

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

ARTHUR CADORE MATUELLA BARCELLA

**SIMULAÇÃO DE MODULADOR/DEMODULADOR PTT-A3 PARA
APLICAÇÕES NO SISTEMA DE SATÉLITES ARGOS-3**

SÃO JOSÉ - SC

2025

Arthur Cadore Matuella Barcella

Simulação de Modulador/Demodulador PTT-A3 para Aplicações no
Sistema de Satélites ARGOS-3

Projeto de Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Coordenadoria do Curso de
Engenharia de telecomunicações do campus
São José do Instituto Federal de Santa Cata-
rina

Área de concentração: Telecomunicações

Orientador: Prof. Arliones Stevert Hoeller
Junior, Dr.

Coorientador: Prof. Richard Demo Souza,
Dr.

São José - SC

2025

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	12
Figura 2 – Satélites para coleta de dados ambientais	14
Figura 3 – Estrutura do quadro de transmissão ARGOS-3	16
Figura 4 – Simulação de portadora pura no domínio da frequência	17
Figura 5 – Estrutura do datagrama ARGOS-3	18
Figura 6 – Exemplo de agrupamento de sensores por bloco de dados	20
Figura 7 – Diagrama de blocos do transmissor ARGOS-3	22
Figura 8 – Diagrama de blocos do codificador convolucional ARGOS-3	23
Figura 9 – Embaralhador de dados para o ARGOS-3	23
Figura 10 – Modulador IQ	24
Figura 11 – Codificação NRZ e Manchester dos vetores I e Q	25
Figura 12 – Formatação dos pares IQ	26
Figura 13 – Modulação IQ	27
Figura 14 – Diagrama de blocos do demodulador	27
Figura 15 – Demodulação dos canais I e Q	29
Figura 16 – Filtragem passa baixa de I e Q	30
Figura 17 – Filtragem casada de I e Q	31
Figura 18 – Decisão de I e Q	32
Figura 19 – Comparação dos vetores IQ decididos	32
Figura 20 – Desembaralhador de dados para o ARGOS-3	33
Figura 21 – Comparação de BER vs $\frac{E_b}{N_0}$ utilizando codificação convolucional	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Dados meteorológicos da PCD 31855 (10/10/2007 - 11/10/2007)	. . .	19
Quadro 2	–	Comprimento em bits para cada tamanho de mensagem (T_m)		20
Quadro 3	–	Bits adicionados às mensagens do usuário antes da codificação		21

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.*

AWGN *Additive White Gaussian Noise.*

BER *Bit Error Rate.*

CBERS *China-Brazil Earth Resources Satellites.*

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

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

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

ETR *Estações Terrenas de Recepção.*

FFT *Fast Fourier Transform.*

FPGA *Field Programmable Gate Array.*

INPE *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.*

IoT *Internet of Things.*

Manchester *Manchester Encoding.*

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 pulso modelador.

d_{free} Distância livre do código convolucional.

$d_I(t)$ Sinal analógico canal I.

$d'_I(t)$ Sinal do canal I após filtragem casada.

$d_Q(t)$ Sinal analógico canal Q.

$d'_Q(t)$ Sinal do canal Q após filtragem casada.

$\frac{E_b}{N_0}$ Relação energia por bit sobre densidade espectral de potência do ruído.

f_c Frequência da portadora.

f_n Frequência da portadora detectada.

G_0 Vetor gerador correspondente ao canal I.

G_1 Vetor gerador correspondente ao canal Q.

$g(t)$ Pulso modelador RCL.

$g(-t)$ Inverso do pulso modelador RCL.

$h(t)$ Resposta do filtro passa-baixa.

I Componente (canal) em fase.

X_n Vetor de saída I do embaralhador.

I_{PCD} Identificador da PCD.

I'_n Amostra do canal I após desembaralhamento.

k Número de grupos de três bits embaralhados.

m Comprimento do vetor de amostras.

n Número de amostras.

N_b Número de blocos.

P_e Polinômio gerador utilizado no embaralhamento.

ϕ_0 Fase inicial do sinal modulado.

P_m Bit de paridade.

$P_n[k]$ Potência espectral do segmento xn.

P_t Limiar de potência espectral.

Q Componente (canal) em quadratura.

Y_n Vetor de saída Q do embaralhador.

Q'_n Amostra do canal Q após desembaralhamento.

R_b Taxa de bits, 400 bps (ARGOS-3).

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

$s(t)$ Sinal modulado.

S Sequência de bits de sincronização.

t Tempo contínuo.

τ Delay de amostragem.

T_b Tempo de bit.

T_m Tamanho da mensagem.

T_s Intervalo de amostragem do sinal.

u_t Vetor de entrada do codificador convolucional.

v_t^0 Vetor de saída I do codificador convolucional.

v_t^1 Vetor de saída Q do codificador convolucional.

X'_n Vetor de saída quantizado do canal I.

$x_I(t)$ Portadora ortogonal em fase (I).

$x_n[m]$ Segmento de tempo discreto usado na amostragem da portadora.

$X_n[k]$ Espectro de frequência amostrado do segmento xn.

$X_{NRZ}[n]$ Vetor de saída I codificado em NRZ.

$X'_{NRZ}[n]$ Vetor de saída I codificado em NRZ.

Y'_n Vetor de saída quantizado do canal Q.

$Y_M[n]$ Vetor de saída Q codificado em Manchester.

$Y'_M[n]$ Vetor de saída Q codificado em Manchester.

$y_Q(t)$ Portadora ortogonal em quadratura (Q).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
1.2	ORGANIZAÇÃO DE TEXTO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	COLETA DE DADOS SBCDA VIA SATÉLITE	14
2.1.1	Constelação Catarina	15
2.2	EVOLUÇÃO DO SISTEMA ARGOS	15
2.3	ESPECIFICAÇÕES DO PADRÃO PTT-A3	16
2.3.1	Portadora pura	16
2.3.2	Palavra de sincronismo	17
2.3.3	Datagrama	18
2.4	ESTRUTURA DE UM DATAGRAMA ARGOS-3	18
2.4.1	Dados de aplicação	19
2.4.1.1	Sensores	19
2.4.1.2	Blocos de dados	19
2.4.2	Tamanho de mensagem	20
2.4.3	Identificador da PCD	21
2.4.4	Bits de fim de mensagem	21
2.5	TRANSMISSOR PTT-A3	21
2.5.1	Codificador convolucional	22
2.5.2	Embaralhador	23
2.5.3	Modulador IQ	24
2.5.3.1	Codificação NRZ e Manchester	24
2.5.3.2	Formatação por filtragem RRC	25
2.5.3.3	Modulação em banda passante	26
2.6	RECEPTOR PTT-A3	27
2.6.1	Deteccção de portadora	28
2.6.2	Demodulador IQ	28
2.6.2.1	Filtragem passa baixa e Filtragem Casada	29
2.6.2.2	Decisão de simbolos	31
2.6.3	Desembaralhador	32
2.6.4	Decodificador convolucional	33

3	PROPOSTA	35
	Referências	37

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).

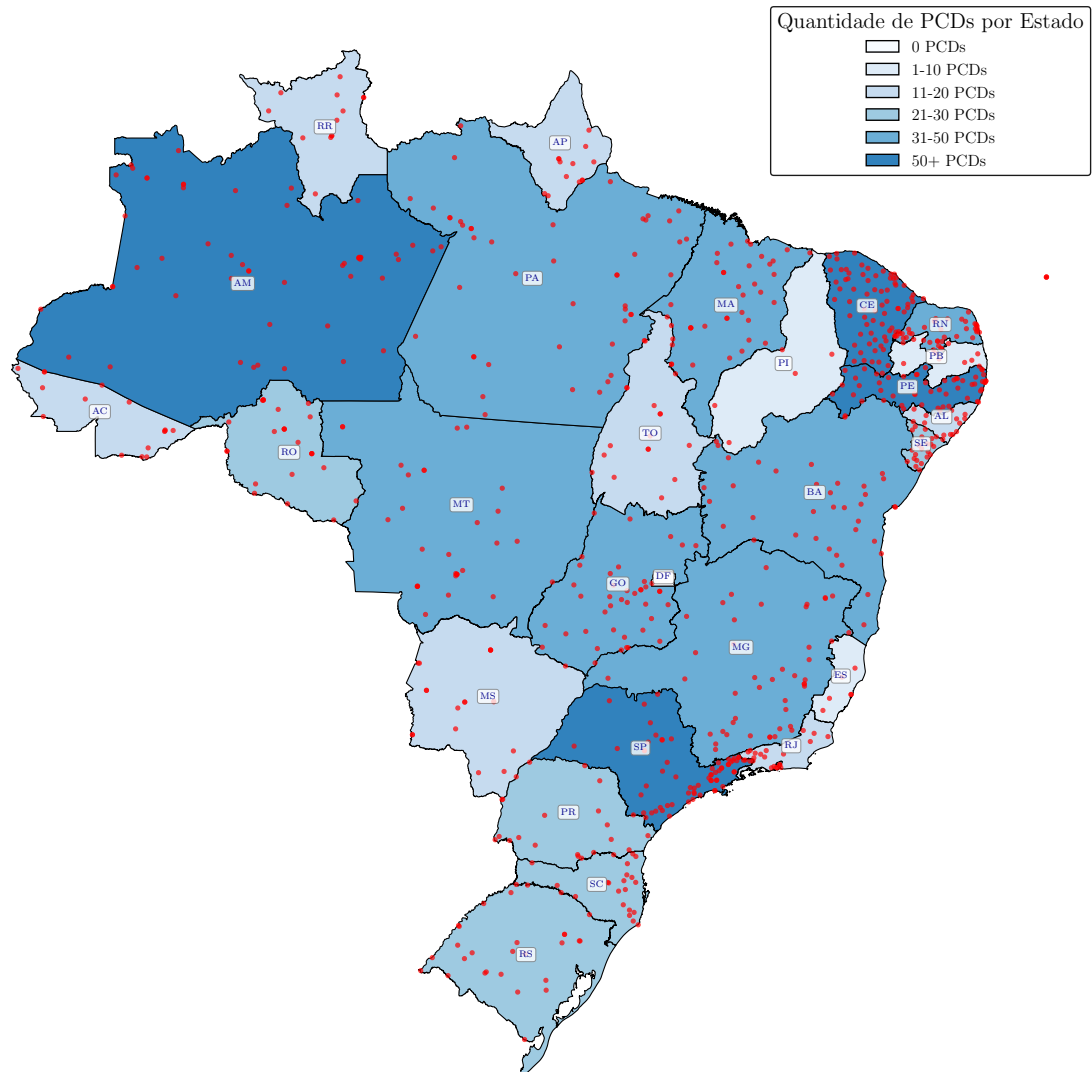
De acordo com dados do Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA) ³, atualmente é possível realizar a inspeção dos dados de 1030 pontos ativos de coleta distribuídos pelo país, cuja distribuição geográfica é apresentada na Figura 1 (SILVA; ALMEIDA, 2022).

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 detecção de portadoras;
- Simular a modulação e demodulação dos sinais enviados por uma PCD;
- Simular o efeito da adição de ruído;
- Simular a montagem e interpretação do datagrama das PCDs.

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 a proposta de desenvolvimento e as etapas previstas para a execução do projeto.

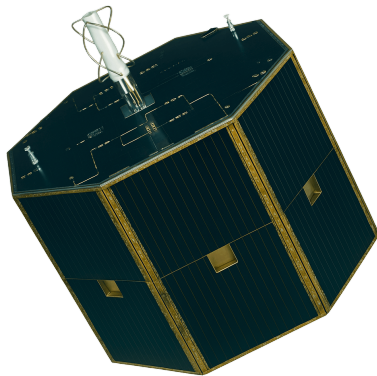
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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.

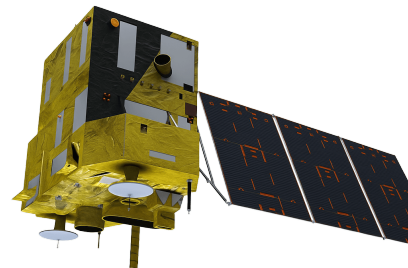
2.1 COLETA DE DADOS SBCDA VIA SATÉLITE

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
Massa	115 kg
Potência Elétrica	110 W
Vida útil	4 anos
Altitude média	≈ 750 km
Inclinação orbital	25°
Período orbital	99,7 min

Parâmetro	Valor
Massa	1 980 kg
Potência Elétrica	2 300 W
Vida útil	3 anos
Altitude média	≈ 778 km
Inclinação orbital	$98,54^\circ$
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 nanosatélites 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 flexível ¹. 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).

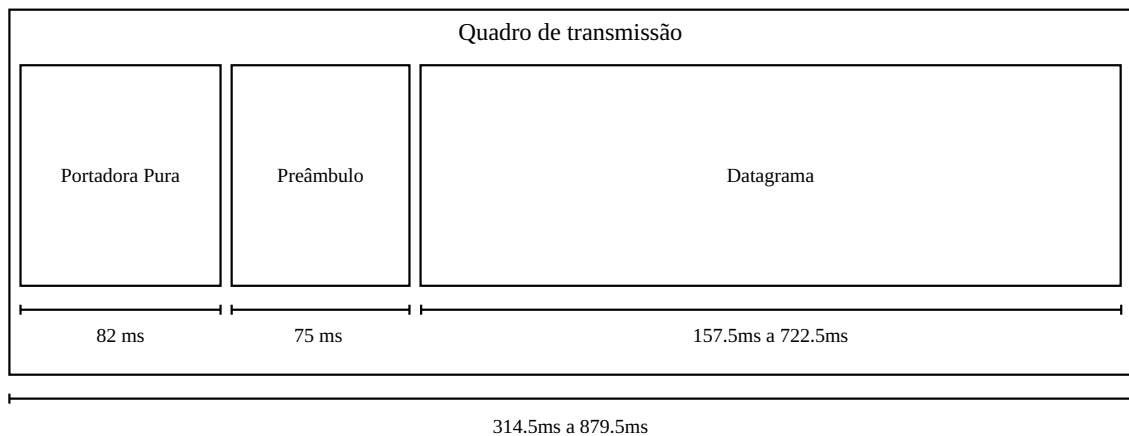
A evolução desse sistema levou ao desenvolvimento do ARGOS-3, que introduziu novas técnicas digitais de comunicação. Essa nova geração incorporou transmissores do tipo PTT-A3 e PTT-ZE, os quais se destacam pela adoção de modulação QPSK, codificação convolucional e embaralhamento de dados, resultando 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 (preâmbulo) e datagrama. Na Figura 3, a estrutura é apresentada de forma detalhada, considerando que a taxa de transmissão R_b é de 400bps CNES (2006).

Figura 3 – Estrutura do quadro de transmissão ARGOS-3

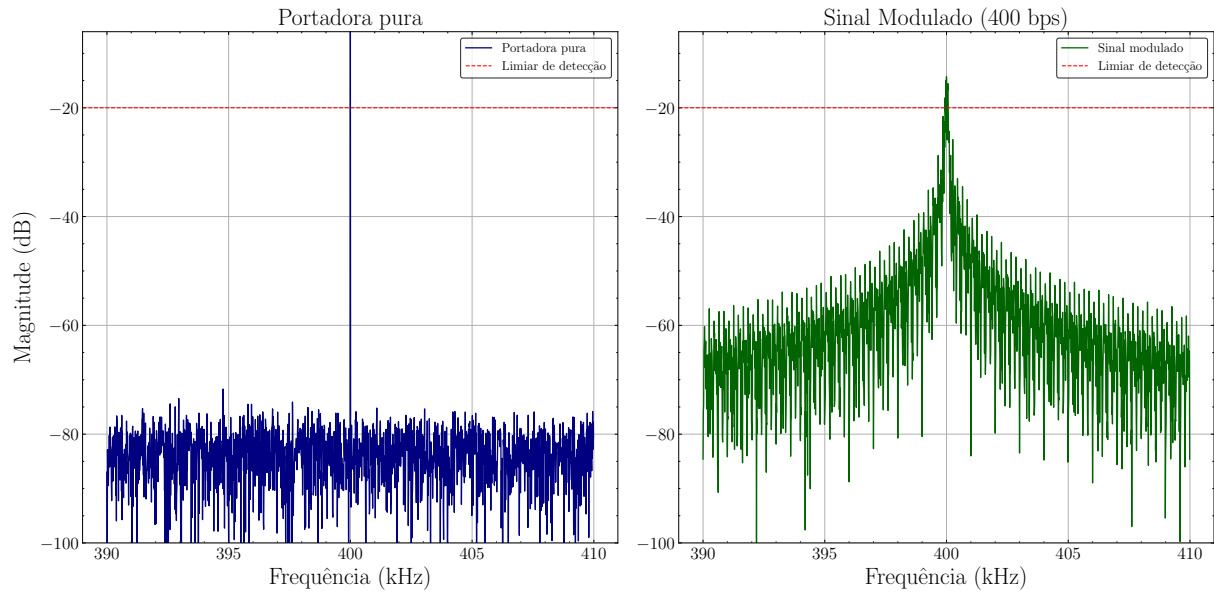


2.3.1 Portadora pura

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 – Simulação de portadora pura no domínio da frequência



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 $S = 2BEEEEBF_{16}$, o que permite alinhar corretamente a decisão e identificar o início do bloco de dados úteis. (CNES, 2006)

A sequência S é separada em dois vetores distintos, I e Q , por meio de uma intercalação simples de seus bits. O processo de intercalação consiste em distribuir os bits de forma alternada entre os canais I e Q , resultando em uma sequência de 30 bits que será transmitida como preâmbulo (CNES, 2006), podendo ser representado como

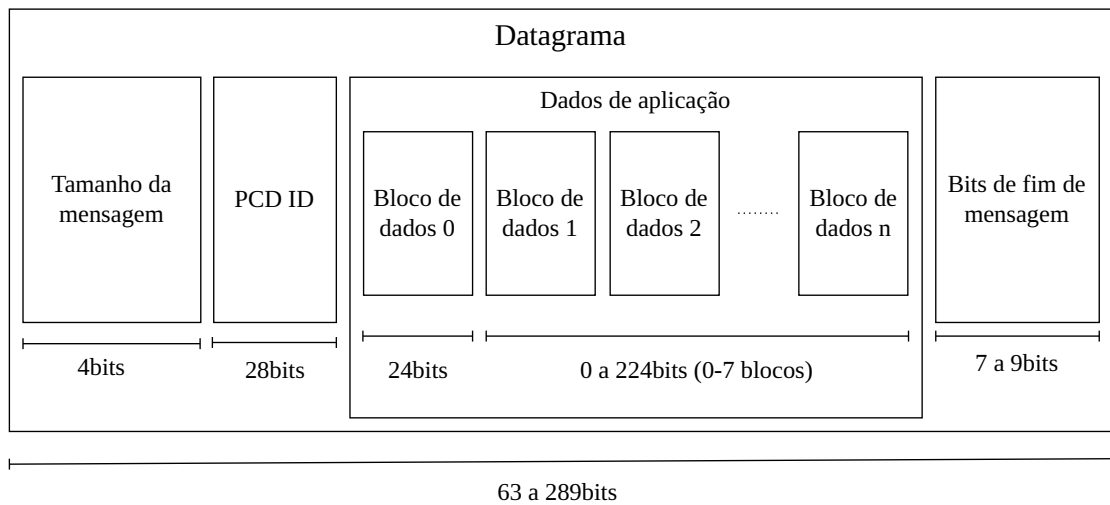
$$\begin{aligned}
S &= [2BEEEEBF_{16}] \mapsto S = [S_0, S_1, S_2, \dots, S_{29}] \\
S_I &= [S_0, S_2, S_4, \dots, S_{28}] \mapsto S_I = [1111, 1111, 1111, 111] \\
S_Q &= [S_1, S_3, S_5, \dots, S_{29}] \mapsto S_Q = [0011, 0101, 0100, 111]
\end{aligned} \tag{2.1}$$

Importante destacar que esta palavra não é codificada convoluionalmente ou embaralhada, sendo adicionada ao início do vetor de bits IQ 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)

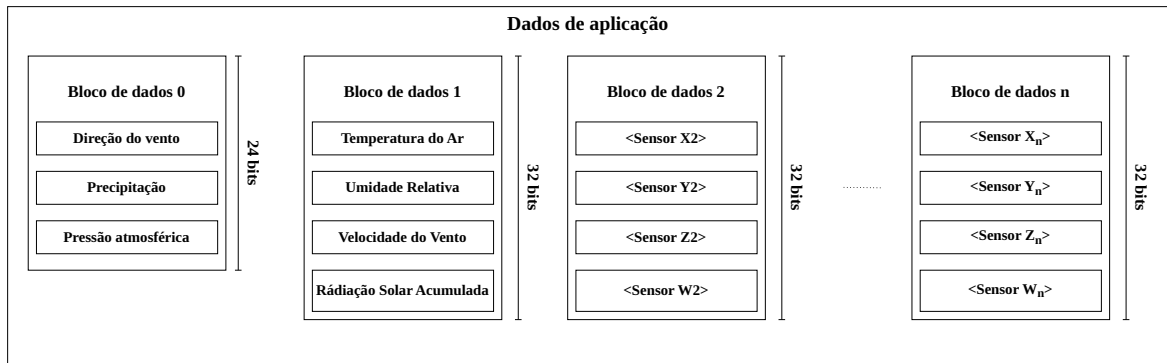
DataHora	DirVento	Precip.	PressãoAtm	RadSolAcum	TempAr	UmidRel	VelVento
2007-11-10 21h	0	0	945.5	2.3	30.8	25.6	0
2007-11-10 18h	0	0	943.8	8.75	36.5	20.8	0
2007-11-10 15h	0	0	947.3	9.72	33.6	28.8	0
2007-11-10 12h	0	0	950.1	4.98	28.0	51.2	0
2007-11-10 09h	0	0	949.3	0.17	20.9	60.8	0
2007-11-10 06h	0	0	947.8	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 $24 + N_b \cdot 32$ bits CNES (2006).

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

Figura 6 – Exemplo de agrupamento de sensores por bloco de dados



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. Como cada bloco possui 32 bits (exceto o primeiro), esse número permite determinar o comprimento total dos dados de aplicação ($32 \cdot T_m$) carregados. O número de blocos, que pode variar de um a oito, determina diretamente o tamanho da mensagem, conforme o Quadro 2 abaixo.

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

Nº de Blocos	T_m	Valor Binário	Comprimento bits
1	0	000	24
2	1	001	56
3	2	010	88
4	3	011	120
5	4	100	152
6	5	101	184
7	6	110	216
8	7	111	248

Após a definição do T_m em formato binário, é necessário calcular o bit de paridade P_m , que é utilizado para verificar a integridade dos dados transmitidos. 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

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

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

2.4.3 Identificador da PCD

O identificador da PCD 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.

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

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

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

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 a memória 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 – Bits adicionados às mensagens do usuário antes da codificação

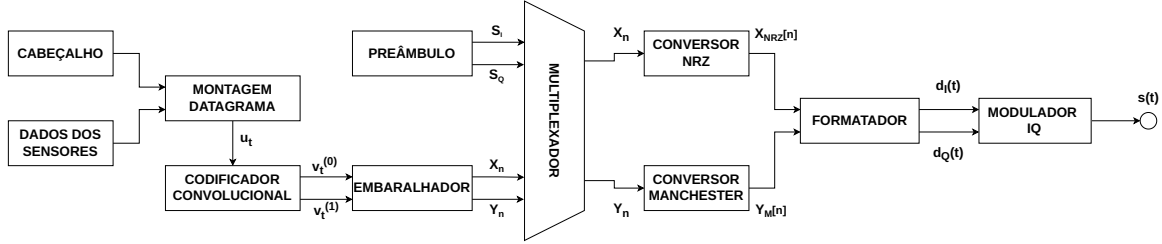
Nº de Blocos	Bits Aplicação	Bits Datagrama	Nº bits "0"
1	24	56	7
2	56	88	8
3	88	120	9
4	120	152	7
5	152	184	8
6	184	216	9
7	216	248	7
8	248	280	8

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 específica, 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, são gerados dois bits de saída, 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

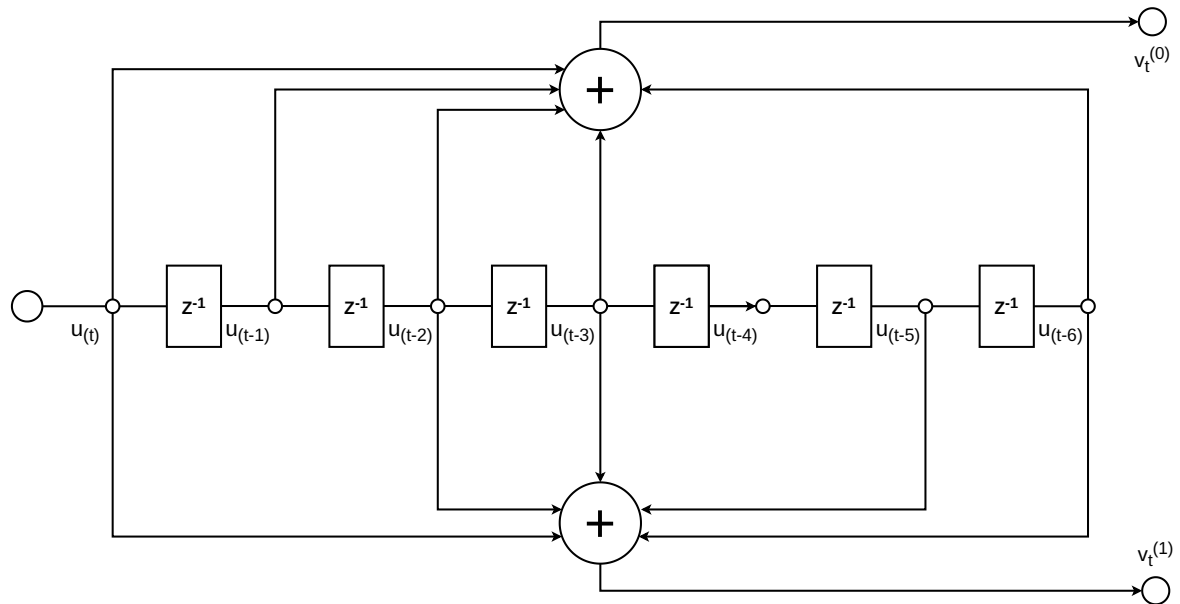
$$\begin{aligned} G_0 = 171_8 &\mapsto G_0 = [1, 1, 1, 0, 0, 1, 1] \\ G_1 = 133_8 &\mapsto G_1 = [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1]. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Os vetores geradores são utilizados para definir uma operação de 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

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

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

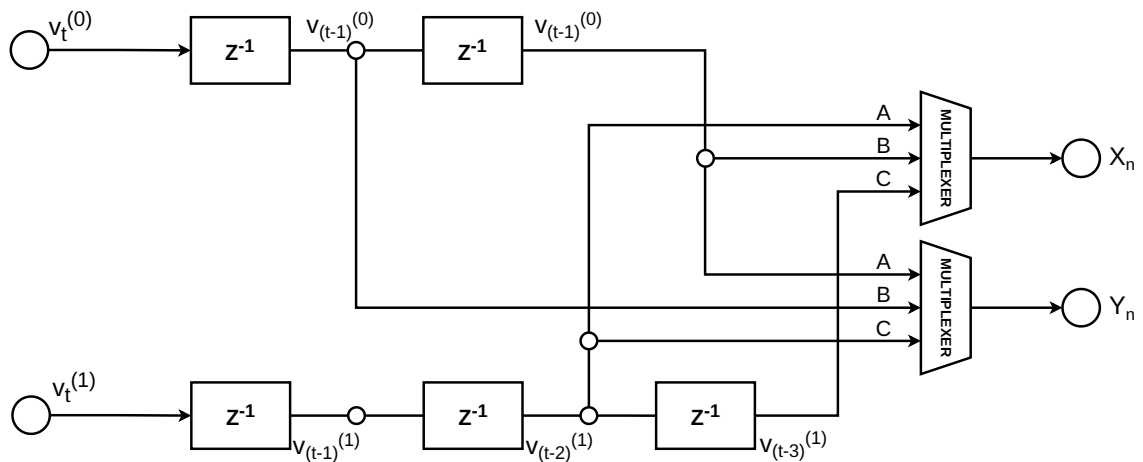


2.5.2 Embaralhador

Após a codificação convolucional, os vetores de saída v_t^0 e v_t^1 são embaralhados para evitar padrões repetitivos. 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 utiliza um polinômio gerador P_e específico. No caso do PTT-A3 sendo $P_e = x^7 + x^3 + 1$ para realizar a operação de embaralhamento, garantindo que os dados sejam distribuídos de forma aleatória antes da modulação QPSK, que pode ser representado pelo diagrama de blocos apresentado na Figura 9 (CNES, 2006).

Figura 9 – Embaralhador de dados para o ARGOS-3



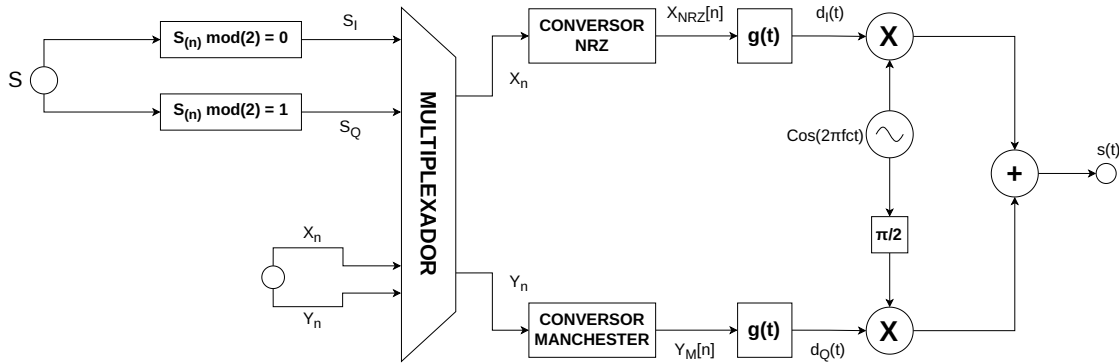
Esse processo resulta nos vetores X_n e Y_n embaralhados. O principal objetivo do

uso do embaralhador é evitar que erros de rajada afetem uma parte específica da sequência de dados transmitida, visto que, uma vez embaralhados, os dados de cada parte do vetor agora estão misturados entre si (RODRIGUES, 2018).

2.5.3 Modulador IQ

Uma vez com os dados embaralhados, os vetores X_n e Y_n são utilizados para modular a portadora em quadratura, resultando no sinal modulado em QPSK. Na Figura 10 é apresentado o diagrama de blocos do modulador IQ, que ilustra como os dados embaralhados e a palavra de sincronismo são combinados para gerar o sinal modulado $s(t)$ que será transmitido (CNES, 2006).

Figura 10 – Modulador IQ



2.5.3.1 Codificação NRZ e Manchester

Para realizar a modulação IQ, primeiro os vetores de dados embaralhados X_n e Y_n precisam ser codificados em formatos específicos. 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). Essas codificações são essenciais para garantir a integridade dos dados durante a transmissão e facilitar a demodulação no receptor (CNES, 2006).

A codificação NRZ é realizada duplicando os bits do vetor X_n , onde cada bit de entrada é representado por dois bits de saída, conforme a expressão

$$X_{NRZ}[n] = \begin{cases} 11, & \text{se } X_n = 1 \\ 00, & \text{se } X_n = 0 \end{cases}, \quad (2.7)$$

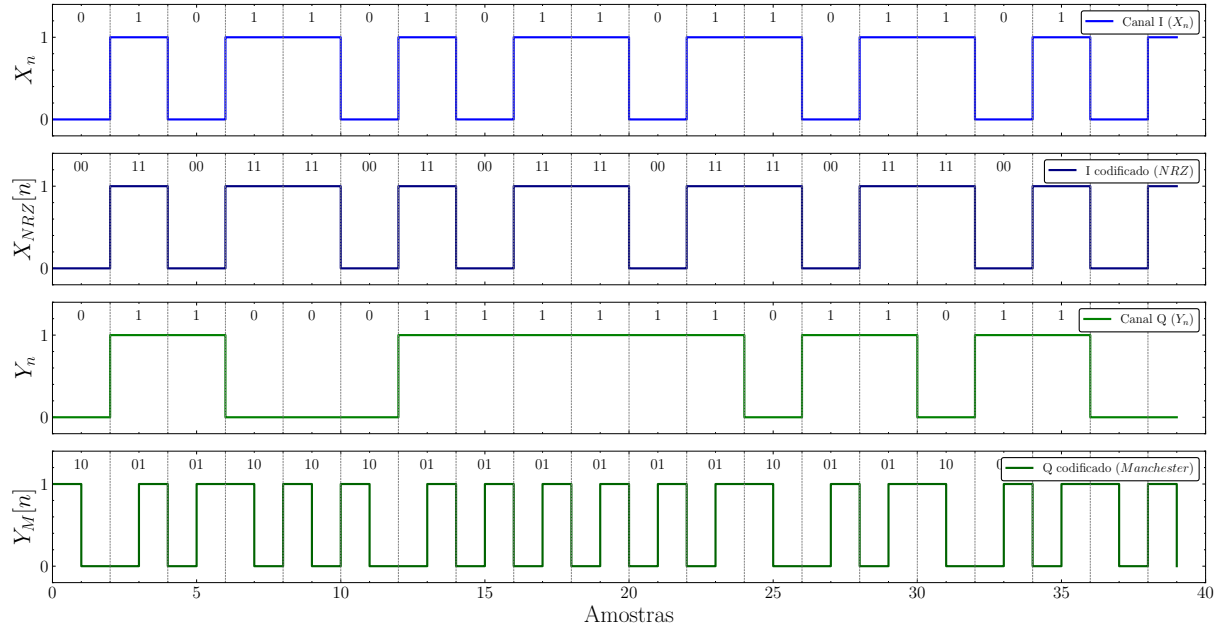
resultando em um vetor de saída $X_{NRZ}[n]$ com o dobro do comprimento do vetor de entrada. Esse processo é necessário para manter o mesmo comprimento do vetor Y_n codificado em Manchester.

Já para o vetor Y_n , a codificação Manchester é aplicada, onde cada bit de entrada é representado por dois bits de saída, alternando entre '0' e '1'. Esse processo pode ser descrito pela expressão

$$Y_M[n] = \begin{cases} 10, & \text{se } Y_n = 1 \\ 01, & \text{se } Y_n = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

resultando assim em um vetor de saída $Y_M[n]$ codificado em Manchester. 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 símbolos na modulação QPSK. A Figura 11 ilustra o processo de codificação dos canais X_n e Y_n , onde os dados são preparados para a modulação QPSK.

Figura 11 – Codificação NRZ e Manchester dos vetores I e Q



2.5.3.2 Formatação por filtragem RRC

Cada par de bits $X_{NRZ}[n]$ e $Y_M[n]$ são então formatados (isto é, espalhados no tempo) para formar uma sequência contínua de símbolos ao longo de t , onde cada símbolo 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 realizar a formatação e gerar os sinais analógicos $d_I(t)$ e $d_Q(t)$, os vetores de bits codificados são multiplicados com um pulso $g(t)$. A formatação é dada por

$$d_I(t) = \sum_n X_{NRZ}[n] \cdot g(t - nT_b) \quad \text{e} \quad d_Q(t) = \sum_n Y_M[n] \cdot g(t - nT_b) \quad , \quad (2.9)$$

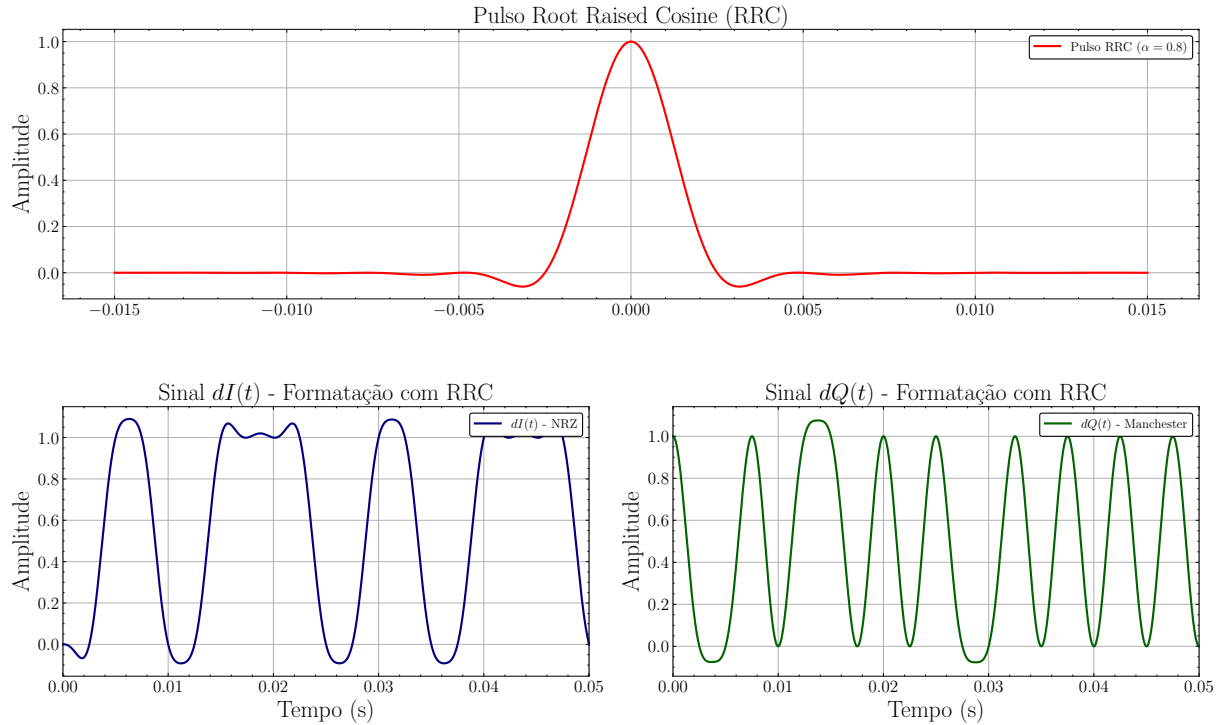
onde é utilizado um pulso $g(t)$ do tipo cosseno levantado limitado (*Root Raised Cosine* (RRC)), definido por

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

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

A formação dos pares I e Q é ilustrada na Figura 12, onde o pulso $g(t)$ é apresentado e em seguida os sinais $d_I(t)$ e $d_Q(t)$ são gerados a partir dos vetores de bits codificados $X_{NRZ}[n]$ e $Y_M[n]$.

Figura 12 – Formação dos pares IQ



2.5.3.3 Modulação em banda passante

Uma vez com os sinais analógicos $d_I(t)$ e $d_Q(t)$ gerados a partir dos vetores de bits codificados, pode-se realizar a modulação dos mesmos e gerar o sinal $s(t)$ de banda passante (CNES, 2006).

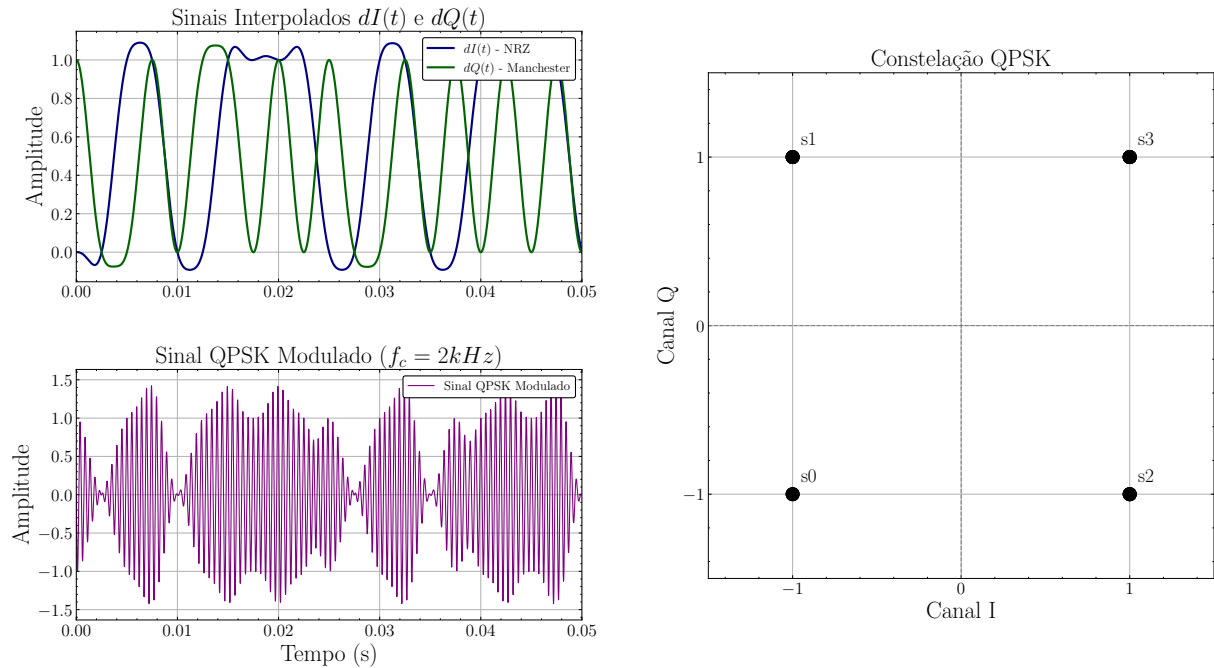
No processo de modulação IQ, o sinal em fase $d_I(t)$ é multiplicado por uma componente cossenoidal em frequência f_c e o sinal em quadratura $d_Q(t)$ é multiplicado por uma componente senoidal na mesma frequência, sendo expresso como

$$s(t) = A d_I(t) \cos(2\pi f_c t + \phi_0) - A d_Q(t) \sin(2\pi f_c t + \phi_0) , \quad (2.11)$$

onde A é a amplitude do sinal, f_c é a frequência da portadora, tipicamente 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 IQ

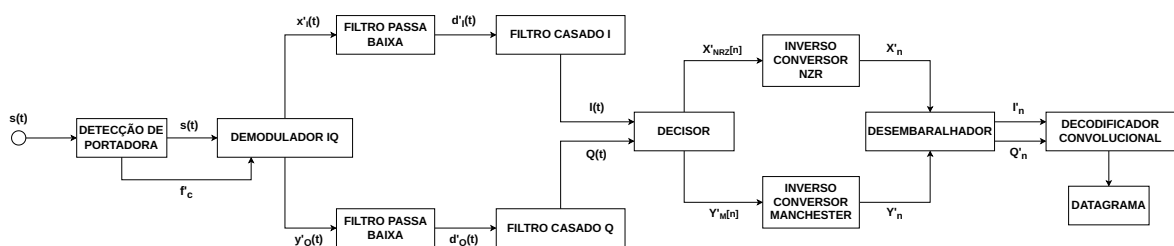


A constelação QPSK na Figura 13 é composta por quatro pontos, cada qual representando um símbolo distinto. Os símbolos são mapeados de acordo com os pares de bits I e Q . Por fim, um ruído *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) é adicionado ao sinal modulado $s(t)$ para simular as condições reais de transmissão.

2.6 RECEPTOR PTT-A3

Como apresentado anteriormente, 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 401,65 MHz e realiza a transmissão. Dessa forma, o satélite necessita de um mecanismo de detecção dos sinais transmitidos e sincronização de f_c para poder demodular o sinal enviado.

Figura 14 – Diagrama de blocos do demodulador



2.6.1 Detecção de portadora

Para realizar a detecção da portadora f_c , o sinal recebido 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

$$x_n[m] = x(t_n + mT_s) , \quad (2.12)$$

onde $x_n[m]$ representa o segmento de sinal, m é o comprimento do vetor de amostras deste sinal, T_s é o intervalo de decisão, e $t_n = n \cdot 10\text{ms}$ é o instante do segmento, múltiplo de 10ms. 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 do espectro $X_n[k]$, 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 , existe a possibilidade de que uma portadora de frequência f_n esteja presente naquela frequência.

Por fim, quando uma frequência é detectada, o sistema registra essa frequência como uma possível portadora e aguarda a coleta de um novo segmento $x_{n+1}[m]$ para verificar se a portadora persiste na mesma frequência, se persistir, o sistema considera que a frequência f_n é a portadora f_c do sinal recebido.

2.6.2 Demodulador IQ

Para realizar a demodulação, o sinal $s(t)$ recebido na frequência detectada f_c 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

$$x'_I(t) = s(t) \cdot x_I(t) = [Ad_I(t) \cos(2\pi f_c t) - Ad_Q(t) \sin(2\pi f_c t)] \cdot 2 \cos(2\pi f_c t) \quad (2.15)$$

$$x'_I(t) = \underbrace{Ad_I(t)}_{\text{Banda base}} + \underbrace{[Ad_I(t) \cos(4\pi f_c t) - Ad_Q(t) \sin(4\pi f_c t)]}_{\text{Dobro da frequência } f_c} , \quad (2.16)$$

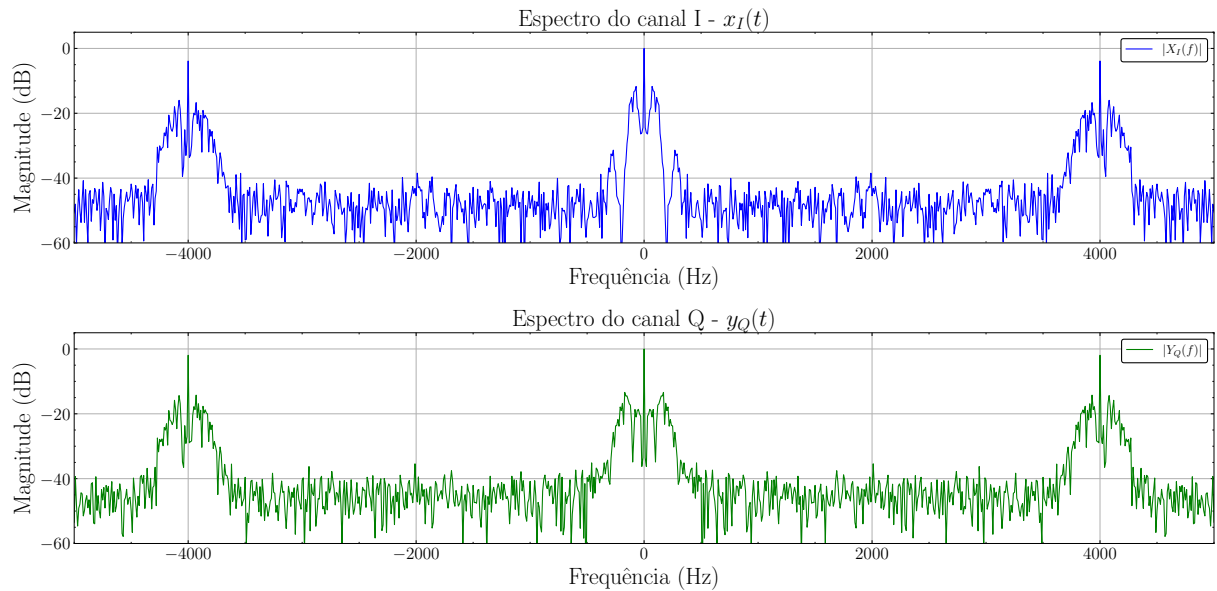
onde $d_I(t)$ é o sinal em fase. O mesmo processo é realizado para o canal Q , que isola o sinal em quadratura $d_Q(t)$ da seguinte forma

$$y'_Q(t) = s(t) \cdot y_Q(t) = [Ad_I(t) \cos(2\pi f_c t) - Ad_Q(t) \sin(2\pi f_c t)] \cdot 2 \sin(2\pi f_c t) \quad (2.17)$$

$$y'_Q(t) = \underbrace{Ad_Q(t)}_{\text{Banda base}} + \underbrace{[Ad_Q(t) \cos(4\pi f_c t) + Ad_I(t) \sin(4\pi f_c t)]}_{\text{Dobro da frequência } f_c} . \quad (2.18)$$

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 $f_c = 2\text{kHz}$).

Figura 15 – Demodulação dos canais I e Q

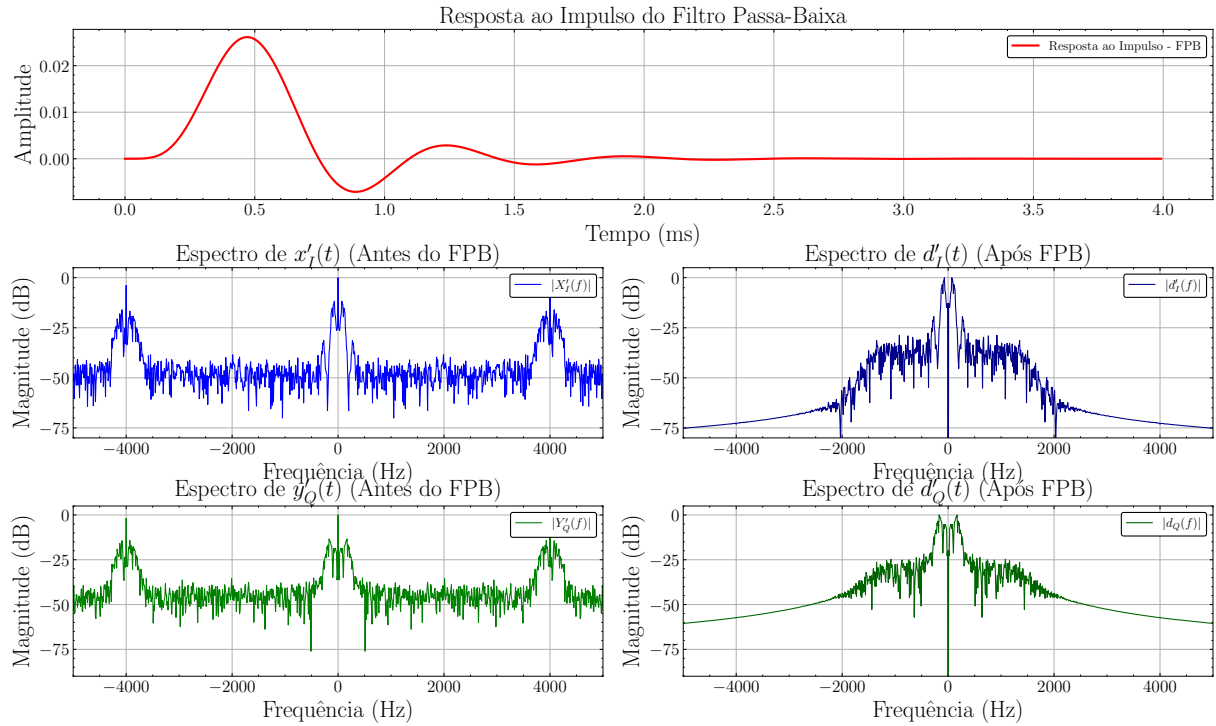


2.6.2.1 Filtragem passa baixa e Filtragem Casada

Para isolar os sinais em banda base $d'_I(t)$ e $d'_Q(t)$, é necessário aplicar um filtro passa-baixa, para isso foi aplicado 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 realizada anteriormente.

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.

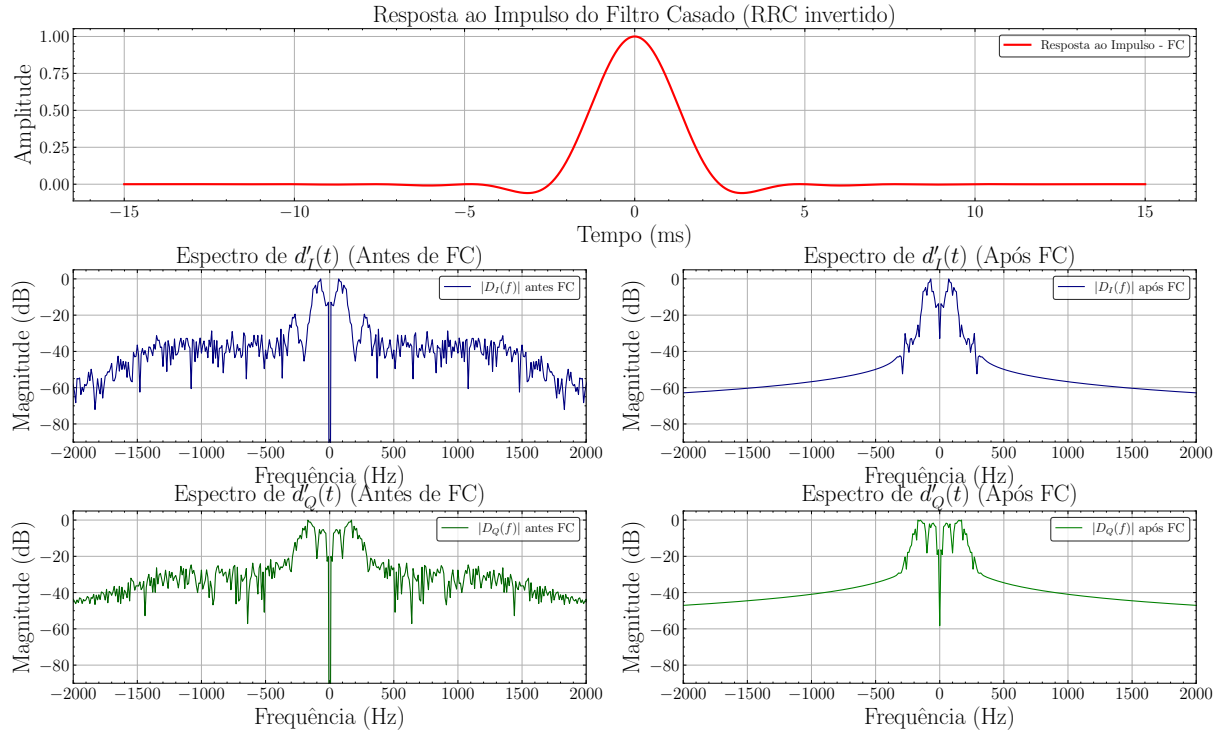
Figura 16 – Filtragem passa baixa de I e Q



Em seguida, os sinais $d_I'(t)$ e $d_Q'(t)$ em banda base passam por um filtro casado, que é utilizado para maximizar a relação sinal-ruído (SNR) do sinal recebido. O filtro casado é ajustado para coincidir com o pulso RRC invertido $g(-t)$ (SKLAR, 1988).

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

Figura 17 – Filtragem casada de I e Q



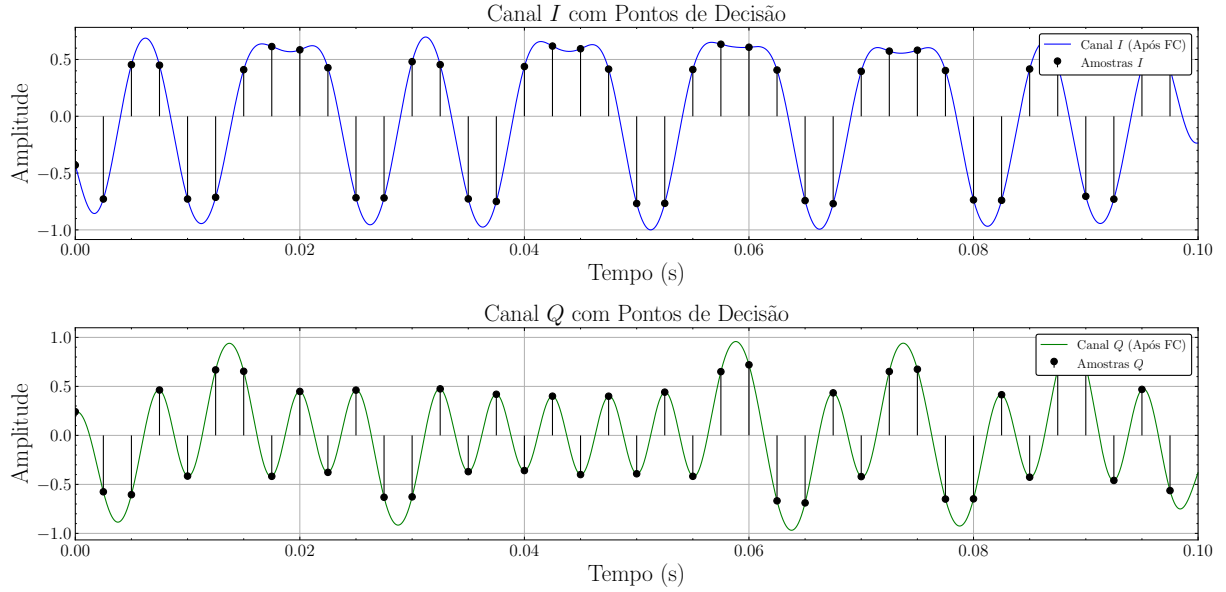
2.6.2.2 Decisão de símbolos

Uma vez com os sinais $d_I'(t)$ e $d_Q'(t)$ filtrados, o próximo passo é a decisão dos sinais em instantes específicos, a partir de um delay inicial τ , para recuperar os símbolos transmitidos. A decisão é realizada a cada período de bit T_b . O processo de decisão pode ser expresso como

$$X'_{NRZ}[n] = d_I'(nT_b + \tau) \quad \text{e} \quad Q'_M[n] = d_Q'(nT_b + \tau) \quad , \quad (2.19)$$

onde n é o índice de amostra e τ é o atraso inicial da decisão. A Figura 18 apresenta os sinais amostrados $X'_{NRZ}[n]$ e $Y'_M[n]$ após a filtragem casada, onde é possível observar os pontos amostrados no tempo, correspondendo aos símbolos transmitidos.

Figura 18 – Decisão de I e Q

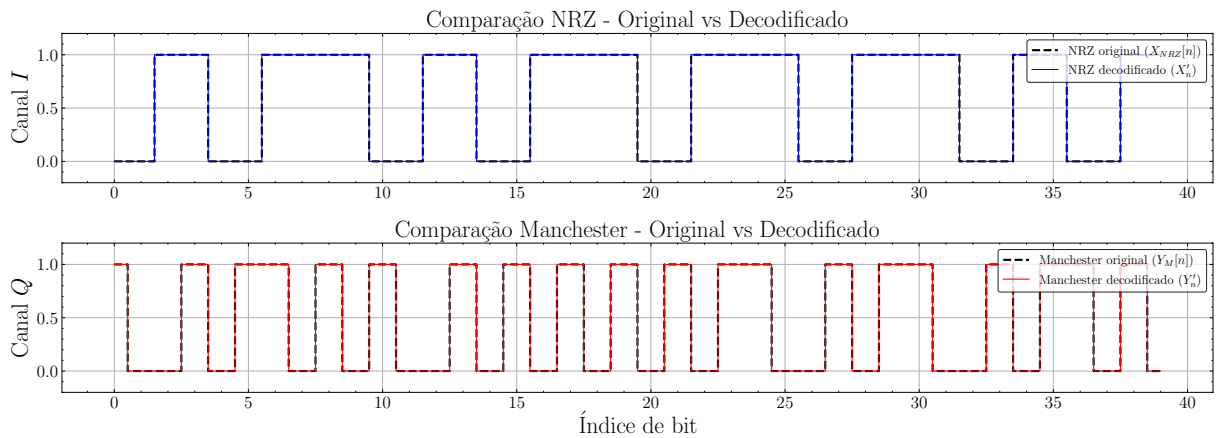


Os valores amostrados $X'_{NRZ}[n]$ e $Y'_M[n]$ são então decididos para valores discretos, correspondendo aos símbolos transmitidos. O mapeamento dos pares pode ser expressado como

$$X'_n = \begin{cases} 1, & \text{se } X'_{NRZ}[n] \geq 0 \\ 0, & \text{se } X'_{NRZ}[n] < 0 \end{cases}, \quad Y'_n = \begin{cases} 1, & \text{se } Y'_M[n] \geq 0 \\ 0, & \text{se } Y'_M[n] < 0 \end{cases}, \quad (2.20)$$

onde X'_n e Y'_n são os vetores bit decididos. A Figura 19 apresenta os bits decididos X'_n e Y'_n após a decisão, em comparação com os vetores $X_{NRZ}[n]$ e $Y_M[n]$ originais.

Figura 19 – Comparação dos vetores IQ decididos



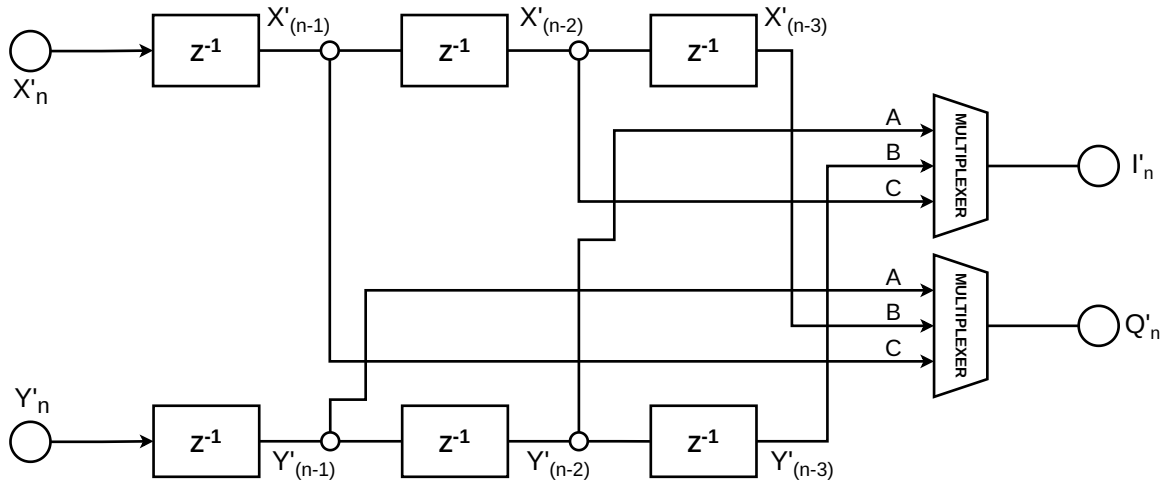
2.6.3 Desembaralhador

Após a decisão, os dados recebidos se encontram 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. 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 – Desembaralhador de dados para o ARGOS-3

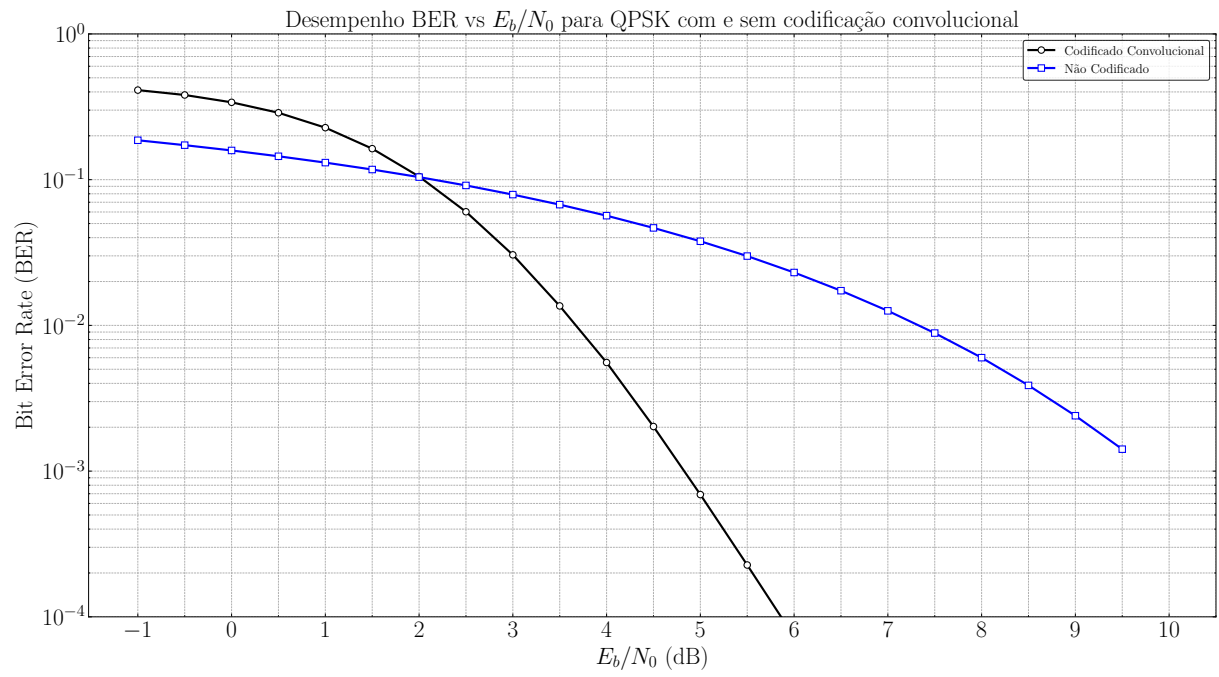


2.6.4 Decodificador convolucional

Após o desembaralhamento, os vetores I'_n e Q'_n estão prontos para a decodificação convolucional. O algoritmo mais 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 para a mensagem recebida em relação à mensagem possível (CNES, 2006; RODRIGUES, 2018).

No padrão ARGOS-3, o código convolucional utilizado segue o padrão 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 ilustrado na Figura 21, o uso do código convolucional na transmissão do sinal permite operar em valores de $\frac{E_b}{N_0}$ menores em relação a não utilização do codificador, para a *Bit Error Rate* (BER) visada pelo sistema, permitindo uso em ambientes com maior ruído e interferência.

Figura 21 – Comparação de BER vs $\frac{E_b}{N_0}$ utilizando codificação convolucional

3 PROPOSTA

Este trabalho propõe a implementação de um simulador de transmissor e receptor de sinais conforme as especificações do padrão ARGOS-3 apresentadas anteriormente, 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.

Trabalhos Realizados

Até o momento, foram realizados estudos para fundamentação teórica sobre o padrão de comunicação ARGOS-3, bem como pesquisas bibliográficas sobre transmissão digital e padrões de comunicação relacionados. Também foram feitas simulações iniciais para compreensão do funcionamento do sistema e levantamento de requisitos para as próximas etapas.

Metodologia

O desenvolvimento do trabalho seguirá as etapas:

- Estudo aprofundado do padrão ARGOS-3 e protocolos/padrões associados;
- Simulação da transmissão digital de mensagens compatíveis com o padrão ARGOS-3, utilizando ferramentas computacionais;
- Desenvolvimento da etapa de detecção da portadora;
- Implementação da cadeia de recepção (demodulação) do sinal;
- Avaliação da integridade da recepção e compatibilidade com o protocolo;
- Análise dos resultados e comparação com referências técnicas.

Resultados Esperados

Espera-se obter um sistema funcional capaz de simular e processar transmissões digitais compatíveis com o padrão ARGOS-3.

Cronograma

- **Mês 1-2:** Estudo do padrão ARGOS-3 e revisão bibliográfica;

- **Mês 3:** Simulação de transmissão digital e levantamento de requisitos;
- **Mês 4-5:** Desenvolvimento da detecção/sincronização da portadora;
- **Mês 6-7:** Implementação da cadeia de recepção (demodulação);
- **Mês 8:** Avaliação dos resultados, testes e ajustes finais;
- **Mês 9:** Redação do relatório final e apresentação dos resultados.

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.