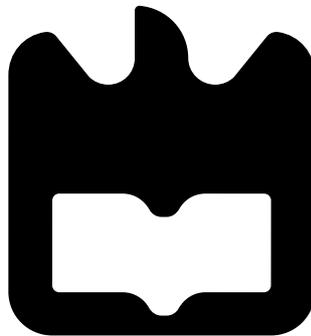




**Pedro Rui
Oliveira da
Silva Maia**

Rádio Amador via Satélite usando Sistema SDR





**Pedro Rui
Oliveira da
Silva Maia**

Rádio Amador via Satélite usando Sistema SDR

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Pedro Cabral, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e sob a coorientação científica do Doutor Telmo Reis Cunha, Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

o júri / the jury

presidente / president

Doutora Susana de Jesus Mota

Professora Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

Doutor Cristiano Ferreira Gonçalves

Radio Frequency R&D Senior Engineer, Huawei Technologies Sweden Ab (arguente)

Doutor Pedro Cabral

Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (orientador)

**agradecimentos /
acknowledgements**

Aproveito esta oportunidade para agradecer a todos que me ajudaram ao longo do meu percurso académico. Em primeiro lugar, obrigado aos meus pais pelo o apoio que me deram nos tempos mais difíceis e por me darem a oportunidade de continuar os meus estudos.

Gostava também de agradecer aos meus irmãos pelo apoio que me deram quando mais precisei.

Agradeço ao Vasco, ao Tomás e ao Bruno pelos tempos bem passados e companheirismo durante estes 5 longos anos. Ao Diogo e Daniel que me aturam desde a escola primária.

Ao António e Paulo Gonçalves pela ajuda que me deram na fase final desta dissertação.

Obrigado Prof. Pedro Cabral por me ter aceite como orientado, pela partilha de conhecimento e experiência e pelo cuidado e dedicação que apresentou durante a realização desta dissertação.

Finalmente, obrigado ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro que ajudou e disponibilizou o espaço necessário para concretizar o objetivo da dissertação.

Palavras-chave

Rádio amador, Rádio definido por software, Satélite

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo implementar um sistema de transmissão e recepção que tenha a capacidade de comunicar com o satélite Es'hail 2. O núcleo deste sistema é o ADALM-PLUTO da Analog Devices, que foi selecionado como o equipamento mais adequado após a análise de vários SDRs. Embora vários softwares tenham sido utilizados ao longo da dissertação como o MATLAB e o GNURadio, concluiu-se que o melhor software para comunicação via satélite e interação com outros utilizadores ao redor do mundo é o SDRConsole. Este software é amplamente utilizado na comunidade de rádio amador devido às suas capacidades e interface gráfica amigável.

Antes do sistema final ter sido implementado, realizaram-se alguns testes com o ADALM-PLUTO. Estes testes visavam estudar a evolução da potência à sua saída, transmissão e recepção de sinais de áudio modulados em AM e SSB, assim como transmissão e recepção de um sinal QPSK.

O sistema foi inicialmente implementado substituindo o satélite por um misturador de rádio frequência a fim de garantir que o sistema funcionasse conforme o esperado. Quando é realizada a transmissão deste sistema, o sinal sai do ADALM-PLUTO a 2.4 GHz com potência máxima de 3 dBm que após passar pelo amplificador CN-0417 sofre 21 dB de amplificação. O sinal após ser filtrado é transmitido por uma antena com mais ou menos 23 dBm ou 200 mW devido às perdas existentes no filtro. O misturador, com antenas conectadas nos conectores IF e RF, recebe o sinal transmitido pelo sistema que após ser deslocado para 10.4 GHz por um sinal de referência de 8 GHz a 10 dBm no conector LO, é retransmitido. O LNB, alimentado com 14 V e um sinal de referência de 24 MHz a 0 dBm, recebe o sinal do misturador e desloca-o para 1.04 GHz. Finalmente, este sinal é atenuado e recebido pelo ADALM-PLUTO. O amplificador utilizado neste sistema necessita de ser alimentado por 5 V através de um cabo micro-USB e consome no máximo cerca de 500 mA. O LNB consome 101 mA. Com este sistema, foi viável transmitir e receber sinais de voz modulados em USB, com valores de SNR que variam entre 38 e 40 dB entre distâncias de 1 a 6 metros entre o sistema e o misturador. Não foi possível aumentar mais a distância devido a limitações de espaço no laboratório.

Finalmente realizou-se as alterações necessárias para que o sistema tivesse a capacidade de receber sinais provenientes do downlink do satélite, assim como transmitir sinais no uplink. Em vez de serem implementados dois estágios de amplificação e usar o CN-0417 como pré-amplificador, decidiu-se usar um amplificador ZHL-30W-252-S+ da Mini-Circuits como único estágio. Este amplificador é alimentado por 28 V, consome no máximo 6.3 A e tem um ganho de 50 dB, mas a sua entrada não pode ter um sinal com mais de 0 dBm de potência. Um refletor de 60 cm foi usado em conjunto com o LNB e antena de transmissão para focar e amplificar os sinais recebidos e transmitidos. Para garantir uma transmissão de qualidade, foi essencial configurar o software de modo que na saída do amplificador de potência o sinal atingisse 10 W, sendo que, devido a perdas nos cabos, chega à antena com 3 W. Foi possível transmitir sinais USB para o satélite, e por sua vez recebê-los com um SNR de 26 dB.

Keywords

Amateur Radio, Software Defined Radio, Satellite

Abstract

This dissertation aims to implement a transmission and reception system that has the ability to communicate with the Es'hail 2 satellite. This system has as its core the ADALM-PLUTO from Analog Devices which, after having analyzed several SDRs, was chosen as the most suitable equipment for this purpose. Although several softwares are used throughout the dissertation, such as MATLAB and GNURadio, it was concluded that the best software for satellite communication and interaction with users worldwide is SDR Console. This software is widely used in the amateur radio community due to its capabilities and user-friendly graphical interface.

Before the final system was implemented, some tests were carried out with ADALM-PLUTO, which aimed to study the evolution of the power at its output, transmission and reception of audio signals using AM and SSB modulation, as well as transmission and reception of a QPSK signal.

The system was then implemented in a first phase by replacing the satellite with a RF mixer to be sure that the system worked as expected. Finally, the necessary changes were made so that it would have the ability to receive signals from the satellite, as well as transmit signals to it. When transmitting, the signal exits the ADALM-PLUTO at 2.4 GHz with a maximum power of 3 dBm and after passing through the CN-0417 amplifier, gets amplified by 21 dB. The signal after being filtered, is transmitted by an antenna with more or less 23 dBm or 200 mW due to the losses in the filter. The mixer with antennas connected to the IF and RF connectors, receives the signal transmitted by the system that after being shifted to 10.4 GHz by a 10 dBm reference signal at 8 GHz present at the LO connector, is retransmitted. The LNB, powered with 14 V and a reference signal of 24 MHz at 0 dBm, receives the signal from the mixer and shifts it to 1.04 GHz. Finally, this signal is attenuated and received by ADALM-PLUTO. The amplifier used in this system needs to be powered by 5 V through a micro-USB cable and consumes 500 mA of current at max. The LNB consumes 101 mA of current. With this system it was possible to transmit and receive SSB modulated voice signals with SNR values ranging between 40 and 48 dB for distances between 1 and 6 meters between the system and the mixer. It was not possible to increase the distance any further due to the dimensions of the laboratory.

Finally, the necessary changes were made so that the system would have the ability to receive signals from the downlink of the satellite, as well as transmit signals in the uplink. Instead of implementing two amplification stages and using the CN-0417 as a preamplifier to drive a power amplifier, it was decided to use the ZHL-30W-252-S+ amplifier from Mini-Circuits as the single stage. This amplifier is powered by 28 V, consumes a maximum of 6.3 A and has 50 dB gain, but at its input can not have a signal with more than 0 dBm of power. A 60 cm reflector was used in conjunction with the LNB and transmitting antenna to focus and amplify the received and transmitted signals. To ensure a quality transmission, it was essential to configure the software so that, at the output of the power amplifier, the signal reached 10 W, with losses in the cables causing it to arrive at the antenna with 3 W. It was possible to transmit USB signals to the satellite and receive those same signals with a SNR value of 26 dB.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Lista de Acrónimos	ix
1 Introdução	1
1.1 Motivações e objetivos	1
1.2 Organização da Dissertação	2
2 Rádio definido por software	3
2.1 Introdução	3
2.2 Funcionamento geral de um SDR	4
2.3 Aplicações do rádio definido por software	6
2.3.1 Rádio cognitivo	6
2.4 ADALM-PLUTO	8
2.4.1 Introdução	8
2.4.2 Funcionamento do AD9363	8
2.4.3 Especificações do ADALM-PLUTO	10
2.5 RTL-SDR	11
2.5.1 Introdução	11
2.5.2 Especificações do RTL-SDR	11
2.5.3 Chipset RTL2832U	13
2.6 Kiwi SDR	14
2.6.1 Introdução	14
2.6.2 Especificações	14
2.7 Software usado	16
2.7.1 MATLAB ou SIMULINK	16
2.7.2 GNU Radio	16
2.7.3 SDR Console	17
3 Satélite Es’hail 2 / QO-100	19
3.1 Introdução	20
3.2 Comunicação com o QO-100	20
3.3 Regras de utilização	21

3.4	Escolha do SDR	22
3.5	Estação para comunicação	22
4	Sistema de Transmissão e Recepção	25
4.1	Introdução	25
4.2	Desenho	25
4.3	Implementação	28
4.3.1	Medição da potência de transmissão do ADALM-PLUTO	28
4.3.2	Testes de Transmissão e Recepção entre ADALM-PLUTO	31
	Transmissor e Recetor AM	31
	Transmissor e recetor SSB	40
	Transmissor e recetor QPSK	49
4.3.3	Montagem do sistema de transmissão e recepção de testes	54
4.4	Montagem e resultados do sistema de transmissão e recepção final	61
5	Conclusão e trabalhos futuros	73
5.1	Conclusão	73
5.2	Trabalhos futuros	75
	Bibliografia	77
A	Código de MATLAB	81
A.1	Medição da potência de saída do ADALM-PLUTO	81
A.2	Comparação do sinal original com sinal recebido	83
A.3	Função para alinhar dois sinais	85
A.4	Cálculo do ACPR	87
A.5	Cálculo do EVM	88
B	Desenho dos filtros	91
B.1	Resultados	94
C	Outros testes	97
C.1	Característica do misturador	97
	C.1.1 Procedimentos	97
	C.1.2 Resultados	97

Lista de Figuras

2.1	Funcionamento de um SDR [1]	4
2.2	Processo de receção e transmissão de um sistema SDR [2]	5
2.3	Ciclo do rádio cognitivo [3]	6
2.4	Diagrama conceitual de um motor de rádio cognitivo a operar numa plataforma de rádio definido por software [3]	7
2.5	(a) Foto do ADALM-PLUTO, (b) I/O do ADALM-PLUTO [3]	8
2.6	Processo de receção e transmissão de um sistema SDR	9
2.7	RTL-SDR [4]	11
2.8	Diagrama de blocos do RTL2832U	13
2.9	Kiwi SDR [5]	14
2.10	Diagrama de blocos do Kiwi SDR [6]	15
2.11	Exemplo de um recetor NBFM desenvolvido no GNU Radio [7]	17
2.12	Screenshot do SDR Console enquanto um ADALM-PLUTO comunica com o QO-100 [8]	18
3.1	Satélite QO-100 [9]	19
3.2	Transponder Narrow-Band [10]	20
3.3	Transponder Wide-Band [11]	21
3.4	DuoBand-Feed 2,4 / 10 GHz - TWIN LNB AMSAT da BaMaTech	23
3.5	Arquitetura da estação de rádio via satélite [12]	24
4.1	Sistema de receção e transmissão para teste	26
4.2	Sistema de comunicação com o satélite	27
4.3	Relação entre a potência de saída e o ganho de transmissão quando o ADALM-PLUTO está configurado com uma frequência de amostragem de 2 MHz	29
4.4	Relação entre a potência de saída e o ganho de transmissão quando o ADALM-PLUTO está configurado com uma frequência de amostragem de 200 kHz	30
4.5	Fluxograma da simulação de um transmissor AM	31
4.6	Sinal obtido pela mistura de uma senoide de 20Hz com uma senoide de 1kHz	32
4.7	Sinal obtido pela mistura de uma senoide de 1kHz com uma senoide de 20Hz com amplitude a variar entre 0 e 2	32
4.8	Sinal AM	33
4.9	Transmissor AM com ADALM-PLUTO	34
4.10	Recetor AM	34
4.11	Atenuação no transmissor de 0dB.	35
4.12	Atenuação no transmissor de 30dB.	36

4.13	Atenuação no transmissor de 40dB.	36
4.14	Atenuação no transmissor de 50dB.	37
4.15	Ganho no recetor de 0dB.	38
4.16	Ganho no recetor de 40dB.	38
4.17	Ganho no recetor de 50dB.	39
4.18	Método de faseamento para geração de um sinal SSB	40
4.19	Simulação do transmissor Single Side Band.	40
4.20	Simulação da transmissão Upper Side Band.	41
4.21	Simulação da transmissão Lower Side Band.	41
4.22	Transmissor Single Side Band.	42
4.23	Recetor Single Side Band.	42
4.24	Ganho no recetor de 0dB.	43
4.25	Ganho no recetor de 10dB.	43
4.26	Ganho no recetor de 20dB.	44
4.27	Ganho no recetor de 10dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 0.5	45
4.28	Ganho no recetor de 30dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 0.5	45
4.29	Ganho no recetor de 10dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 1.	46
4.30	Ganho no recetor de 30dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 1.	47
4.31	Ganho no recetor de 0dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 1.	47
4.32	Ganho no recetor de 0dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 12.	48
4.33	Transmissor QPSK	49
4.34	Recetor QPSK	49
4.35	Sinal QPSK transmitido	50
4.36	Sinal recebido quando não há atenuação no transmissor e quando o recetor está configurado com 15 dB de ganho.	51
4.37	Sinal recebido quando o transmissor está configurado com 14 dB de atenuação e o recetor com 15 dB de ganho.	52
4.38	EVM em relação à distância entre as antenas do transmissor e recetor	53
4.39	Relação entre atenuação do transmissor do ADALM-PLUTO e a potência no conector RF do misturador	54
4.40	Potência à saída do Bias-T em relação à atenuação de transmissão do ADALM-PLUTO com atenuador entre filtro e misturador	55
4.41	Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 1 metros de distância do sistema	56
4.42	Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 4 metros de distância do sistema	56
4.43	Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 4 metros de distância do sistema com obstáculo à frente do mixer	57
4.44	Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 4 metros de distância do sistema com obstáculo à frente do LNB	57
4.45	Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 6 metros de distância do sistema e o LNB está direcionado para o seu local	58

4.46	Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 6 metros de distância do sistema e o LNB está levemente desviado do seu local	58
4.47	Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 6 metros de distância do sistema com LNB levemente desviado do local correto e com obstáculos no caminho	59
4.48	Sinal de voz modulado em USB transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 6 metros de distância	59
4.49	Setup de ligação ao satélite	61
4.50	Beacon PSK recebido mas desviado em frequência	62
4.51	Janela para escolha do rádio	62
4.52	Janela das definições do rádio	63
4.53	Definições do conversor	63
4.54	Beacon PSK recebido após conversão de frequência	64
4.55	Beacon PSK recebido após ser bloqueado pela função Geostationary Sattelite Beacon	64
4.56	Receção de toda a banda estreita do QO-100 usando o sistema montado e SDR Console	65
4.57	Receção de toda a banda estreita do QO-100 usando o WebSDR	65
4.58	Tom transmitido pelo ADALM-PLUTO e recebido no downlink do satélite	66
4.59	Definições para o conversor do transmissor	66
4.60	Tom transmitido pelo ADALM-PLUTO e recebido no downlink do satélite após correção	67
4.61	Transmissão e receção de um sinal de voz modulado em USB	68
4.62	Sinal transmitido por outro utilizador e recebido pelo sistema montado	69
4.63	Sinais recebidos pelo sistema	70
4.64	Parâmetros do algoritmo de redução de ruído	70
4.65	Comparação do sinal transmitido pelo uplink do satélite com o sinal recebido do downlink	71
4.66	Sinal gerado por SDR Console que escreve uma mensagem de texto no espectrograma recebido do downlink do satélite	71
B.1	Esquemático para projeto do filtro	91
B.2	Passo 2	92
B.3	Janela para fazer o desenho do filtro	92
B.4	Janela para fazer a simulação do filtro	93
B.5	Janela para fazer a otimização do filtro	93
B.6	Esquemático com as medidas para o filtro obtido após desenho e otimização	94
B.7	Simulação do filtro obtido após desenho e otimização	94
B.8	Esquemático final do filtro	95
B.9	Simulação do filtro final	95
B.10	Comparação dos resultados obtidos pelo simulador com os resultados obtidos pelo VNA	96
B.11	Filtro impresso	96
C.1	Característica do misturador	98

Lista de Tabelas

2.1	Especificações do ADALM-PLUTO [13]	10
2.2	Sintonizadores e gama de frequências usados no RTL-SDR [4]	12
2.3	Outras especificações do RTL-SDR [4]	12
2.4	Especificações do Kiwi SDR [6]	14

Lista de Acrónimos

ACARS Aircraft Communications Addressing and Reporting System.

ACPR Adjacent Channel Power Ratio.

ADC Analog-to-Digital Converter.

ADS-B Automatic Dependent Surveillance–Broadcast.

AGC Automatic Gain Control.

AIS Automatic Identification System.

AM Amplitude Modulation.

APRS Automatic Packet Reporting System.

APT Automatic Picture Transmission.

ARM Advanced RISC Machines.

CIC Cascaded Integrator-Comb filter.

COSMAC Complementary Symmetry Monolithic Array.

CW Continuous Waveform.

DAB Digital Audio Broadcasting.

DAC Digital-to-Analog Converter.

DARPA Defense Advanced Research Projects Agency.

DC Direct Current.

DSP Digital Signal Processing.

EVM Error Vector Magnitude.

FFT Fast Fourier Transform.

FIFO First In, First Out.

FIR Finite Impulse Response.

FM Frequency Modulation.

FPGA Field-Programmable Gate Array.

GPS Global Positioning System.

GPSDO GPS Disciplined Oscillator.

GPU Graphics Processing Unit.

HF High Frequency.

HTML HyperText Markup Language.

IF Intermediate Frequency.

LHCP Left-Hand Circular Polarization.

LNA Low-Noise Amplifier.

LNB Low Noise Block.

LO Local Oscillator.

LSB Lower Sideband.

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration.

ODMA Opportunity-Driven Multiple Access.

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing.

OSCAR Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio.

PCB Printed Circuit Board.

POCSAG Post Office Code Standardisation Advisory Group.

PSK Phase Shift Keying.

QPSK Quadrature Phase Shift Keying.

RBW Resolution Bandwidth.

RCA Radio Corporation of America.

RF Radio Frequency.

RHCP Right-Hand Circular Polarization.

RRC Root Raised Cosine.

SDR Software Defined Radio.

SNR Signal to Noise Ratio.

SSB Single-Sideband.

TCXO Temperature Compensated Crystal Oscillator.

TIA TransImpedance Amplifier.

TS Transport Stream.

UHF Ultra High Frequency.

USB Upper Sideband.

VHF Very High Frequency.

VNA Vector Network Analyzer.

WLAN Wireless Local Area Network.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivações e objetivos

No final do século XIX, com as primeiras emissões de rádio surgiu o rádio amador [14]. Como ainda não existiam fábricas de rádio, pessoas começaram a construir os seus próprios equipamentos nas suas casas e deu-se o início deste hobby.

Devido ao rádio amador, houve o avanço de várias tecnologias. As técnicas desenvolvidas pelos operadores de rádio amador ajudaram na evolução da internet, telefones, radar, transmissão de dados via microondas e até fornos de microondas [15].

O rádio amador fornece meios de comunicação independentes de canais de comunicação tradicionais. Isto pode ser útil quando serviços de telefone ou internet não estão disponíveis. Nos dias modernos, o rádio amador apresenta um papel importante no fornecimento de comunicações eletrónicas de emergência para a gestão de catástrofes, onde nos Estados Unidos da América mais de 80000 operadores estão disponíveis para esta tarefa [16]. Por exemplo, o serviço de rádio amador manteve agências de Nova York em contacto umas com as outras depois do seu centro de comando ter sido destruído durante o 11 de Setembro, e anos mais tarde teve também um papel importante durante o furacão Katrina quando as comunicações falharam, assim como em 2013 durante as inundações no Colorado [17].

Existe também um interesse técnico devido ao facto do rádio amador envolver uma quantidade significativa de conhecimentos técnicos e especialização. E por isso, várias pessoas que se envolvem com rádio amador gostam de aprender sobre eletrónica, tecnologia de rádio e sistemas de comunicação.

Devido à flexibilidade dos sistemas de rádio definido por software, os SDR são usados pelos operadores de rádio amador modernos. Os transmissores e recetores baseados em SDR oferecem uma conjugação muito interessante entre arquiteturas clássicas, como a super-heterodina, com tecnologia digital rápida, o que resulta em desempenhos muito bons. Esta nova abordagem de rádio definido por software aplicada a rádios transceptores para comunicações via-satélite reveste-se de grande interesse tornando possível a comunicação com grande parte do mundo ao usar satélites geoestacionários.

O objetivo desta dissertação é o projeto, implementação e teste de uma estação de rádio via satélite baseada em sistemas SDR.

1.2 Organização da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos.

O capítulo 1 contém a motivação e o objetivo que se pretende alcançar.

No capítulo 2 é apresentada uma introdução à tecnologia SDR onde que é explicado o seu funcionamento geral, aplicações, alguns dos dispositivos existentes e softwares que podem ser usados.

O capítulo 3 é dedicado ao satélite Es'hail 2 / QO-100. São apresentadas algumas informações sobre a sua origem, plano de banda e regras de utilização a serem seguidas. Neste capítulo é escolhido o SDR para concretizar o objetivo desta dissertação.

No capítulo 4 é feito o desenho de um sistema de transmissão e recepção para testes, onde o satélite é substituído misturador com antenas nos conectores IF e RF, e o sistema de transmissão e recepção final. No subcapítulo "Implementação", são realizados alguns testes com o ADALM-PLUTO, como medição da sua potência de saída e testes de transmissão e recepção usando várias modulações (AM, SSB e QPSK). Além disso, são realizados testes no sistema onde o satélite é substituído por um misturador. Os testes realizados com este sistema têm como principal propósito garantir que os ramos de transmissão e recepção funcionem como esperado. Finalmente, na última parte do capítulo, o sistema final é montado e são apresentados todos os resultados obtidos quando se concretizou a comunicação com o satélite.

No capítulo 5 encontra-se a conclusão e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Rádio definido por software

Este capítulo explica o que é **Rádio Definido por Software**, assim como à sua evolução ao longo dos anos e aplicação. Vai ser explicado também o funcionamento de um três equipamentos SDR diferentes.

2.1 Introdução

Avanços modernos em tecnologias de computação, processamento digital de sinal, algoritmos de comunicações digitais, inteligência artificial, rádio-frequência, design de hardware, topologias de rede e outros elementos fizeram com que sistemas de comunicação modernos evoluíssem em plataformas complexas, inteligentes e de alto desempenho capazes de se adaptar a ambientes operacionais e entregar grandes quantidades de informação em tempo real sem erros. O último passo na tecnologia de sistemas de comunicação é o rádio definido por software, ou SDR [3].

Rádio Definido por Software é um sistema de rádio onde componentes tradicionalmente implementados em hardware como misturadores, filtros, amplificadores, entre outros são antes implementados através de software num computador ou sistema embebido [18].

Em 1982, enquanto trabalhava sob um contrato do Departamento de Defesa dos EUA na RCA (Radio Corporation of America), o departamento de Ulrich L. Rohde desenvolveu o primeiro SDR que usava o chip COSMAC (Complementary Symmetry Monolithic Array Computer). No ano de 1991 o termo SDR foi reinventado por Joseph Mitola [19].

Um dos primeiros rádios definidos por software foi o sistema SPEAKEasy [20], desenvolvido pela DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) nos Estados Unidos da América. O SPEAKEasy foi projetado para fornecer um sistema de comunicação de rádio flexível e reconfigurável para uso militar [21]. Este sistema foi testado pela primeira vez em campo no ano de 1990 e foi usado com sucesso durante a Guerra do Golfo em 1991. O sucesso do sistema SPEAKEasy abriu caminho para um maior desenvolvimento da tecnologia SDR, que é agora amplamente utilizada em aplicações militares e civis.

Além da flexibilidade, os SDRs possuem diversas vantagens sobre implementações tradicionais de rádios. São soluções mais robustas a variações de temperatura e envelhecimento dos seus componentes, visto que transferem o processamento para o domínio digital, deixando de ter o seu desempenho preso à precisão dos componentes analógicos do rádio. Também possuem toda a facilidade de desenvolvimento que um ambiente de software fornece, como ferramentas para simulação e correção de erros. Por transferir ao software grande parte do

processamento, reduz a complexidade do hardware dos rádios modernos, limitando-os apenas a implementação do front-end de RF. Isso também implica em alta integração, dada a eliminação, através do uso de um processador, de muitos dos elementos ativos e passivos do rádio, antes responsáveis pelo processamento e modulação do sinal. Todos estes fatores têm influência no custo final reduzido do produto [1].

2.2 Funcionamento geral de um SDR

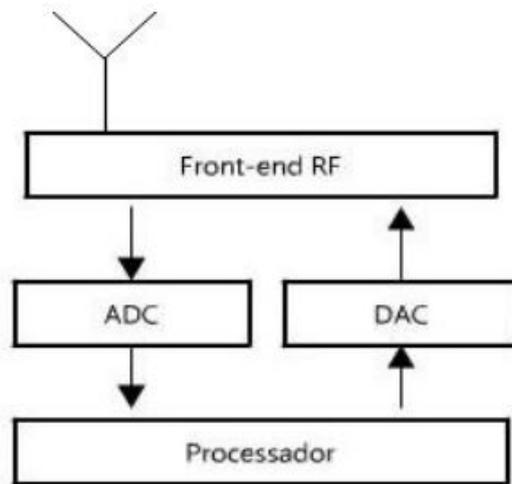


Figura 2.1: Funcionamento de um SDR [1]

A figura 2.1 ilustra o funcionamento geral de um SDR. O processador faz o processamento digital do sinal por software, a ADC faz a conversão do sinal recebido pela antena num sinal digital, a DAC faz a conversão do sinal digital num sinal analógico. O front-end RF, onde podem estar incluídos LNAs, filtros, misturadores e outros componentes, é responsável pela recepção e transmissão do sinal.

O recetor de um SDR funciona da seguinte forma:

1. Uma antena recebe sinais de rádio do ar. A antena pode ser sintonizada para uma faixa de frequência específica.
2. O sinal é deslocado para banda-base e amplificado por um LNA.
3. A ADC converte o sinal analógico recebido pela antena num sinal digital que pode ser processado por um computador.
4. O sinal digital é enviado para um DSP que aplica vários algoritmos de processamento de sinal. Estes algoritmos podem incluir desmodulação, descodificação e outras técnicas de processamento de sinal.
5. Os algoritmos de processamento de sinal são todos implementados em software, o que significa que podem ser alterados ou atualizados sem a necessidade de quaisquer modificações de hardware. O sinal enviado pelo transmissor é recuperado.

O processo de transmissão é essencialmente o inverso do processo de recepção:

1. O utilizador fornece a informação que deseja transmitir. Esta informação pode ser qualquer coisa, desde sinais de áudio ou vídeo até dados digitais.
2. A informação é processada pelo DSP que usa algoritmos de processamento de sinal para gerar o sinal que será transmitido.
3. O sinal à saída do DSP é então enviado para um conversor digital-analógico (DAC) que converte o sinal digital para sinal analógico.
4. Finalmente, ocorre o deslocamento do espectro do sinal para a frequência de transmissão pretendida. O sinal é então amplificado e enviado para uma antena que o transmite.

Ambos os processos são ilustrados por diagramas de blocos na figura 2.2.

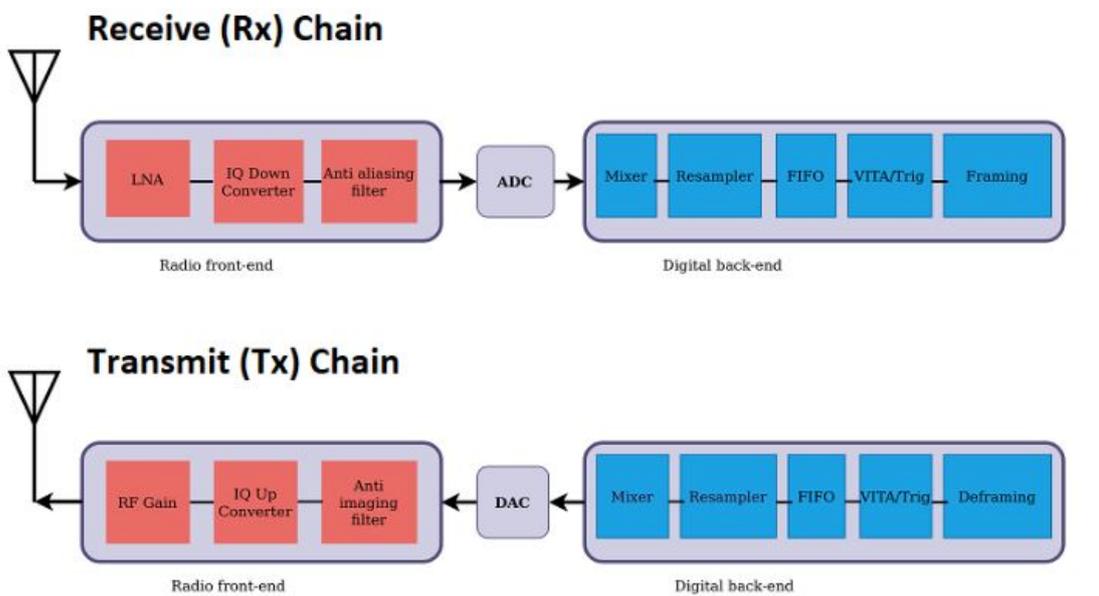


Figura 2.2: Processo de recepção e transmissão de um sistema SDR [2]

2.3 Aplicações do rádio definido por software

A tecnologia de rádio definido por software pode ser usada para várias aplicações. A mais comum é para comunicação, onde o sistema SDR pode ser usado para comunicação de voz, dados e vídeo numa vasta gama de frequências incluindo HF, VHF e UHF. O rádio definido por software possibilitou também que o campo de rádio amador ficasse mais acessível. Isto ocorreu ao permitir que utilizadores usem hardware pronto a utilizar e software open-source para construir os seus sistemas de rádio.

A partir do momento que o dispositivo SDR está conectado ao computador, é possível começar a explorar usos mais específicos desta tecnologia. Estudos identificaram outras aplicações significativas, tais como: Posicionamento Dinâmico de Espectro, Múltiplo Acesso Orientado por Oportunidade (ODMA), regulação de espectro e redução de custos (algumas implementações de sistemas SDR são mais baratas do que a sua contraparte analógica) [22].

Um pouco além das aplicações mais tradicionais, os sistemas SDR começam a aparecer em áreas com alto impacto dentro das telecomunicações. É o caso da assistência ao condutor [23], da receção de sinais GPS [24] e da análise de propagação de HF [25]. Estão também a ser encontradas potenciais aplicações nas áreas de testes de aviação [26] e na investigação sobre rádio cognitivo [27].

2.3.1 Rádio cognitivo

Rádio cognitivo é uma metodologia poderosa para realizar comunicações onde cada rádio dentro de uma rede tem a capacidade de sentir o seu ambiente, alterar o seu comportamento e aprender sobre novas situações em tempo real assim que estas são encontradas (figura 2.3).

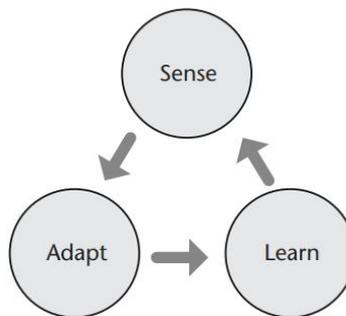


Figura 2.3: Ciclo do rádio cognitivo [3]

Como resultado da habilidade de sensação, adaptação e aprendizagem de um rádio cognitivo, este requer que o sistema de comunicação que está a operar seja altamente versátil. Portanto, a tecnologia SDR é indicada para este tipo de aplicação. Contudo, deve-se ter em consideração que nem todos os SDRs são construídos da mesma maneira. Portanto, é fundamental considerar o objetivo pretendido para o SDR, porque ao observar a figura 2.4 podemos ver que o motor do rádio cognitivo forma-se em cima da porção de processamento de banda base da plataforma SDR. Esta porção pode ser uma de várias tecnologias de computação como, sistemas de microprocessador, FPGAs, DSPs, GPUs, ARM, e outras tecnologias de computação embutidas [3].

Se estivermos a utilizar, por exemplo, uma FPGA, é importante notar que estas não são facilmente reprogramáveis. Portanto, não são adequadas para operações que mudam de

frequentemente num sistema de comunicação. Porém, a FPGA é ideal para aplicações que exijam uma velocidade de computação elevada. São por estas razões que devemos escolher o hardware de computação certo para se obter o máximo de desempenho possível no rádio cognitivo [3].

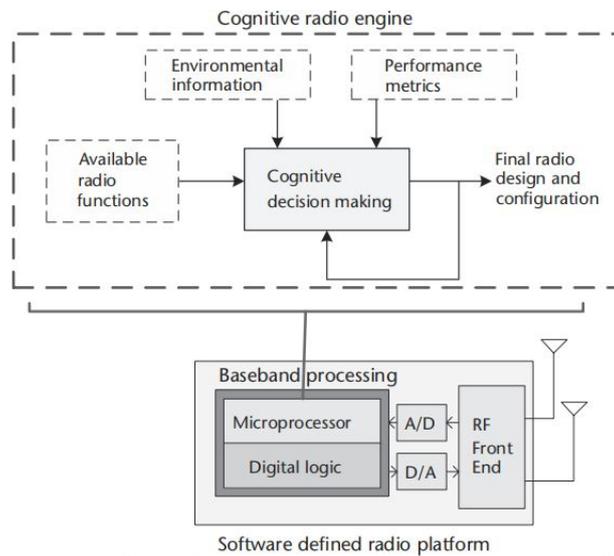


Figura 2.4: Diagrama conceitual de um motor de rádio cognitivo a operar numa plataforma de rádio definido por software [3]

Mais sobre rádio cognitivo em [28].

2.4 ADALM-PLUTO

2.4.1 Introdução



Figura 2.5: (a) Foto do ADALM-PLUTO, (b) I/O do ADALM-PLUTO [3]

Desenvolvido pela Analog Devices, o ADALM-PLUTO é uma plataforma low-cost projetado para que estudantes entendam melhor sobre rádio definido por software, rádio-frequência e comunicações. O ADALM-PLUTO pode ser usado pelo utilizador em conjunto com softwares como MATLAB, Simulink e GNU Radio para aplicar conceitos teóricos em casos práticos. Por outro lado, se o objetivo for rádio amador, o software mais indicado é o SDR Console [29].

Na figura 2.5 pode-se observar que dentro do ADALM-PLUTO se encontra um transceptor AD9363, que é responsável pela captura e digitalização dos dados RF. Em baixo do AD9363 está a Xilinx Zynq-7000, uma FPGA responsável pela comunicação entre o computador do utilizador e o transceptor.

2.4.2 Funcionamento do AD9363

Pode-se pensar no transceptor AD9363 como estando dividido em três secções, uma secção analógica de RF, uma secção analógica de banda-base, e uma secção de processamento de sinal para o recetor e para o emissor.

Após a receção, o sinal entra num LNA onde é amplificado e de seguida é enviado para o misturador (o misturador opera entre 325 MHz e 3.8 GHz mas com modificações no software pode-se expandir esta gama). Após o processo de mistura, o sinal é dividido em dois e são criadas as componentes em fase e quadratura através de uma rotação de fase do clock do misturador. O sinal é então filtrado pelo amplificador de transimpedância e filtro passa-baixo (o TIA age como um filtro de um polo) para remover aliasing, reduzir ruído e interferência. Finalmente, os sinais são convertidos pelas ADCs e após downsampling, são enviados para a FPGA que através do núcleo AXI DMAC escreve a informação na memória externa do ADALM-PLUTO.

No caso do emissor, estas operações ocorrem de maneira inversa. Os sinais em fase e quadratura são enviados pelo processador em banda-base depois de passarem por interpolação

e são convertidos pelas DACs. Os sinais são filtrados pelos filtro passa-baixo e após serem modulados, passam por um atenuador regulável. A figura 2.6 apresenta o diagrama de blocos do AD9363 [3].

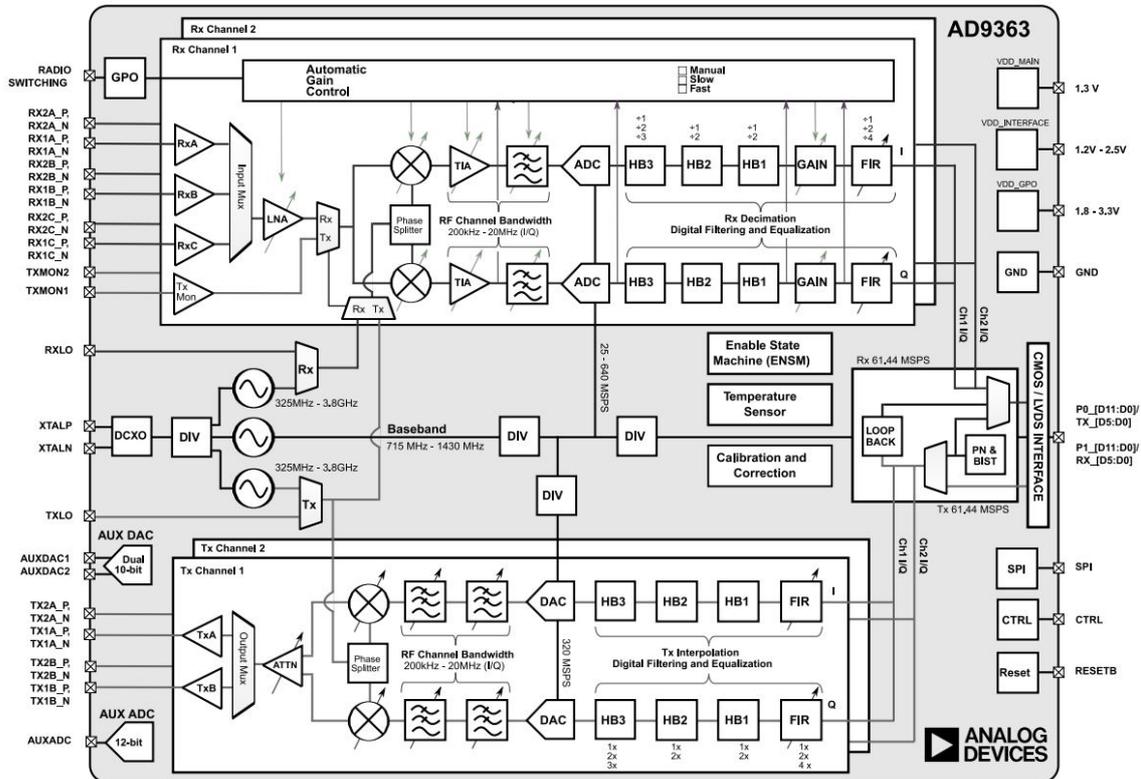


Figura 2.6: Processo de recepção e transmissão de um sistema SDR

2.4.3 Especificações do ADALM-PLUTO

Especificações	Valor típico
Alimentação (USB)	4.5 V a 5.5 V
Taxa de amostragem da ADC e DAC	65.2 kSPS a 61.44 MSPS
Resolução da ADC e DAC	12 bits
Precisão da frequência	± 25 ppm
Gama de sintonização	325 MHz a 3800 MHz
Potência de saída máxima (Tx)	7 dBm
Figura de ruído (Rx)	< 3.5 dB
Precisão de modulação Tx e Rx (EVM)	-34 dB
Proteção RF	Nenhuma
USB	2.0 On-the-Go
Núcleo	Single ARM Cortex® -A9 @ 667 MHz
Células lógicas da FPGA	28k
DSP Slices	80
DDR3L	4 Gb (512 MB)
QSPI Flash	256 Mb (32 MB)
Dimensões	117 mm \times 79 mm \times 24 mm
Peso	114 g
Temperatura	10°C to 40°C

Tabela 2.1: Especificações do ADALM-PLUTO [13]

Como foi mencionado anteriormente, pode-se configurar o ADALM-PLUTO por software de modo a aumentar a gama de frequências a que opera. No MATLAB, o comando `configurePlutoRadio('AD9364')` configura o firmware do ADALM-PLUTO para que este opere entre 70 e 6000 MHz com uma largura de banda de 56 MHz. Por padrão opera entre 325 e 3800 MHz com uma largura de banda de 20 MHz [30].

2.5 RTL-SDR

2.5.1 Introdução



Figura 2.7: RTL-SDR [4]

O RTL-SDR é um recetor SDR perfeito para o uso como um scanner de rádio baseado em computador com software livre como HSDR, SDR-Radio, Linrad, GQRX ou SDR Touch no Android. Funciona em Windows, MacOS, Linux, Android e até mesmo computadores Linux incorporados como o Raspberry Pi. É ótimo para muitas aplicações, incluindo varredura de rádio geral, controle de tráfego aéreo, rádio de segurança pública, radar de aeronaves ADS-B, radar de barco AIS, ACARS, rádio troncal, voz digital P25/MotoTRBO, POCSAG, balões meteorológicos, APRS, APT, satélites meteorológicos NOAA, satélites Meteor M2, radioastronomia, monitoramento de dispersão de meteoros, DAB, ou para uso como um panadaptador de baixo custo com um ham radio tradicional [4]. As origens do RTL-SDR derivam de dongles sintonizadores de TV DVB-T que foram baseados no chipset RTL2832U. Descobriu-se que os dados brutos de I / Q no chipset RTL2832U podiam ser acessados diretamente, o que permitiu que o sintonizador de TV DVB-T fosse convertido num rádio definido por software de banda larga através de um driver de software personalizado desenvolvido por Steve Markgraf [4].

2.5.2 Especificações do RTL-SDR

A gama de frequências utilizada pelo RTL-SDR varia de acordo com o tipo de sintonizador presente no dispositivo, bem como a forma que ele foi implementado. Em baixo encontra-se uma tabela com os vários sintonizadores usados neste SDR e a gama de frequências correspondente. Na tabela 2.3 são apresentadas outras especificações importantes.

Sintonizador	Gama de frequências
Elonics E4000	52 - 2200 MHz com uma lacuna de 1100 MHz a 1250 MHz (varia)
Rafael Micro R820T/2/R860	24 - 1766 MHz (Pode ser melhorado para 13 - 1864 MHz com drivers experimentais)
Rafael Micro R828D	Modelo RTL-SDR Blog V4: 24 - 1766 MHz. Outros modelos podem ter um corte em torno de 1 GHz
Fitipower FC0013	22 - 1100 MHz
Fitipower FC0012	22 - 948.6 MHz
FCI FC2580	146 - 308 MHz e 438 - 924 MHz (lacuna entre)

Tabela 2.2: Sintonizadores e gama de frequências usados no RTL-SDR [4]

Especificações	Valor típico
Taxa de amostragem	3.2 MS/s(máximo) ou 2.56 MS/s (estável)
Resolução da ADC	8 bits
Impedância de entrada	75 Ohm

Tabela 2.3: Outras especificações do RTL-SDR [4]

2.5.3 Chipset RTL2832U

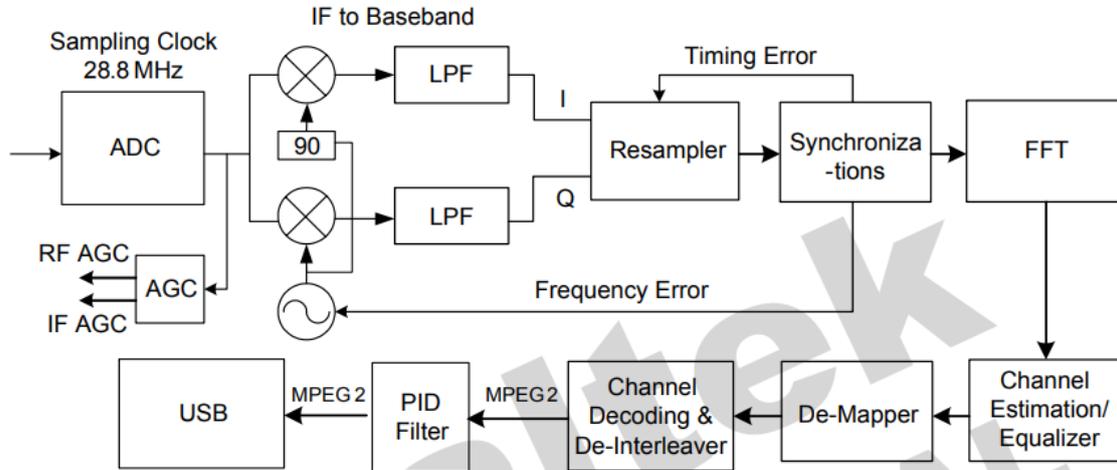


Figure 1. Block Diagram

Figura 2.8: Diagrama de blocos do RTL2832U

A ADC pode aceitar saída de sintonizador com várias larguras de banda (6, 7, 8 MHz), diferentes frequências IF (4,57M ou 36,167M), entrada Zero IF (canal I & Q) e pode realizar reversão de espectro. O circuito AGC ajusta a intensidade do sinal recebido para um nível moderado para a ADC. Este bloco suporta dois caminhos de saída e ambos são sinais modulados sigma-delta. O RTL2832U usa amostragem IF ou Zero-IF para processar os sinais recebidos. A conversão digital para baixo converte o sinal IF amostrado num sinal de banda base complexo para processamento. A frequência de conversão para baixo e filtro passa-baixo podem ser programados de acordo com diferentes frequências IF, taxas de amostragem e largura de banda do sinal. O resampler altera a taxa de amostragem do sinal recebido de uma taxa de amostragem fixa da ADC para uma taxa de amostragem OFDM de acordo com a largura de banda do sinal. Após a sincronização, o bloco FFT converte o sinal recebido no domínio do tempo para o domínio de frequência. O bloco de Estimativa de Canal/Equalização é responsável por avaliar as condições dos sinais, compensando a degradação causada pela propagação multi-path.

Finalmente, o sinal é direcionado para o bloco de Channel Decoding & De-Interleaver, onde os bits de dados de decisão são reorganizados na sequência correta e os bits de erro na sequência recebida são identificados e corrigidos. Um desembaralhador recupera a saída do decodificador para uma sequência de Transport Stream (TS)[31].

2.6 Kiwi SDR

2.6.1 Introdução



Figura 2.9: Kiwi SDR [5]

O KiwiSDR é um rádio definido por software (SDR) que abrange as faixas de frequência de ondas curtas, ondas longas, AM e várias estações de serviço público e transmissões de rádio amador em todo o mundo, dentro do espectro que vai de 10 kHz a 30 MHz. O KiwiSDR é uma placa de circuito impresso personalizada que se conecta a um computador BeagleBone Green ou BeagleBone Black. Basta adicionar uma antena, fonte de alimentação e conexão de rede. O software é fornecido num cartão micro-SD [32].

Um navegador compatível com HTML5 e uma conexão com a Internet permitem ouvir um KiwiSDR público em qualquer lugar do mundo.

2.6.2 Especificações

Especificações	Valor típico
Alimentação	5 V
Resolução da ADC	14 bits
Gama de sintonização	10 kHz até 30 MHz
FPGA	Xilinx Artix-7 A35

Tabela 2.4: Especificações do Kiwi SDR [6]

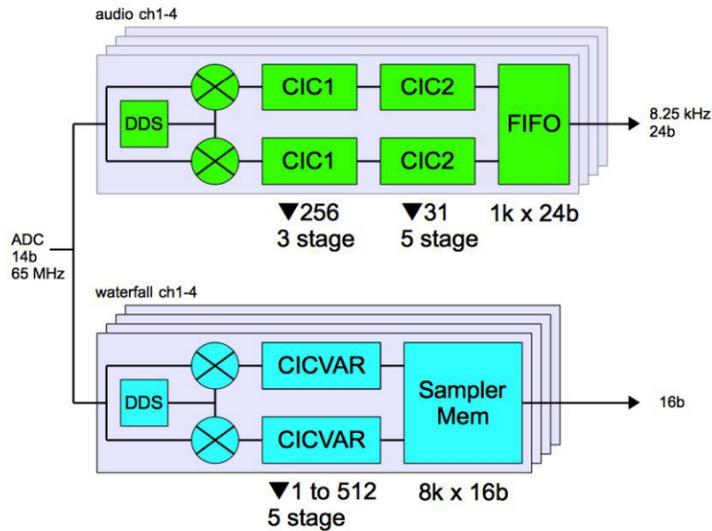


Figura 2.10: Diagrama de blocos do Kiwi SDR [6]

Nos canais de áudio e nos canais de espectrograma, os blocos DDS geram os clocks para os mixers.

O filtro CIC1 é um filtro de 3 estágios com 18 bits de saída e decimação de 256. O filtro CIC2 é um filtro de 5 estágios com 24 bits de saída e decimação de 31. Isto dá uma taxa de áudio de 8.25 kHz que é conveniente para o desmodulador de dados WSPR integrado.

Amostras de dados para o display FFT vêm diretamente da ADC com taxa de amostragem total, mas em pedaços de baixo rendimento. Um segundo espectrograma derivado dos dados do canal de áudio podem mostrar apenas a largura de banda do canal de áudio antes de qualquer filtragem de banda de passagem pós-DDC (normalmente menor que 10 kHz). Em contraste, os espectrograma do WebSDR é um FFT Zoom completo que age mais como um analisador de espectro tradicional. Isto permite que se procure mais sinais em outros lugares do espectrograma enquanto se está a ouvir uma frequência definida. No caso do Kiwi SDR, isto requer que o espectrograma seja implementado com um DDC separado. Assim, este SDR de 4 canais tem na realidade 8 canais DDC totalmente independentes. Para fornecer 12 níveis de zoom, os filtros CIC em cascata implementam a decimação em potência de base 2 de 1 a 1024. Para uma FFT de 2048 pontos, mapeamento para um display de 1024 pixels (para dar uma aparência nítida), dá um RBW de 30 kHz no zoom mínimo (span 30MHz) e RBW 15 Hz no zoom máximo (span 15 kHz). A FFT utilizada é, na verdade, de 8192 pontos devido a um "hack" realizado no FIR. Portanto, isto requer uma memória de 8 ksamples.

Após os DDCs, os dados armazenados nos FIFOs e memórias são transferidos para o Beagle onde ocorre o processamento de banda base. Para áudio isto é filtragem passa-banda, AGC, desmodulação e geração de S-meter. Para o espectrograma é a FFT e processamento de exibição.

Esta informação foi retirada das páginas 16 - 20 do manual presente em [6].

2.7 Software usado

Neste subcapítulo vão ser apresentados alguns programas capazes de trabalhar com SDRs.

2.7.1 MATLAB ou SIMULINK

O MATLAB suporta vários modelos de SDR, sendo um deles o ADALM-PLUTO. Nesta dissertação o SDR usado foi o ADALM-PLUTO, e por isso as informações seguintes focam-se mais nele.

Através da toolbox Communications Toolbox™ Support Package for Analog Devices ADALM-PLUTO Radio, é possível usar o MATLAB e SIMULINK para prototipar, verificar e testar sistemas práticos. Esta toolbox disponibiliza funções capazes de configurar o ADALM-PLUTO para que este seja capaz de desempenhar a função pretendida. Estas são as funções disponibilizadas:

- **configurePlutoRadio** - configura o ADALM-PLUTO para operar num modo de chip-set específico, o AD9363 (325 – 3800 MHz) ou o AD9364 (70 – 6000 MHz);
- **findPlutoRadio** - retorna um array informações sobre quaisquer rádios ADALM-PLUTO conectados ao host. Se a função não encontrar rádios, o array está vazio;
- **sdrdev(DeviceName)** - cria um objeto de rádio para fazer interface com o hardware de rádio identificado por DeviceName. Este objeto permite configurar o hardware de rádio e o computador host para comunicação adequada. Para receber ou transmitir dados através do rádio, deve-se criar um System Object recetor ou transmissor;
- **sdrxx(DeviceName)** - cria um System Object recetor com propriedades default que recebe dados do hardware de rádio especificado por DeviceName. O objeto recebe dados através de comunicação USB. O objeto recetor conecta-se ao hardware de rádio quando se chama o objeto. O objeto continua conectado até ser chamdado o método release;
- **sdrtx(DeviceName)** - cria um System Object transmissor com propriedades default que transmite dados para o hardware de rádio especificado por DeviceName. O objeto transmite dados através de comunicação USB. O objeto transmissor conecta-se ao hardware de rádio quando se chama o objeto. O objeto continua conectado até ser chamdado o método release;
- **designCustomFilter** - abre a aplicação ADI filter. Usa a aplicação ADI filter para alterar o design do filtro aplicado à cadeia de filtros no objeto recetor ou transmissor;
- **info** - retorna um array que contém as configurações de rádio atuais para o hardware de rádio associado;

Para mais informações acessar [33].

2.7.2 GNU Radio

O GNU Radio é um toolkit de desenvolvimento de software gratuito e open-source que fornece blocos de processamento de sinal para implementar rádios por software. Pode ser usado com hardware RF externo para criar rádios definidos por software, ou sem hardware

num ambiente semelhante a simulação.É amplamente utilizado em ambientes de pesquisa, indústria, academia, governo e hobby para apoiar a pesquisa de comunicações sem fio e sistemas de rádio do mundo real [34]. Documentação e tutoriais disponíveis em [7].

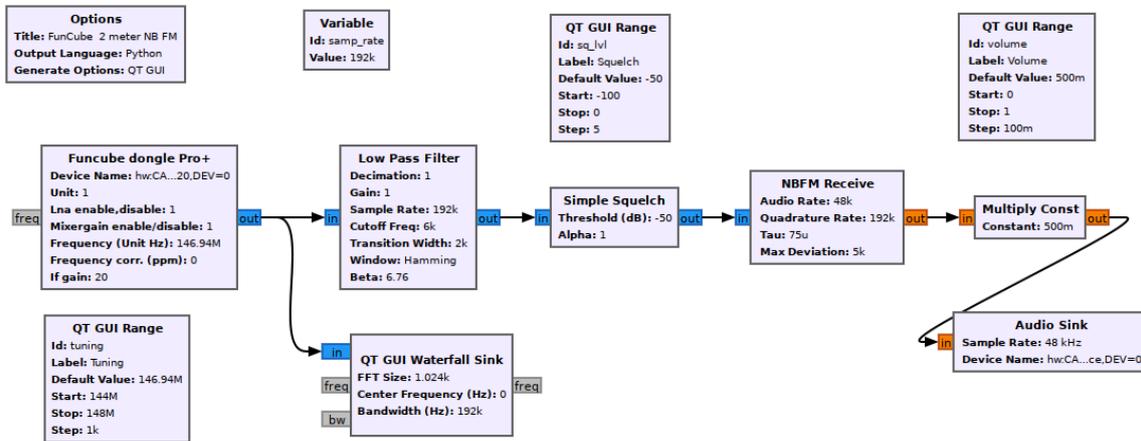


Figura 2.11: Exemplo de um recetor NBFM desenvolvido no GNU Radio [7]

2.7.3 SDR Console

O SDR Console é uma aplicação de rádio definido por software que permite aos utilizadores receber e processar sinais de uma ampla gama de frequências de rádio. Foi desenvolvido por Simon Brown, que também criou o popular software Ham Radio Deluxe.

Com o SDR Console, utilizadores podem conectar uma variedade de dispositivos SDR, incluindo modelos populares como o ADALM-PLUTO e RTL-SDR, ao computador e sintonizar sinais numa ampla gama de frequências. O software fornece um poderoso conjunto de ferramentas para analisar e processar estes sinais, incluindo um analisador de espectro, espectrograma e recursos de gravação de sinal.

O SDR Console é compatível com os sistemas operacionais Windows e Linux e está disponível numa versão gratuita e paga. A versão gratuita fornece acesso à maioria dos recursos do software, enquanto a versão paga inclui recursos adicionais, como um sistema de plug-in de processamento digital de sinal (DSP) e suporte para operação remota [8]. Este é um software muito usado por operadores de rádio amador modernos devido às ferramentas de análise e processamento de sinal que este oferece. Para além disto, ainda possui ferramentas específicas para a comunicação com o satélite usado durante esta dissertação.

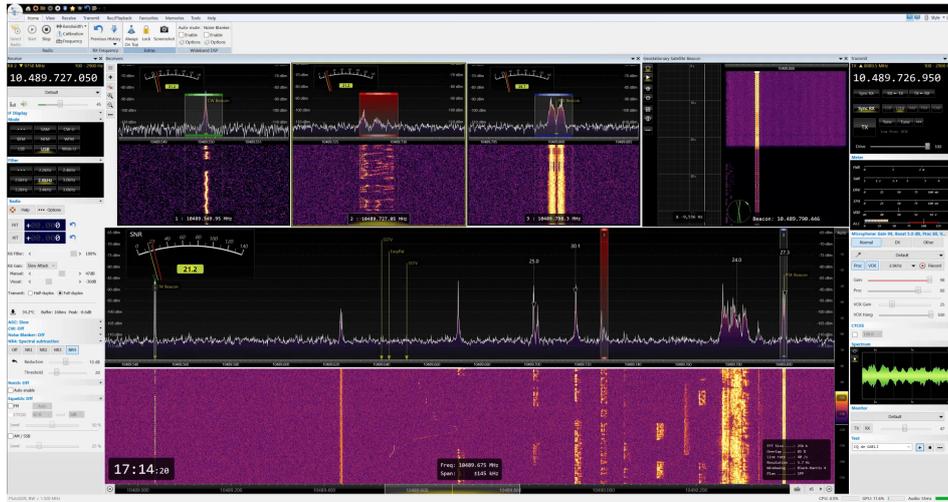


Figura 2.12: Screenshot do SDR Console enquanto um ADALM-PLUTO comunica com o QO-100 [8]

Capítulo 3

Satélite Es'hail 2 / QO-100



Figura 3.1: Satélite QO-100 [9]

3.1 Introdução

O Es'hail 2 também conhecido como Quebec-OSCAR 100 ou QO-100, é um satélite catari com órbita geoestacionária lançado do Kennedy Space Center por um Falcon 9 da SpaceX [35]. Este satélite da empresa Es'hailSat fornece televisão, voz, internet e serviços de comunicação corporativos e governamentais em toda a Europa, Médio Oriente, África, e partes da América do Norte, América do Sul e Ásia [9].

Muitos satélites de rádio amador recebem a designação OSCAR (orbiting satellite carrying amateur radio). Estes satélites podem ser usados por operadores de rádio amador para comunicação de voz e dados. Uma vez que este satélite se encontra em órbita geoestacionária, sua posição não muda em relação à Terra; portanto, é possível comunicar com o satélite a qualquer hora do dia. Contudo, como o satélite está a 35786 km acima do equador, existem desafios em termos de perdas de energia de espaço livre, precisão de apontamento da antena e latência. Como o Es'hail 2 foi o centésimo satélite lançado a transportar uma carga de rádio amador recebeu o apelido OSCAR-100 [12].

3.2 Comunicação com o QO-100

O satélite possui 24 transponders a operar na banda Ku e 11 na banda Ka para fornecer serviços comerciais. Além disso, inclui mais 2 transponders: um para transmissões narrow-band e outro para transmissões wide-band. Para o transpoder narrow-band ter a capacidade de acomodar vários canais, é necessário usar técnicas de transmissão apropriadas. As mais populares são onda-contínua (CW) e banda lateral única (SSB).

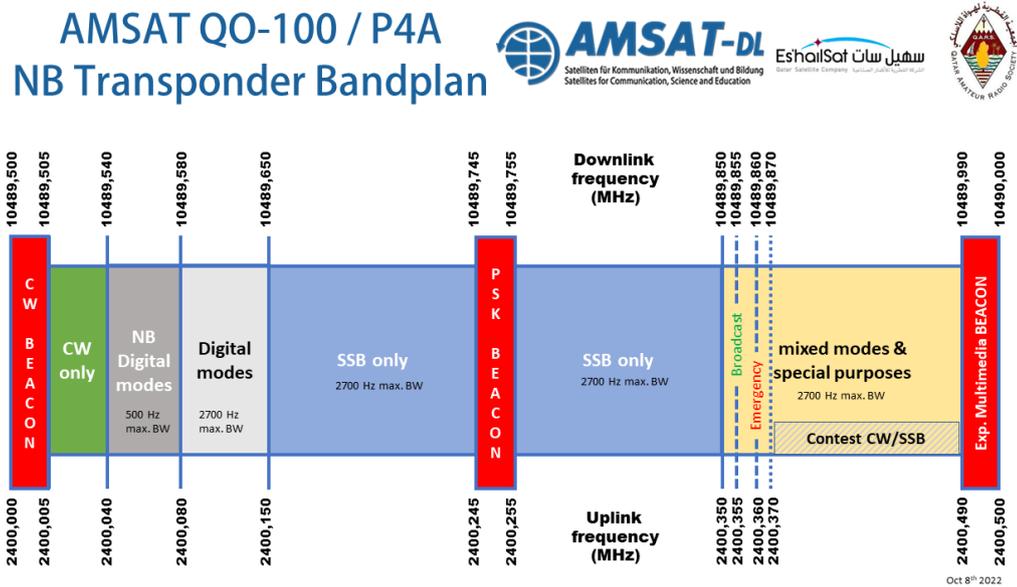


Figura 3.2: Transponder Narrow-Band [10]

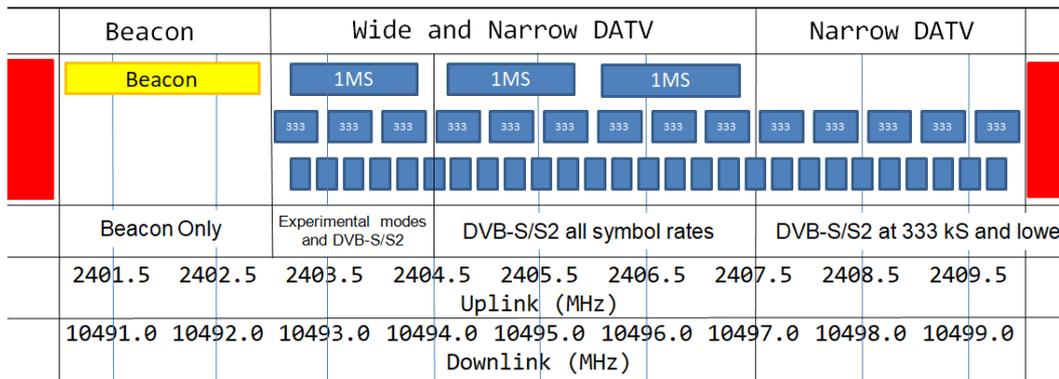


Figura 3.3: Transponder Wide-Band [11]

Nas figuras 3.2 e 3.3 pode-se observar o plano de banda utilizado pelos transponders de narrow-band e wide-band.

O transponder de narrow-band tem uplink entre 2400.000 e 2400.500 MHz com polarização RHCP e downlink entre 10489.500 e 10490.000 MHz com polarização vertical. O transponder de wide-band tem uplink entre 2401.500 e 2409.500 MHz com polarização RHCP e downlink entre 10491.000 e 10499.000 MHz com polarização horizontal.

3.3 Regras de utilização

No website da AMSAT-DL existem um conjunto de regras que os utilizadores devem respeitar quando estão a operar dentro do serviço de rádio amador do QO-100.

As mais importantes são:

- O nível do sinal transmitido deve ser menor do que o beacon.
- Não se devem fazer transmissões de sinais FM ou qualquer outra modulação que ultrapasse uma largura de banda de 2.7 kHz no transponder de banda-estreita.
- Não devem ser feitas transmissões a frequências inferiores às do beacon inferior ou a frequências superiores às do beacon superior.
- Deve ser mantida uma banda de guarda à volta dos beacons CW e PSK.
- Operação full-duplex é obrigatória!
- A operação remota pela Internet é indesejável e permitida apenas durante a comunicação de desastres.

Mais informações podem ser visualizadas em [11].

3.4 Escolha do SDR

Entre os SDRs apresentados no capítulo anterior foi escolhido o ADALM-PLUTO para realizar a comunicação com o satélite Es'hail 2. O transceptor AD9363 presente no ADALM-PLUTO possui uma largura de banda de transmissão e recepção de 20 MHz, e por isso pode facilmente fazer a recepção do downlink dos transponders de narrow-band e wide-band, após a conversão para uma gama de frequências suportada pelo ADALM-PLUTO (informação presente na tabela 2.1). O ADALM-PLUTO pode transmitir nas frequências de uplink sem qualquer tipo de conversor, o que não é o caso para o RTL-SDR e do KiwiSDR, pois estes não possuem transmissor. Apesar disso, na parte de recepção seria preciso hardware adicional para ser possível receber o QO-100 com o RTL-SDR e o KiwiSDR. O ADALM-PLUTO também suporta operação full-duplex que é mandatório segundo as regras de operação do QO-100. De notar que o software MATLAB não suporta operação full-duplex. O MATLAB é uma aplicação inerentemente single-threaded [36]. Devido a este problema, a maior parte dos operadores usam outros softwares para comunicar com o QO-100.

O software mais usado para este objetivo chama-se SDR Console, criado por Simon Riley. Este software gerencia a interação entre o utilizador e o transceptor, e implementa desmodulação e modulação em software (mais informações no subcapítulo 2.7.3).

3.5 Estação para comunicação

A alternativa mais barata para a recepção do satélite é o uso de um refletor de parabólica, como os usados para recepção de televisão por satélite, juntamente com um LNB. O LNB contém o guia de onda e conversor necessários para fazer o deslocamento do sinal proveniente do downlink do satélite entre 10.489500 GHz e 10.490000 GHz para uma frequência mais baixa e suportada pelo SDR escolhido. Se o LNB possuir um cristal oscilador de 24 MHz, o sinal será deslocado para frequências entre 1.129500 GHz e 1.130000 GHz. Se por outro lado o LNB tiver um cristal oscilador de 25 MHz, o sinal recebido será deslocado para frequências entre 739.500 MHz e 740.000 MHz. Em ambos os casos, o ADALM-PLUTO é capaz de receber sinais a estas frequências.

O tamanho do refletor depende da localização da estação e do transponder do satélite que se pretende utilizar. Neste caso, vai-se operar no transponder de banda-estreita onde é permitido comunicar com outros utilizadores através a transmissão e recepção de sinais SSB. Para realizar a transmissão é recomendado um refletor entre 60 e 90 cm e uma potência de transmissão entre 5 e 10 W. A antena de transmissão deve possuir polarização LHCP, e após a reflexão pelo refletor, o sinal é transmitido no uplink com polarização RHCP.

Para o downlink, o refletor deve medir 89 cm se a estação estiver em regiões chuvosas como Brasil e Tailândia, mas para regiões como Portugal, um refletor de 60 cm é suficiente. A antena de recepção deve ter polarização vertical [37][9].

Para usar apenas um refletor, LNBs são modificados de modo a incluir a antena de transmissão. Um exemplo está apresentado na figura 3.4.



Figura 3.4: DuoBand-Feed 2,4 / 10 GHz - TWIN LNB AMSAT da BaMaTech

Em sistemas de modulação de banda estreita como estes, os sinais transmitidos e recebidos têm larguras de banda que geralmente são inferiores a 3 kHz e, em alguns casos, pode chegar a apenas alguns Hz. Isto requer osciladores locais extremamente estáveis para evitar a sintonização constante. Para assegurar essa estabilidade, sinais de relógio externos de alta precisão e baixa deriva são ocasionalmente empregados.

As frequências de uplink estão dentro da banda WLAN 2.4 GHz e, por isso, é possível reaproveitar equipamentos WLAN como amplificadores de potência. No entanto, como se pode observar na tabela 2.1, o ADALM-PLUTO tem uma potência máxima de transmissão de 7 dBm que é insuficiente para acionar este tipo de amplificadores. É necessário então um estágio de pré-amplificação. O amplificador CN-0417, baseado no amplificador de potência ADL5606, possui cerca de 21 dB de ganho e potência máxima de saída de 1 W. Este amplificador opera numa gama de frequências entre 1800 MHz e 2700 MHz, por isso pode ser usado neste caso [12].

É possível usar um amplificador de potência sem este estágio de pré-amplificação, no entanto o preço deste tipo de amplificador é maior. A potência máxima de entrada também tende a ser menor que pode ser desvantajoso, correndo o risco de ser danificado.

A figura 3.5 mostra a arquitetura de uma estação de rádio via satélite que usa estas especificações .

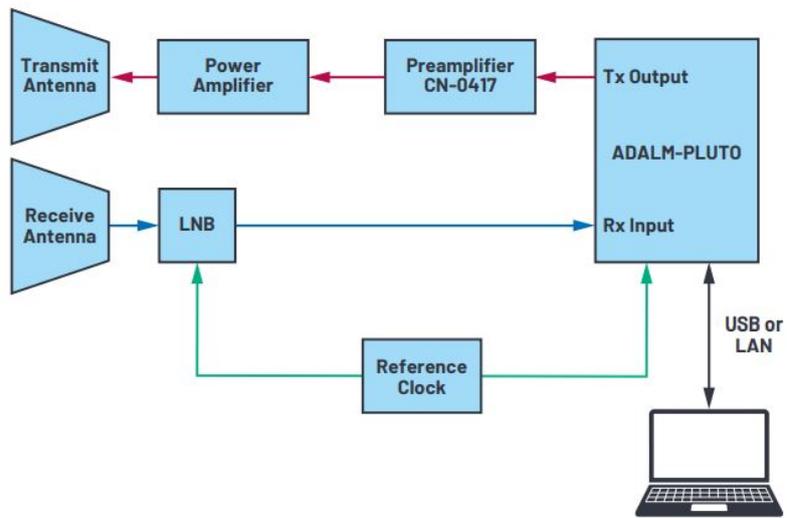


Figura 3.5: Arquitetura da estação de rádio via satélite [12]

Capítulo 4

Sistema de Transmissão e Recepção

4.1 Introdução

Este capítulo contém 3 subcapítulos. Primeiro será feito o desenho dum sistema de transmissão e recepção que irá ser usado para testar os componentes usados para realizar a comunicação com o satélite. Este sistema vai se abstrair do satélite ao usar um misturador que fará o deslocamento em frequência do espectro do sinal transmitido a 2.4 GHz para a frequência de 10.4 GHz (nesta fase decidiu-se usar valores arredondados para as frequência de transmissão e recepção). No mesmo subcapítulo é desenhado o sistema final.

No segundo subcapítulo (Implementação), será realizada a implementação de ambos os sistemas, fazendo no princípio vários testes em relação à potência de transmissão do ADALM-PLUTO, testes de transmissão e recepção de sinais AM, SSB e QPSK (usando somente um ou dois SDRs) e finalmente são feitos os teste ao protótipo do sistema.

Finalmente, no terceiro e último subcapítulo, o sistema final é montado e os resultados obtidos relacionados à comunicação do sistema final com o satélite são apresentados.

4.2 Desenho

A arquitetura da estação de rádio presente na figura 3.5 foi usada como inspiração para o sistema usado nesta dissertação para realizar a comunicação com o satélite.

Antes de se tentar comunicar com o satélite, decidiu-se numa primeira instância montar um sistema que faz a substituição do satélite por um misturador de rádio frequência. O misturador desloca o sinal transmitido a 2.4 GHz pelo sistema para 10.4 GHz, simulando assim o comportamento do satélite. Com este sistema é possível registrar o comportamento do LNB ao receber os sinais deslocados pelo misturador e, assim, resolver quaisquer problemas que sejam obtidos. Este protótipo está ilustrado na figura 4.1.

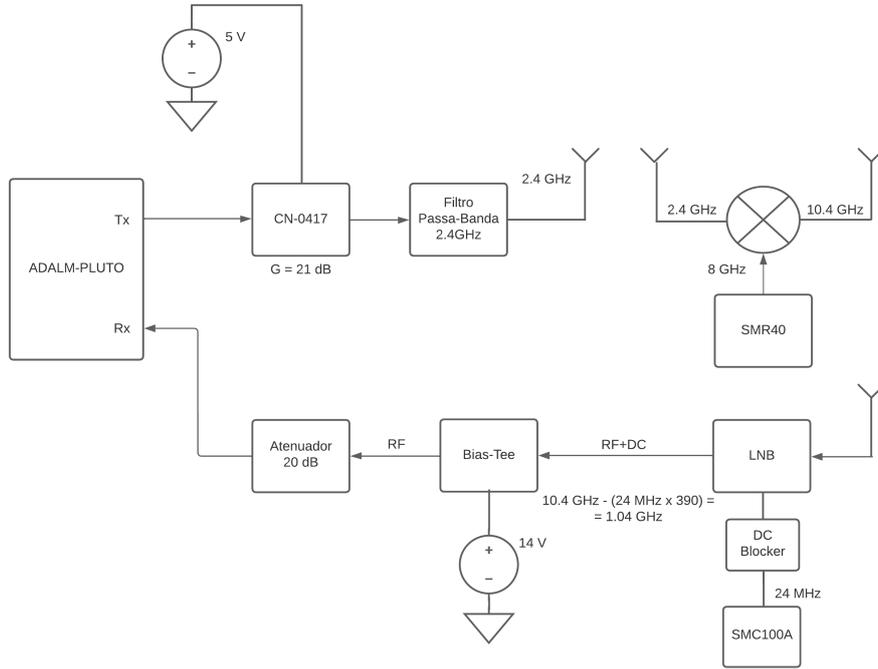


Figura 4.1: Sistema de recepção e transmissão para teste

Este sistema tem 2 ramos, um de transmissão e outro de recepção. No ramo de transmissão é usado um amplificador de potência CN-0417 da Analog Devices. Este amplificador tem um ganho de 21 dB e potência de saída máxima de 1 W. O sinal amplificado é filtrado através de um filtro passa-banda onde o seu projeto pode ser encontrado no anexo B. O sinal é irradiado por uma antena de 2.4 GHz e recebido pelo misturador ZX05-153LH-S+ da Mini-Circuits. Este misturador faz o deslocamento em frequência do sinal transmitido pelo ADALM-PLUTO, de 2.4 GHz para 10.4 GHz, após ser misturado por um sinal de 8GHz presente no conector LO. O sinal é então irradiado por uma antena de 10.4 GHz.

O ramo recetor possui logo no seu início um LNB OPTICUM LTP-04H modificado [38] (mesmo LNB da figura 3.4). Para começar, o seu oscilador local foi removido e no seu lugar é usado um sinal de referência de 24 MHz produzido por um gerador de sinal (é necessário usar um DC Blocker entre o gerador de sinal e o LNB devido à fuga de tensão DC). Uma antena para 10.4 GHz está ligada diretamente a este LNB por um guia de onda, enquanto a antena de 2.4 GHz para transmissão está anexada para ser possível usar apenas um refletor de parabólica para comunicação com satélite. O sinal recebido pelo LNB a 10.4 GHz é transportado para 1.04 GHz. Para calcular a frequência para a qual ocorreu o deslocamento do sinal recebido pelo LNB, usa-se a seguinte expressão:

$$f_{LNB} = f_{downlink} - (f_{ref} \times 390) \quad (4.1)$$

Então, por exemplo, para receber o beacon central do transponder narrow-band que tem uma frequência de downlink de 10.489750 GHz, deve-se sintonizar o ADALM-PLUTO para 1.129750 GHz.

Para ligar o LNB é necessário um Bias-T que fará com que tensão DC se propague para o LNB, mas não deixará passar nenhuma tensão para o caminho que é ligado ao ADALM-PLUTO. Finalmente, o sinal passa por atenuador de 20 dB para diminuir a sua potência e consequentemente não danificar o ADALM-PLUTO.

Após concluir que o sistema funciona, é então montado o sistema representado no diagrama de blocos da figura 4.2 que comunicará com o satélite.

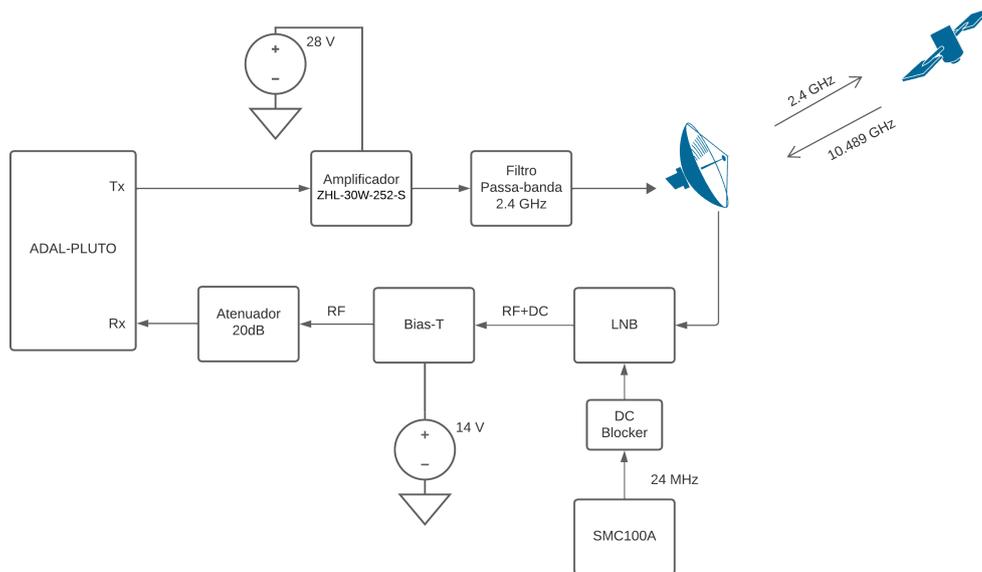


Figura 4.2: Sistema de comunicação com o satélite

O amplificador de potência CN-0417 da Analog Devices foi substituído pelo ZHL-30W-252-S, isto porque a arquitetura da figura 3.5 presume que é preciso um estágio de pré-amplificação devido à potência de entrada mínima do amplificador de potência. No entanto, este estágio não é necessário para o ZHL-30W-252-S funcionar porque a potência máxima de entrada deste amplificador é 0 dBm. Como o ADALM-PLUTO consegue um máximo de 7 dBm de potência à sua saída, o uso do CN-0417 como estágio de pré-amplificação (21 dB de ganho) não é necessário e, se for usado, pode danificar o amplificador ZHL-30W-252-S. Finalmente, foi incluído no sistema um refletor de parabólica onde será afixado o LNB, e assim fazer a comunicação com o satélite. O refletor vai focar o sinal do downlink do satélite no LNB, como também vai concentrar a energia irradiada do sinal transmitido e aumentar o ganho da antena.

Quando o ramo de recepção estiver a funcionar é esperado que o beacon PSK que tem o seu centro à frequência de downlink 10.489750 GHz, depois de passar pelo LNB, chegue ao recetor do ADALM-PLUTO a 1.129750 GHz.

Para montar os sistemas os seguintes componentes e equipamentos são necessários:

- 1x ADALM-PLUTO
- 1x Amplificador Analog Devices CN-0417
- 1x Amplificador Mini Circuits ZHL-30W-252-S

- 1x Misturador Mini Circuits ZX05-153LH-S+
- 1x Filtro Passa-Banda 2.4 GHz
- 1x LNB DuoBand-Feed 2,4 / 10 GHz - TWIN LNB AMSAT
- 1x Bias-T Pasternack PE1601
- 1x Refletor de parabólica de 60 cm
- 2x Antena 2.4 GHz
- 1x Atenuador de 20 dB
- 1x DC Blocker
- 1x Fonte de sinal SMR40 para gerar o sinal de 8 GHz
- 1x Fonte de sinal SMC100A para 24 MHz
- 2x Fonte de alimentação
- 1x Analisador de espectro
- 1x Computador com GNU Radio, MatLab e SDRConsole instalado

4.3 Implementação

Antes de partir para os testes de transmissão e recepção com o ADALM-PLUTO, fez-se um estudo sobre a potência de transmissão. Após esta experiência realizaram-se testes de transmissão e recepção de sinais de áudio com modulação AM e SSB, assim como a transmissão e recepção de um sinal QPSK. Apesar do sinal SSB ter a metade da largura de banda de um sinal AM e menor potência, também é mais difícil de recuperar o sinal enviado pelo transmissor. Este tipo de modulação também é menos suscetível a ruído e é usada para comunicações de longa distância. Resumindo, apesar da modulação AM ser mais simples, a modulação SSB oferece vantagens em termos de eficiência de largura de banda, potência e resistência a ruído que são necessárias para este tipo de aplicação.

4.3.1 Medição da potência de transmissão do ADALM-PLUTO

Sabe-se que o ADALM-PLUTO tem uma potência máxima de 7 dBm, no entanto, é necessário fazer um estudo sobre a sua potência de saída porque esta varia dependendo da frequência central assim como frequência de amostragem configurada. A única maneira de controlar a potência de saída do ADALM-PLUTO é variando a atenuação no seu transmissor, por isso este estudo vai dar-nos uma ideia da potência correspondente a cada valor de atenuação.

Para realizar esta experiência foram usados os seguintes equipamentos:

- 1x ADALM-PLUTO
- 1x Agilent N1913A Powermeter

- 1x Sensor Agilent E9301A
- 1x Computador com MATLAB instalado

Antes de fazer qualquer medição é necessário calibrar o medidor de potência. Para isso liga-se o sensor ao medidor de potência e depois de se conectar a entrada do sensor ao conector POWER REF, pressiona-se o botão CAL e seleciona-se a opção Zero+Cal.

Para medir a potência de saída do ADALM-PLUTO, conectou-se a entrada do sensor ao conector TX do ADALM-PLUTO. Através de um script MATLAB, realizou-se a transmissão de uma senoide. Este script varia a atenuação da transmissão e regista a potência de saída do ADALM-PLUTO ao usar o medidor de potência em modo remoto.

A transmissão tem então as seguintes características:

- Sinal : Senoide
- Frequência Central: 2.4GHz
- Atenuação da Transmissão : 0 dB a 89 dB

Obtiveram-se os resultados a seguir:

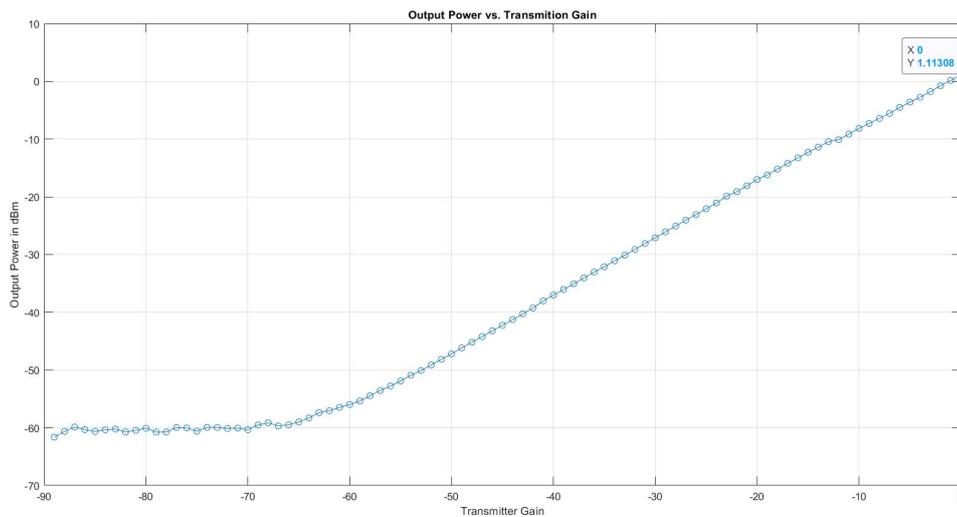


Figura 4.3: Relação entre a potência de saída e o ganho de transmissão quando o ADALM-PLUTO está configurado com uma frequência de amostragem de 2 MHz

Verifica-se que a potência de saída é diretamente proporcional à atenuação no transmissor a partir de aproximadamente 50 dB. Logo, quando se realizarem testes, deve-se usar valores de atenuação entre 0 dB e 50 dB porque para valores mais altos, a potência de saída vai se manter constante.

Ao configurar o ADALM-PLUTO com uma frequência de amostragem de 200 kHz, descobriu-se que a potência de transmissão diminuiu. Isto significa que se estiverem a ser realizados testes onde os conectores TX e RX estiverem conectados diretamente com um cabo, deve-se ter cuidado para não configurar o ADALM-PLUTO com uma frequência de amostragem que faça com que o valor da potência de transmissão ultrapasse o valor máximo de potência do receptor,

caso contrário, este pode ser danificado. O teste efetuado na figura 4.3 foi realizado com uma frequência de amostragem de 2 MHz e a figura 4.4 com uma frequência de amostragem de 200 kHz.

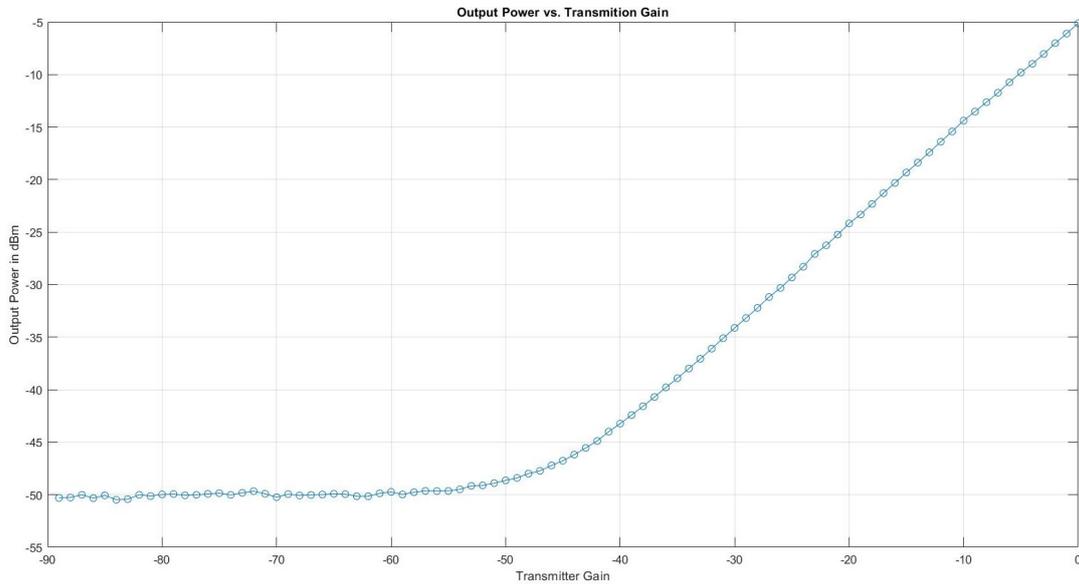


Figura 4.4: Relação entre a potência de saída e o ganho de transmissão quando o ADALM-PLUTO está configurado com uma frequência de amostragem de 200 kHz

Ao comparar as figuras podemos observar que de facto a potência de saída do ADALM-PLUTO varia em relação à frequência de amostragem. Portanto, tem de haver um cuidado adicional quando os conectores do ADALM-PLUTO estão conectados entre si por um cabo SMA e, ao fazer testes de transmissão e receção nesta configuração deve-se usar um atenuador ligado ao recetor do ADALM-PLUTO.

4.3.2 Testes de Transmissão e Recepção entre ADALM-PLUTO

Foram usados os seguintes equipamentos para realizar os testes de transmissão e recepção:

- 2x ADALM-PLUTO
- 2x Antena 2.4 GHz
- 1x Computador com GNU Radio e MatLab instalado

Para realizar estes testes foram criados fluxogramas no GNURadio para transmitir e receber um sinal AM, SSB e QPSK utilizando o Adalm-Pluto. Os sinais AM e SSB recebidos são gravado num ficheiro .WAV e, com um script de MatLab, é feita a comparação do sinal original e o sinal recebido. O sinal QPSK recebido é gravado num ficheiro que depois é carregado num script de Matlab para calcular o ACPR deste sinal. O mesmo acontece para a constelação de modo que seja possível calcular o EVM.

Todos os scripts de Matlab podem ser acessados nos anexos.

Transmissor e Recetor AM

Para realizar este fluxograma foram usadas informações de [39] e [40]. Antes de usar o Adalm-Pluto no fluxograma foram feitos testes por meios de simulação. O fluxograma da simulação de um transmissor AM está representado na figura 4.5.

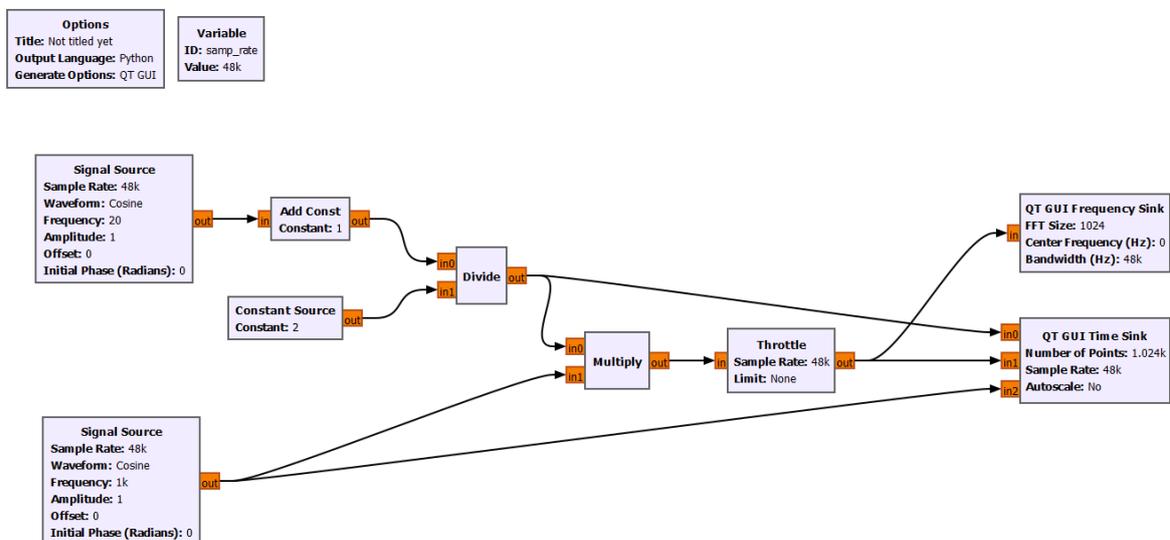


Figura 4.5: Fluxograma da simulação de um transmissor AM

Neste fluxograma estão 2 fontes de sinal que geram um sinal com 20Hz e um sinal de 1kHz (portadora). À frente do gerador de sinal de 20Hz, foi colocado um bloco de soma porque ao se misturar o sinal de 20Hz diretamente com o sinal de 1kHz vai ser obtido o sinal representado na figura 4.6.

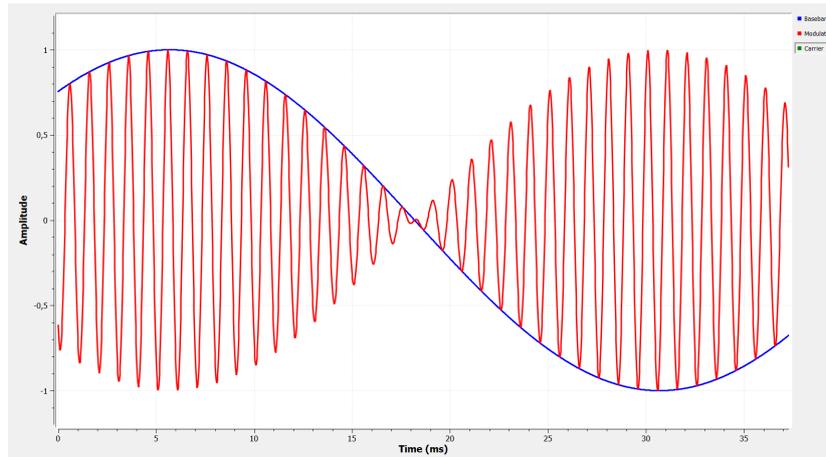


Figura 4.6: Sinal obtido pela mistura de uma senoide de 20Hz com uma senoide de 1kHz

Repare-se que sempre que a amplitude do sinal em banda-base passa por 0, o sinal modulado em amplitude muda de fase. Ao somar 1 após a geração do sinal em banda base, este sofre um offset e passa a variar a sua amplitude entre 2 e 0, o que resolve o problema de fase do sinal modulado em amplitude. A figura 4.7 mostra o sinal gerado com estas alterações.

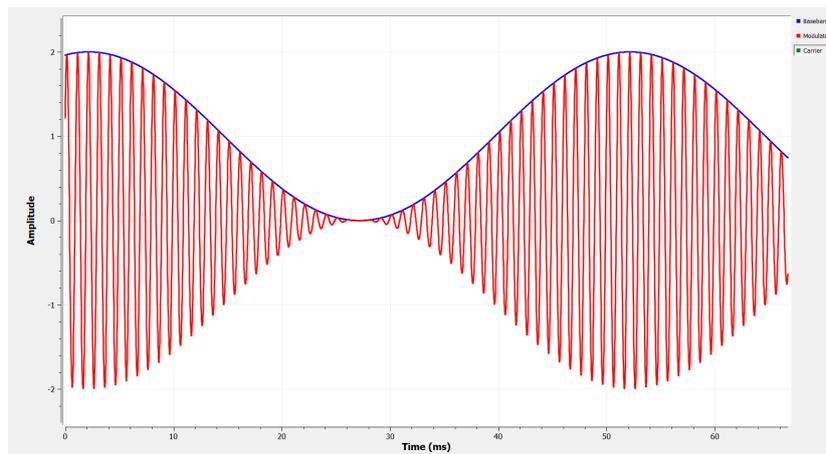


Figura 4.7: Sinal obtido pela mistura de uma senoide de 1kHz com uma senoide de 20Hz com amplitude a variar entre 0 e 2

A partir do momento que a amplitude do sinal em banda-base varia entre 0 e 2, a amplitude do sinal AM vai variar entre -2 e 2 o que não é desejado. Então é adicionado um bloco que vai fazer a divisão por 2 do sinal em banda-base com offset na amplitude. Finalmente, o sinal AM criado pelo fluxograma da figura 4.5 é mostrado na figura a seguir.

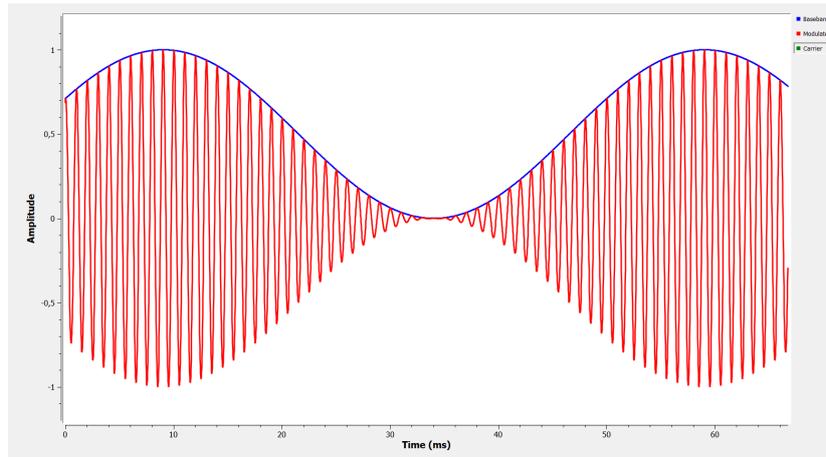


Figura 4.8: Sinal AM

Para realizar a transmissão com o Adalm-Pluto vai ser retirado o bloco que faz a mistura entre os dois sinais e o gerador do sinal da portadora, porque a mistura vai ser feita pelo SDR que vai também gerar a onda portadora com o seu oscilador local. Neste caso, o sinal a ser modulado não vai ser uma senoide de 20Hz, mas um sinal gerado pelo microfone do computador ou um sinal de áudio previamente gravado. O bloco de throttle também foi retirado devido ao facto deste só poder ser usado quando não há hardware presente no fluxograma. O fluxograma do transmissor AM usando o ADALM-PLUTO está representado na figura 4.9.

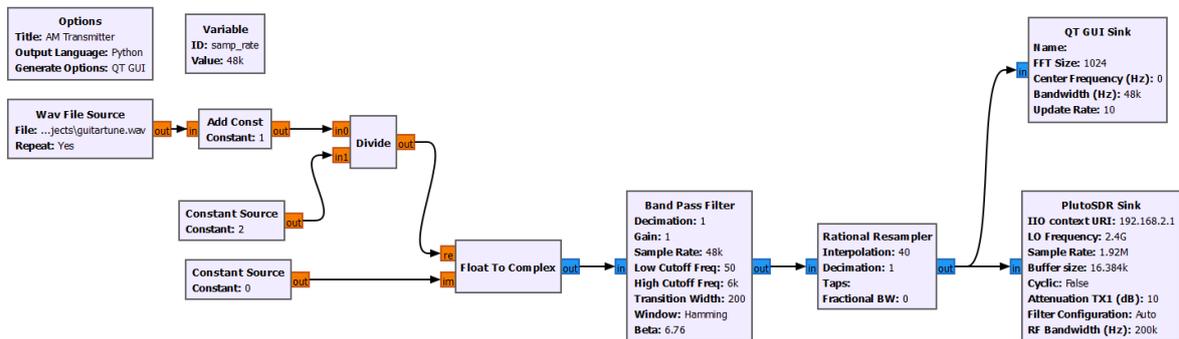


Figura 4.9: Transmissor AM com ADALM-PLUTO

A arquitetura do recetor do Adalm-Pluto é Zero-IF, isto significa que o Adalm-Pluto usa um oscilador local para misturar o sinal sintonizado com um LO na mesma frequência da portadora ou muito próxima desta para converter diretamente o sinal sintonizado para banda-base. Isto elimina a necessidade de um estágio de IF. À saída do recetor vai haver um sinal I/Q, onde a componente imaginária é uma versão da componente real desfasada em 90° . A figura 4.10 mostra o fluxograma do recetor AM usando o ADALM-PLUTO.

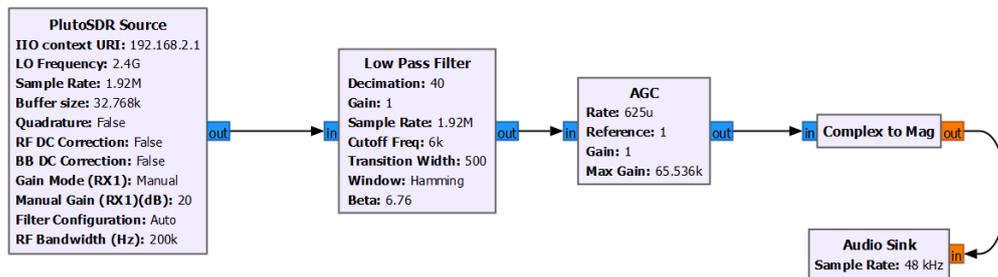


Figura 4.10: Recetor AM

O filtro passa-baixo é usado para remover todas as componentes fora da banda-base e também para fazer decimação, de modo que o sinal fique com uma frequência de amostragem adequada. Após o filtro passa-baixo, o sinal passa por um bloco de AGC. Para obter o sinal original deve-se usar o bloco "Complex to Mag". Este bloco calcula a magnitude de amostras complexas. Após isto, o sinal é gravado num ficheiro e também é reproduzido pelos altifalantes do computador.

Para testar a qualidade da transmissão e receção, fez-se a transmissão de um ficheiro de áudio com 15 segundos de duração onde se varia a atenuação do transmissor enquanto o recetor tem o ganho no modo AGC Fast Attack. Após este teste, o ganho do recetor foi variado entre 0 e 50dB enquanto a atenuação do transmissor permaneceu a 10dB.

Quando a atenuação no transmissor variou e o ganho no recetor permaneceu o mesmo obtiveram-se os seguintes resultados:

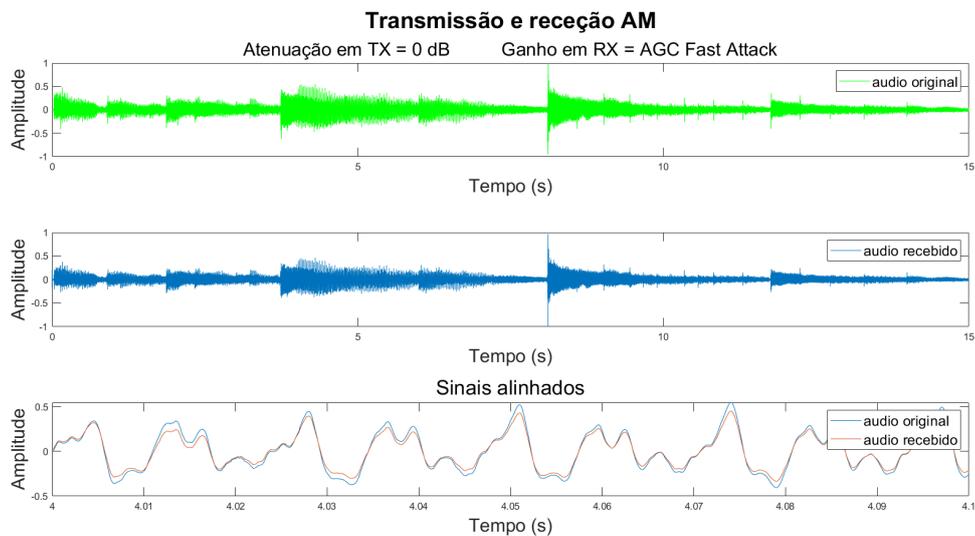


Figura 4.11: Atenuação no transmissor de 0dB.

A figura 4.11 compara o sinal original com o recebido quando a atenuação no transmissor tem o valor de 0 dB. Observa-se que na porção ampliada, os sinais coincidem quase perfeitamente e por isso conclui-se que o sinal foi recebido com qualidade. Este resultado repete-se até que a atenuação tenha o valor de 20 dB.

A partir de 30 dB, figura 4.12, o sinal recebido começa a degradar-se. Na porção ampliada observa-se que amplitude do sinal recebido é mais pequena do que o sinal original. Além disso, existem picos de amplitude no sinal recebido que não existem no sinal original.

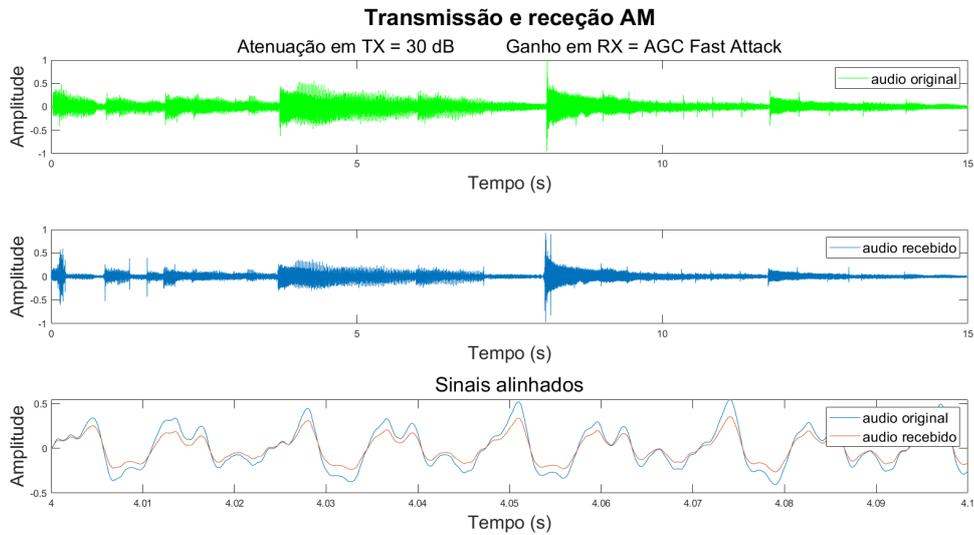


Figura 4.12: Atenuação no transmissor de 30dB.

Quando os sinais recebidos com atenuação entre 0 e 30 dB (sinais mostrados nas figuras anteriores) são reproduzidos, é possível ouvir um tom por detrás do sinal de áudio esperado. À medida que a atenuação aumenta, o tom fica cada vez mais baixo.

A atenuação no transmissor foi aumentada para 40 dB na figura 4.13. Como era esperado, a amplitude do sinal recebido diminui significativamente em relação ao original. Entre 9 e 13 segundos, o sinal recebido está distorcido e quando é reproduzido ouve-se ruído ao invés do som original. Com a diminuição da amplitude ocorre a diminuição do volume.

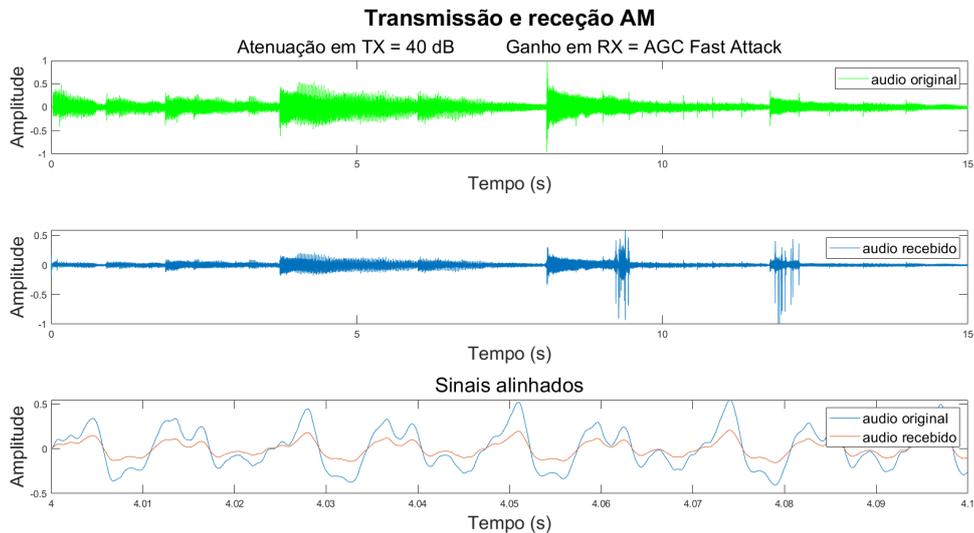


Figura 4.13: Atenuação no transmissor de 40dB.

Devido à grande atenuação, já não é possível ouvir o tom por detrás do sinal que foi descrito anteriormente.

Na figura 4.14 o sinal transmitido é atenuado em 50 dB. Em comparação ao sinal original, a amplitude do sinal recebido é quase nula principalmente na porção ampliada e quando é reproduzido, nota-se que a sua potência é muito baixa o que torna ruído muito aparente.

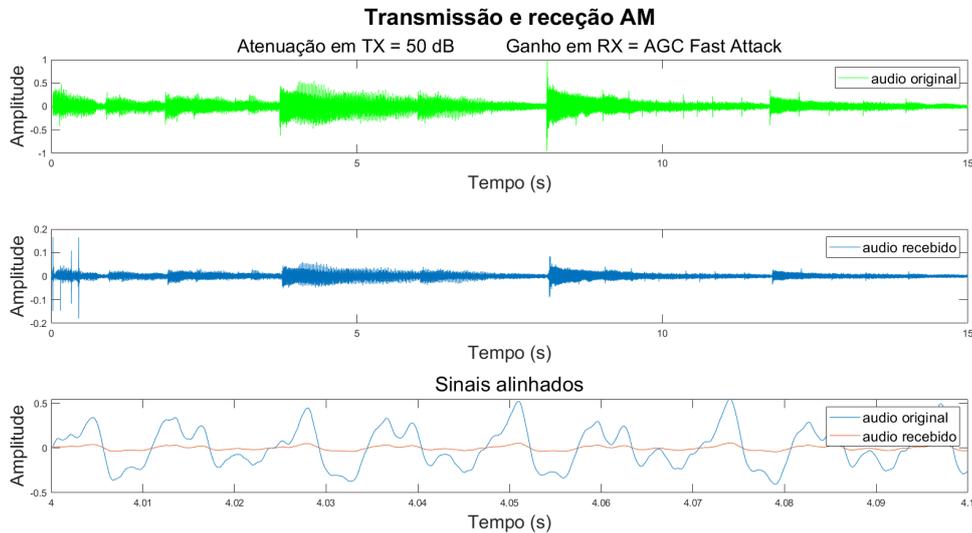


Figura 4.14: Atenuação no transmissor de 50dB.

A elevada atenuação resulta numa potência de saída significativamente reduzida, o que, por consequência, resulta numa amplitude muito baixa do sinal recebido. Enquanto se realizavam os testes percebeu-se que os picos de amplitude que não existem no sinal original e que estão presentes nos sinais recebidos das figuras 4.12, 4.13 e 4.14 ocorrem devido ao bloco AGC presente no fluxograma do recetor. Portanto para este modo de ganho no recetor (AGC Fast Attack), como veremos também no capítulo sobre transmissão e recepção de um sinal SSB, tirar o bloco AGC do fluxograma pode ser favorável para eliminar estes picos. No entanto, vai-se observar uma diminuição da amplitude do sinal para determinados valores de atenuação no transmissor.

Fez-se novamente a transmissão e recepção do sinal, mas desta vez mantendo a atenuação no transmissor a 10 dB e variando o ganho do recetor.

Com o ganho do recetor a 0 dB, o sinal recebido coincide com o original na porção ampliada, mas no geral apresenta menor amplitude como mostra a figura 4.15. O tom que era possível ouvir quando o sinal era atenuado a 10 dB e o recetor estava configurado com o modo de ganho AGC Fast Attack desapareceu.

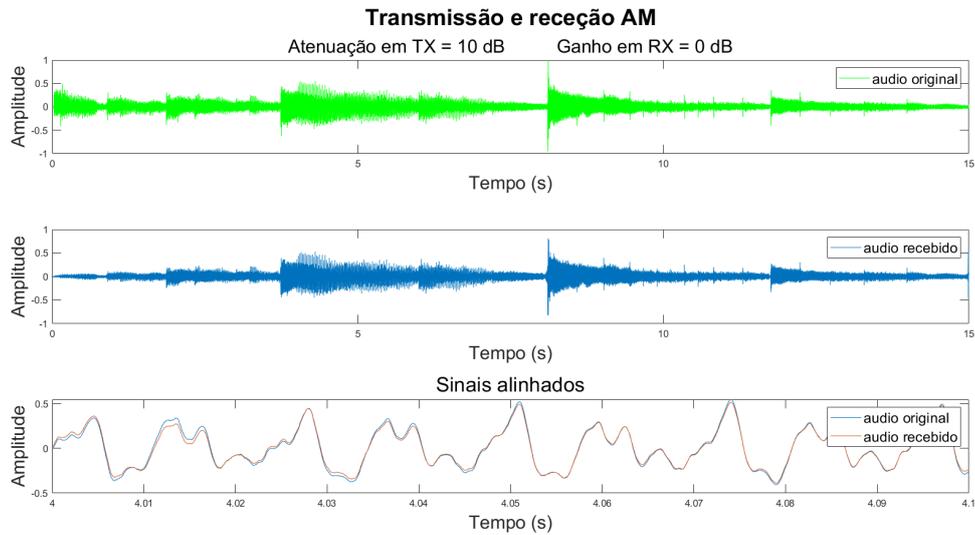


Figura 4.15: Ganho no recetor de 0dB.

Até 30 dB de ganho no recetor, o sinal recebido permaneceu parecido ao sinal recebido apresentado na figura 4.15, exceto nas zonas de menor amplitude. À medida que o ganho no recetor aumentou, essas zonas que apresentavam menor amplitude, como entre 0 e 1 segundos, foram amplificadas até que coincidiram quase perfeitamente com o sinal transmitido. Quando reproduzidos é possível perceber que a potência do sinal aumentou em relação ao ruído.

Quando se aumentou o ganho para 40 dB, o sinal recebido começa a saturar, perdendo assim muita qualidade. Na figura 4.16 é possível visualizar este acontecimento, principalmente na porção de sinal ampliada.

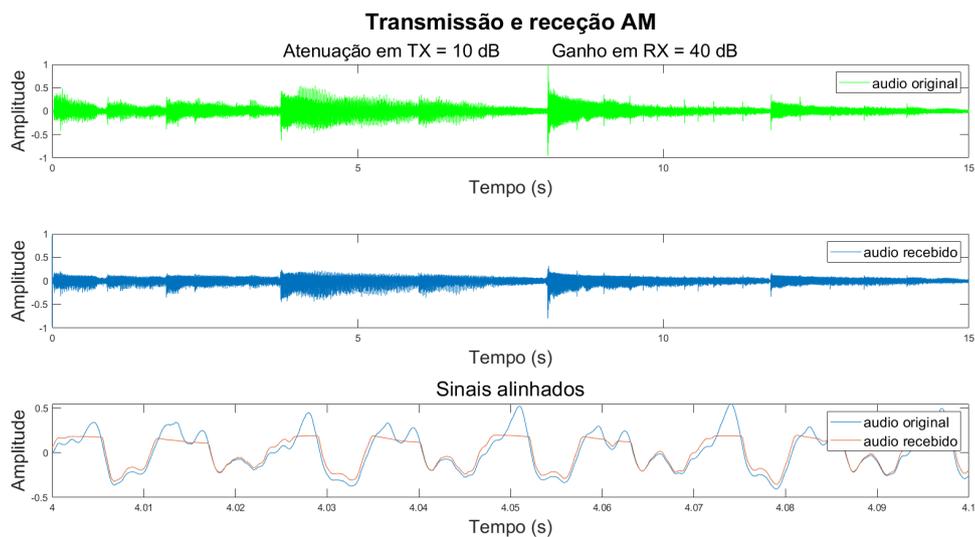


Figura 4.16: Ganho no recetor de 40dB.

Após aumentar o ganho do recetor para 50 dB, o sinal é completamente destruído como se pode observar pela figura 4.17. Quando reproduzido, aquilo que se ouve mais é ruído e no fundo é possível ouvir o sinal de áudio esperado com o volume muito baixo. Isto indica um SNR muito baixo.

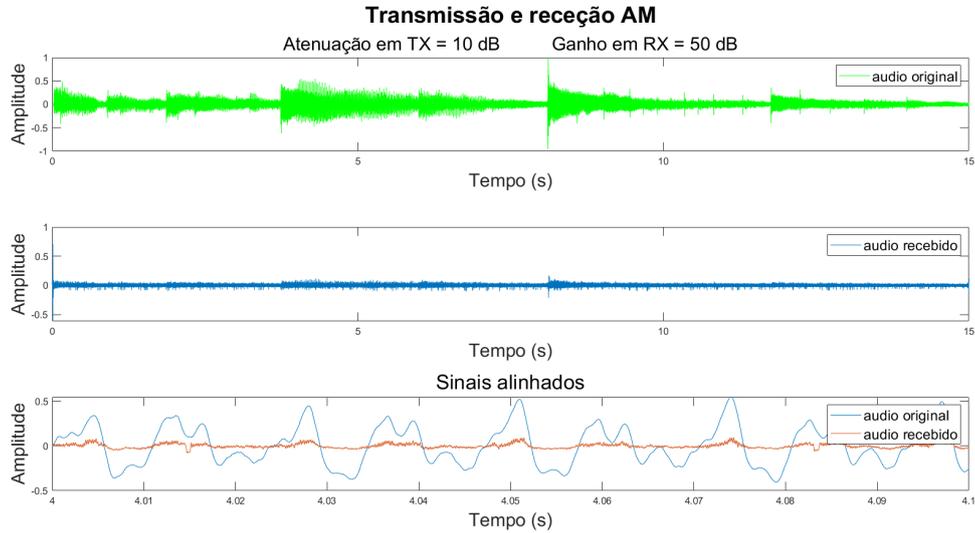


Figura 4.17: Ganho no recetor de 50dB.

Nestes testes apenas se removeu o bloco de ganho automático presente no fluxograma, alterou-se o modo de ganho do recetor para manual e deixou-se a atenuação do transmissor constante a 10 dB. Observando o fluxograma do recetor, não se vê nada que justifique o comportamento presente nas figuras 4.16 e 4.17. Então, este comportamento pode surgir devido à potência do sinal transmitido ser muito grande para o valor de ganho no recetor escolhido, o que faz com que o LNA responsável em amplificar o sinal recebido deixe de ser linear.

Transmissor e recetor SSB

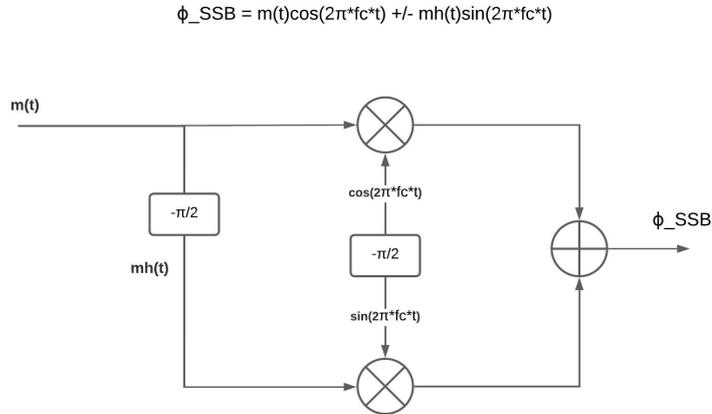


Figura 4.18: Método de faseamento para geração de um sinal SSB

Para construir estes fluxogramas foram usadas informações de [41] e [42]. A figura 4.19 representa o fluxograma para a simulação do transmissor SSB. Para fazer a modulação foi usado o método de faseamento que está representado na figura 4.18. Ao usar a transformada de Hilbert é gerado um sinal real e um sinal imaginário que é a versão desfasada a 90º da entrada. As componentes real e imaginária são separadas para haver a possibilidade de gerar um sinal LSB ou USB. Para gerar o sinal LSB é preciso girar a fase da componente imaginária do sinal por 180º, ou seja, tem-se de multiplicar este sinal por -1. Após este procedimento, ambos os sinais são recombinados num sinal complexo.

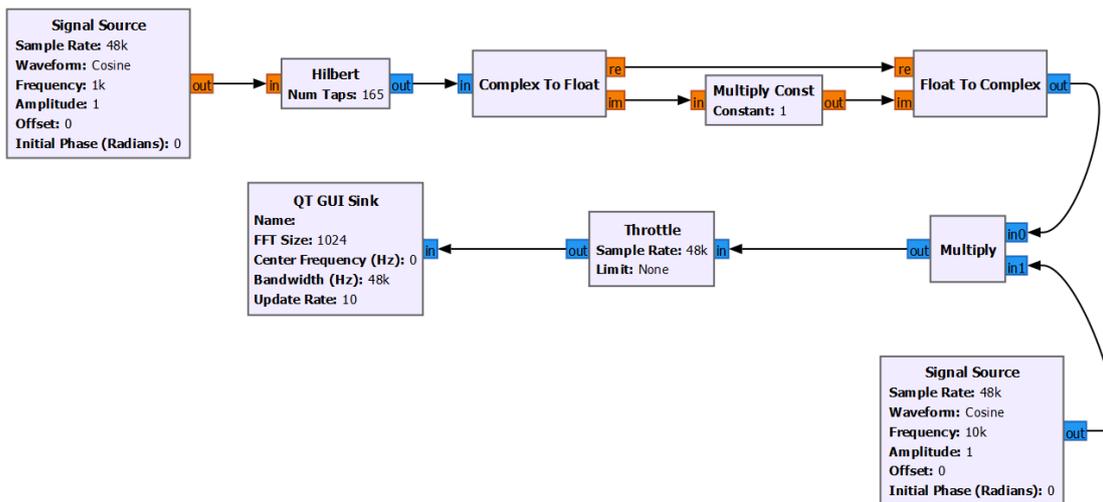


Figura 4.19: Simulação do transmissor Single Side Band.

Nas figuras 4.20 e 4.21 estão representadas as simulações para as transmissões USB e LSB, respetivamente. Pode-se observar que em ambas as figuras, as bandas opostas aparecem porém

estão suprimidas (LSB para transmissão USB e USB para transmissão LSB).

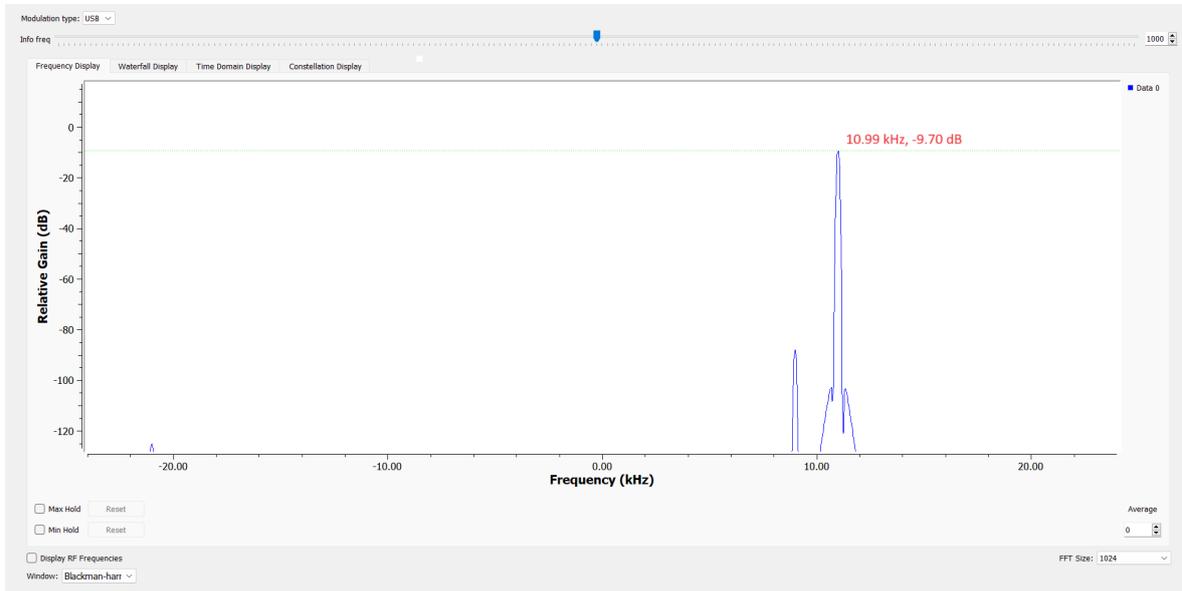


Figura 4.20: Simulação da transmissão Upper Side Band.

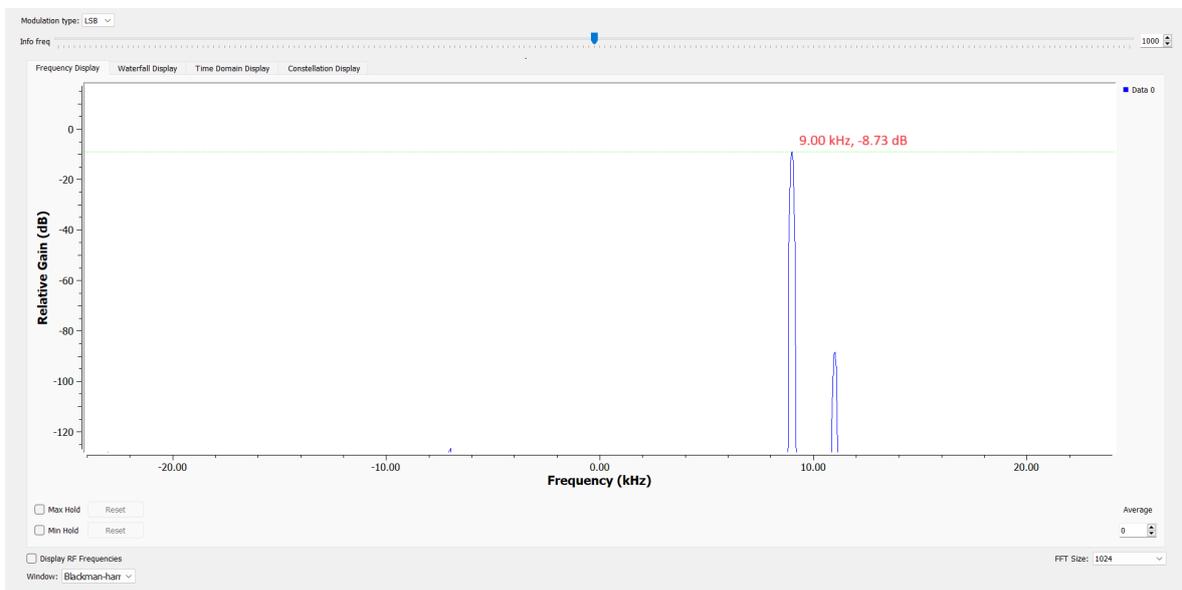


Figura 4.21: Simulação da transmissão Lower Side Band.

A figura 4.22 representa o fluxograma para o transmissor SSB. Vai ser transmitido um ficheiro de áudio, por isso foi usado um filtro passa-banda com frequência de corte inferior a 50 Hz e frequência superior de corte a 6 kHz. Ao fazer transmissão de voz, um filtro com frequência de corte inferior igual a 100 Hz e frequência de corte superior igual a 2.9 kHz seria suficiente. Para garantir a frequência de amostragem adequada no sinal que entra no bloco de transmissão do Adalm-Pluto, ele passa por um bloco de resampling com um fator

de interpolação de 40.

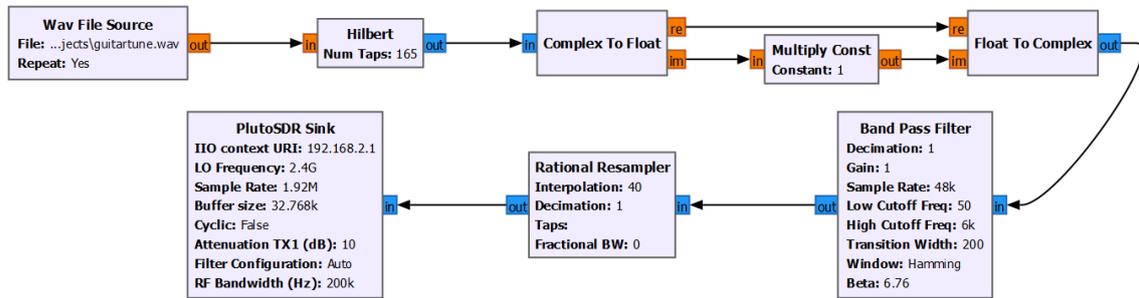


Figura 4.22: Transmissor Single Side Band.

Na figura 4.23 está representado o recetor. O sinal à saída do bloco recetor é filtrado e depois a frequência de amostragem é ajustada para 48 kHz. Os sinais I e Q são então separados para passar por blocos de transformada de Hilbert. A componente imaginária à saída do primeiro é somada à componente real à saída do segundo para obter o sinal original. Para o caso da receção de um sinal LSB teremos de subtrair. De notar que o sinal Q entra num bloco de transformada de Hilbert para compensar o atraso, neste estágio não existe transformação. Antes do sinal ser reproduzido pelo dispositivo de som do computador e gravado num ficheiro .WAV, é amplificado por um bloco de multiplicação para ser possível controlar o volume.

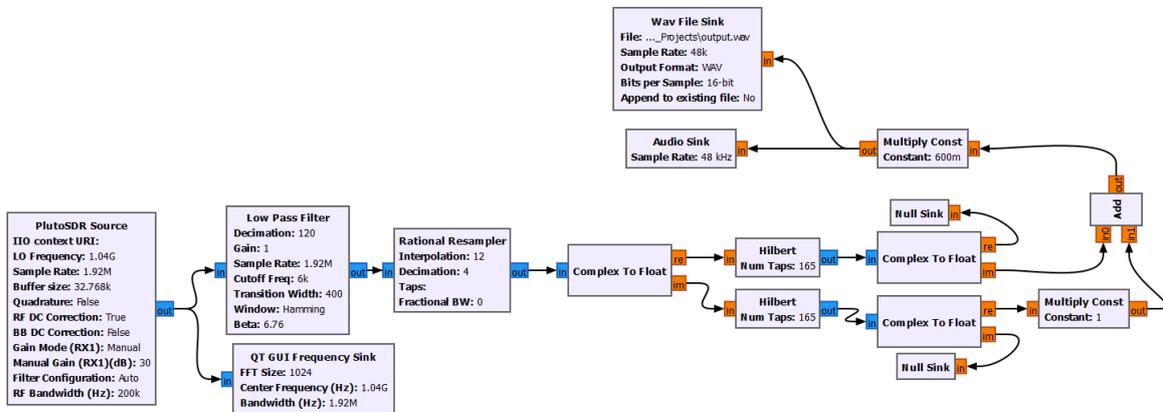


Figura 4.23: Recetor Single Side Band.

Repetiu-se o último teste que se fez à transmissão e receção AM. Manteve-se constante a atenuação no transmissor e variou-se o ganho no recetor. Os primeiros testes foram realizados com um bloco AGC presente no fluxograma, depois este bloco foi retirado.

Na figura 4.24, está apresentada a comparação do sinal original com o recebido quando o recetor foi configurado com 0 dB de ganho. Na porção ampliada, entre 1.8 e 1.9 segundos, a amplitude é muito baixa em relação ao sinal original. Porém, se o sinal for reproduzido é possível ouvi-lo com clareza e sem ruído aparente.

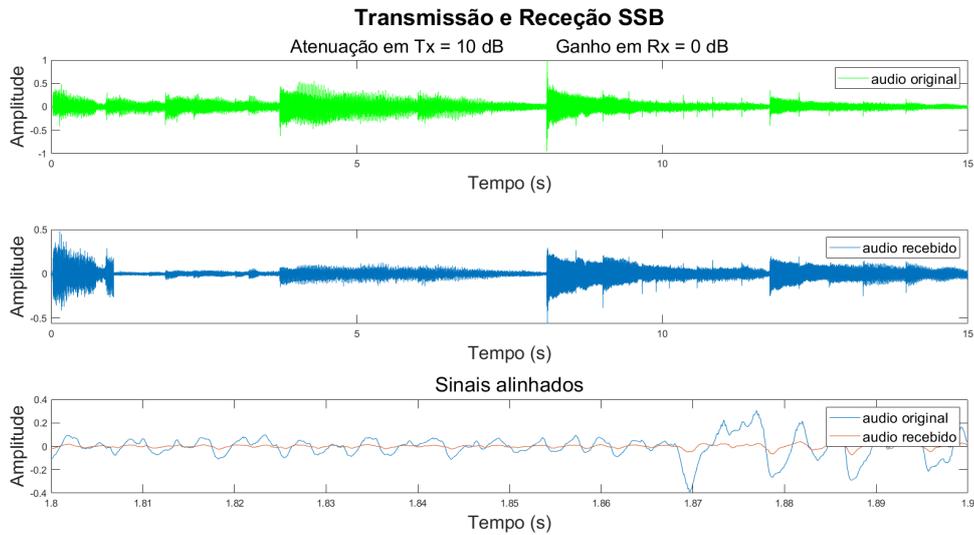


Figura 4.24: Ganho no recetor de 0dB.

Após aumentar o ganho do recetor até 10 dB na figura 4.25, apesar do sinal recebido estar mais parecido com o original nota-se que logo no primeiro segundo do sinal existe um aumento de amplitude anómalo que rapidamente diminui. Isto ocorre em ambas as figuras 4.24 e 4.25 porque o sinal foi capturado algum tempo depois de ser transmitido tendo sido posteriormente alinhado com o original usando o Matlab. Então, o primeiro segundo dos sinais apresentado nestas figuras corresponde ao último segundo dos sinais capturados e, por isso, essa porção foi influenciada pelo bloco AGC. Na região ampliada da figura 4.25, entre 8.1 e 8.2 segundo, o bloco AGC já tinha começado a fazer efeito o que faz com que o sinal apresente estas distorções. Este fenómeno ocorre para todas as partes de maior amplitude presentes no sinal original.

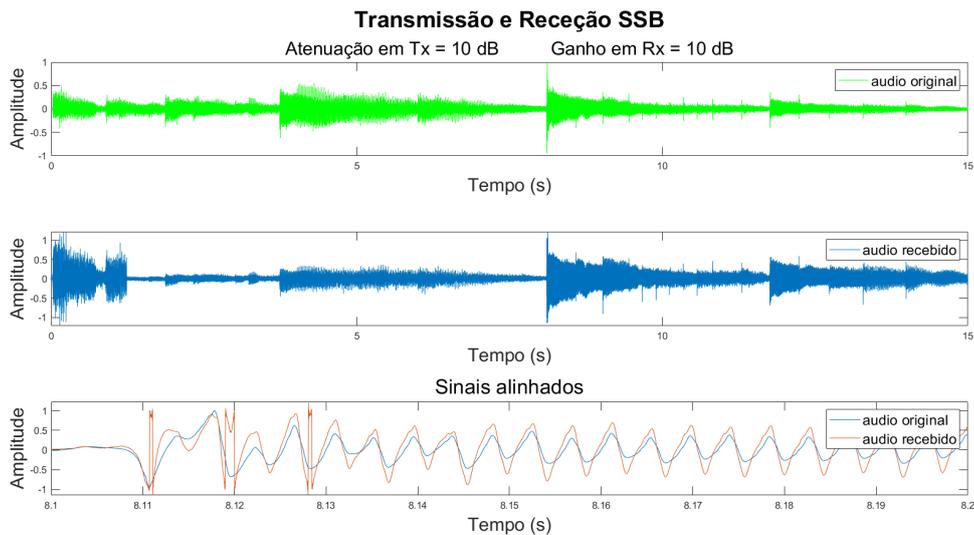


Figura 4.25: Ganho no recetor de 10dB.

Com 20 dB de ganho o sinal recebido tem o aspeto apresentado na figura 4.26. O bloco AGC causa uma distorção significativa em todas as regiões do sinal recebido que correspondem a regiões de grande amplitude no sinal original, como pode ser claramente observado na secção ampliada. Nesta região não existe qualquer semelhança entre o sinal recebido e o original. Este fenómeno é conhecido na língua inglesa como *"audio clipping"* que é um tipo de distorção que ocorre quando um sinal de áudio excede a amplitude máxima que pode ser representada ou gravada com precisão.

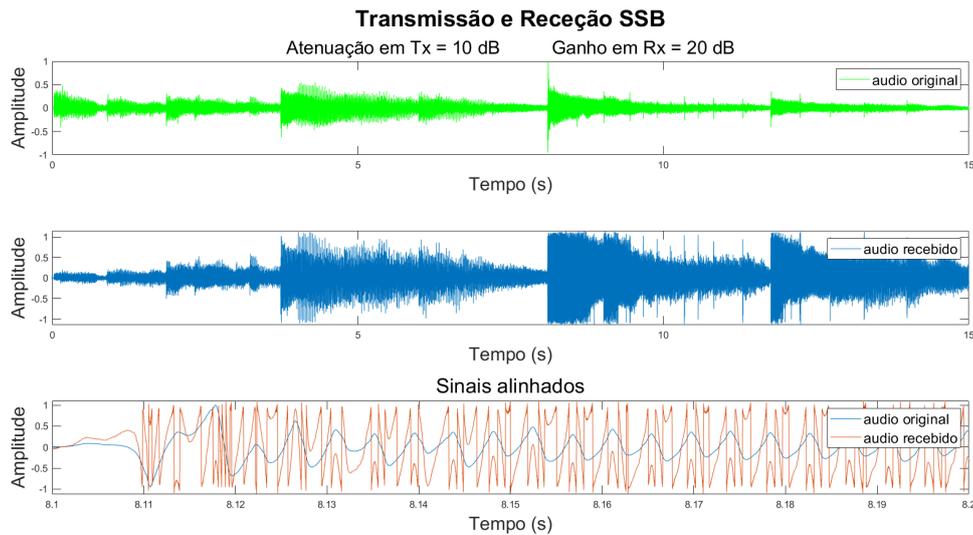


Figura 4.26: Ganho no recetor de 20dB.

Devido a este fenómeno, o bloco de AGC foi retirado do fluxograma e foi usado um bloco de multiplicação para ser possível controlar o nível da amplitude do sinal recebido. Dentro do bloco de multiplicação foram usados valores entre 0 e 1 para fazer o controlo do volume.

Começou-se por utilizar o valor de 0.5 dentro do bloco. Isto significa que vai ocorrer uma atenuação no sinal recebido.

Quando se configurou o recetor do ADALM-PLUTO com um ganho de 10 dB, o sinal que está presente na figura 4.27 foi recebido. A amplitude deste sinal é muito baixa em relação ao original, por isso é necessário aumentar o ganho do recetor.

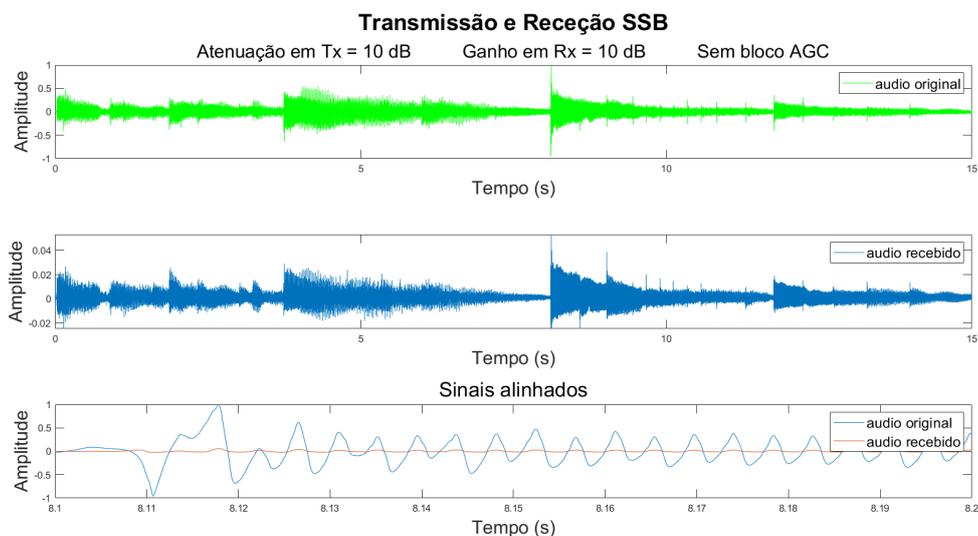


Figura 4.27: Ganho no recetor de 10dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 0.5

Após aumentar o ganho para 20 dB não se notou uma diferença muito grande na amplitude. No entanto, quando foi aumentada para 30 dB houve um aumento considerável na amplitude do sinal recebido que está apresentado na figura 4.28. Pode-se observar que na porção ampliada, o sinal recebido é praticamente idêntico ao original na regiões de menor amplitude. Quando é reproduzido, este sinal de áudio apresenta uma amplitude suficientemente alta para que não seja preciso fazer qualquer ajuste ao volume do programa onde é reproduzido. Também não é possível ouvir ruído.

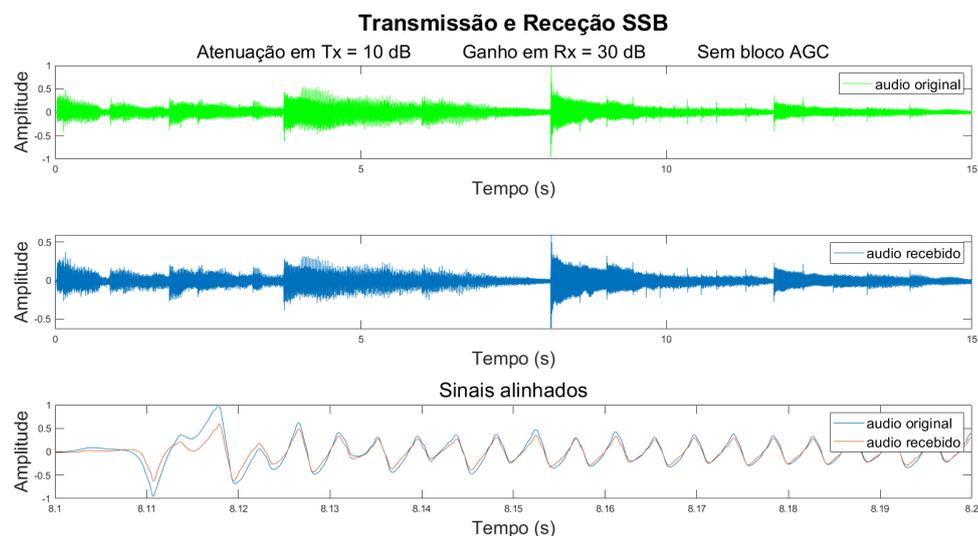


Figura 4.28: Ganho no recetor de 30dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 0.5

Fez-se a alteração do valor presente no bloco de multiplicação de 0.5 para 1. Assim, o sinal recebido não sofre nenhuma atenuação adicional e a sua amplitude é controlada exclu-

sivamente com o ganho configurado no recetor.

O ganho no recetor foi ajustado novamente para 10 dB e realizou-se a receção do sinal presente na figura 4.28. Podemos observar que apenas com o ajuste do ganho no recetor, o sinal tem quase a mesma forma do sinal apresentado na figura 4.28 mas com uma amplitude um pouco mais baixa. Novamente, quando é reproduzido não se ouve qualquer ruído.

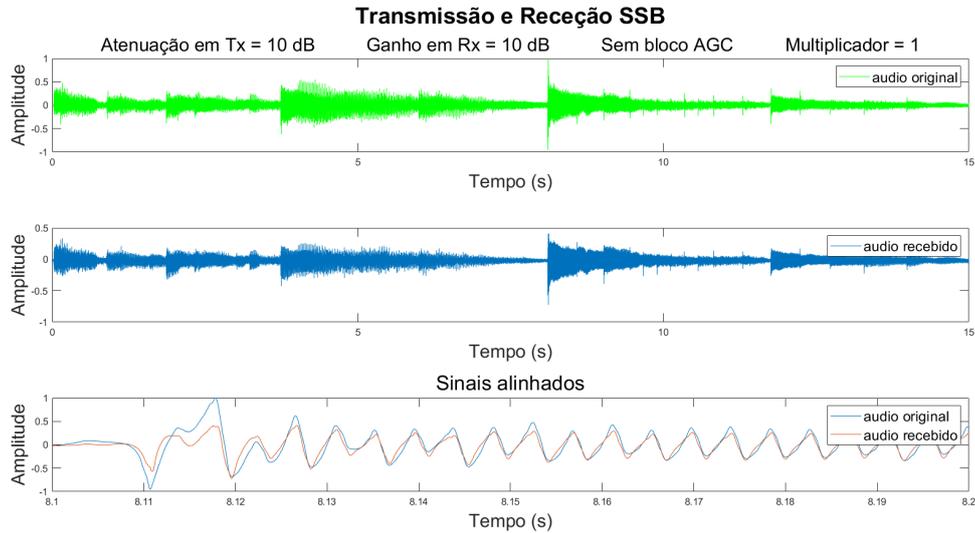


Figura 4.29: Ganho no recetor de 10dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 1.

Ter controlo sobre o volume é mais favorável do que ter um bloco AGC, porque se compararmos os resultados obtidos da figura 4.29 com os da figura 4.25 vemos que o sinal recebido não apresenta mais distorção e agora o sinal está mais próxima ao original, porém com amplitude mais baixa.

Quando o ganho no recetor é aumentado para 30 dB e no bloco de multiplicação é usado 1, é possível observar que a amplitude do sinal recebido começa a ser maior do que o esperado e, por isso, o sinal começa a ficar distorcido como é mostrado na figura 4.30. Então, neste caso, é favorável usar um valor menor que 1 de modo a eliminar a distorção presente no sinal.

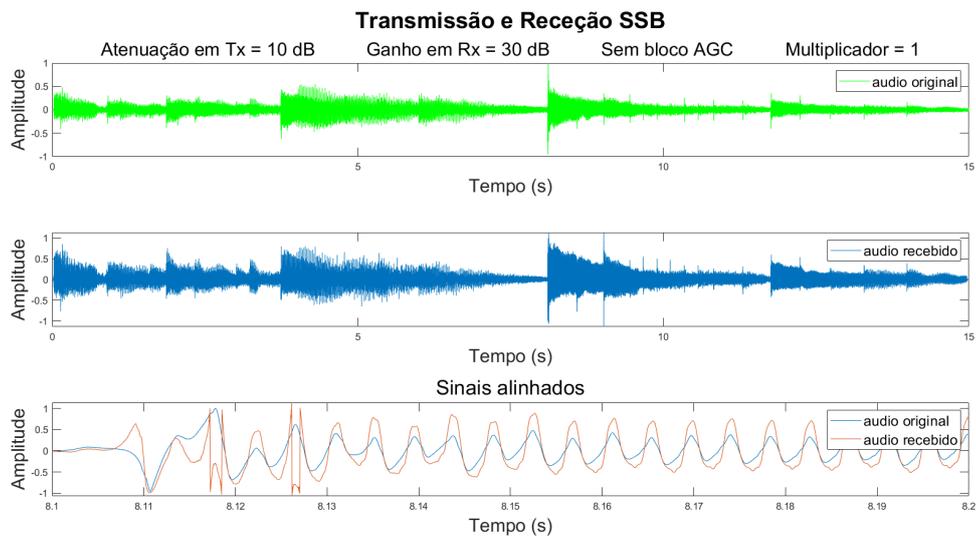


Figura 4.30: Ganho no recetor de 30dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 1.

Para realizar a receção de sinais que estejam mais atenuados e, por alguma razão não for possível alterar o ganho no recetor, pode-se aumentar a gama de valores usados no bloco de multiplicação. A figura 4.31 mostra o sinal recebido quando o ADALM-PLUTO é configurado para ter uma atenuação de 10 dB no transmissor, ganho de 0 dB no recetor e, após o sinal de áudio ser recuperado, é multiplicado por 1 (como nos testes anteriores). A amplitude do sinal recebido é muito baixa em relação ao original e, quando ampliado, não se nota qualquer semelhança entre os dois.

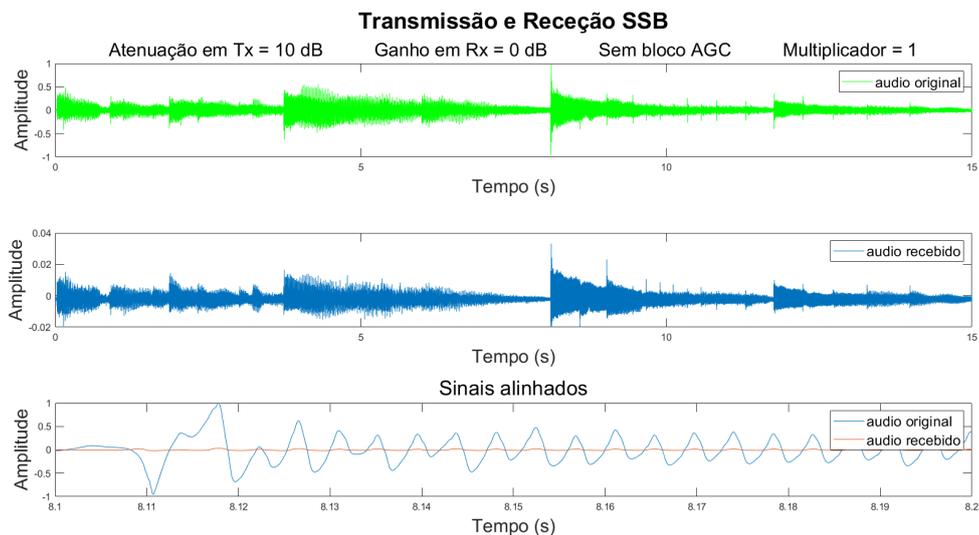


Figura 4.31: Ganho no recetor de 0dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 1.

O teste foi repetido por este motivo, todavia o sinal recuperado foi multiplicado por 12. Este resultado é apresentado na figura 4.32. A amplitude do sinal aumentou e agora está muito mais próximo do original como se pode observar pela região ampliada. Quando reproduzido, esta mudança implica o aumento do volume do áudio.

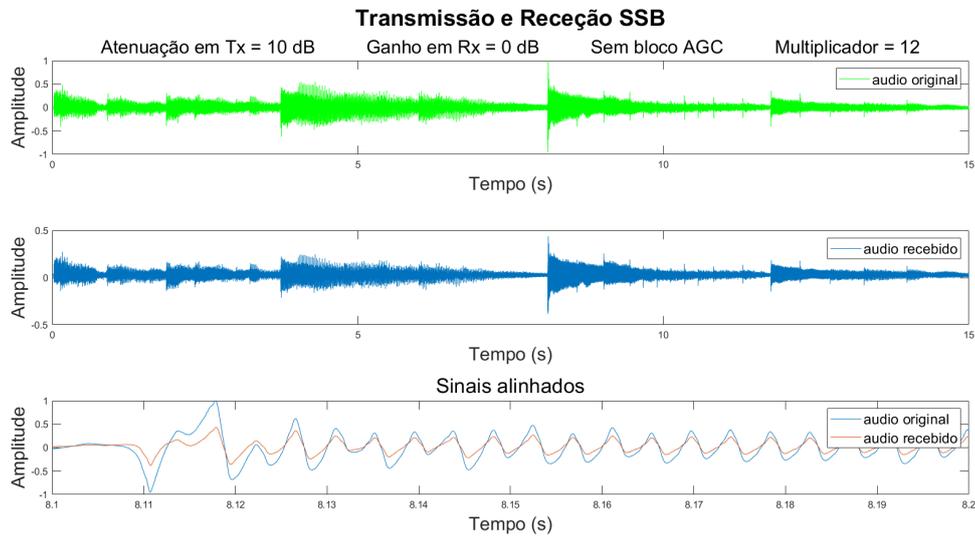


Figura 4.32: Ganho no recetor de 0dB sem bloco de AGC quando multiplicador igual a 12.

Concluindo, o bloco AGC foi substituído por um bloco multiplicador localizado no final do fluxograma após a recuperação do sinal de áudio e antes da gravação e reprodução do ficheiro de áudio reconstruído. Esta mudança remove os problemas de "clipping" causados pela AGC, contudo para que a forma de onda do sinal recebido fique próximo à do original é preciso haver um aumento maior no ganho do recetor do ADALM-PLUTO. O valor dentro do bloco multiplicador deve ser mudado consoante o valor ganho configurado no recetor do ADALM-PLUTO de modo a que não aconteça "audio clipping".

Transmissor e recetor QPSK

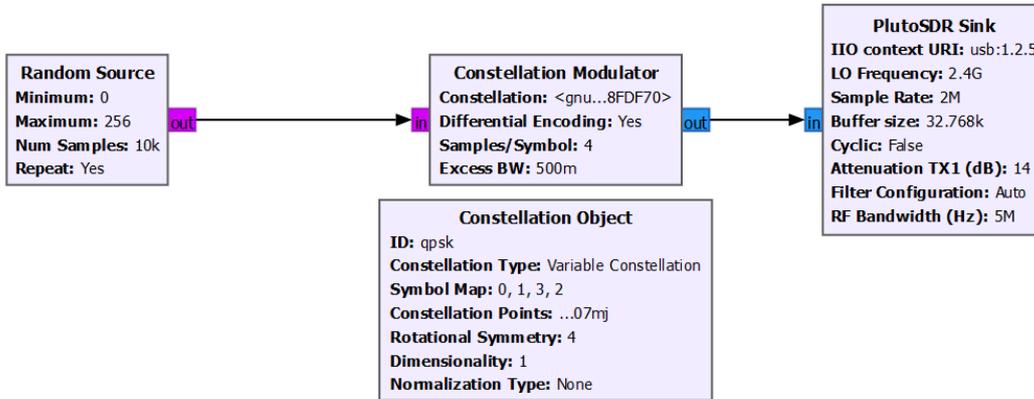


Figura 4.33: Transmissor QPSK

Para montar estes fluxogramas usou-se informação de [43]. O fluxograma presente na figura 4.33 representa o transmissor QPSK. Neste fluxograma são gerados bits que são modulados numa constelação complexa ao usar o bloco Constellation Modulator, que usa um objeto de constelação para controlar o sinal transmitido. O modulador precisa que na sua entrada estejam presentes bytes, por isso o gerador foi configurado para tal. O modulador usa também um filtro Root-Raised-Cosine para moldar o sinal.

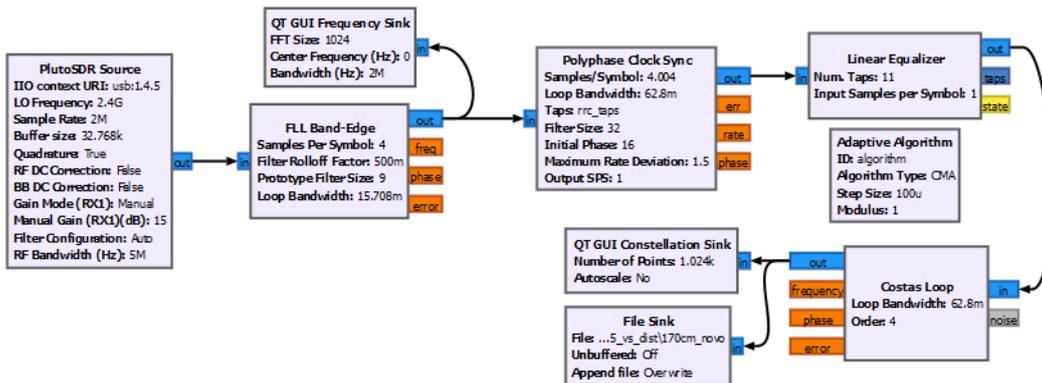


Figura 4.34: Recetor QPSK

O fluxograma presente na figura 4.34 representa o recetor QPSK. Neste fluxograma é recebido o sinal transmitido e é feita a recuperação do clock ao usar o bloco Polyphase Clock Sync. Este bloco faz a recuperação do clock, de seguida implementa um filtro RRC para remover interferência entre símbolos causada pelo filtro no transmissor e finalmente faz down-sample do sinal e produz amostras a 1 amostra por símbolo na saída. Um equalizador é usado para reduzir os efeitos do multipath e fazer com que os símbolos convirjam para o

círculo unitário. De seguida qualquer desvio de fase e frequência é corrigido usando um Costas Loop.

O sinal transmitido é apresentado na figura 4.35.

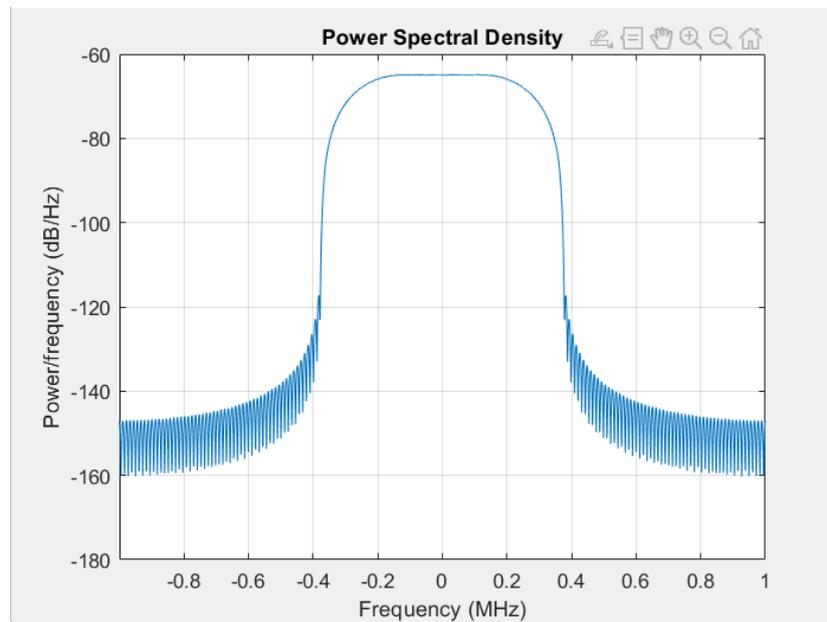
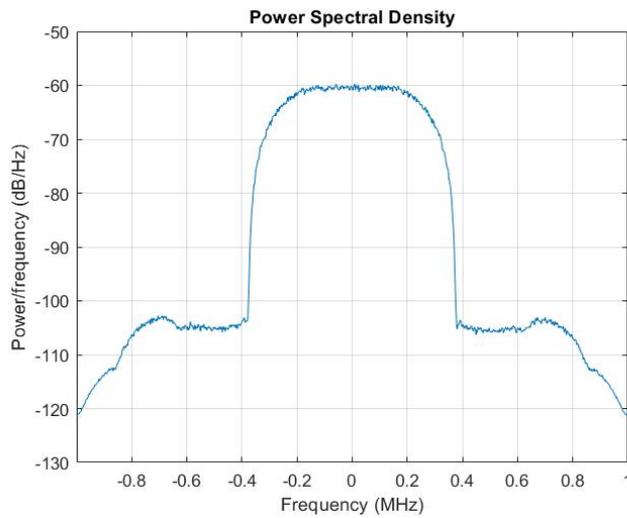


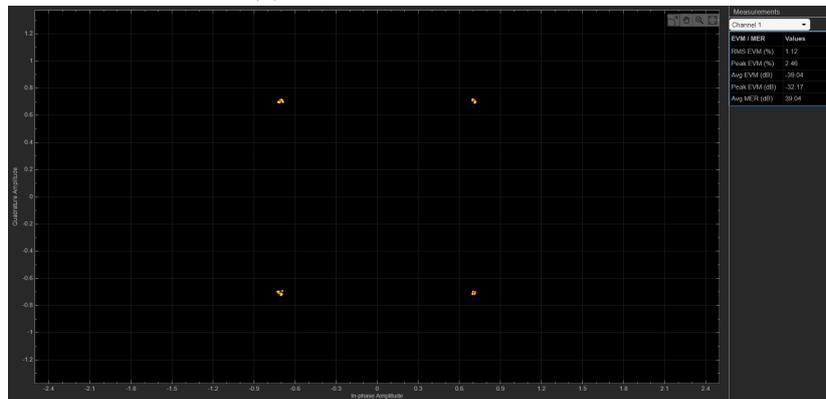
Figura 4.35: Sinal QPSK transmitido

No primeiro teste foi usado apenas um ADALM-PLUTO. Para receber este sinal, o transmissor foi configurado com 0 dB de atenuação e o recetor com 10 dB de ganho.

Na figura 4.36 podemos observar o espectro do sinal e a sua constelação. Podemos observar que apesar do EVM ter um valor bom, o espectro do sinal possui bandas adjacentes muito acentuadas, onde o ACPR obtido é de -44.3 dB. De modo a diminuir a potência destas bandas adjacentes, teve de se aumentar a atenuação durante a transmissão do sinal.



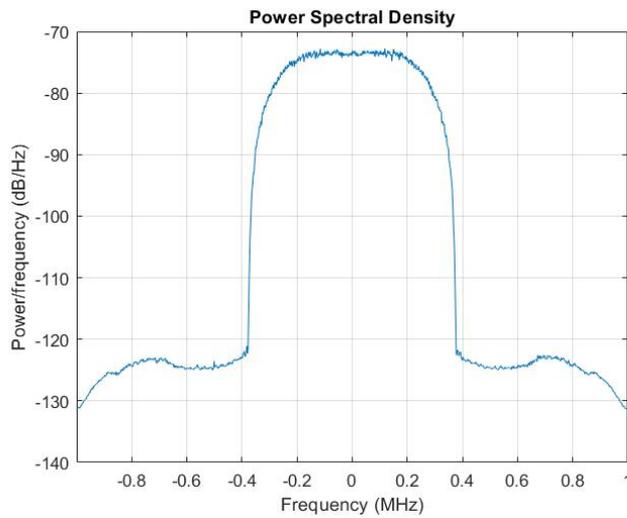
(a) Espectro do sinal recebido.



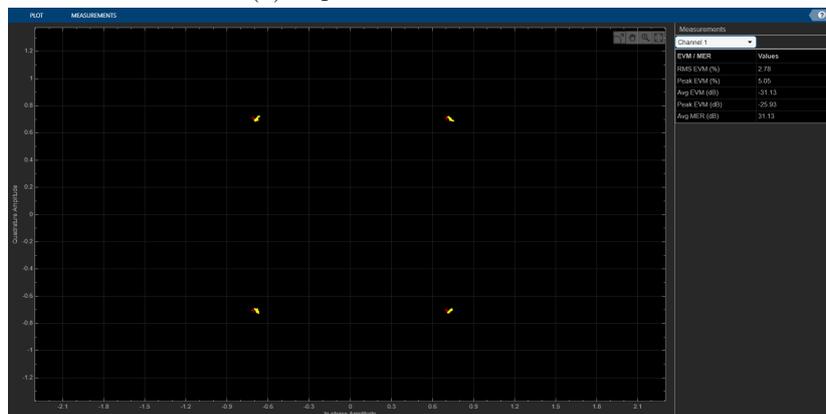
(b) Constelação do sinal recebido.

Figura 4.36: Sinal recebido quando não há atenuação no transmissor e quando o recetor está configurado com 15 dB de ganho.

Após a mudança do valor de atenuação no transmissor, houve também a necessidade de aumentar um pouco o ganho na receção. O espectro do sinal e a sua constelação pode ser observada na figura 4.37.



(a) Espectro do sinal recebido.

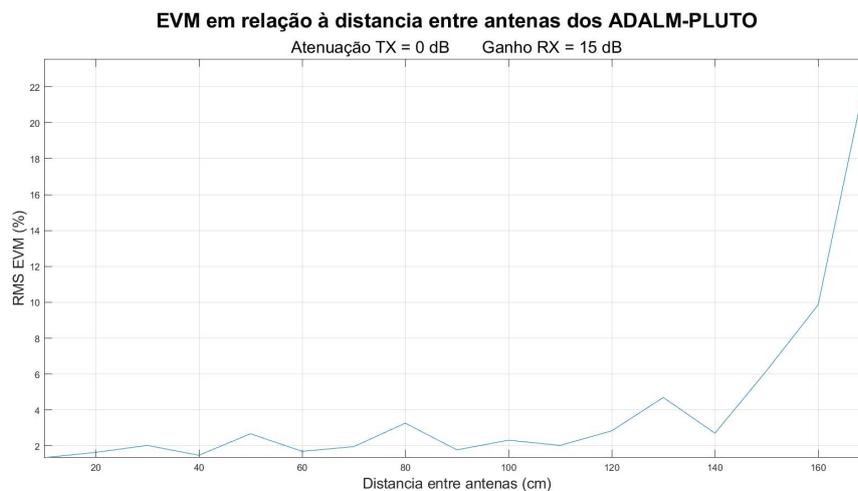


(b) Constelação do sinal recebido.

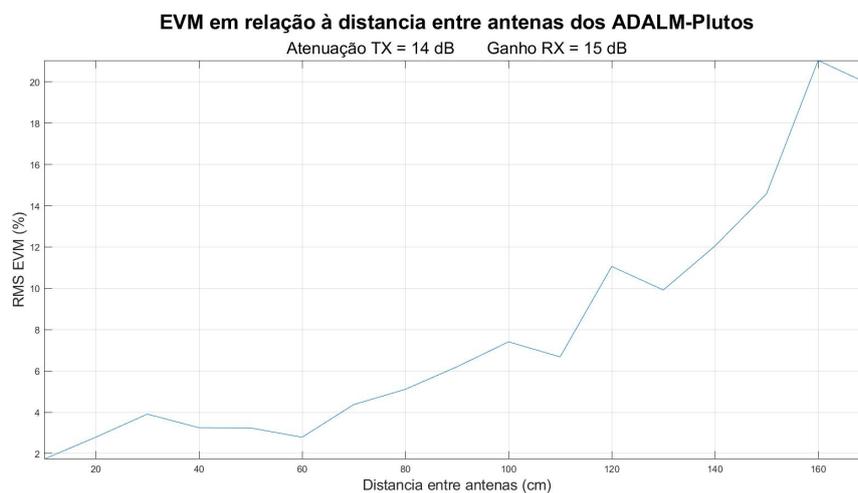
Figura 4.37: Sinal recebido quando o transmissor está configurado com 14 dB de atenuação e o recetor com 15 dB de ganho.

Podemos observar agora que o espectro do sinal possui uma forma mais parecida ao original apesar de o EVM ter aumentado de 1.12% para 2.78%. Para este sinal obteve-se um ACPR de -50.45 dB que é esperado devido à diminuição da potência das bandas adjacentes.

A seguir, usaram-se dois ADALM-PLUTO para testar a relação entre o EVM e a distância entre a antena do transmissor e a antena no recetor. Para realizar este teste, usou-se os parâmetros de recepção e transmissão dos sinais apresentados anteriormente.



(a) Relação entre EVM e distância para o primeiro caso



(b) Relação entre EVM e distância para o segundo caso

Figura 4.38: EVM em relação à distância entre as antenas do transmissor e recetor

Podemos ver pela figura 4.38 que o gráfico para o primeiro caso apresenta valores de EVM melhores do que no segundo, apesar dos problemas descritos para esta configuração anteriormente. Isto acontece porque a potência à saída do transmissor é maior para o primeiro caso do que no segundo. Se o objetivo for fazer a transmissão e receção entre 2 dispositivos deve-se usar a primeira configuração. Caso a intenção seja utilizar somente um ADALM-PLUTO para estabelecer uma comunicação QPSK, é aconselhável optar pela segunda configuração, devido à proximidade das antenas.

4.3.3 Montagem do sistema de transmissão e recepção de testes

Após terem sido feitas as experiências relacionadas à potência de transmissão do ADALM-PLUTO e transmissão e recepção de vários tipos de sinais, passou-se à montagem e teste do sistema representado na figura 4.1. No datasheet do misturador usado não havia informação à cerca da sua característica ou atenuação entre os conectores IF e RF para a frequência de 2.4 GHz, então houve a necessidade de fazer testes para determinar essas características. Na figura C.1 do anexo C.1 está representada a característica do misturador.

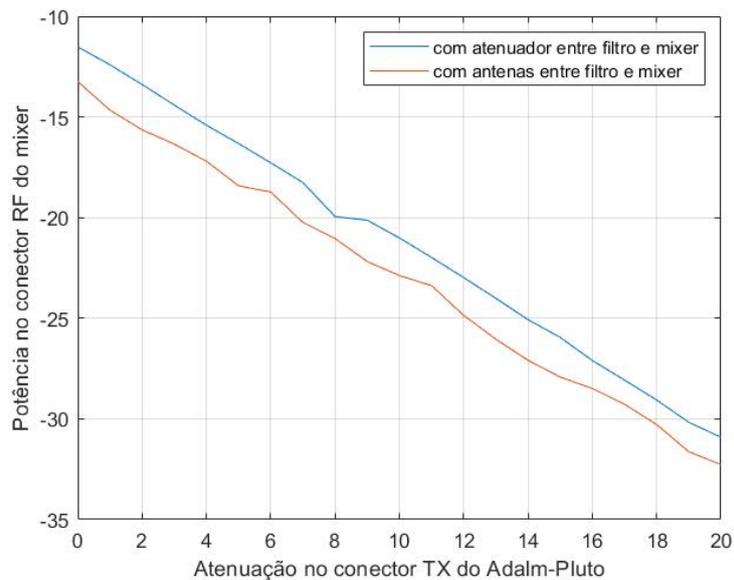


Figura 4.39: Relação entre atenuação do transmissor do ADALM-PLUTO e a potência no conector RF do misturador

Na figura 4.39 podemos observar como a potência no conector RF varia com a atenuação de transmissão do ADALM-PLUTO. Como era esperado, quando entre o filtro e o misturador se usa antenas, a atenuação é maior em relação à situação onde se usa o atenuador. Podemos também comparar estes resultados com os presentes na figura C.1 do anexo C.1. Ao compará-los e ao usar os resultados presentes na figura 4.3 como referência para a potência de transmissão do ADALM-PLUTO, podemos observar que os resultados obtidos se encaixam no esperado.

Agora é necessário saber a potência à saída do LNB. Para realizar este teste, ligou-se o analisador de espectro à saída do Bias-T.

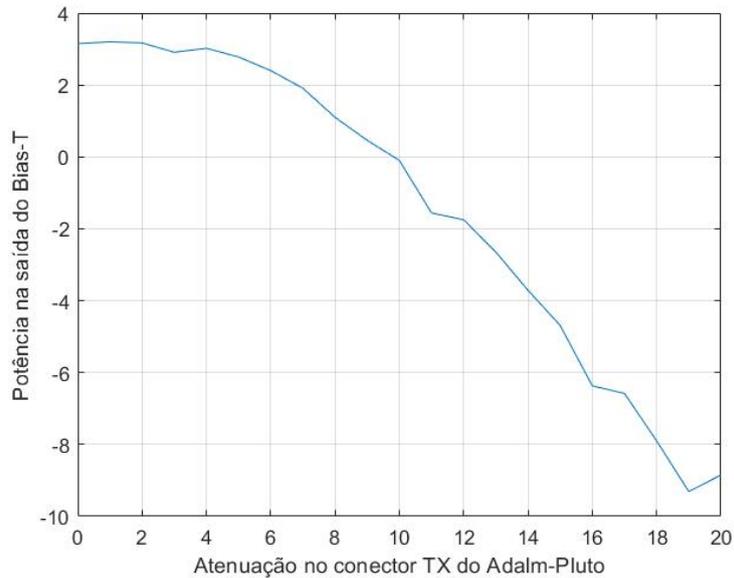


Figura 4.40: Potência à saída do Bias-T em relação à atenuação de transmissão do ADALM-PLUTO com atenuador entre filtro e misturador

Neste teste foi usada a mesma gama de valores para a atenuação no transmissor do ADALM-PLUTO. No gráfico da figura 4.40, entre 0 e 3 dB de atenuação, a potência medida no conector RF do Bias-T mantém-se constante em 3 dBm. Isto é um indicador de que o amplificador presente no interior do LNB possui uma potência de saída máxima do mesmo valor. Então, como foi visto anteriormente que a potência máxima suportada pelo recetor do ADALM-PLUTO é 2.5 dBm, antes de fazer a receção de sinais recebidos pelo LNB, é necessário o uso de um atenuador no conector RX do ADALM-PLUTO para não o danificar. Neste caso usou-se um atenuador de 20 dB.

A figura 4.41 foi obtida quando se usou o SDR Console para transmitir e receber um tom. Pelo espetrograma, que mostra como o sinal se comporta ao longo do tempo, podemos ver que existe um drift na frequência de transmissão. Isto é o resultado do oscilador do ADALM-PLUTO não estar sincronizado com os osciladores dos geradores de sinal usados para gerar o sinal para o misturador e sinal de referência do LNB. Também foi descoberto por pesquisa em fóruns que este desvio na frequência está associado ao efeito provocado no oscilador local do ADALM-PLUTO pelo calor que é gerado quando se usa o transmissor [44]. Esta reação é uma das razões de se usar o SDR Console em vez do GNU Radio.

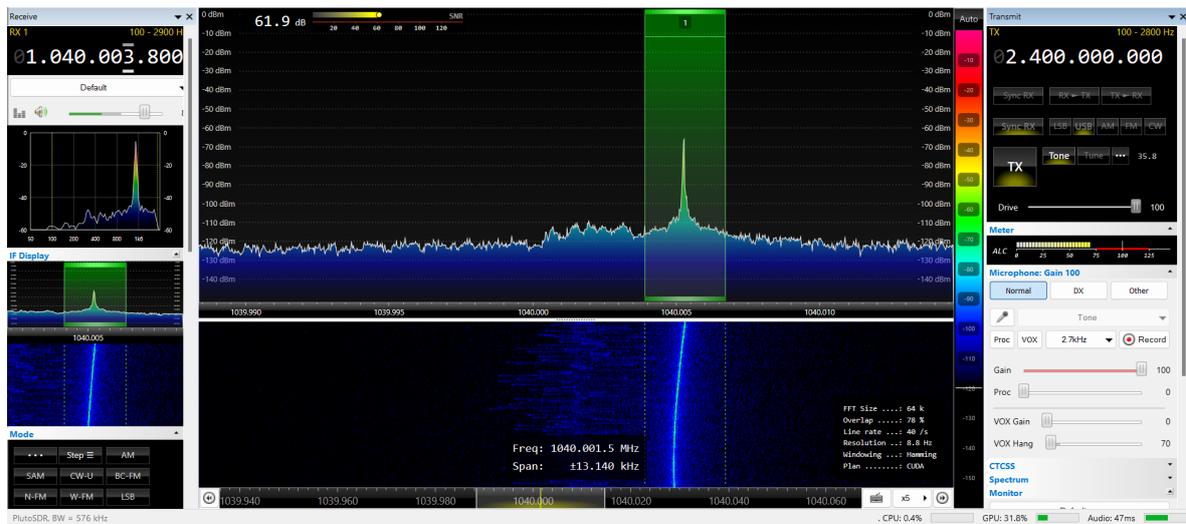


Figura 4.41: Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 1 metros de distância do sistema

O sinal que saiu do sistema transmissor com aproximadamente 20 dBm de potência e com o mixer a 1 metro de distância foi recebido pelo ADALM-PLUTO com um SNR de 61.9 dB.

Quando se aumentou a distância entre o misturador e o sistema foram obtidos os resultados presentes na figura 4.42. Como era esperado, o sinal chegou ao misturador mais atenuado devido à distância maior. Isto provocou uma diminuição no valor do SNR que tem agora 55.2 dB.

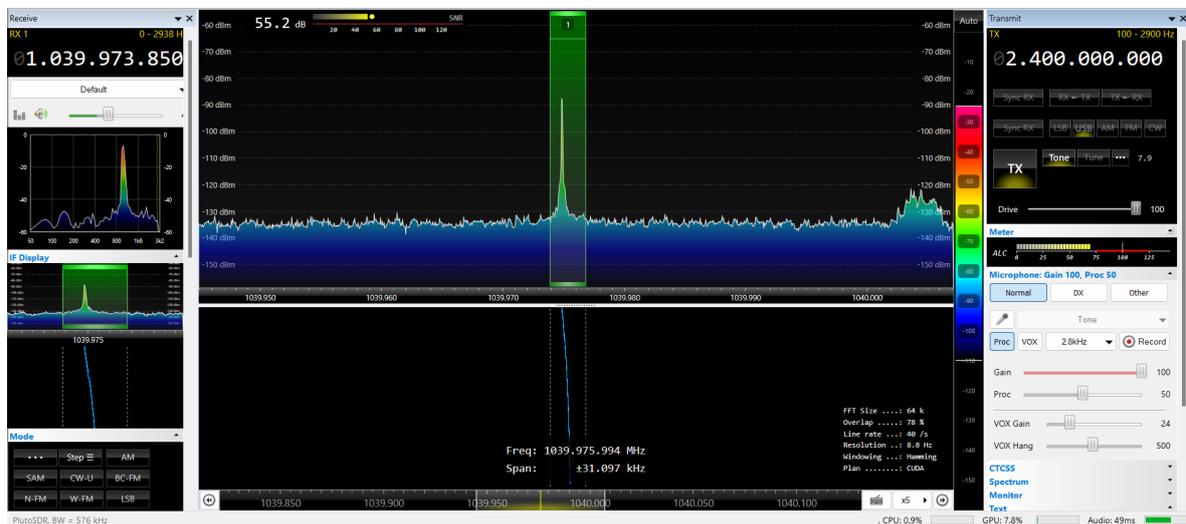


Figura 4.42: Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 4 metros de distância do sistema

Posicionou-se um obstáculo à frente do misturador e o SNR diminui de 55.2 dB para 39.9 dB como se observa pela figura 4.43.

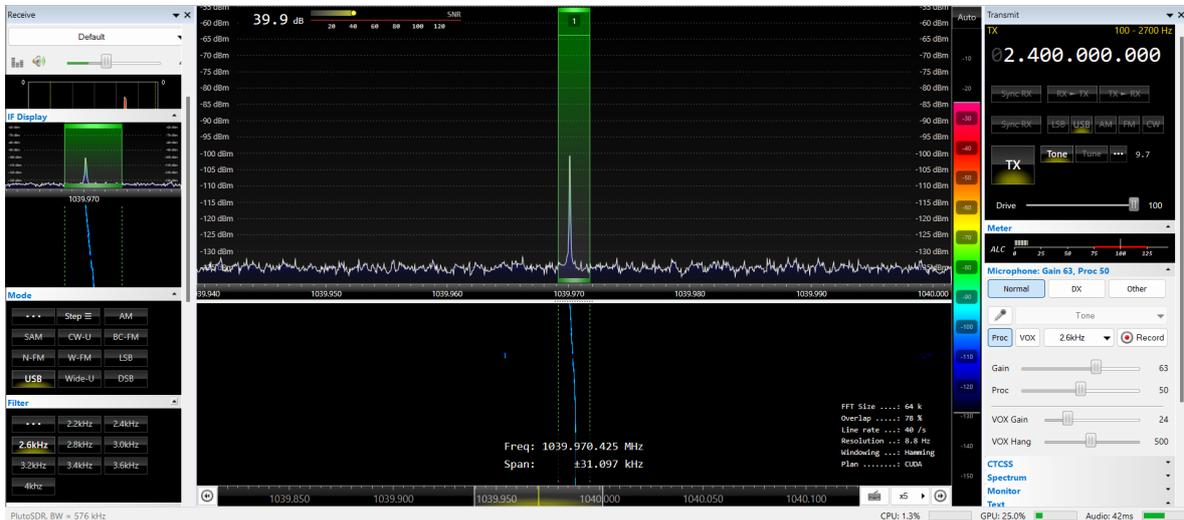


Figura 4.43: Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 4 metros de distância do sistema com obstáculo à frente do mixer

Porém quando se posicionou o obstáculo em frente ao LNB, o SNR diminui de 55.2 para 24.4 dB, isto pode ser visto na figura 4.44.

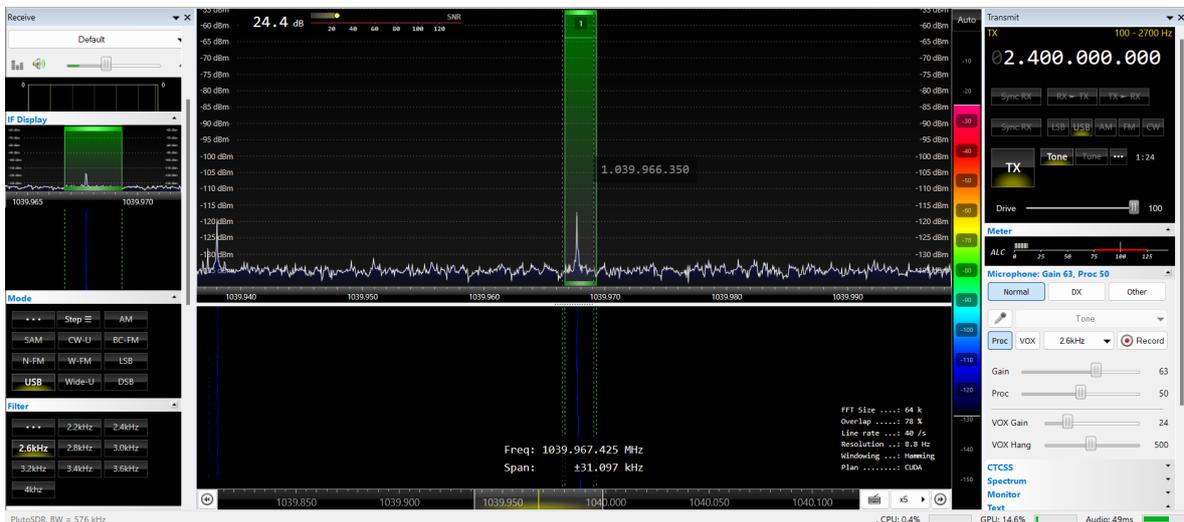


Figura 4.44: Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 4 metros de distância do sistema com obstáculo à frente do LNB

Isto é um indicador que a antena de 10.4 GHz anexada ao LNB é muito diretiva, portanto quanto melhor direcionada para o local do misturador estiver o LNB e por consequência a antena, maior será o SNR principalmente para maiores distâncias.

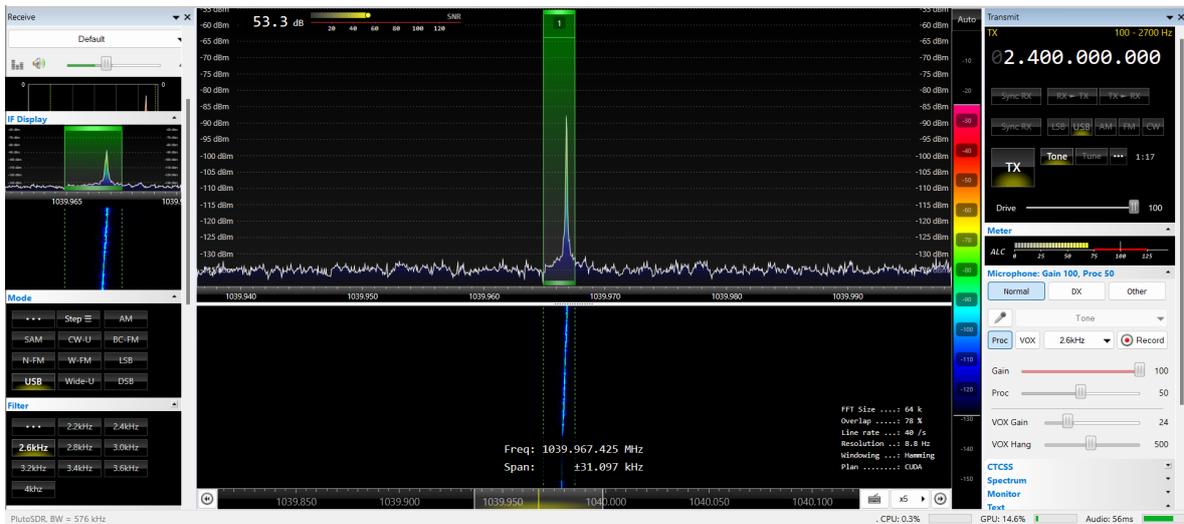


Figura 4.45: Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 6 metros de distância do sistema e o LNB está direcionado para o seu local

Na figura 4.45 o misturador estava a 6 metros do sistema. Quando se desviou o LNB por poucos graus do local do misturador, foram obtidos os resultados apresentados na figura 4.46. O SNR diminui de 53.3 dB para 45.9 dB.

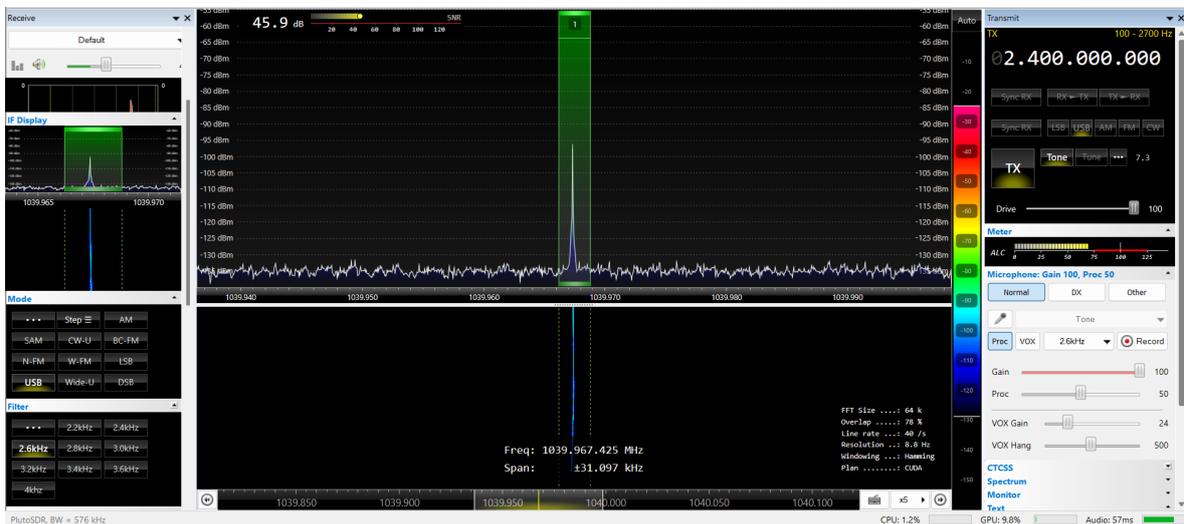


Figura 4.46: Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 6 metros de distância do sistema e o LNB está levemente desviado do seu local

Se existirem obstáculos pelo caminho, o SNR será ainda mais pequeno como mostra a figura 4.47, onde o SNR tem o valor de 26.4 dB.

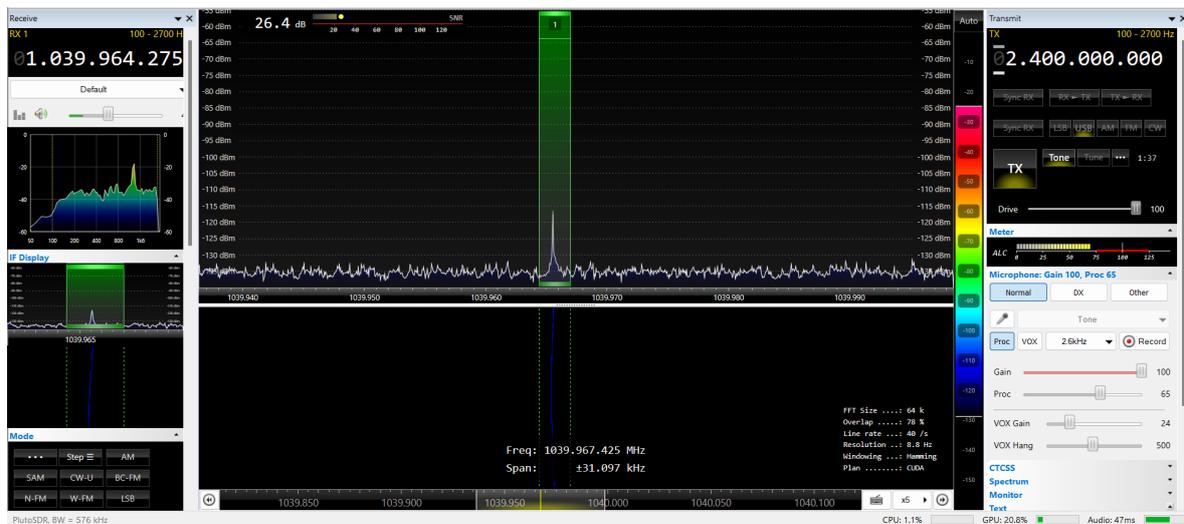


Figura 4.47: Tom transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 6 metros de distância do sistema com LNB levemente desviado do local correto e com obstáculos no caminho

Passou-se então a transmitir um sinal de voz usando o microfone do computador. O sinal é modulado em Upper Side Band com largura de banda de 2.7 kHz. Decidiu-se usar estas configurações para estar o mais próximo possível das configurações que devem ser usadas para comunicar com o satélite. A figura 4.48 mostra a transmissão e recepção quando o misturador está a 6 metros de distância do sistema.

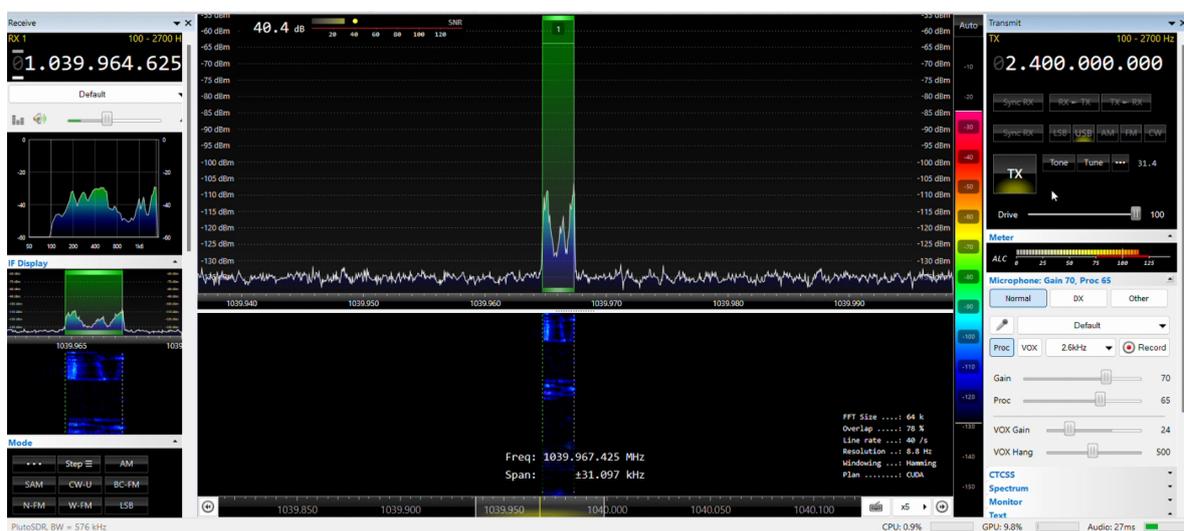


Figura 4.48: Sinal de voz modulado em USB transmitido e recebido pelo ADALM-PLUTO com uso do SDR Console quando o mixer está a 6 metros de distância

O SNR do sinal varia entre 37 e 40.4 dB dependendo do quão alto se estiver a falar, mas repare-se que o ganho do microfone foi diminuído de 100% para 70%. Quando o ganho do microfone é colocado a 100% é possível ouvir o eco após acabar de falar. Logo, o ganho foi diminuído até 70% que é o limiar no qual se deixa de ouvir este eco. Enquanto se está a

transmitir, continua a existir o problema do desvio de frequência ao longo do tempo. Como o sinal de voz tem de ser modulado em Upper Side Band, é preciso regular constantemente a frequência de recepção para que o sinal esteja dentro da banda de recepção definida no software pelo retângulo verde. Caso contrário, o sinal é desviado até que a voz se torna incompreensível. Como foi falado anteriormente, um dos causadores deste problema é o calor gerado pelo PCB do ADALM-PLUTO quando este está em funcionamento e notou-se que por quanto mais tempo estiver ligado, vai chegar um momento onde este desvio em frequência se torna mais pequeno e aí é possível contornar o problema usando a função XIT presente no software. Esta função desvia o espetro do sinal em frequência até que este esteja na frequência correta (muito parecido com o ajuste de ppm). No entanto, cada vez que se liga o sistema é necessário fazer este ajuste. Caso existam obstáculos entre o sistema e o misturador, o SNR diminui bastante (~ 10 dB) o que faz com que não se ouça a transmissão devido ao ruído.

Não foi possível aumentar mais a distância entre o misturador e o sistema devido a limitações de espaço no laboratório onde foram feitas estas experiências, logo como como se obteve resultados satisfatórios usando o SDR Console ao transmitir e receber um sinal de voz modulado em a 6 metros, passou-se para a última fase deste projeto que é a montagem do sistema que irá comunicar de facto com o satélite Es'hail 2 representado na figura 4.2.

Primeiro é necessário saber a posição do QO-100. Como o setup esteve localizado no Instituto de Telecomunicações, a parabólica deve estar apontada segundo um azimute de 133° e elevação de 31° (deve-se assegurar que não existe a obstrução por obstáculo entre a parabólica e o satélite) [45].

4.4 Montagem e resultados do sistema de transmissão e recepção final

O setup de ligação ao satélite que foi montado encontra-se representado na figura 4.49, onde, a vermelho, estão assinalados os elementos principais. Foram necessárias duas fontes de alimentação (uma para alimentar o LNB e outra para o amplificador) devido ao consumo de corrente do amplificador ser muito alto (cerca de 6 Amperes).

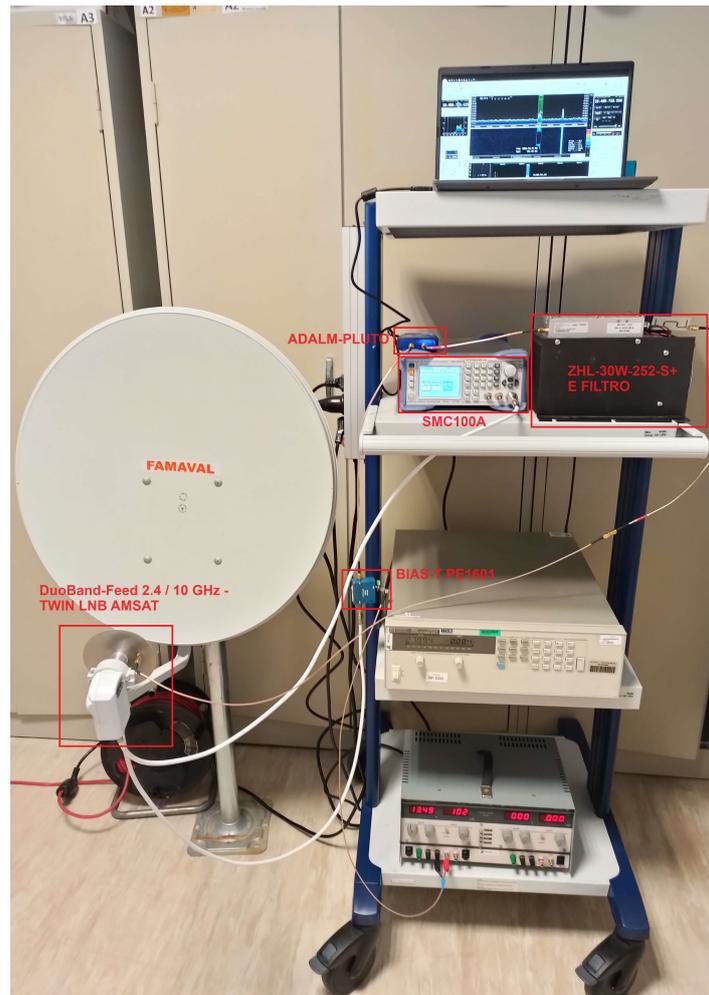


Figura 4.49: Setup de ligação ao satélite

Após apontar a parabólica na direção do satélite, o primeiro objetivo para testar a recepção seria receber o beacon PSK central. O beacon PSK possui o seu centro na frequência de down-link 10.489750 GHz, logo deve-se sintonizar a frequência do ADALM-PLUTO para 1.129750 GHz (valor obtido através da equação 4.1).

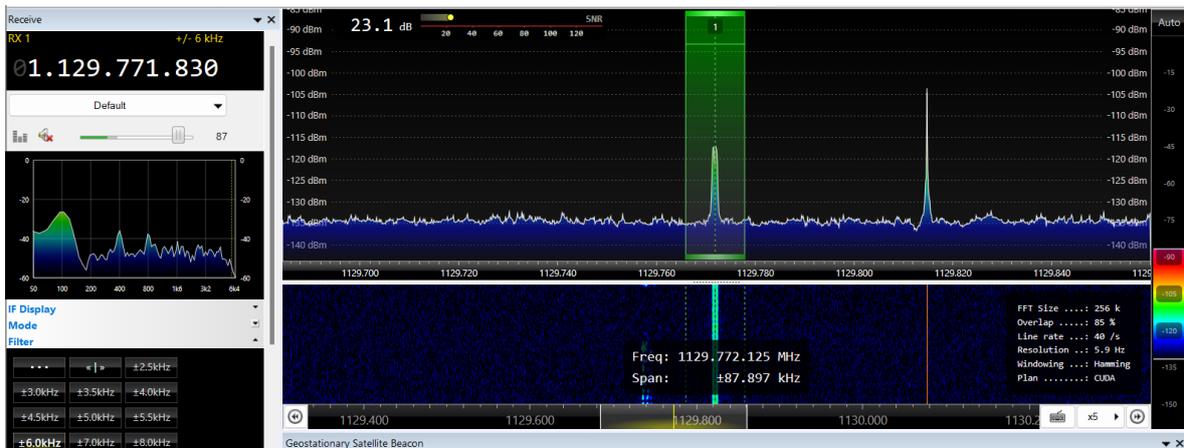


Figura 4.50: Beacon PSK recebido mas desviado em frequência

O beacon PSK foi recebido com sucesso, no entanto a uma frequência diferente do que era esperado (canto esquerdo da figura 4.50) estando o seu centro a 1.129771830 GHz. Este problema pode ser resolvido usando a função Geostationary Sattelite Beacon do SDR Console, mas primeiro teve-se de criar um conversor para que a frequência de receção apresentada no software esteja na gama de frequências de downlink do satélite. Para isso, na janela que é aberta para escolher o rádio quando se inicia o software (mostrado na figura 4.51), deve-se seleccionar as definições.

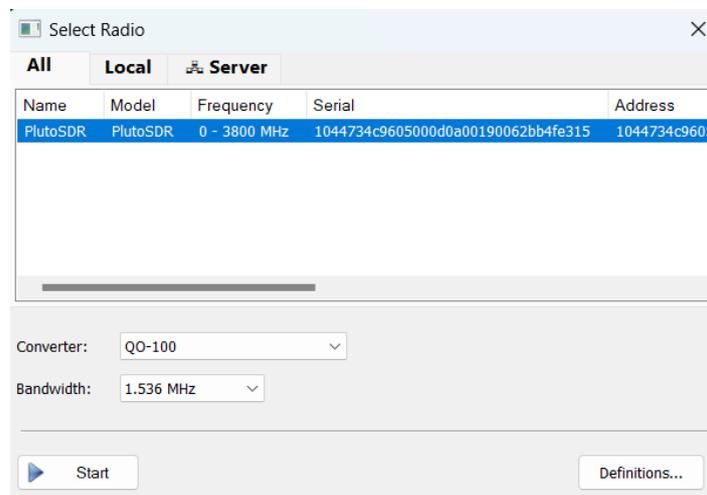


Figura 4.51: Janela para escolha do rádio

Após seleccionar as definições, ativa-se a caixa que diz Converter Selection e carrega-se em editar.

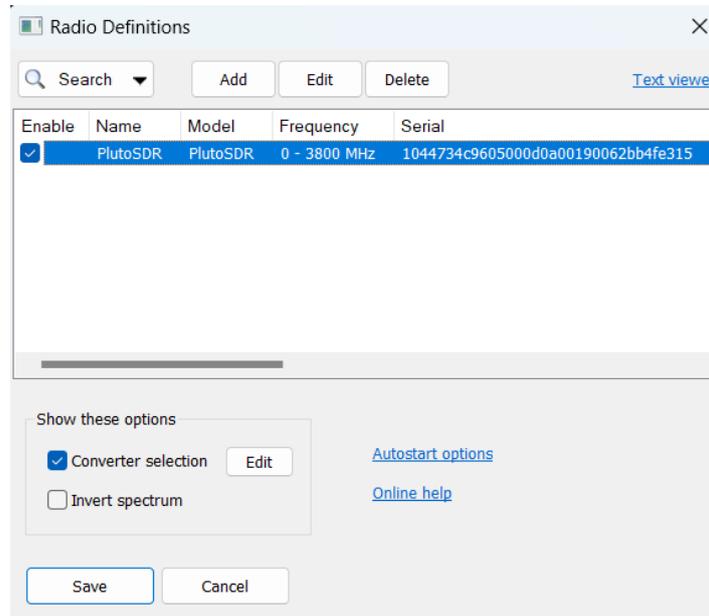


Figura 4.52: Janela das definições do rádio

Finalmente adiciona-se um conversor do tipo down-converter e, após selecionar RX, introduz-se a diferença entre a frequência de downlink do beacon e a frequência à qual foi recebida pelo ADALM-PLUTO que neste caso é igual a 9.359978170 GHz.

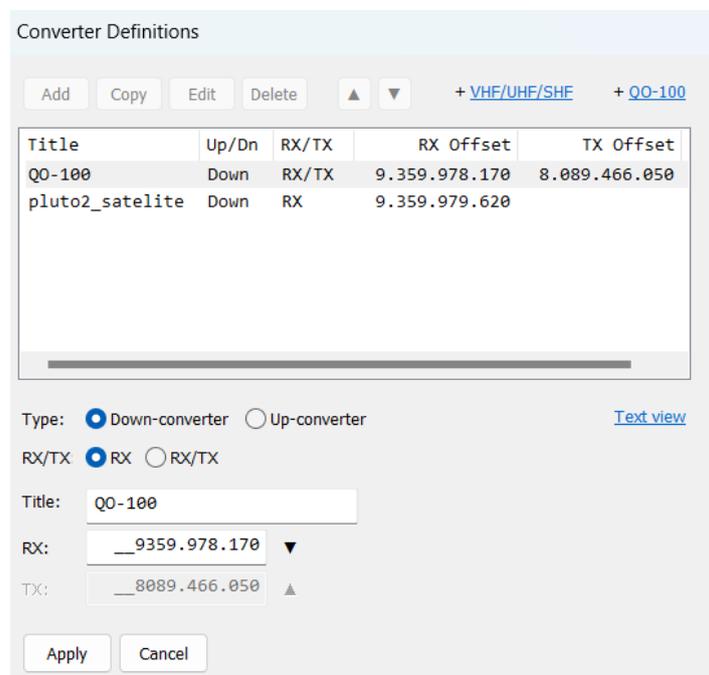


Figura 4.53: Definições do conversor

Depois de ter feito esta alteração, obteve-se a figura 4.54

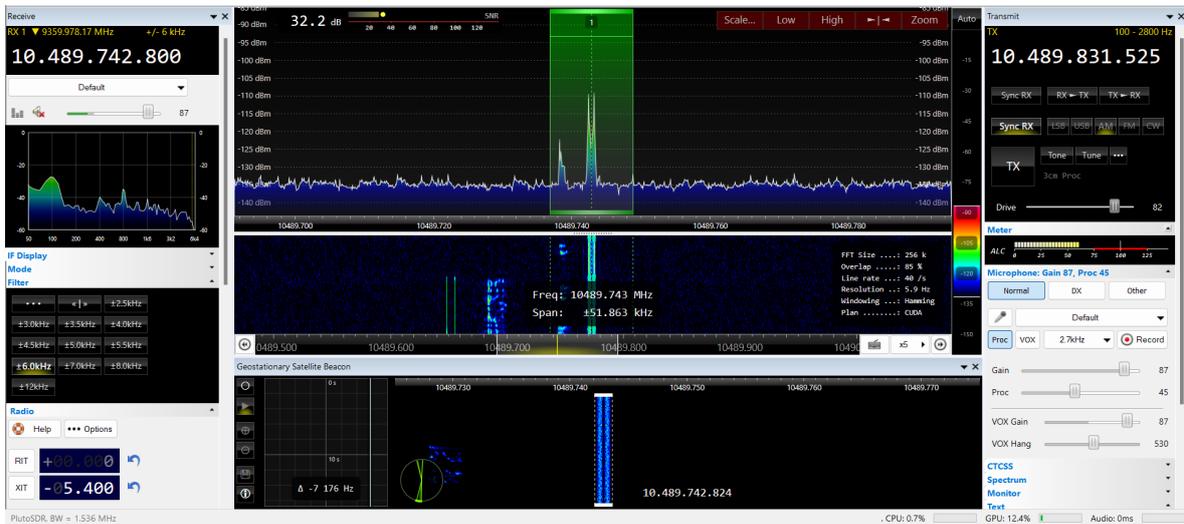


Figura 4.54: Beacon PSK recebido após conversão de frequência

Pode-se ver que apesar de se ter feito esta alteração, o beacon ainda não está na posição correta. Então, fez-se uso da ferramenta Geostationary Sattelite Beacon que usa o beacon como alvo para fazer o deslocamento em frequência de todos os sinais recebidos para o sítio correto, como é mostrado na figura 4.55.

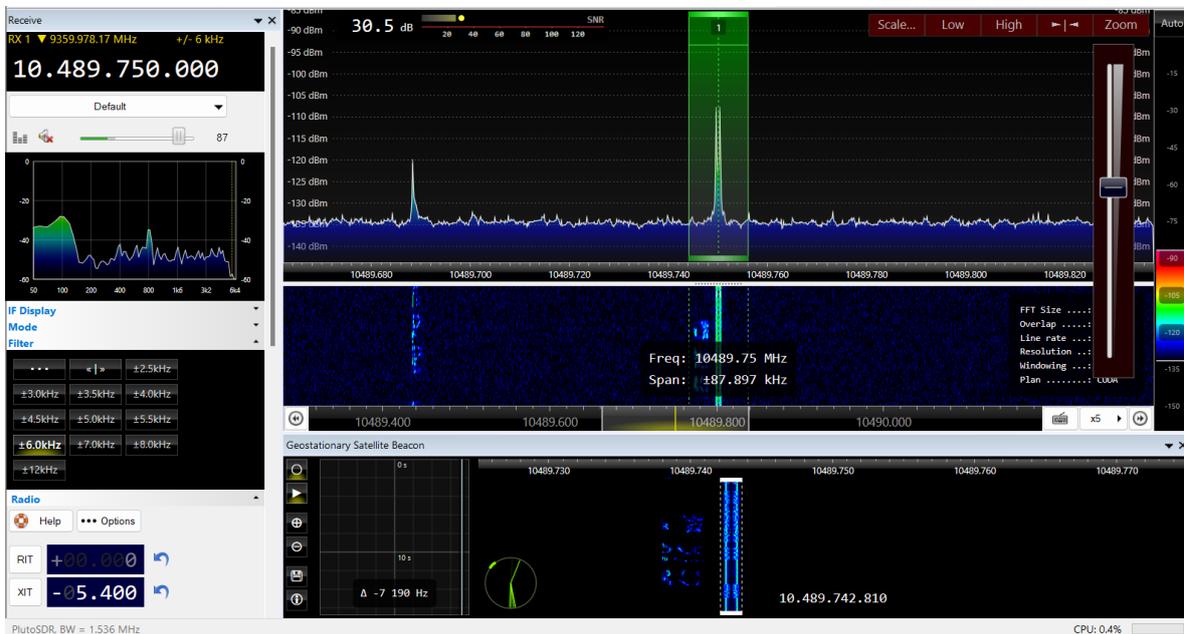


Figura 4.55: Beacon PSK recebido após ser bloqueado pela função Geostationary Sattelite Beacon

Assim, sempre que o sistema é reiniciado, basta selecionar o beacon PSK com esta ferramenta. Isso fará com que os sinais sejam deslocados para as frequências corretas.

Para saber se está ocorrendo a recepção de todos os sinais provenientes do downlink do satélite, usou-se o website WebSDR para comparar os sinais mostrados neste website com os que estavam a ser recebidos pelo sistema. O WebSDR é um recetor de rádio definido por software conectado à Internet que permite que muitos ouvintes ouçam e o sintonizem simultaneamente. Para o caso do QO-100, o WebSDR é hospedado na Goonhilly Earth Station em Cornwall (na Inglaterra).

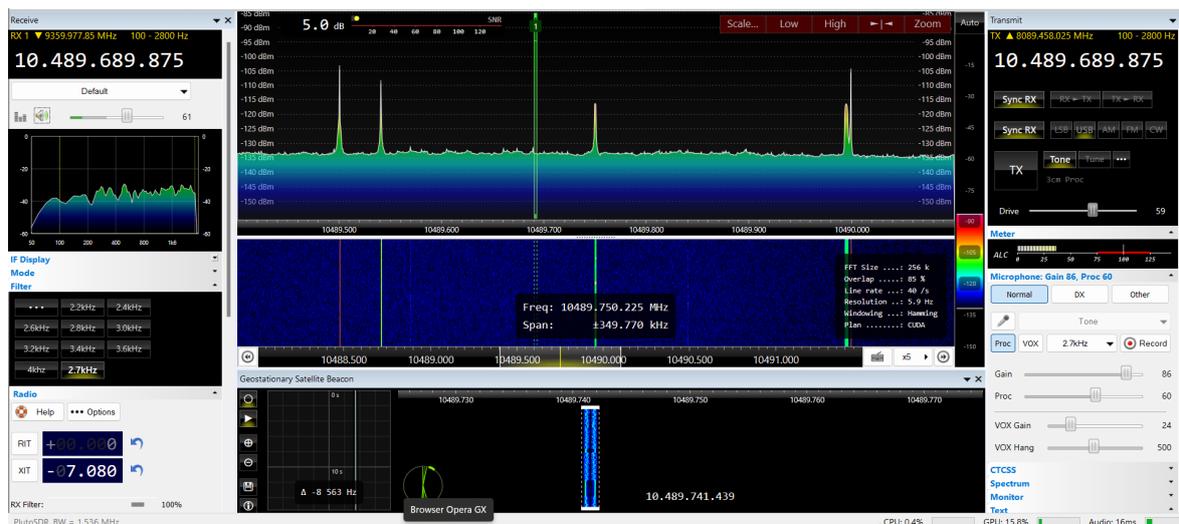


Figura 4.56: Recepção de toda a banda estreita do QO-100 usando o sistema montado e SDR Console

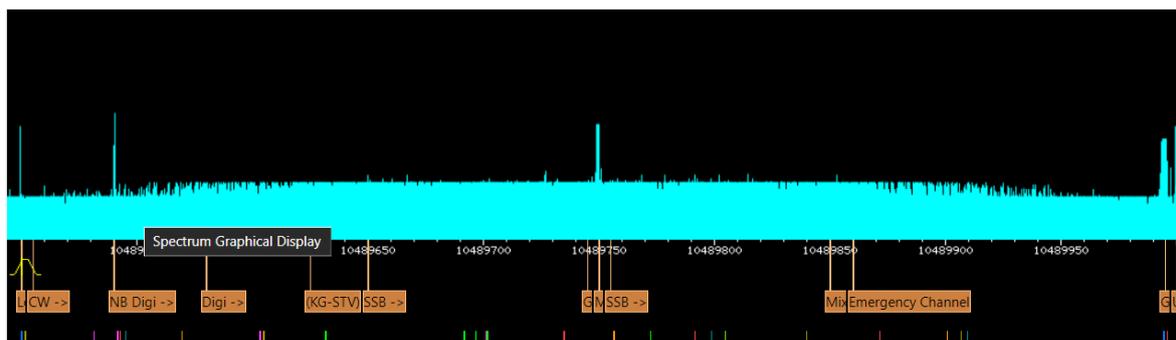


Figura 4.57: Recepção de toda a banda estreita do QO-100 usando o WebSDR

Ao comparar as figuras 4.56 e 4.57 podemos ver que o sistema está a receber todos os sinais enviados pelo QO-100. Da esquerda para a direita podemos ver o beacon CW, a seguir um sinal digital de banda estreita, o beacon PSK no centro do espetro e o beacon multimédia experimental. Estas imagens foram capturadas entre as 9 e as 10 horas da manhã, e, por isso, não há nenhuma pessoa a falar nos canais dedicados a transmissões SSB.

Antes de transmitir qualquer sinal de voz modulado em USB, um tom com 1 Watt de potência foi transmitido. Como se tinha a noção que o tom não iria aparecer à frequência de

downlink correta, escolheu-se transmiti-lo as 2.400250 que no downlink equivale ao centro o beacon PSK.

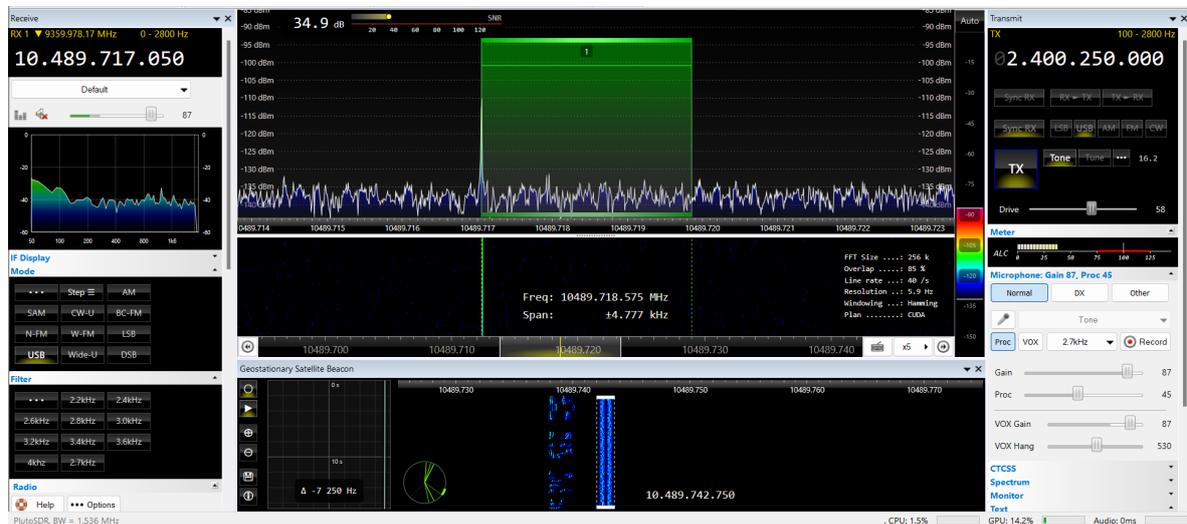


Figura 4.58: Tom transmitido pelo ADALM-PLUTO e recebido no downlink do satélite

Pela figura 4.58, observa-se que o tom não se encontra na frequência de downlink correta. Para corrigir este problema repetiu-se o processo que se fez no recetor quando se configurou o conversor. Desta vez, para obter o valor usado no conversor, calculou-se a diferença entre a frequência a que o tom foi recebido e a frequência a que foi transmitido. Neste caso foi obtido o valor 8089467050 Hz, no entanto tem-se de considerar a frequência do próprio tom visto que quando foi transmitido estava modulado em USB. Então o valor a ser usado é 8089466050 Hz porque o tom era de 1 kHz.

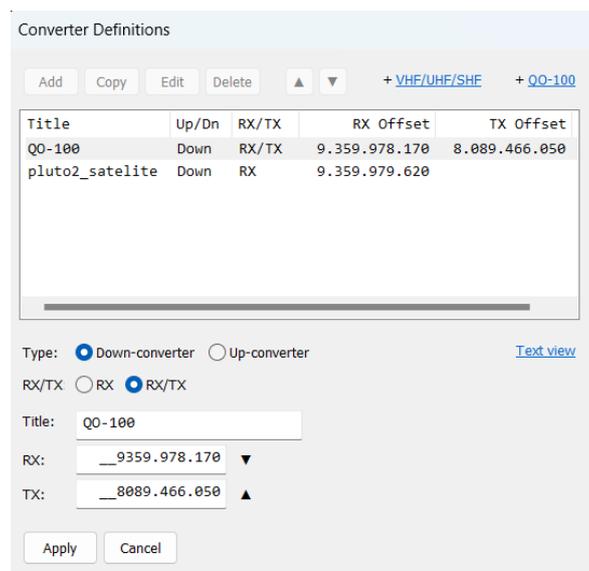


Figura 4.59: Definições para o conversor do transmissor

Agora, ao observar a figura 4.60, vê-se que o tom está muito próximo da frequência suposta

(está cerca de 100 Hz acima da frequência devido ao problema relacionado ao oscilador local do ADALM-PLUTO descrito no subcapítulo anterior).

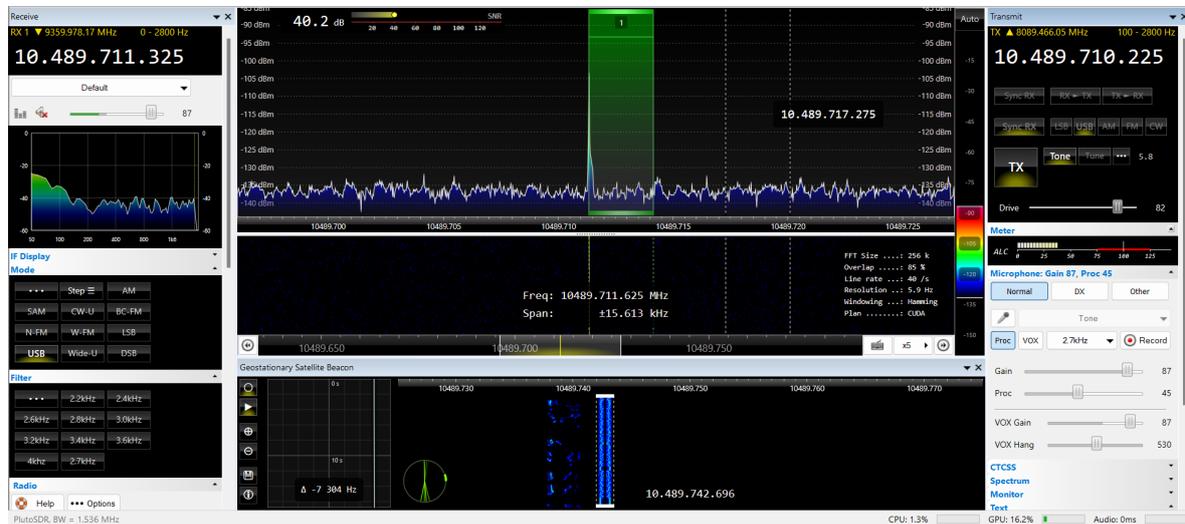


Figura 4.60: Tom transmitido pelo ADALM-PLUTO e recebido no downlink do satélite após correção

Ao observarmos a frequência do transmissor, pode-se notar que, devido à configuração do conversor, é possível selecionar a frequência de downlink na qual se deseja que o sinal transmitido apareça. Logo, pode-se configurar a frequência de transmissão e recepção como sendo a mesma, eliminando assim a necessidade de fazer cálculos que relacionavam a frequência de uplink com a de downlink. Se a função de sincronização RX do programa for usada, em qualquer lugar do espectro que se clique, ambas as frequências são alteradas para aquela selecionada, facilitando assim a comunicação com outros utilizadores.

Realizou-se finalmente a transmissão do sinal de voz modulado em USB. O problema de desvio de frequência continua a existir e não há nada que se possa fazer para o solucionar, apenas se pode mitigar o problema usando ferramentas de correção que são disponibilizadas pelo SDR Console como o XIT. Ao mudar o valor do XIT, o sinal transmitido pode ser deslocado para a frequência correta, mas terá de se reajustar o valor pois a correção não é definitiva. No entanto, observou-se que quanto mais tempo o sistema permanece ligado, menor se torna o desvio no transmissor.

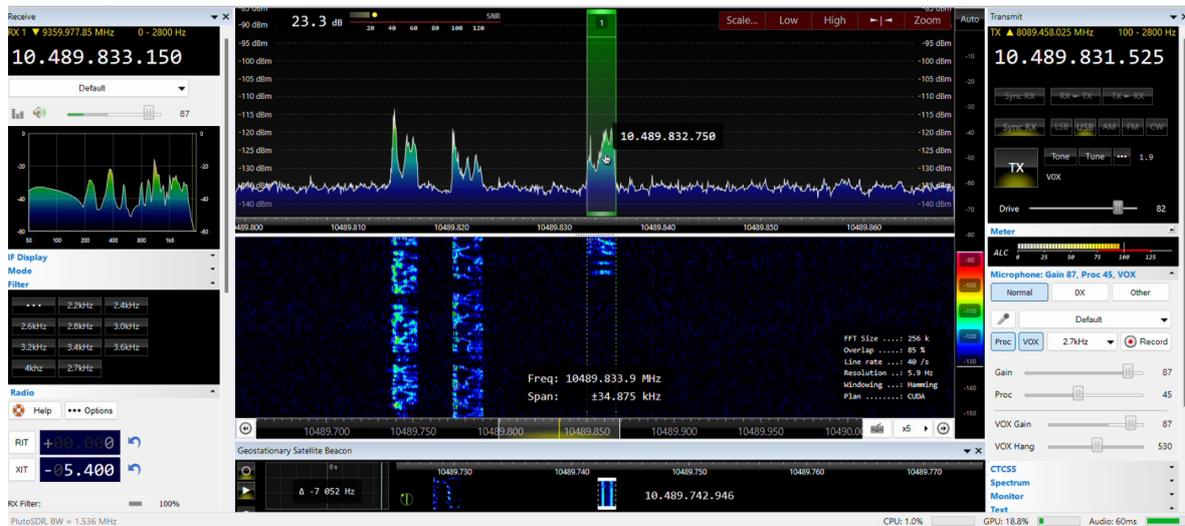


Figura 4.61: Transmissão e recepção de um sinal de voz modulado em USB

A figura 4.61 foi capturada enquanto ocorria a transmissão de voz. Foi necessário ajustar algumas configurações, como o ganho do microfone e drive, para obter uma potência máxima de 10 W à saída do amplificador, uma vez que 1 W não era suficiente para garantir que o sinal transmitido fosse recebido com um valor de SNR razoável. No entanto, devido ao tamanho dos cabos coaxiais usados, entre a saída do amplificador e a antena de transmissão existe uma perda de 5 dB na potência do sinal. Portanto, se o sinal tem 10 Watts na saída do amplificador, ele terá aproximadamente 3.2 Watts quando chegar à antena. Segundo o datasheet do ZHL-30W-252-S+, a potência de saída no ponto de 1 dB de compressão a 2.4 GHz é 43.80 dBm por isso, não é indicado subir mais a potência à entrada do amplificador caso contrário ele deixa de ser linear.

Devido ao desvio de frequência descrito anteriormente, decidiu-se não usar a função de sincronização das frequências de transmissão e recepção. Em vez disso, usou-se essa função para selecionar o local onde se queria transmitir, que de seguida foi desligada e feito o ajuste fino na frequência de recepção. Pode-se ver que o SNR do sinal recebido é de 23.3 dB, não estando muito diferente do SNR de transmissões de outros utilizadores. O sinal foi recebido com clareza e foi compreensível desde que estivesse completamente dentro da banda de recepção. Como o sinal de voz é modulado em USB, é necessário que todo o seu espectro esteja dentro da banda de recepção, caso contrário frequências serão cortadas fazendo com que o sinal recebido seja incompreensível.

Pode-se fazer a comparação da figura acima com a figura 4.62 onde está representada a recepção de um sinal de voz transmitido por outro utilizador.

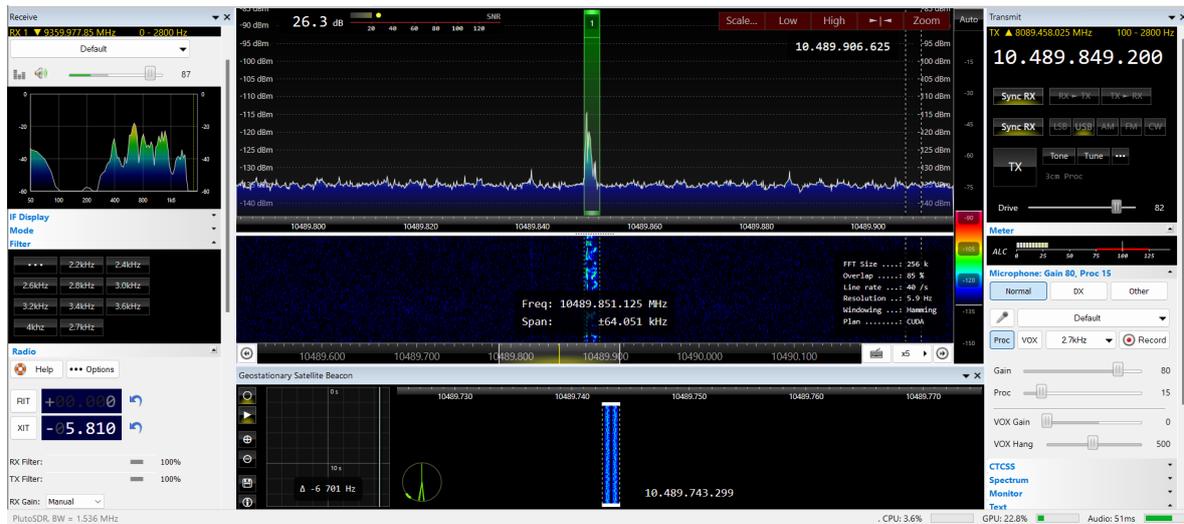


Figura 4.62: Sinal transmitido por outro utilizador e recebido pelo sistema montado

O sinal que foi enviado por este utilizador foi recebido com o sistema montado com um SNR de 26.3 dB. Conseguiram-se receber sinais de outros utilizadores que apresentavam um SNR maior, porém estes utilizadores estão a desobedecer às regras de utilização do satélite onde a potência do sinal que é transmitida é maior do que a permitida (o sinal transmitido não deve ser mais potente do que os beacons).

Na figura 4.63, foi traçado um gráfico que representa o sinal transmitido e recebido pelo sistema, bem como outro gráfico que representa o sinal recebido pelo sistema, que foi transmitido por outro utilizador.

No primeiro, entre os 0 e 1.9 segundos existe apenas ruído, porque ainda não tinha começado a transmissão. Aos 2 segundos começou-se a receber o sinal que foi transmitido. Entre as partes de fala e silêncio pode-se observar que a amplitude do ruído não é tão grande como a do ruído presente entre 0 e 2 segundos. Para o reduzir foi usado um algoritmo de redução de ruído que é fornecido pelo SDR Console. A amplitude do ruído é maior entre 0 a 2 segundos porque o algoritmo acha, antes do sinal ser recebido, que o próprio ruído é o sinal pretendido. Após o sinal começar a ser recebido, o algoritmo muda o seu comportamento. Entre grandes períodos de silêncio, como por exemplo entre mais ou menos 3.5 e 5.5 segundos, a amplitude do ruído começa lentamente a aumentar. Podemos observar este mesmo comportamento no segundo gráfico na região entre 16.4 e 19.1 segundos. Em ambos os gráficos, entre pequenos períodos de silêncio, o ruído é mínimo. Para ambas as receções foi também usada uma AGC Slow Attack.

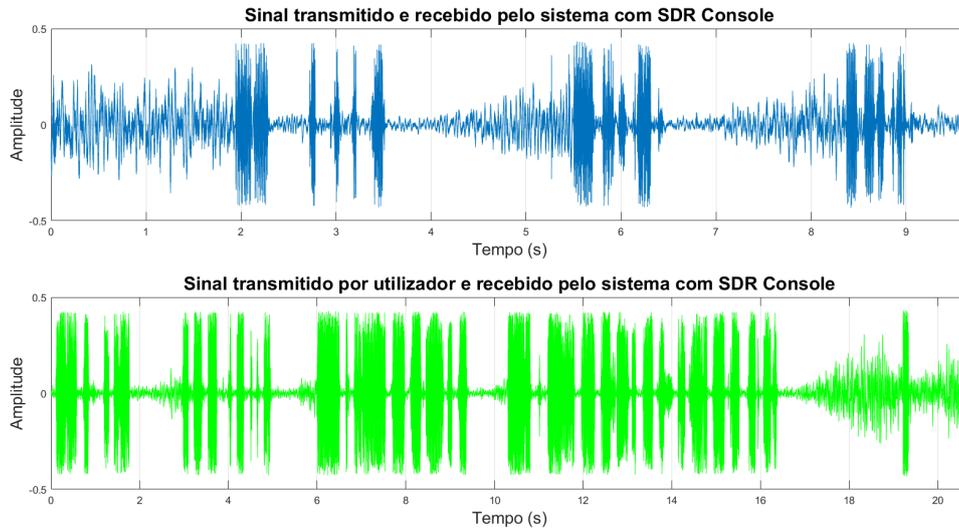


Figura 4.63: Sinais recebidos pelo sistema

As configurações dos parâmetros deste algoritmo podem ser encontradas na figura 4.64.

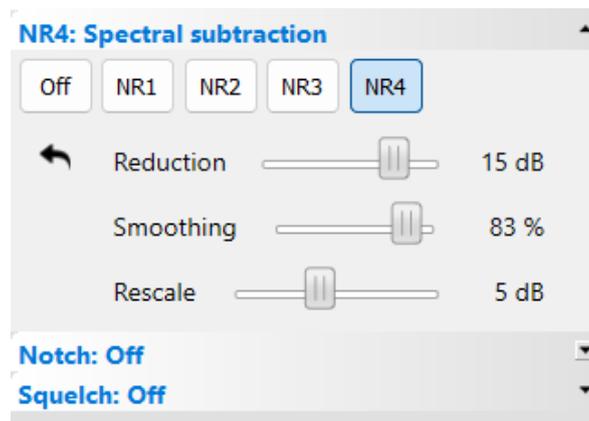


Figura 4.64: Parâmetros do algoritmo de redução de ruído

Um sinal transmitido é comparado com o recebido na figura 4.65. A forma de onda do sinal recebido apresenta semelhanças em relação à forma de onda do sinal transmitido. Claramente, consegue-se distinguir entre períodos de fala e silêncio. Como já foi descrito anteriormente, onde no sinal transmitido se encontram zonas de silêncio, no recebido encontra-se ruído. Contudo, quando se sobrepõe os sinais e se amplia uma região, observa-se que as suas formas de onda não coincidem. Isto é uma consequência do aquecimento do PCB do ADALM-PLUTO que afeta o seu oscilador. Devido a este fenómeno, a frequência de transmissão sofre um desvio ao longo do tempo. Assim, quando o sinal é recebido do downlink do satélite, frequências serão cortadas fazendo com que o sinal de áudio se torne mais agudo ou mais grave (corte de baixas e altas frequências respetivamente). Quando reproduzido, este sinal de áudio apresenta uma tonalidade mais aguda do que o original. Logo, sabe-se que o recetor estava sintonizado para uma frequência maior do que a de downlink deste sinal. O sinal foi

recebido com um SNR de 24 dB.

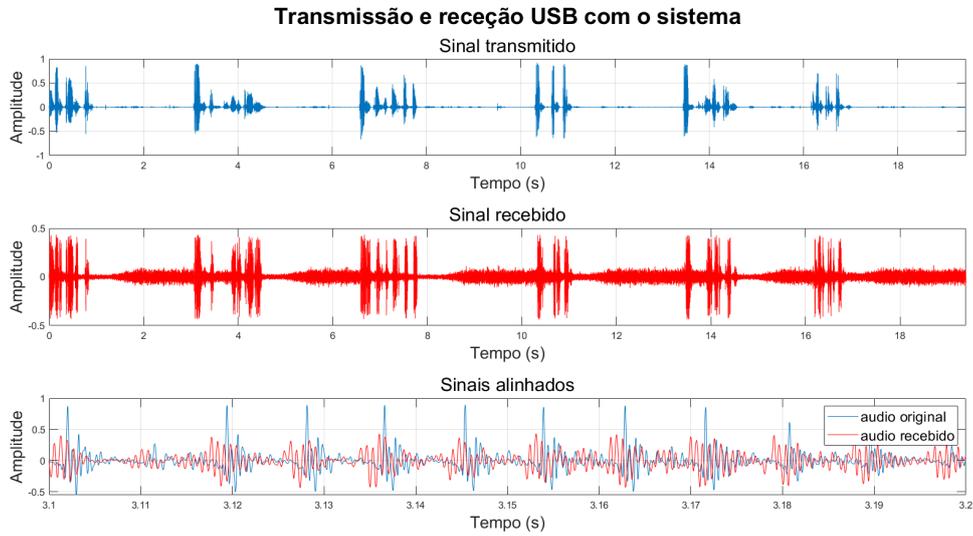


Figura 4.65: Comparação do sinal transmitido pelo uplink do satélite com o sinal recebido do downlink

Para comprovar o bom funcionamento do sistema montado, realizou-se um último teste. Usando o SDR Console é possível gerar um sinal com modulação USB que quando visto num espectrograma pode-se observar uma mensagem de texto.

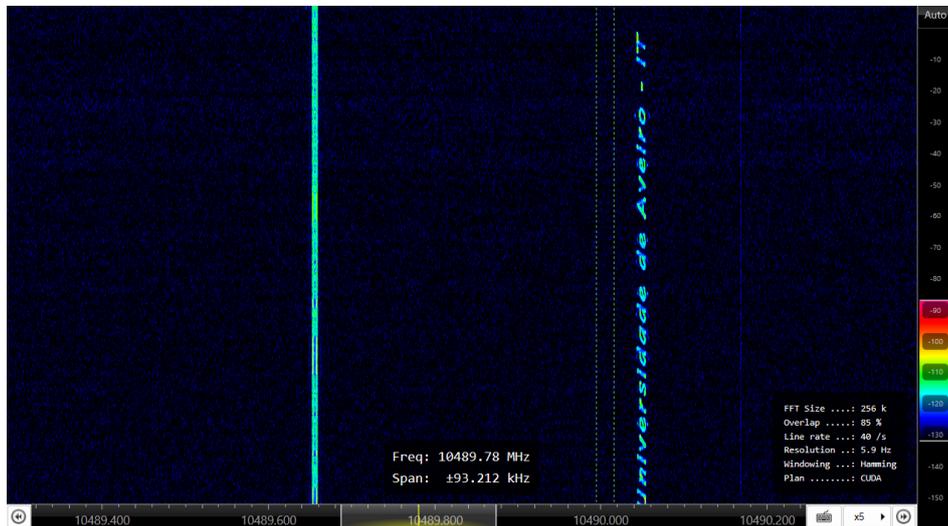


Figura 4.66: Sinal gerado por SDR Console que escreve uma mensagem de texto no espectrograma recebido do downlink do satélite

O programa foi então configurado para gerar um sinal que quando é visto no espectrograma, forma a mensagem "Universidade de Aveiro - IT". Este sinal foi transmitido e a sua receção pode ser vista na figura 4.66. Ao lado esquerdo encontra-se o espectro do beacon

PSK e à direita a mensagem. Pode-se fazer a leitura da mensagem sem qualquer problema, provando assim que o sistema montado é capaz de realizar a comunicação com o satélite QO-100.

Capítulo 5

Conclusão e trabalhos futuros

5.1 Conclusão

O objetivo da dissertação é o projeto de uma estação de rádio amador via satélite usando SDR. Depois de se terem analisados vários SDRs, decidiu-se usar o ADALM-PLUTO. A gama de frequências usada pelo satélite e a disposição de um transmissor por parte do ADALM-PLUTO foram os fatores decisivos para a escolha deste SDR (frequências de uplink dentro da gama suportada pelo ADALM-PLUTO), além da capacidade de ser usado em modo full-duplex. O software SDR Console foi usado em conjunto com o ADALM-PLUTO devido ao seu ambiente gráfico amigável e intuitivo, assim como as várias funcionalidade que se mostraram úteis para o desenvolvimento deste trabalho.

Depois de se ter feito o desenho do sistema a implementar, foram realizados testes ao ADALM-PLUTO que faziam a medição de potência à saída do transmissor, o que foi imperativo para não correr o risco de danificar quaisquer equipamentos e também para depois se ter uma noção do desempenho do sistema em relação a ganhos e possíveis perdas dentro do próprio sistema. Foram também realizados testes sobre a capacidade de transmissão e receção do ADALM-PLUTO. Para transmissão e receção de um sinal AM, foi visto que quando o ganho do ADALM-PLUTO é configurado como modo AGC Fast Attack, o sinal é recebido com qualidade quando o transmissor apresenta entre 0 e 20 dB de atenuação, sendo a forma de onda do sinal de áudio quase idêntica ao original. Ultrapassados 30 dB de atenuação no transmissor, o sinal é recebido cada vez mais danificado. Além de a amplitude do sinal recebido diminuir, também começaram a aparecer picos no sinal recebido que não estavam presentes no sinal original. Após tentar resolver este problema, foi descoberto que os picos presentes no sinal recebido eram causados pelo bloco AGC presente no fluxograma do recetor que em conjunto com o modo AGC Fast Attack do ADALM-PLUTO, aumentavam a amplitude do sinal recebido até que este ultrapassava o valor máximo de amplitude que pode ser representado ou gravado com precisão.

O bloco AGC foi removido e o ganho do recetor do ADALM-PLUTO ajustado manualmente. O teste anterior foi repetido, mas desta vez fixou-se o valor de atenuação do transmissor a 10 dB e variou-se o ganho no bloco recetor. Entre 0 e 30 dB de ganho no recetor, apesar de o sinal recebido apresentar uma amplitude menor no geral, os picos sobre os quais se comentou anteriormente desapareceram. Todavia, ao ultrapassar 40 dB de ganho no recetor, o sinal começa a saturar até que aos 50 dB é só recebido ruído.

Quando se transmitiu e recebeu um sinal USB fez-se o mesmo tipo de teste. O valor de

atenuação no transmissor foi configurada para 10 dB e ajustou-se o ganho no recetor enquanto no fluxograma do recetor estava presente um bloco AGC. Com ganho a 0 dB a amplitude do sinal recebido é muito baixa em relação ao sinal original. Ao aumentar o ganho do recetor para 10 dB e 20 dB, a amplitude do sinal recebido aumenta, no entanto as regiões correspondentes a grandes amplitudes no sinal original são afetadas por "clipping". O bloco AGC, tal como como no recetor AM, prova-se inútil e por isso é removido. Após a remoção do bloco de ganho automático, é inserido um bloco de multiplicação que age como um fator de amplificação no sinal de áudio recuperado, proporcionando assim um controle mais preciso sobre a amplitude desse sinal. Inicialmente, é usado um valor de 0.5 dentro desse bloco, o qual reduz a amplitude do sinal de áudio recuperado pela metade em relação ao sinal recebido. Devido à seleção desse valor, entre 0 e 20 dB de ganho no bloco recetor, o sinal de áudio recuperado inicialmente apresenta uma amplitude bastante reduzida, a qual é aumentada quando se aplica um ganho de 30 dB (este valor é ideal para esta última configuração).

O valor dentro do bloco de multiplicação foi ajustado para 1 (ganho unitário), o que se mostrou eficaz na amplificação, tornando o sinal recebido mais próximo do original. No entanto, quando o ganho no recetor atinge ou ultrapassa 30 dB, o sinal recuperado sofre distorção pelo mesmo motivo mencionado anteriormente. Conclui-se então que o uso de um bloco de multiplicação é mais vantajoso do que um bloco AGC porque dependendo do sinal recebido, existe um melhor controlo quando se pode escolher o valor de amplificação em vez desse valor ser gerado automaticamente pela AGC.

Para finalizar estes testes foi transmitido e recebido um sinal QPSK. Quando se usou no transmissor uma atenuação de 0 dB e no recetor um ganho de 15 dB, o sinal recebido apresentava bandas adjacentes muito acentuadas, um ACPR de -44.3 dB e EVM de 1.12 %. Para reduzir a potência destas bandas aumentou-se a atenuação na transmissão de 0 dB para 14 dB. Após esta mudança, o ACPR foi melhorado de -44.3 dB para -50.45 dB. No entanto, o EVM aumentou de 1.12% para 2.78%. Foram utilizados dois dispositivos ADALM-PLUTO para estudar a relação entre o EVM e a distância entre as antenas de transmissão e receção. Observou-se que, quando o ACPR é mais elevado, o EVM é menor para distâncias maiores, ao contrário do que ocorre quando o ACPR é menor.

Passou-se então à montagem do sistema de teste. Este sistema tem como função garantir que todos os componentes funcionam como o esperado, abstraindo-se do satélite ao usar um misturador para fazer o deslocamento do espectro do sinal transmitido a 2.4 GHz para 10.4 GHz. Primeiro fez-se um estudo sobre de como evolui a potência no conector RF do misturador com a potência de transmissão do ADALM-PLUTO, onde os resultados obtidos coincidiram com o estudo feito previamente sobre a característica do misturador usado. Com estes testes conclui-se que entre o conector IF e RF, quando no conector LO existe um sinal a 8 GHz com 10 dBm de potência, existe uma atenuação de mais ou menos 12 dB. Realizou-se o mesmo teste sobre o LNB e descobriu-se que a sua potência máxima de saída era de mais ou menos 3 dBm. Os testes realizados evidenciaram que a antena de 10.4 GHz, que está conectada ao LNB, é altamente diretiva. Como resultado, é necessário alinhar o LNB diretamente com a posição do misturador. Caso contrário, a relação sinal-ruído dos sinais recebidos sofreria uma redução significativa. No que diz respeito à transmissão, quando se transmitiu um tom e ao analisar o espectrograma apresentado no SDR Console, viu-se que existia um desvio de frequência ao longo do tempo causado pela instabilidade térmica do oscilador local do ADALM-PLUTO.

Finalmente montou-se o sistema que realiza a comunicação com o satélite. Neste sistema, o amplificador de potência CN-0417 da Analog Devices foi substituído pelo ZHL-30W-252-

S+ devido à sua baixa potência de saída e falta de necessidade deste ser usado como pré-amplificador. O LNB foi afixado a um refletor parabólico de 60 cm para poder receber o sinal vindo do downlink do satélite, assim como ter a capacidade de transmitir no uplink. Após regular o azimute e elevação da parabólica, instantaneamente se recebeu os três beacons esperados (o beacon CW, PSK, e experimental) o que significa que a recepção estava a funcionar. Isto foi comprovado com a comparação dos sinais recebidos pelo ADALM-PLUTO com os apresentados no WebSDR. Alguns problemas como o desvio causado pela instabilidade térmica mantêm-se mas reparou-se que quanto mais tempo o setup estiver ligado menor é o desvio, sendo possível contorná-lo com uso de ferramentas fornecidas pelo programa. Para saber se a transmissão estava funcional, transmitiu-se um tom com 1 W de potência que foi recebido pelo satélite. No entanto, na frequência de downlink errada. Outra vez, este problema é insignificante podendo ser corrigido com o programa através da configuração de conversores de frequência. Os sinais transmitidos através do sistema montado ou por outros utilizadores foram recebidos com qualidade com SNRs entre 23 e 26 dB. Neste satélite, a modulação padrão escolhida pelos seus utilizadores é USB. Com este tipo de modulação é necessário ter cuidado com a frequência de recepção, pois existe a possibilidade de serem cortadas frequências do sinal e este se tornar incompreensível. Ao comparar o sinal transmitido com o sinal recebido, foi observado que, embora as formas de onda fossem semelhantes, ao ampliar uma determinada parte dos sinais, notou-se que eles não coincidiam. A influência do ruído no sinal recebido e o corte de frequências resultante da influência do calor gerado pelo PCB no oscilador local são a razão deste acontecimento. Foi também possível transmitir um sinal que escreve uma mensagem no espectrograma. Esta mensagem foi recebida e a sua leitura é clara.

Finalmente, após a discussão dos resultados anteriores, pode-se concluir que o objetivo desta dissertação foi atingido com sucesso.

5.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros pode-se fazer uma reestruturação do setup montado para que este possa ser deixado ao ar livre. Assim o amplificador de potência poderá ficar perto da antena de transmissão de modo a que se minimize perdas causadas pelo comprimento dos cabos coaxiais usados. Para isto devíamos incluir a utilização de conversores de tensão no sistema, um LNB ultra-estável com um TCXO de boa qualidade, e um ADALM-PLUTO modificado. A modificação do ADALM-PLUTO pode ser feita pelo aluno onde este substituiu o oscilador local por um de melhor qualidade que não apresente instabilidade térmica. Esta solução é um pouco delicada devido à necessidade de soldagem de componentes muito pequenos. Outra solução seria a compra de um PLUTO+ que contém as modificações mencionadas anteriormente, ou usar um sinal de relógio de referência externo que esteja bloqueado em frequência a um sinal de GPS (usando por exemplo o Leo Bodnar GPSDO). Para se poder deixar o setup ao ar livre deve-se montar todo o sistema dentro de um recipiente à prova de água para evitar danificação. O amplificador de potência usado no sistema final (ZHL-30W-252-S+) possui um preço de unidade de 4 906,60 euros. Não é necessário usar um amplificador como este. Se usarmos um CN-0417 da Analog Devices como estágio de pré-amplificação e por exemplo o amplificador de potência da DXPatrol que é projetado para este tipo de setup e satélite, seriam poupados 4691,71 euros.

Bibliografia

- [1] Andre Luiz Garcia Reis, Andre Felipe Barros, Karlo Gusso Lenzi, Luis Geraldo Pedroso Meloni, and Silvio Ernesto Barbin. Introduction to the software-defined radio approach. *IEEE Latin America Transactions*, 10(1):1156–1161, 2012.
- [2] Per Vices. What is a software defined radio? <https://www.everythingrf.com/community/what-is-a-software-defined-radio>. Acedido em: 12/03/2023.
- [3] Alexander M Wyglinski, Robin Getz, Travis Collins, and Di Pu. *Software-defined radio for engineers*. Artech House, 2018.
- [4] About rtl-sdr. <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>. Accessed: 08/04/2023.
- [5] Kiwisdr website. <http://kiwisdr.com>. Acedido em : 27/10/2023.
- [6] Kiwi sdr design review document. <http://kiwisdr.com/docs/KiwiSDR/KiwiSDR.design.review.pdf>. Acedido em: 11/09/2023.
- [7] Gnu radio wiki. https://wiki.gnuradio.org/index.php/Main_Page. Accessed: 05/04/2023.
- [8] Sdr console website. <https://www.sdr-radio.com/console>. Acedido em: 16/10/2023.
- [9] Es’hail 2 / qo-100. <https://amsat-uk.org/satellites/geo/eshail-2/>.
- [10] New qo-100 band plan. <https://amsat-dl.org/en/new-qo-100-band-plan/>. Acedido em: 19/03/2023.
- [11] Qo-100 wb transponder bandplan and operating guidelines. <https://amsat-dl.org/en/p4-a-wb-transponder-bandplan-and-operating-guidelines/>. Acedido em: 19/03/2023.
- [12] Analog Devices Diego Koch. Adi sdr transceivers enable amateur space communication. <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/adi-sdr-transceivers-enable-amateur-space-communication.html>. Acedido em: 19/03/2023.
- [13] Analog Devices. Adalm-pluto sdr active learning module. <https://www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/product-highlight/ADALM-PLUTO-Product-Highlight.pdf>. Acedido em: 18/03/2023.
- [14] H Gernsback. The first annual official wireless blue book of the wireless association of america. *Modern Electrics*, May, 1909.

- [15] Radioamadorismo. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Radioamadorismo>.
- [16] Russell C Coile. The role of amateur radio in providing emergency electronic communication for disaster management. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 1997.
- [17] ARRL The National Association for Amateur Radio. What is ham radio. <http://www.arrl.org/what-is-ham-radio>. Acedido: 27/03/2023.
- [18] Markus Dillinger, Kambiz Madani, and Nancy Alonistioti. *Software defined radio: Architectures, systems and functions*. John Wiley & Sons, 2005.
- [19] Joseph Mitola. Software radios: Survey, critical evaluation and future directions. *Software Radio Technologies: Selected Readings*, pages 3–11, 2001.
- [20] Mathew NO Sadiku and Cajetan M Akujuobi. Software-defined radio: a brief overview. *Ieee Potentials*, 23(4):14–15, 2004.
- [21] R.I. Lackey and D.W. Upmal. Speakeasy: the military software radio. *IEEE Communications Magazine*, 33(5):56–61, 1995.
- [22] José Raúl Machado-Fernández. Software defined radio: Basic principles and applications. *Revista Facultad de Ingeniería*, 24(38):79–96, 2015.
- [23] Nathalie Haziza, Mohamed Kassab, Raymond Knopp, Jérôme Härrri, Florian Kaltenberger, Philippe Agostini, Marion Berbineau, Christophe Gransart, Joëlle Besnier, Jacques Ehrlich, et al. Multi-technology vehicular cooperative system based on software defined radio (sdr). In *Communication Technologies for Vehicles: 5th International Workshop, Nets4Cars/Nets4Trains 2013, Villeneuve d’Ascq, France, May 14-15, 2013. Proceedings 5*, pages 84–95. Springer, 2013.
- [24] Mohammad S Sharawi and Oleksiy V Korniyenko. Software defined radios: A software gps receiver example. In *2007 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications*, pages 562–565. IEEE, 2007.
- [25] Pradeep B Nagaraju, Eric Koski, and Tommaso Melodia. A software defined radio ionospheric chirpsounder for hf propagation analysis, 2009.
- [26] Eric H Matlis, TC Corket, and Sivaram P Gogineni. Ac plasma anemometer for hypersonic mach number experiments. In *ICIASF 2005 Record International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*, pages 245–256. IEEE, 2005.
- [27] Joseph Mitola and Gerald Q Maguire. Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE personal communications*, 6(4):13–18, 1999.
- [28] Alexander M Wyglinski, Maziar Nekovee, and Thomas Hou. *Cognitive radio communications and networks: principles and practice*. Academic Press, 2009.
- [29] Adalm-pluto overview. <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto>. Acedido em : 11/03/2023.

- [30] MATLAB. Communications toolbox support package for analog devices adalm-pluto radio. https://www.mathworks.com/help/supportpkg/plutoradio/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. Acedido em: 18/03/2023.
- [31] Rtl2832u datasheet. <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1493155/Realtek/RTL2832U/1>. Acedido em: 11/09/2023.
- [32] Introduction to using the kiwisdr. http://kiwisdr.com/ks/using_Kiwi.html.
- [33] Communications toolbox support package for analog devices adalm-pluto radio. https://www.mathworks.com/help/supportpkg/plutoradio/index.html?s_tid=CRUX_lftnav. Accessed: 05/04/2023.
- [34] Gnu radio. <https://www.gnuradio.org/about/>. Accessed: 05/04/2023.
- [35] Stephen Clark. SpaceX selected for launch of qatari satellite. <https://spaceflightnow.com/2014/12/29/spacex-selected-for-launch-of-qatari-satellite/>.
- [36] Is there a full duplex transceiver functionality for the adalm-pluto and matlab? Acedido em : 22/04/2023.
- [37] Es'hail-2 / amsat phase 4-a / qatar-oscar 100. <https://amsat-dl.org/en/eshail-2-amsat-phase-4-a/>.
- [38] Amsat-dl qo-100 downconverter v3d. <https://amsat-dl.org/der-neue-amsat-dl-qo-100-downconverter-v3d/>. Acedido em: 20/07/2023.
- [39] Gnu radio simulation example: Am transmitter and receiver. https://wiki.gnuradio.org/index.php/Simulation_example:_AM_transmitter_and_receiver. Acedido em: 27/06/2023.
- [40] Am modulation on gnu radio. <https://jeremyclark.ca/wp/telecom/am-modulation-on-gnu-radio/>. Acedido em: 27/06/2023.
- [41] Simulation example: Single sideband transceiver. https://wiki.gnuradio.org/index.php/Simulation_example:_Single_Sideband_transceiver. Acedido em: 28/07/2023.
- [42] Ssb modulation on gnu radio. <https://jeremyclark.ca/wp/telecom/ssb-modulation-on-gnu-radio/>. Acedido em: 28/07/2023.
- [43] Guided tutorial psk demodulation. https://wiki.gnuradio.org/index.php/Guided_Tutorial_PSK_Demodulation. Acedido em : 20/07/2023.
- [44] My first tx to qo-100, is this off frequency and drift normal for stock pluto? <https://forum.amsat-dl.org/index.php?thread/3778-my-first-tx-to-qo-100-is-this-off-frequency-and-drift-normal-for-stock-pluto/>. Acedido em: 26/10/2023.
- [45] Es'hail-2 (qo-100) dish pointing. <https://eshail.batc.org.uk/point/>. Acedido em: 26/10/2023.

Apêndice A

Código de MATLAB

A.1 Medição da potência de saída do ADALM-PLUTO

```
% Title:          ADALM-PLUTO Output Power Measurement
%
% Autores:        Pedro Maia <pedrorui33@ua.pt>
% Last update:    19/07/2023
```

```
clc
clear
close
```

```
addpath('./Drivers_LAN/Drivers_LAN/N1913')
```

```
%-----ALDAM-PLUTO Specs
```

```
-----
deviceNameSDR = 'Pluto';
fc = 2.4e9;      % center frequency
fs = 2e6;        % sample frequency
```

```
%-----Tone Creation
```

```
-----
sw = dsp.SineWave;
sw.Amplitude = 1;
sw.Frequency = 10;
sw.ComplexOutput = true;
sw.SampleRate = fs;
sw.SamplesPerFrame = 2000;
txWaveform = sw();
```

```
%-----Powermeter Configuration
```

```

N1913_ip = '192.168.81.38'
[idn_N1913,error_N1913]=N1913_Init(N1913_ip);
[~] = N1913_Config(idn_N1913,fc);

%-----Plot Power vs Gain
-----
Gain = -89:1:0
for i=1:length(Gain)
    sdrTransmitter = sdrtx(deviceNameSDR, ...
        'RadioID','usb:0', ...
        'CenterFrequency',2.4e9, ...
        % center frequency: 2.4GHz
        'BasebandSampleRate',fs,...
        'Gain', Gain(i));
        % default Gain = -10 dB (range: -89.75 dB - 0 dB)

    transmitRepeat(sdrTransmitter,txWaveform);
    pause(5)
    [~,power(i)] = N1913_ReadPower(idn_N1913);
    % Agilent N1913 power reading

    release(sdrTransmitter);
end

figure
plot(Gain,power,'-o');
grid on
xlabel('Transmitter Gain');
ylabel('Output Power in dBm');
title('Output Power vs. Transmition Gain')

fclose(idn_N1913)

```

A.2 Comparação do sinal original com sinal recebido

```
% Title:          Signal Comparison
%
% Autores:        Pedro Maia <pedrorui33@ua.pt>
% Last update:    13/04/2023

clc
clear
close

% Read received audio
[audio_recebido,Fs_recebido] = audioread('RX_0dB_multi_12.wav');

% Received audio downsampling
Fs = 44100;
[Numer, Denom] = rat(Fs/Fs_recebido);
audio_recebido_resample = resample(audio_recebido, Numer, Denom)
    ;

% Read original audio
afr = dsp.AudioFileReader('guitartune.wav','SamplesPerFrame',
    length(audio_recebido_resample))

while ~isDone(afr)
    audio_original = afr();
end

% Plot signals

time = (0:length(audio_original)-1)/Fs;

[x_a,y_a,dt] = align_circular_signal(audio_recebido_resample,
    audio_original,50);

time2 = (0:length(y_a)-1)/Fs;

figure
subplot(3,1,1)
plot(time, audio_original, 'g')
legend('audio original')
xlabel('Time (s)')
```

```

ylabel('Amplitude')
title('SSB Transmission and Reception')
subtitle('Tx Attenuation = 10 dB           Rx Gain = 0 dB
         No AGC Block           Volume = 12')
xlim([0 15])

subplot(3,1,2)
plot(time,real(x_a))
xlabel('Time (s)')
ylabel('Amplitude')
legend('audio recebido')
xlim([0 15])

subplot(3,1,3)
plot(time2,y_a,time2,real(x_a))
legend('audio original','audio recebido')
subtitle('Sinais Alinhados')
xlabel('Time[s]');
ylabel('Amplitude')
xlim([8.1 8.2])

```

A.3 Função para alinhar dois sinais

```
function [x_a,y_a,dt] = align_circular_signal(x,y,itters)
% [x_a,y_a] = align_circular_signal(x,y,iter)
%
% Aligns the signals x and y considering that they are circular
% (periodic).
% The procedure is iterative, default 10 iterations.

%
% Author: Filipe Barradas
% Date: November 2013

x = reshape(x,[],1);
y = reshape(y,[],1);

Hf = fft(x).*conj(fft(y));
H = ifft(Hf);
[~,ind_m] = max(abs(H));

dt = ind_m;

x_a = circshift(x,-(ind_m-1));
h = (x_a'*y)./(x_a'*x_a);
h = exp(1j*angle(h));
x_a = h.*x_a;

N = length(x_a);
f = fftshift((-1/2+1/N:1/N:1/2).');

tol = 1e-5*norm(x)*norm(y);

try
    for k1 = 1:itters
        d = delay_estimator(x_a,y,tol);
        dt = dt + d;
        del = exp(-1j*2*pi*f*d);
        x_a = ifft(fft(x_a).*conj(del));
    end
catch
    for k1 = 1:10
        d = delay_estimator(x_a,y,tol);
        dt = dt + d;
        del = exp(-1j*2*pi*f*d);
        x_a = ifft(fft(x_a).*conj(del));
    end
end
```

```

end
h = (x_a'*y)/(x_a'*x_a);
h = exp(1j*angle(h));
x_a = h.*x_a;
y_a = y;
end

function d = delay_estimator(x,y,tol)
N = length(x);

R3 = ifft(fft(x).*conj(fft(y)))/N;

R = -real(R3);
lags = [(0:round(N/2)-1)';(-round(N/2):-1)'];

R_m = min(R);

pick = (abs(R-R_m)<tol);

ind = (1:N)';
ind = ind(pick);
try
    ind = ind(1);
    d = lags(ind) - 1/2*(R(mod(ind-1+1,N)+1) - R(mod(ind-1-1,N)
        +1))/(R(mod(ind-1+1,N)+1) - 2*R(ind) + R(mod(ind-1-1,N)
        +1));
    if isnan(d) || isinf(d)
        d = lags(ind);
    end
catch
    d = 0;
end
end

```

A.4 Cálculo do ACPR

```
%Title:          ACPR calculation
%
%Authors:        Pedro Maia <pedrorui33@ua.pt>
%Last update:    14/07/2023

clc
close
clear

%% QPSK signal import
f=fopen('recebido_rx_15','rb');
values=fread(f,[2 Inf],'float32');
data = complex(values(1, :), values(2,:));
data=data';

%% Imported signal specifications
excess_bw = 0.5;
sps=4;                % samples per symbol
sample_rate=2e6;      % sampling frequency
bw = (1+excess_bw)/sps * sample_rate; % signal bandwidth

%% comm.ACPR object cration
acpr = comm.ACPR('SampleRate',sample_rate);
acpr.MainChannelFrequency = 0;
acpr.MainMeasurementBandwidth = 100e3;
acpr.AdjacentChannelOffset = [sample_rate/2-bw/2];
acpr.AdjacentMeasurementBandwidth = 100e3;
acpr.MainChannelPowerOutputPort = true;
acpr.AdjacentChannelPowerOutputPort = true;
acpr.SpectralEstimation = 'Specify window parameters';
acpr.SegmentLength = 2048;
acpr.OverlapPercentage = 50;
acpr.Window = 'Blackman-Harris';

%% PSD plot and ACPR calculation
win = blackmanharris(2048);
figure
pwelch(data,win,50,2048,sample_rate,'centered');
[ACPR Main_Channel_Power Adjacent_Channel_Power] = acpr(data)

release(acpr);
```

A.5 Cálculo do EVM

```
%Title:          ACPR calculation
%
%Authors:        Pedro Maia <pedrorui33@ua.pt>
%Last update:    17/08/2023

%% Constellation import and plot
clc
clear
close

f=fopen('170cm_novo','rb');
values=fread(f,[2 Inf],'float32');
data = complex(values(1, :), values(2,:));
data=data';

sps = 1;
refConst = [0.707+0.707i;-0.707+0.707i;-0.707-0.707i;0.707-0.707
            i];

constDiagram = comm.ConstellationDiagram('SamplesPerSymbol',sps,
    ...
    'SymbolsToDisplaySource','Property','SymbolsToDisplay'
    ,10000,...
    'ReferenceConstellation',refConst, 'EnableMeasurements',1);

constDiagram(data)

release(constDiagram)
fclose("all")

% After importing the constellation and register the EVM shown
% in the constellation plot, a EVM vs Distance graph is plotted
.
% The test was made for distance between 10cm and 170cm

rmsEVM_values = [1.73 2.79 3.91 3.25 3.24 2.79 4.37 5.11 6.2
                 7.41 6.68 11.06 9.92 12.05 14.58 21.04 19.88];
distance = 10:10:170;

plot(distance,rmsEVM_values)
grid on
xlim([min(distance) max(distance)]);
ylim([min(rmsEVM_values) max(rmsEVM_values)]);
```

```
xlabel('Distancia entre antenas (cm)');  
ylabel('RMS EVM (%)');  
title('EVM em relacao a distancia entre antenas dos ADALM-Plutos  
' );  
subtitle('Atenuacao TX = 14 dB          Ganho RX = 15 dB');
```


Apêndice B

Desenho dos filtros

Para desenhar os filtros foi usado o software ADS e os Smart Components presentes nele. O projeto foi feito da seguinte maneira:

1. Colocar no esquemático o substrato e o filtro hairpin. Depois disto deve-se configurar os parâmetros de cada um. Neste caso, o substrato usado foi o Rogers RO4350B.

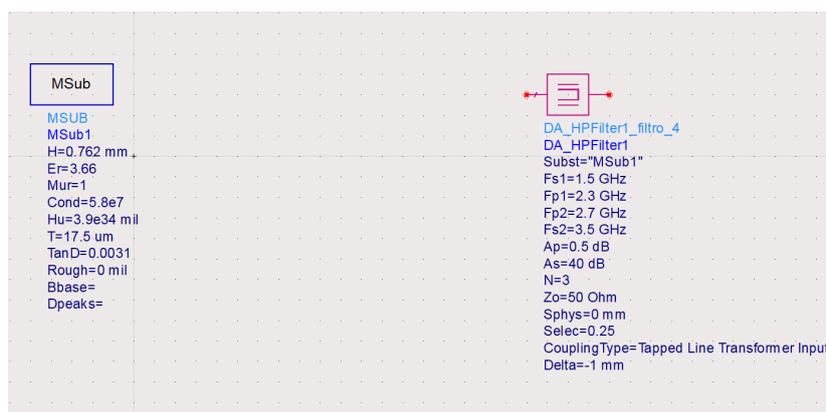


Figura B.1: Esquemático para projeto do filtro

2. Agora deve-se selecionar na barra superior a opção Design Guide e a seguir a opção Passive circuits como mostra a figura B.2

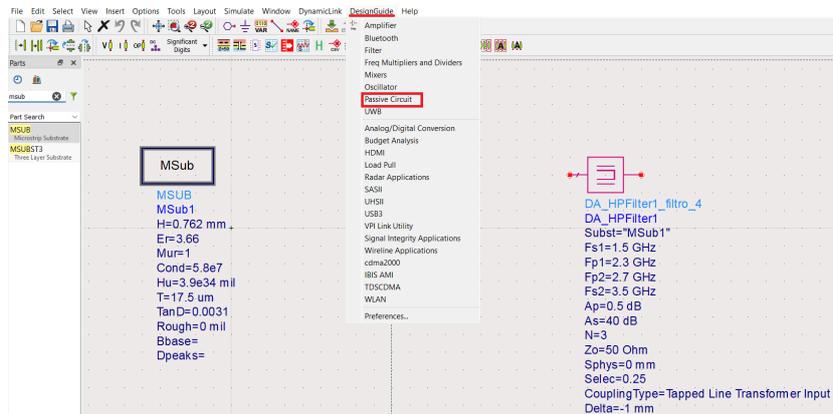


Figura B.2: Passo 2

3. Após seguir o passo 2, uma janela vai abrir onde se deve selecionar a opção Passive Circuit Control Window. Isto vai abrir uma nova janela onde devemos selecionar a opção Design Assistant e de seguida pressionar o botão Design. Isto vai desenhar o filtro de acordo com os parâmetros escolhidos no passo 1.

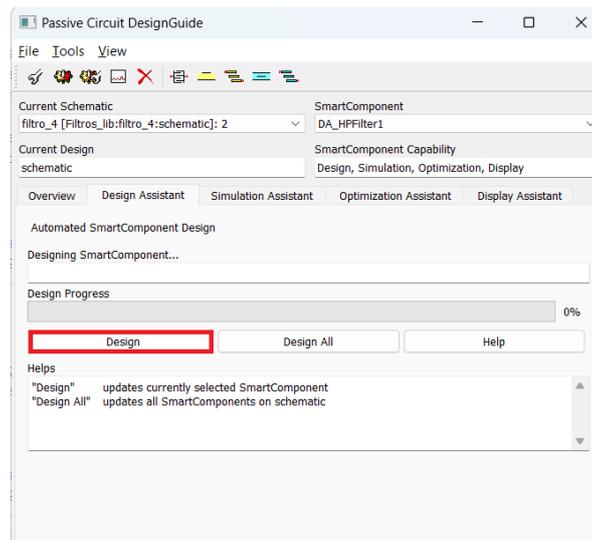


Figura B.3: Janela para fazer o desenho do filtro

4. Agora avançamos para a simulação. Para simular o filtro devemos selecionar a opção Simulation Assistant, e a seguir selecionar a gama de frequências que se pretende simular assim como o número de pontos. Finalmente deve-se carregar no botão Simulate.

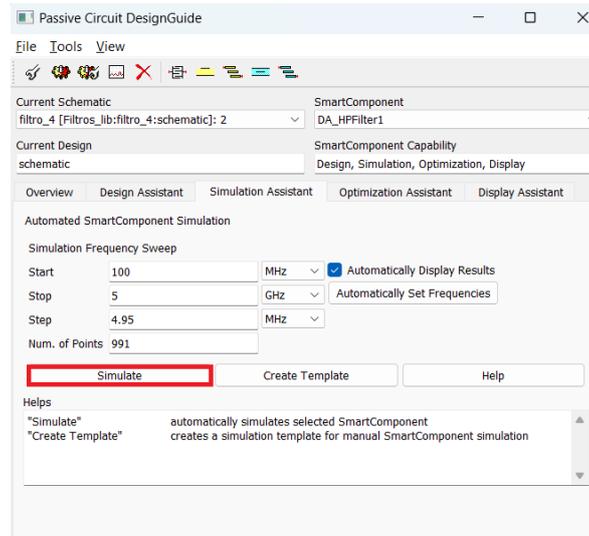


Figura B.4: Janela para fazer a simulação do filtro

- Se na janela de simulação estiverem apresentados resultados que não estejam de acordo com o esperado, pode-se fazer a otimização do filtro ao selecionar a opção Optimization Assistant como mostrado na figura B.5. Se isto não resultar, deve-se mudar os parâmetros do filtro que escolhemos no passo 1, por exemplo largura de nada ou ordem do filtro. No caso desta dissertação teve de se adaptar os parâmetros do filtro para aumentar o espaço entre secções porque o valor obtido pelo ADS era muito pequeno e, por isso, não é suportado pela máquina de impressão de PCB.

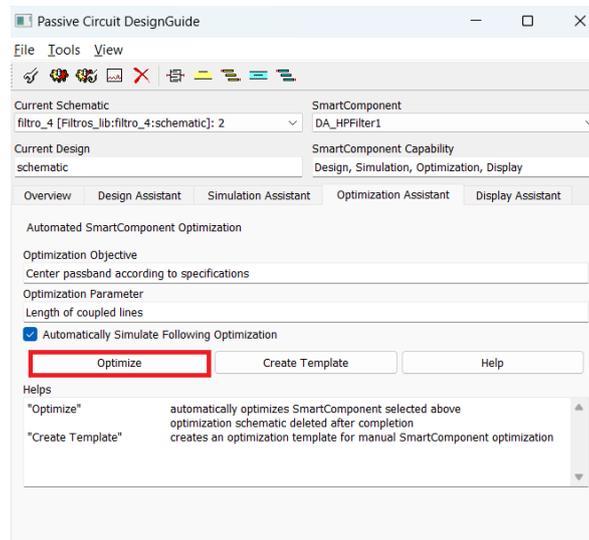


Figura B.5: Janela para fazer a otimização do filtro

B.1 Resultados

Depois de desenhar e otimização, foi obtido o filtro da figura B.6.

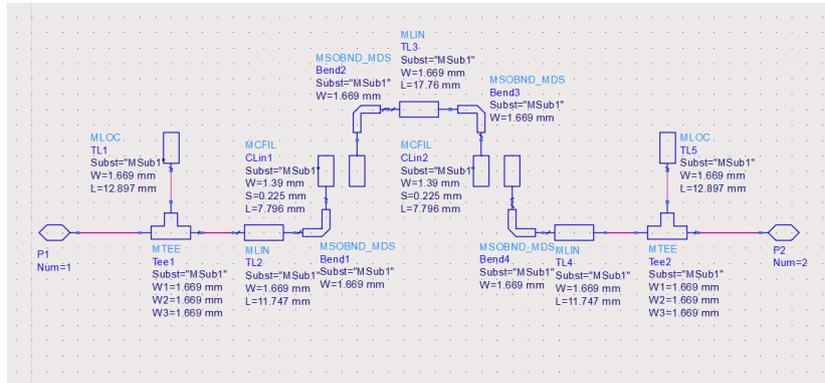


Figura B.6: Esquemático com as medidas para o filtro obtido após desenho e otimização

A figura B.7 mostra os resultados obtidos por simulação. Pode-se observar pelo parâmetro s_{21} e s_{11} que o filtro tem 1.399 dB de atenuação e e -8.104 dB de return loss a 2.4GHz, respectivamente.

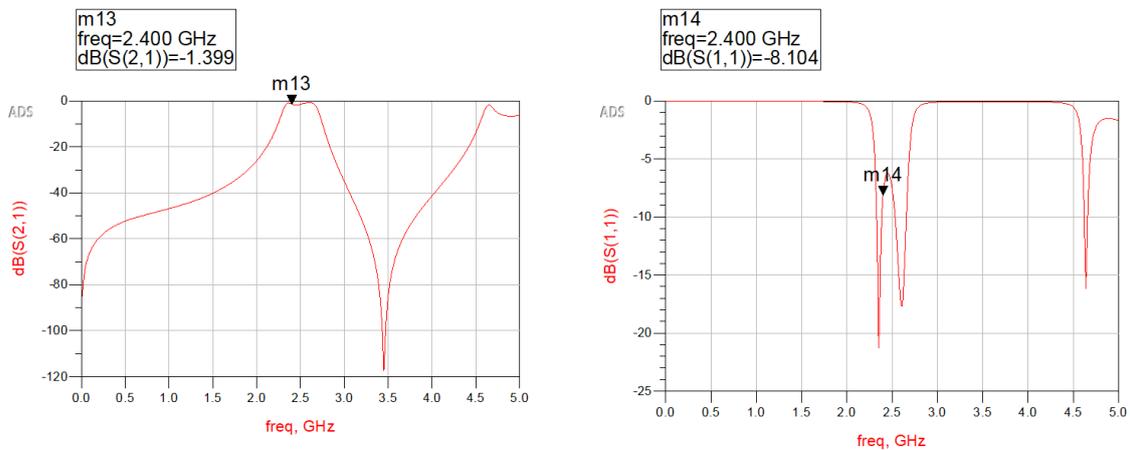


Figura B.7: Simulação do filtro obtido após desenho e otimização

Para soldar os conectores SMA ao filtro, foi necessário adicionar um linha com 5 milímetros de comprimento de cada lado do filtro como é mostrado na figura B.8.

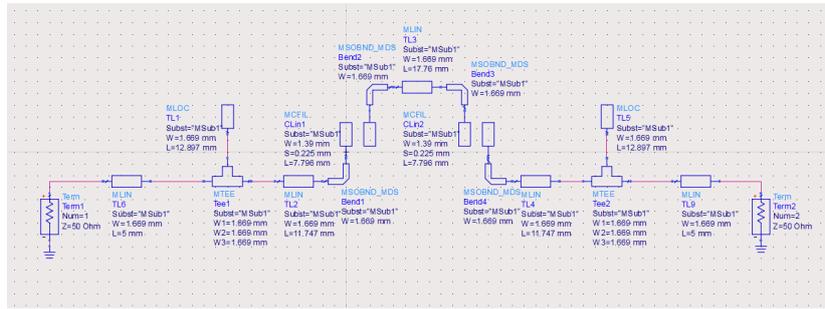


Figura B.8: Esquemático final do filtro

Os resultados obtidos por simulação deste filtro estão apresentados na figura B.9. A atenuação aumentou cerca de 0.005 dB e o return loss aumentou cerca de 0.056 dB.

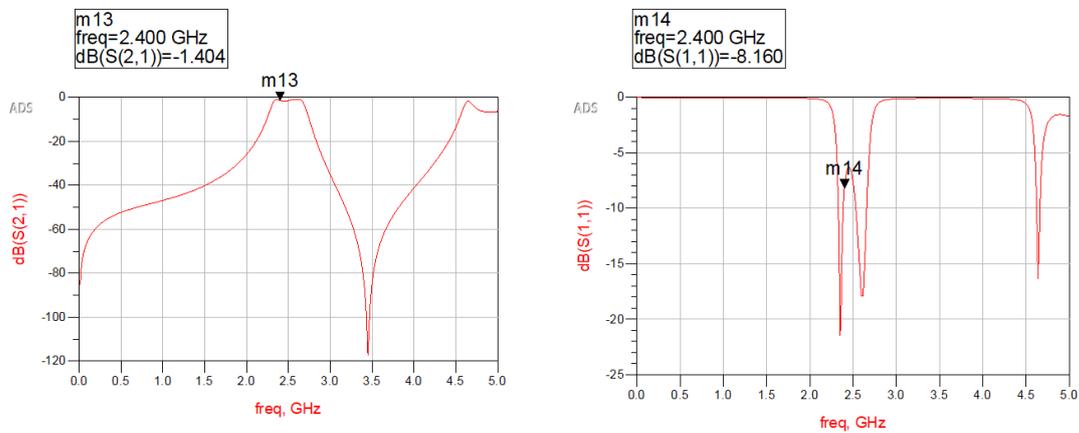


Figura B.9: Simulação do filtro final

Após obter estes resultados, mediu-se os parâmetros S do filtro através de um VNA e comparou-se os resultados obtidos pelo VNA e os resultados obtidos pelo simulador. Na figura B.10 pode-se observar esta comparação, onde em ambos os gráficos o traçado a vermelho representa o filtro simulado e o traçado a azul o filtro que foi imprimido.

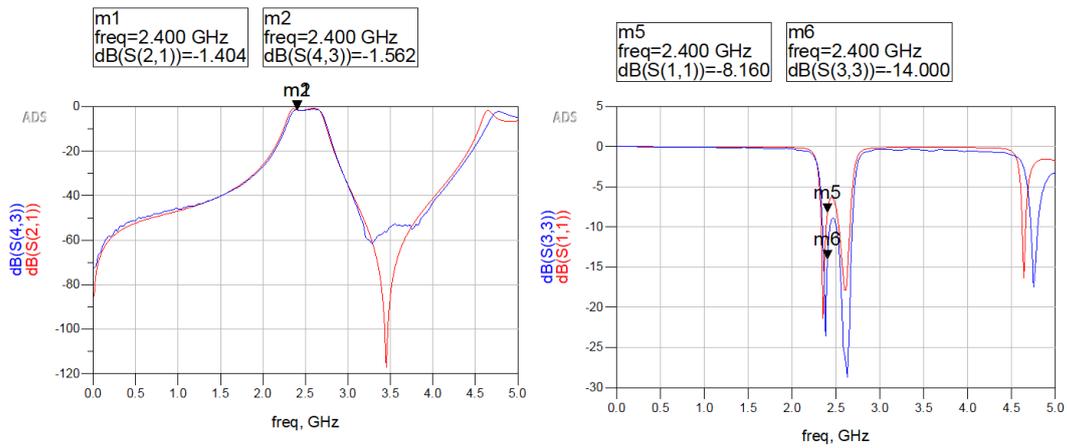


Figura B.10: Comparação dos resultados obtidos pelo simulador com os resultados obtidos pelo VNA

Podemos observar que na prática o filtro apresenta uma atenuação de 1.562 dB na banda de passagem a 2.4 GHz e return loss de -14 dB. Esta diferença de valores derivam ou do processo de fabrico do PCB ou dos conectores SMA que foram soldados.

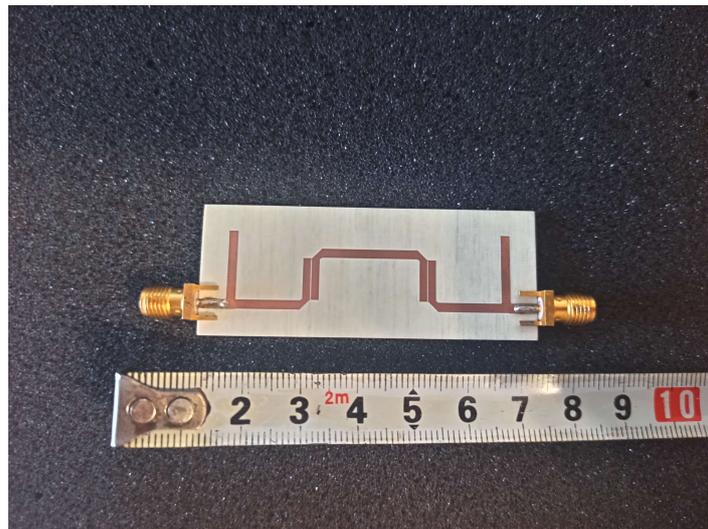


Figura B.11: Filtro impresso

Apêndice C

Outros testes

C.1 Característica do misturador

Como no datasheet do mixer não existe informação sobre a sua característica para os parâmetros que foram usados na montagem do sistema, foi decidido que se devia fazer esta característica no laboratório para ter a noção da atenuação que existe entre o conector IF e RF, e também para saber os valores de potência que podem ou não estar presentes nos dois conectores mencionados.

C.1.1 Procedimentos

Para realizar os testes no laboratório foram usados os seguintes equipamentos:

- 1x Misturador Mini-Circuits ZX05-153LH-S+
- 1x Fonte de sinal para 8 GHz
- 1x Fonte de sinal para 2.4 GHz
- 1x Analisador de espectro
- 1x Computador com MatLab instalado

Para medir a característica do mixer conectou-se um cabo coaxial entre a fonte de sinal configurada para ter na sua saída um tom a 2.4 GHz e o conector IF do misturador. De seguida, o conector LO foi conectado à fonte de sinal configurada para ter na sua saída um tom a 8 GHz que de acordo com o datasheet do mixer, deve ter 10 dBm de potência. Finalmente, para medir a potência do tom a 10.4 GHz presente à saída do conector RF, foi usado um analisador de espectro. Variou-se a potência do sinal presente no conector IF do mixer e registou-se a potência do sinal presente no conector RF que com a ajuda dum script de Matlab, foi traçado um gráfico.

C.1.2 Resultados

A figura xxx mostra o gráfico traçado pelo script de Matlab que representa a relação entre a potência do sinal no conector IF com a potência do sinal presente no canal RF, quando no conector LO se tem uma senoide de 8 GHz a 10 dBm.

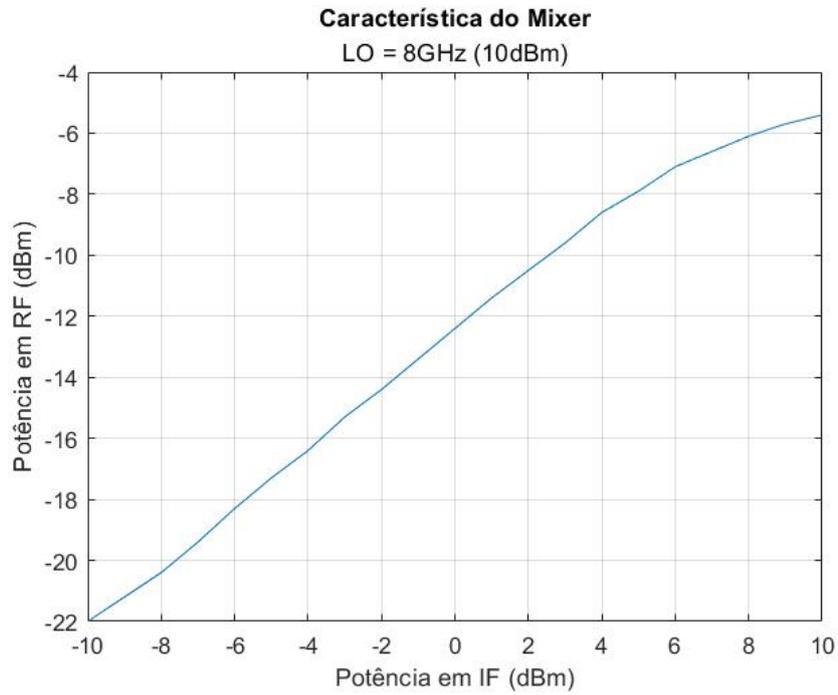


Figura C.1: Característica do misturador

A partir do momento que no conector IF está presente um tom com potência maior ou igual a 5 dBm, a potência no conector RF deixa de ter uma resposta linear e começa a saturar. Quando isto acontece, entre IF e RF deixa de haver um atenuação de 12 dBm pelo que à medida que a potência em IF aumenta, a atenuação entre os dois conectores também aumenta. Portanto, para não danificar o misturador não se deve ultrapassar uma potência de 10 dBm em IF.