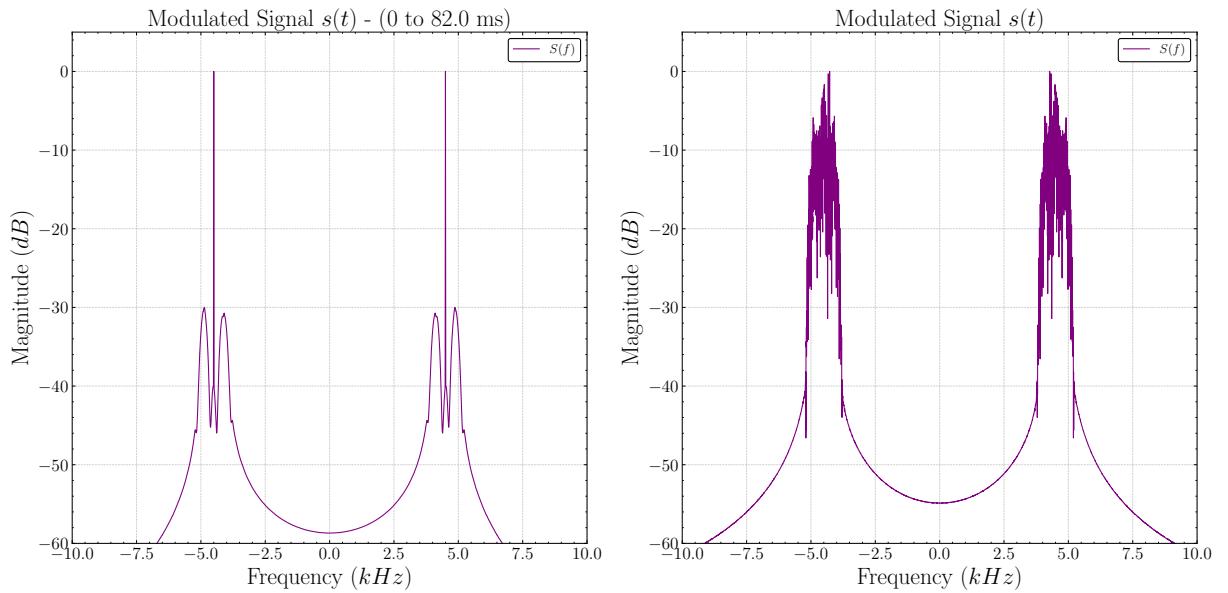


Figura 29 – Fase e Constelação do sinal modulado $s(t)$



3.1.3.1 Adição de portadora pura

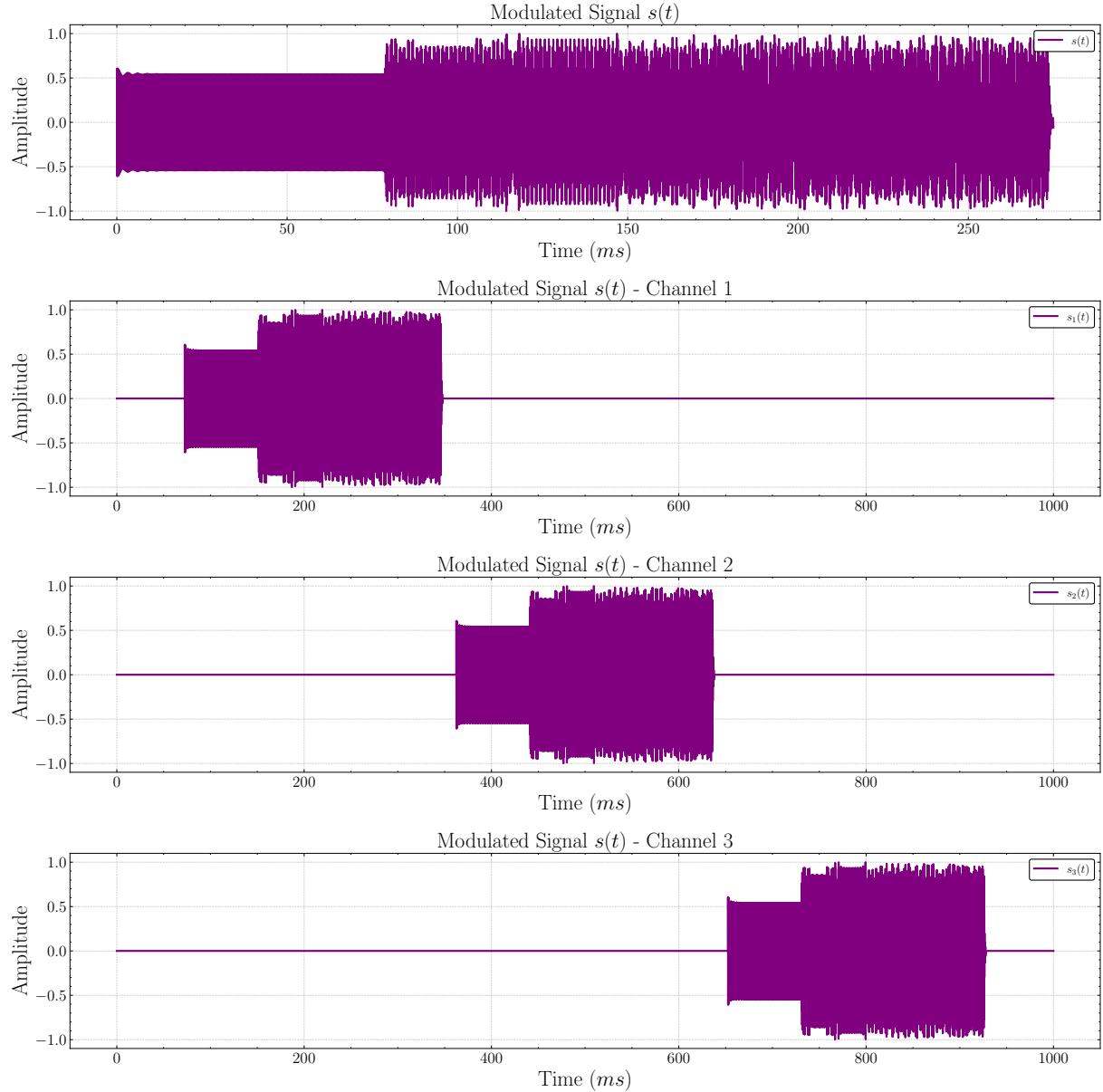
Figura 30 – Comparação de portadora pura e sinal modulado



3.2 CANAL E ADIÇÃO DE RUÍDO

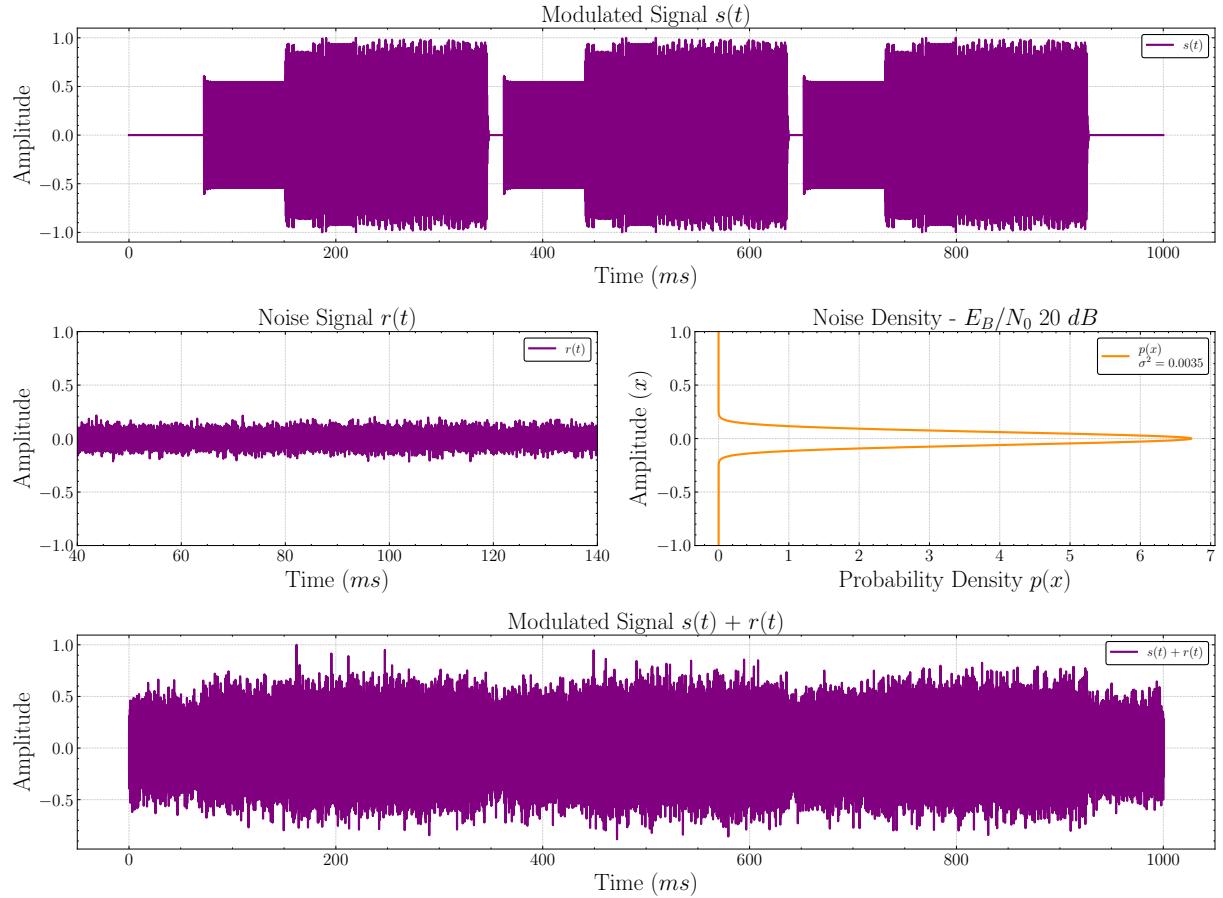
3.2.1 Modelo de canal

Figura 31 – Adição de multiplas transmissões no canal



3.2.2 Geração de ruído AWGN

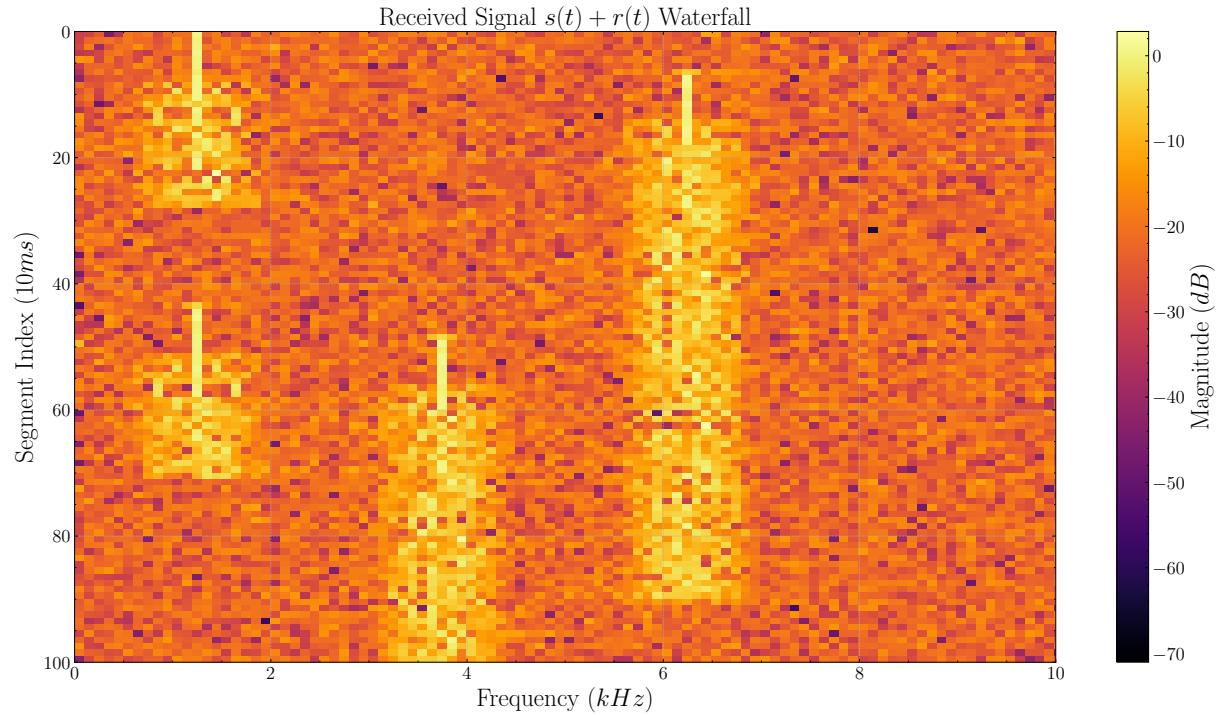
Figura 32 – Adição de ruído ao canal



3.3 DETECÇÃO DE PORTADORA

3.3.1 Segmentação do sinal recebido

Figura 33 – Diagrama de waterfall do canal



3.3.2 Detecção de componentes no espectro

Figura 34 – Detecção de componentes no espectro com base em P_t

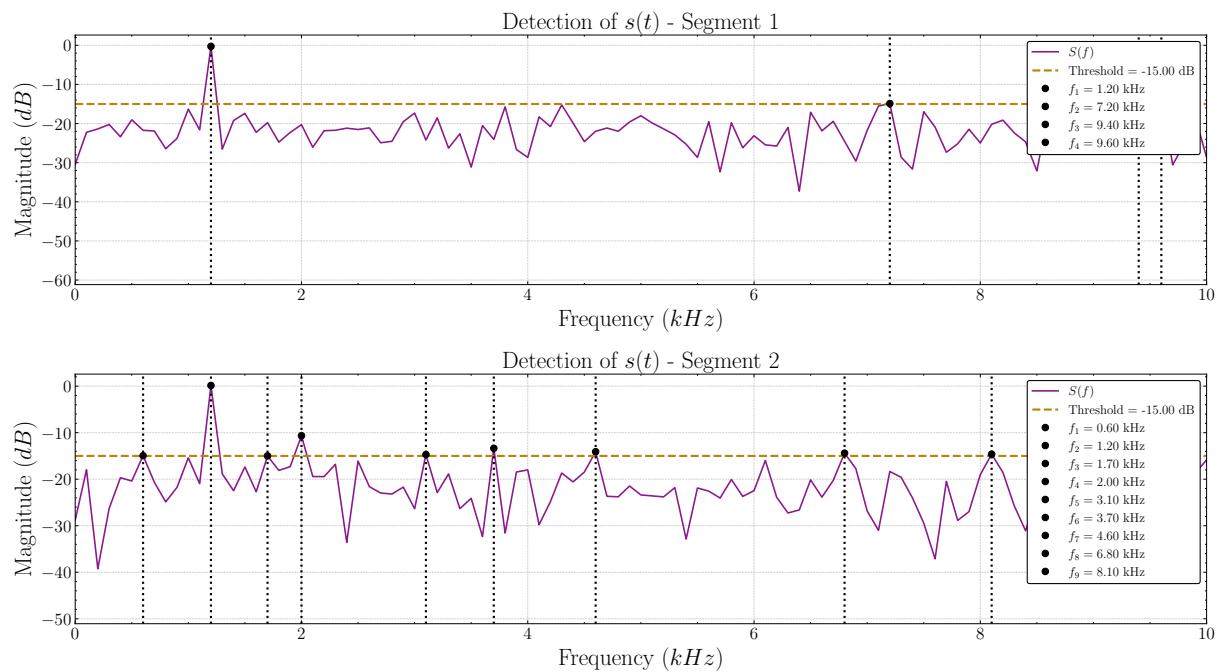
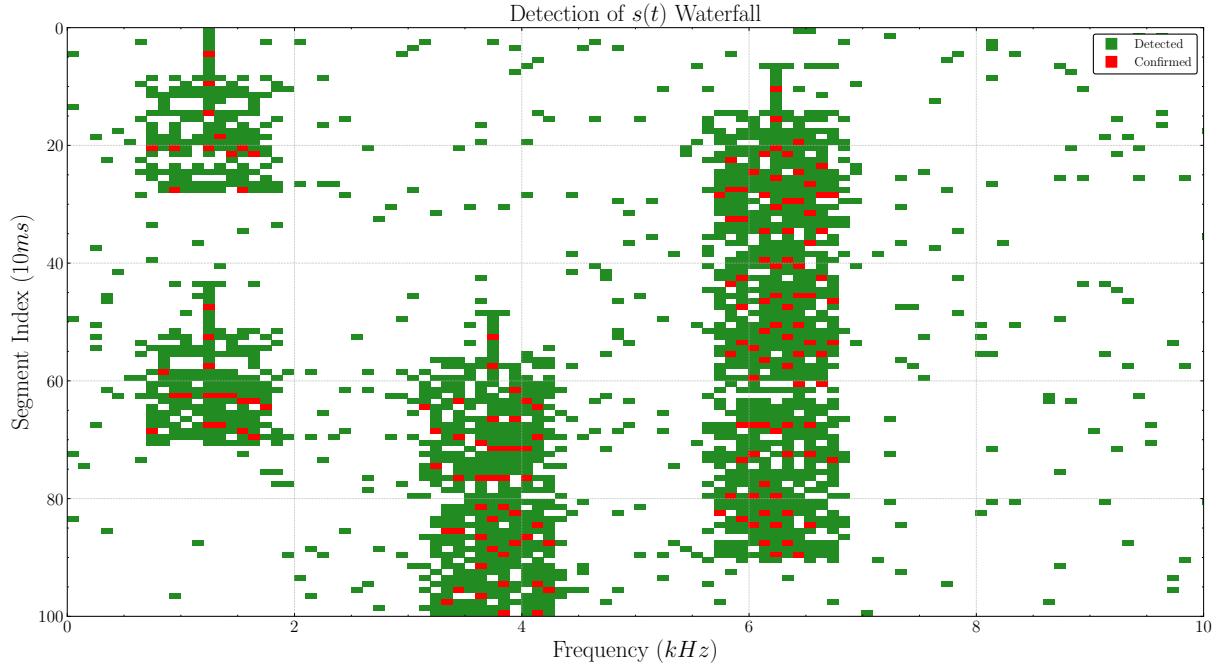
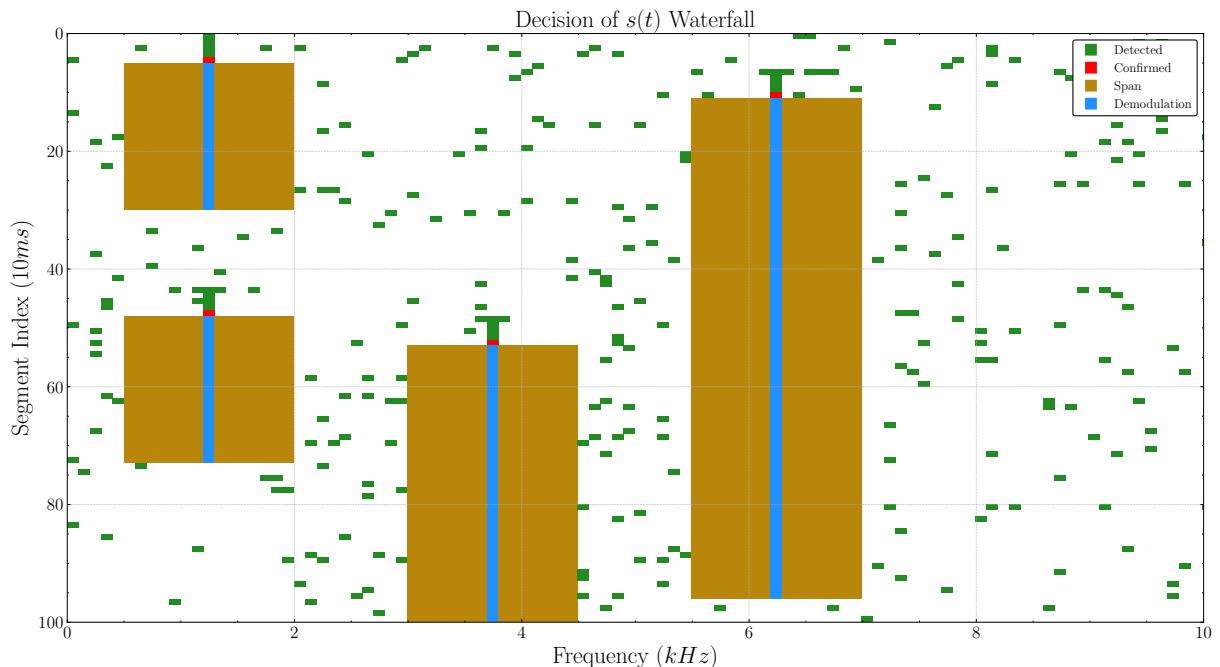


Figura 35 – Diagrama de waterfall de detecção do canal



3.3.3 Decisão de componentes detectadas

Figura 36 – Diagrama de waterfall de decisão do canal

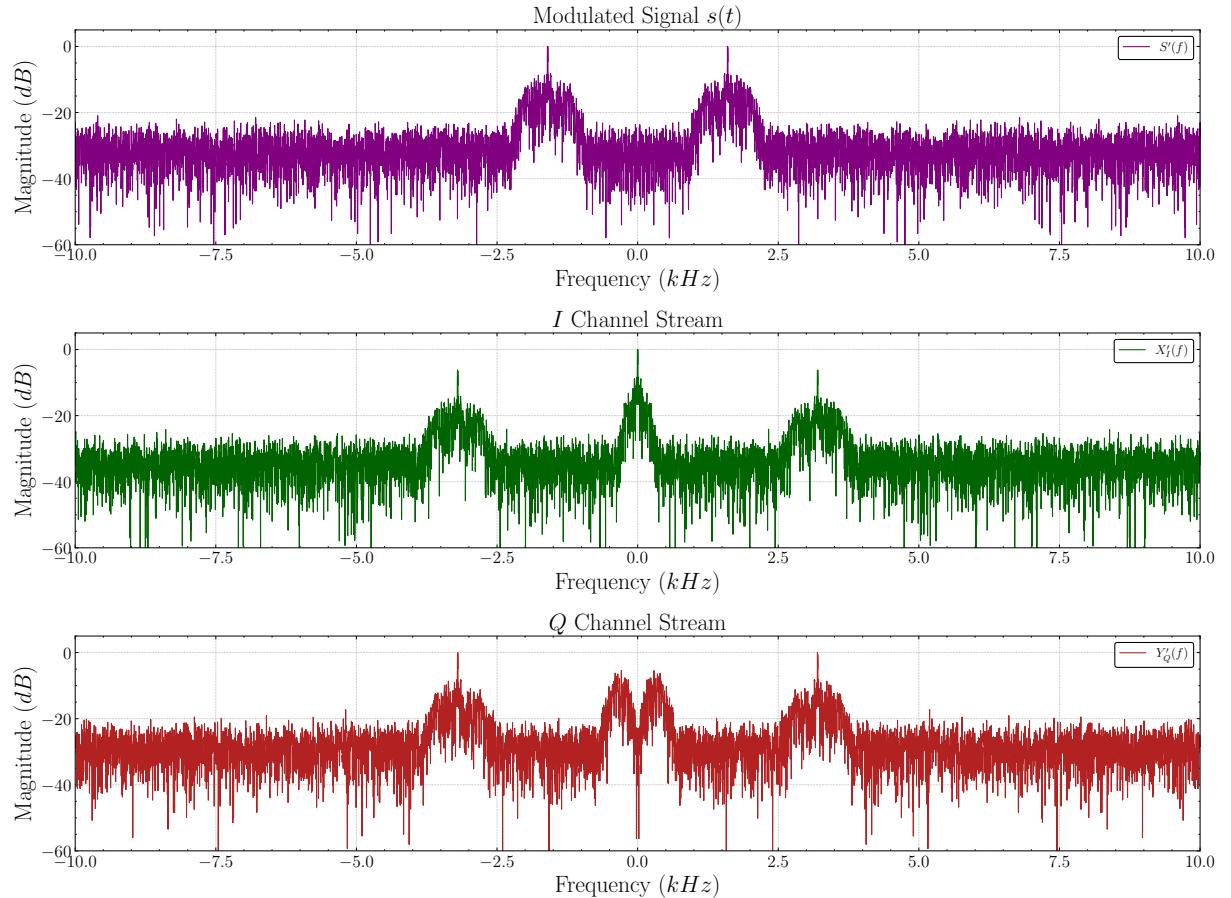


3.3.4 Segmentação do sinal recebido para recepção

3.4 CADEIA DE RECEPÇÃO

3.4.1 Demodulação banda base

Figura 37 – Demodulação banda base dos canais I e Q



3.4.2 Filtragem

Figura 38 – Filtragem passa baixa dos canais I e Q

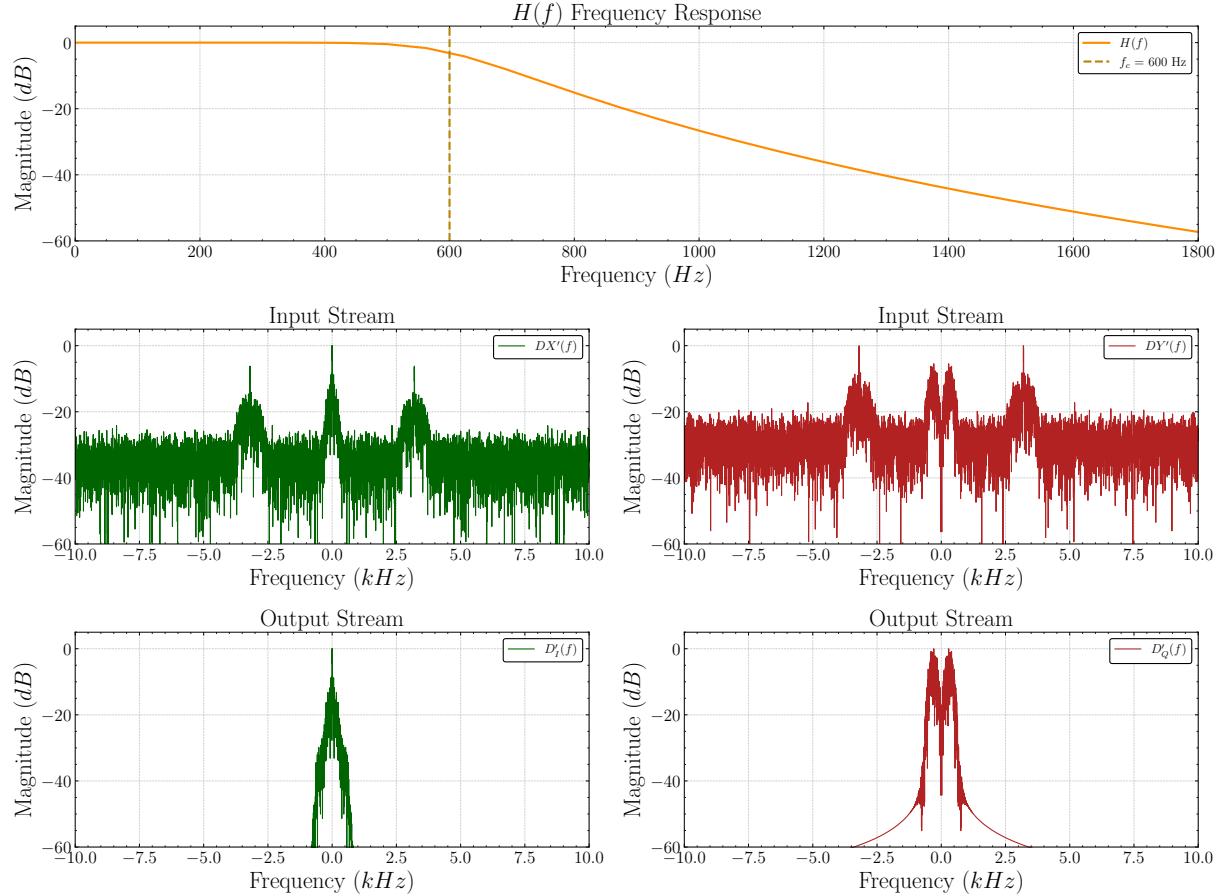
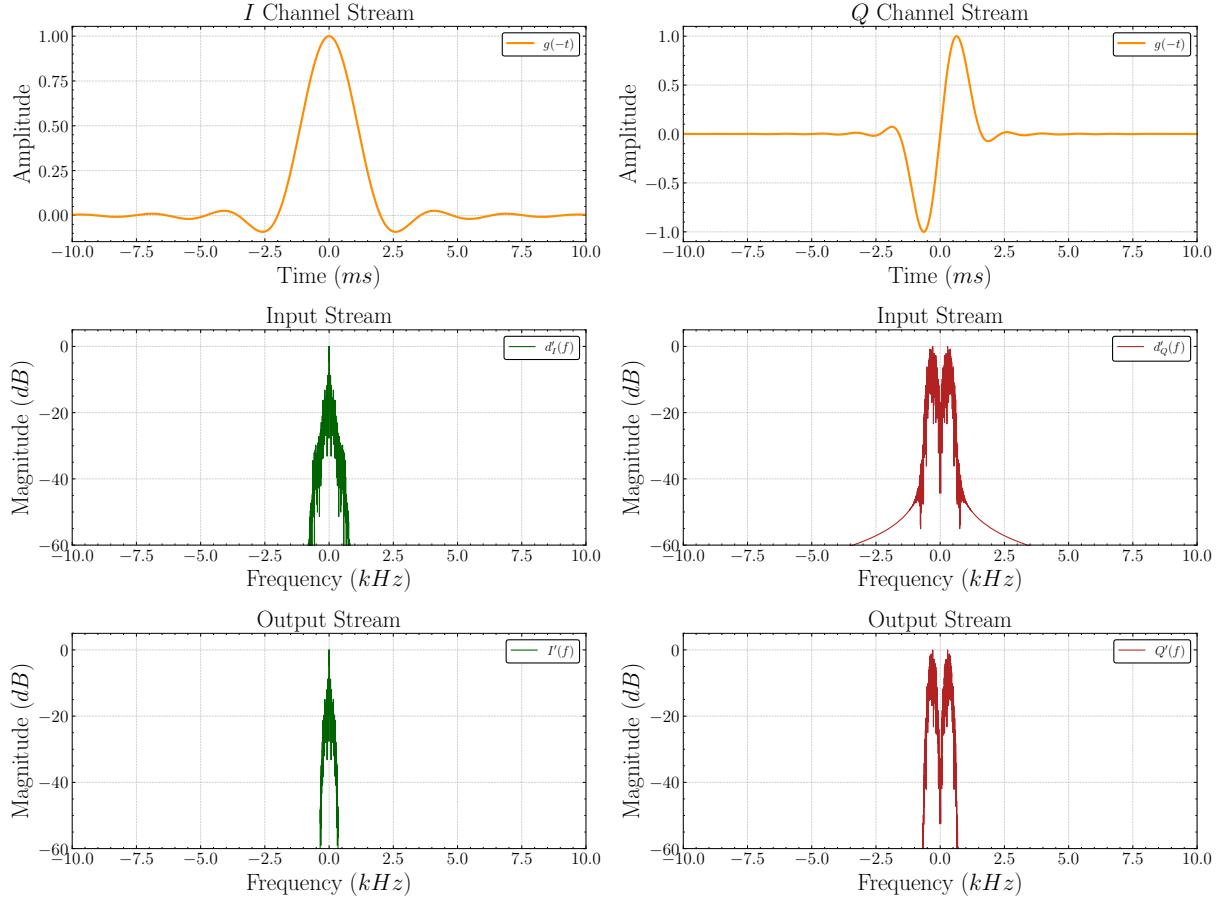


Figura 39 – Filtragem casada dos canais I e Q



3.4.3 Sincronização de símbolos

Figura 40 – Vetor de amostras esperadas para sincronismo com I e Q

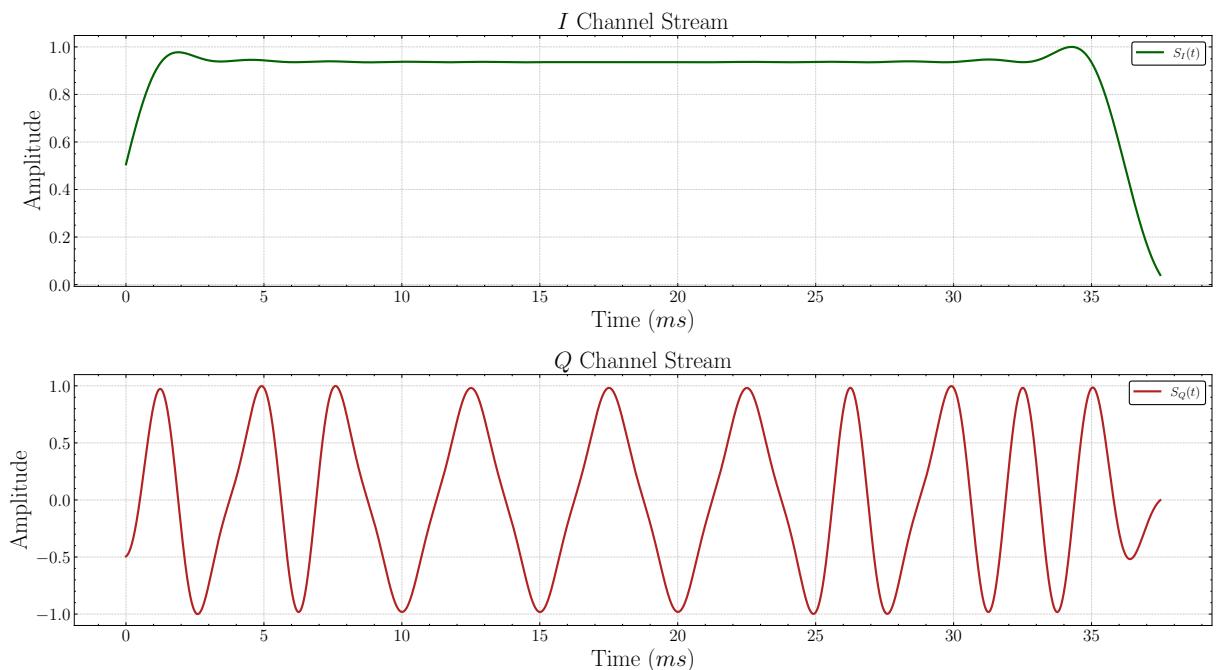


Figura 41 – Módulo de correlação entre I e Q e vetor de sincronismo

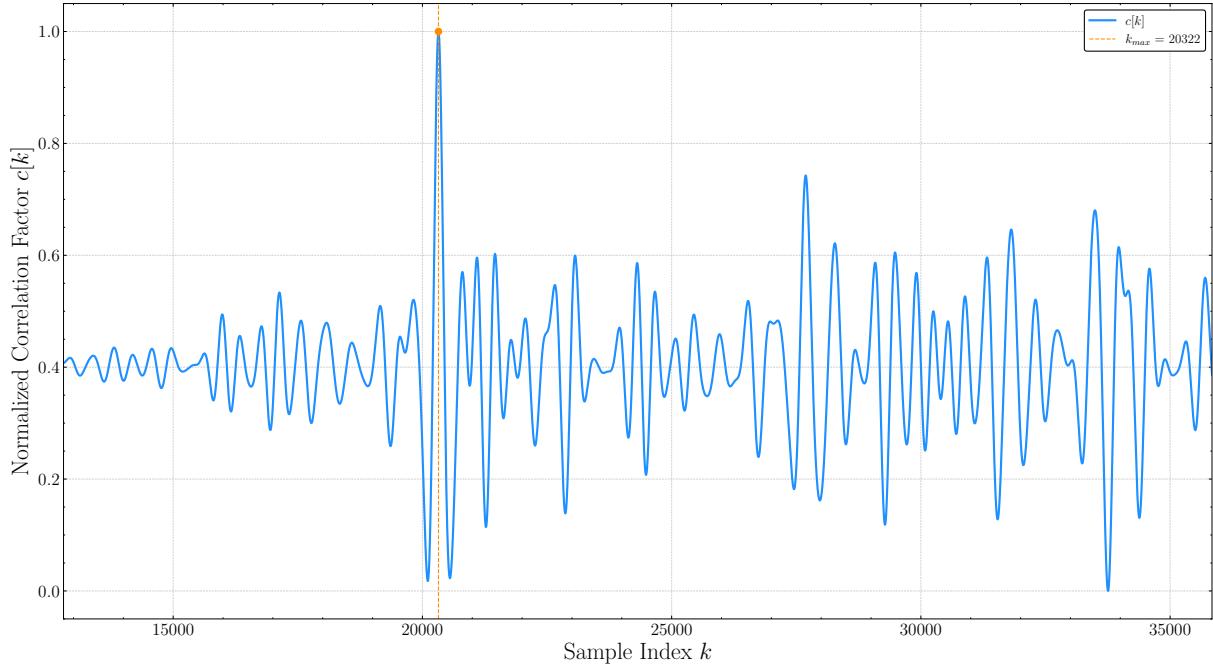
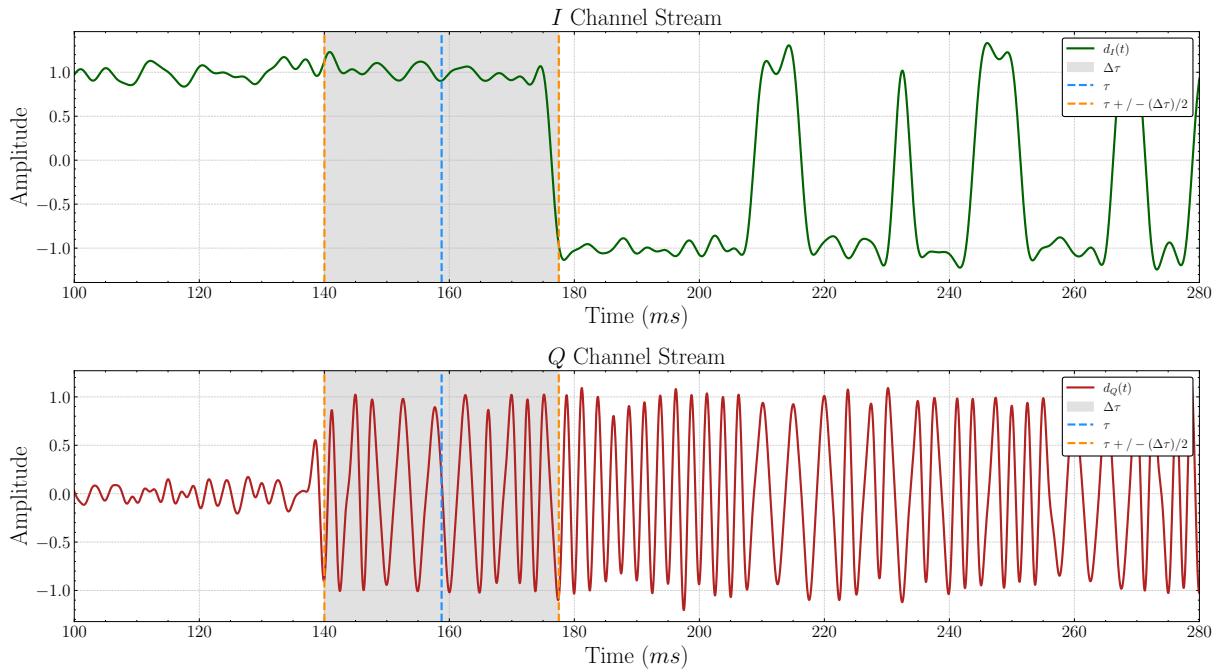


Figura 42 – Sincronização de I e Q com vetor de sincronismo



3.4.4 Decisão de símbolos

Figura 43 – Amostragem dos canais I e Q em T_b a partir de τ

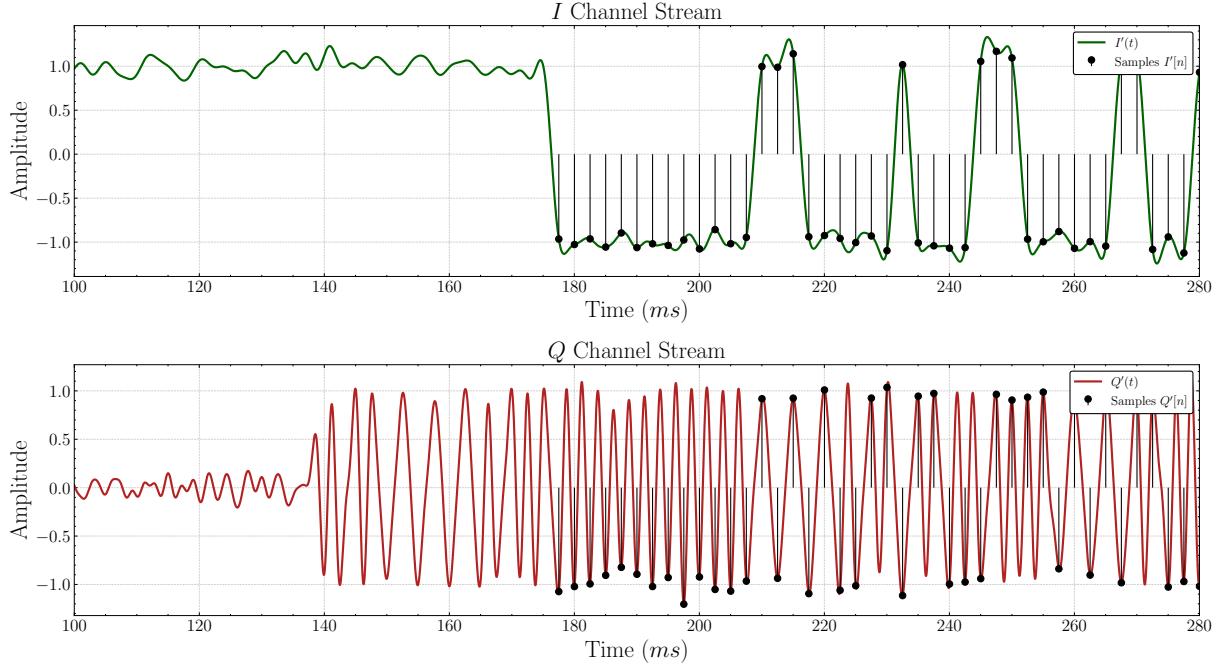
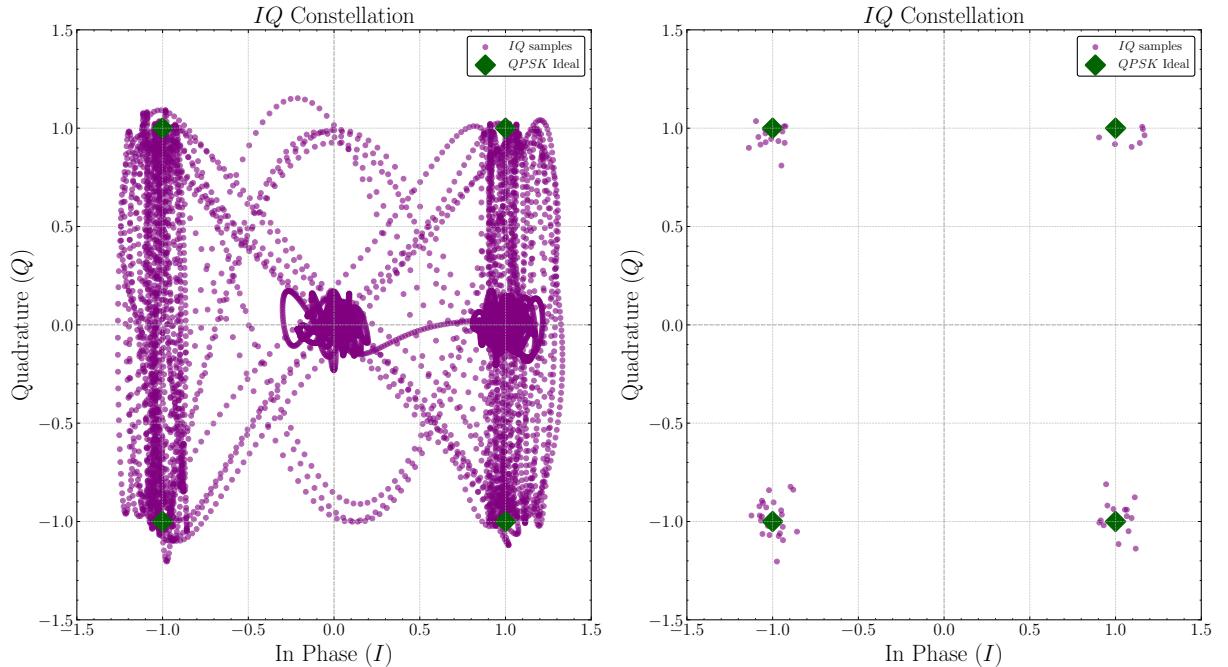
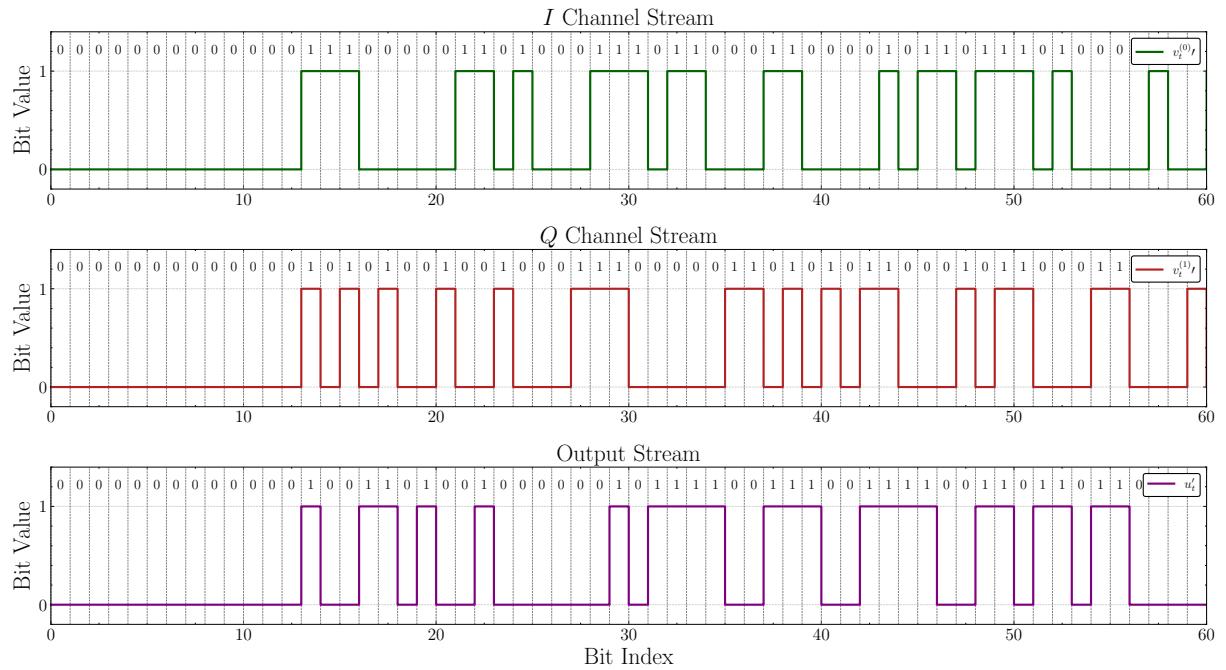


Figura 44 – Constelação dos canais I e Q filtrados e amostrados



3.4.5 Recuperação do Datagrama

Figura 45 – Decodificação convolucional dos canais I e Q



4 CONCLUSÃO

REFERÊNCIAS

CENTENARO, Marco *et al.* A Survey on Technologies, Standards and Open Challenges in Satellite IoT. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 23, n. 3, p. 1693–1720, 2021. DOI: 10.1109/COMST.2021.3078433.

CNES, Project Team. Services and Message Formats Ed2 Rev2. en, p. 80, 2006.

DUARTE, José Marcelo L. *et al.* A multiuser decoder based on spectrum analysis for the Brazilian Environmental Data Collecting System. en. **International Journal of Satellite Communications and Networking**, v. 39, n. 2, p. 205–220, 2021. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd. ISSN 1542-0981. DOI: 10.1002/sat.1381. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sat.1381>.

FRAIRE, Juan A.; CÉSPEDES, Sandra; ACCETTURA, Nicola. Direct-To-Satellite. en. In: AD-HOC, Mobile, and Wireless Networks. Springer, Cham, 2019. p. 241–258. ISSN: 1611-3349. ISBN 978-3-030-31831-4. DOI: 10.1007/978-3-030-31831-4_17. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-31831-4_17.

GOMES, Guilherme Peinador. Otimização de órbita para comunicação de nanossatélites da Constelação Catarina. pt, 2024. Accepted: 2024-07-11. Publisher: Joinville, SC. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/255917>.

LIMA, Raffael Sadite Cordoville Gomes de. **A parallel software-defined ultra-low-power receiver for a satellite message forwarding system**. 2021. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Accepted: 2022-02-02. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/45768>.

RAE, João Carlos Pécala. **Detector de sinais para os satélites do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados usando análise espectral digital**. 2005. Dissertação de Mestrado – Nome da Instituição, Brasil. Disponível conforme normas APA, Chicago e MLA.

RODRIGUES, José Antonio. Demodulador ARGOS III Compatível com Sinais PTT-A2 e PTT-A3. pt, p. 104, 2018. Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.01.12.38/doc/publicacao.pdf>.

SHU, L. **Error Control Coding**. Pearson India, 2011. ISBN 9788131734407. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=BG08Zylo_7gC.

SILVA, Ramon Brandi da; ALMEIDA, Eugenio Sper de. Um framework para a identificação e diferenciação de plataformas de coleta de dados ambientais do Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA). pt. In: SIMPÓSIO Brasileiro de Sistemas de Informação

(SBSI). SBC, 2022. p. 17–20. ISSN: 0000-0000. DOI: 10.5753/sbsi_estendido.2022.222715.
Disponível em: https://sol.sbc.org.br/index.php/sbsi_estendido/article/view/21563.

SKLAR, Bernard. **Digital communications: fundamentals and applications**. USA: Prentice-Hall, Inc., 1988. ISBN 0132119390.

APÊNDICE A – BER VS SNR

Figura 46 – Comparaçāo BER vs SNR - ARGOS3 e QPSK

