



Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação

## Emissor/Recetor Acústico definido por Software para comunicações subaquáticas

David Martins Simões

Dissertação submetida como requisito obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia de Telecomunicações e Informática

Orientador:  
Professor Doutor Nuno Manuel Branco Souto,  
Professor Auxiliar, ISCTE - IUL

2015/2016



Emissor/Recetor Acústico definido por Software para comunicações  
subaquáticas

David Martins Simões



## Resumo

Esta dissertação concerne o estudo e a conceção de um emissor / recetor acústico definido por *software* para comunicações acústicas subaquáticas.

O trabalho incidiu no *design* e na implementação de um esquema de emissão e receção usando técnicas de *Software Defined Radio* (SDR).

As comunicações acústicas subaquáticas têm vindo a tornar-se indispensáveis, uma vez que são uma solução para os atuais cabos submarinos, reduzindo assim os custos de implementação e manutenção, principalmente em zonas mais remotas e de difícil acesso, nas quais a instalação de uma rede fixa cablada se torna bastante complicada e dispendiosa. Por outro lado, a exploração de áreas submarinas tem vindo a crescer e com isto tem-se verificado uma crescente necessidade de existir outras formas de comunicação subaquática que sejam rápidas e eficazes.

Nesta dissertação antes de mais realizou-se uma revisão da literatura e uma análise às aplicações já existentes, de forma a entender os seus pontos fortes, fracos e técnicas de transmissão utilizadas. De seguida desenvolveu-se um emissor / recetor acústico definido por software fazendo uso da ferramenta GNU Radio. Inicialmente foram avaliados os emissores e recetores através de simulações em canal AWGN, *Fading Model* e *Selective Fading Model* considerando modulações GFSK, GMSK, MQAM e DBPSK. Após estas simulações passou-se para os esquemas reais, onde emissores e recetores, fazendo uso das mesmas modulações, utilizavam o ar como canal de comunicação fazendo trocas de mensagens e ficheiros!

Os dados resultantes desta tese visaram assim, demonstrar em que condições é possível a comunicação acústica avaliando as modulações mais adequadas que permitam a implementação de emissores e recetores de baixa complexidade.

Palavras chave: Comunicações subaquáticas acústicas; GNU RADIO; Propagação acústica; GFSK; GMSK; MQAM; DBPSK.



## Abstract

This dissertation studies the design of a transmitter / receiver acoustic scheme based on software defined radio tools for underwater communications.

The work will focus on the implementation and design of a software that allows underwater communications, using the *Software Defined Radio* (SDR).

Underwater acoustic communications have become important since they can be an alternative to submarine cables, reducing implementation and maintenance costs, especially in more remote areas with difficult access, where the installation of a wired fixed network becomes quite complicated and expensive. On the other hand, exploitation of undersea areas has been increasing and thus there has been a growing need for other forms of underwater communication that can be fast and reliable.

On this dissertation primarily carried out a literature review and an analysis of the existing applications in order to understand their strengths, weaknesses and modulations. Next have been developed a transmitter / receiver sound defined by software by using GNU Radio tool. Initially evaluated the senders and receivers through simulations AWGN channel, Fading Model and Selective Fading Model considering the modulation GFSK, GMSK, MQAM and DBPSK. After these simulations was passed to the actual schemes, where transmitters and receivers making use of the same modulations used the air as a communication channel, exchanging messages and files that way.

The results obtained from this thesis aimed thus demonstrate under what conditions acoustic communication are possible to assess the most appropriate modulations that allow the implementation of emitters and low complexity receivers.

Keywords: acoustic underwater communications; GNU RADIO; acoustic propagation; GFSK; GMSK; MQAM; DBPSK.





## **Dedicação**

Correndo o risco de me esquecer de alguém, não posso deixar de agradecer em especial a minha família, porque sem eles seria muito difícil toda esta jornada.

Ao meu orientador Professor Doutor Nuno Manuel Branco Souto pela excelente oportunidade que proporcionou, pela prontidão, dedicação e paciência demonstrada, onde sem a sua ajuda teria sido impossível a conclusão deste trabalho.

Ao ISCTE-IUL, pela disponibilização dos meios à realização do trabalho aqui apresentado.

A todos os meus amigos que na realidade são a família mais alargada e com quem desfruto de bons momentos.



## Índice

Resumo.....	I
Abstract .....	III
Dedicação .....	V
Índice Figuras .....	IX
Índice tabelas.....	XIII
Índice Equações.....	XV
Lista Acrónimos .....	XVII
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 - Motivação e Enquadramento.....	1
1.2 - Estado de Arte .....	6
1.3 - Objetivos .....	8
1.4 – Contribuições.....	8
1.5 – Organização da dissertação .....	9
Capítulo 2 – Comunicação / Canal Acústico .....	11
2.1 - Parâmetros de Sonar.....	12
2.2 - Canal Acústico .....	15
2.3 - Velocidade de propagação do Sinal .....	18
2.4 - Variações temporais .....	23
2.5 - Multi Percurso e Fenómeno de “bolhas”.....	23
2.6 - Equipamentos Acústicos .....	24
Capítulo 3 – Comunicação Acústica e digital .....	27
3.1 – Protocolos e Modulações.....	27
3.1. – Modulações Digitais .....	32
3.1.1 – Modulação GFSK .....	32
3.1.2 – Modulação GMSK.....	33
3.1.3 – Modulação PSK / QPSK.....	34
3.1.4 – Modulação MQAM.....	35

3.1.5 – Modulação OOK.....	37
3.2 – Técnicas de Transmissão e combate a multi percurso.....	38
3.3 – SDR .....	39
3.4 - Soluções existentes.....	41
3.4.1 - Soluções Propostas por Projetos de Investigação .....	42
Capítulo 4 – Transceivers de baixa complexidade para canais acústicos .....	45
4.1 – Esquemas Emissão / Recepção .....	46
4.1.1 – Esquema Emissão / Recepção em canal AWGNN (Additive White Gaussian Noise).....	46
4.1.2 – Esquema Emissão / Recepção em canal <i>Fading Model</i> .....	48
4.1.3 – Esquema Emissão / Recepção em canal <i>Selective Fading Model</i> .....	50
4.2 - Resultados em Canal AWGNN.....	50
4.3 – Resultados em Canal <i>Fading Model</i> .....	55
4.4 – Resultados em Canal <i>Selective Fading Model</i> .....	58
Capítulo 5 – Avaliação dos esquemas de baixa complexidade para canais acústicos .....	61
5.1 – Esquemas emissão e recepção para envio vetores.....	61
5.2 – Resultados em Canal real .....	64
5.2.1 – BER vs. Frequência .....	65
5.2.2 – BER vs. Distância .....	68
5.3 – Apresentação da aplicação.....	70
Capítulo 6 – Conclusões.....	79
Referências .....	81
Apêndices A – Introdução ao Gnu Radio.....	89
Apêndices B – GnuRadio flowgraph para simulações.....	91
Apêndices C - GnuRadio flowgraph para testes reais.....	101
Apêndices D - GnuRadio flowgraph para a aplicação .....	107

## Índice Figuras

Figura 1 - Exemplo Exploração Petrolífera Imagem extraída de [86].	1
Figura 2 - Exemplo sistema de monitorização subaquático. Imagem Extraída de [5].	3
Figura 3 - Exemplo de rede Sensores para uso na defesa Imagem extraída de [87].	4
Figura 4 - Exemplo Rede Sensores uso da Industria Imagem extraída de [88].	4
Figura 5 - Exemplo rede sensores subaquáticos para monitorização Imagem extraída de [89].	4
Figura 6 - Exemplo Rádio definido por software SDR. Imagem extraída de [10].	5
Figura 7 - Robô UAV Russo. Imagem extraída de [90].	6
Figura 8 - Projeto SUNRISE. Imagem extraída de [39].	7
Figura 9 - Relação Sinal Ruído vs. Frequência. Imagem extraída de [5].	11
Figura 10 - Exemplo do modo funcionamento do Sonar Ativo. Imagem extraída de [37].	12
Figura 11 - Densidade Espectral de potência acústica do ruído ambiente num canal acústico em função da frequência. Imagem extraída de [34].	16
Figura 12 - Absorção da onda acústica em água salgada em função da frequência. Imagem extraída de [44].	17
Figura 13 - Dispersão geométrica da onda acústica no meio subaquático. Imagem extraída de [46].	18
Figura 14 - Primeira medição da velocidade do som na água. Imagem extraída de [55].	18
Figura 15 - Atenuação do som na água. Imagem extraída de [49].	19
Figura 16 - Relação sinal ruído em função da frequência para diversas distâncias. Imagem extraída de [50].	20
Figura 17 - Propagação sinal em água pouco profundas. Imagem extraída de [43].	20
Figura 18 - Exemplo das diferentes camadas oceânicas. Imagem extraída de [43].	21
Figura 19 - Velocidade de propagação do sinal em função da profundidade. Imagem extraída de [46].	21
Figura 20 - Ilustração da propagação de sinais sonoros. Imagem extraída de [43].	22
Figura 21 - Efeito Doppler. Imagem extraída de [49].	22
Figura 22 - Efeito multi percurso. Imagem extraída [49].	24
Figura 23 - Exemplo do uso de Hydrofones e Transducers. Imagem extraída de [54].	25
Figura 24 - Transmissão vs. Relação à distância. Imagem extraída [17].	28
Figura 25 - Espectro FDM e Espectro OFDM. Imagem extraída [29].	30
Figura 26 - Esquema do Modulador FSK acima e GFSK em baixo.	32

Figura 27 - Transformação do pulso após passagem pelo filtro Gaussiano. Imagem extraída de [81].	33
Figura 28 - Gerador GMSK. Imagem extraída de [80].	34
Figura 29 - Variação de fase em função da transição de Bit – Modulação PSK. Imagem extraída [81]	34
Figura 30 - Diagrama de fase e quadratura para 4 possíveis símbolos gerados pela modulação QPSK. Imagem extraída de [81].	35
Figura 31 - Exemplos de diagrama de constelação. Imagem extraída de [81].	36
Figura 32 - Exemplos de diagrama de constelação. Imagem extraída de [81].	36
Figura 33 - Sinal OOK NRZ. Imagem extraída de [82].	37
Figura 34 Sinal OOK RZ. Imagem extraída de [82].	37
Figura 35 - Exemplo do conceito de Rádio Definido por software.	40
Figura 36 – Simulador GFSK em canal AWGNN	45
Figura 37 - Simulador GFSK em canal <i>Fading Model</i>	49
Figura 38 - Simulador GFSK em canal <i>Selective Fading Model</i> .	50
Figura 39 - Resultado da Simulação com canal AWGNN na modulação GFSK	51
Figura 40 - Resultado da Simulação com canal AWGNN na modulação GMSK	52
Figura 41- Resultado da Simulação com canal AWGNN na modulação DBPSK	52
Figura 42- Resultado da Simulação com canal AWGNN na modulação MQAM	53
Figura 43 - Resultado da Simulação com canal <i>Fading Model</i> na modulação GFSK	56
Figura 44 - Resultado da Simulação com canal <i>Fading Model</i> na modulação GMSK	56
Figura 45 - Resultado da Simulação com canal <i>Fading Model</i> na modulação DBPSK	57
Figura 46 - Resultado da Simulação com canal <i>Fading Model</i> na modulação MQAM	57
Figura 47 - Resultado da Simulação com canal <i>Selective Fading Model</i> na modulação GFSK	59
Figura 48 - Resultado da Simulação com canal <i>Selective Fading Model</i> na modulação GMSK	59
Figura 49 - Resultado da Simulação com canal <i>Selective Fading Model</i> na modulação DBPSK	60
Figura 50 - Resultado da Simulação com canal <i>Selective Fading Model</i> na modulação MQAM	60
Figura 51 - Emissor GFSK	63
Figura 52 - Recetor GFSK	64

Figura 53 - BER vs. Frequência modulação na GFSK .....	66
Figura 54 - BER vs. Frequência na modulação GMSK .....	66
Figura 55 - BER vs. Frequência na modulação MQAM.....	67
Figura 56 - BER vs. Frequência na modulação DBPSK.....	67
Figura 57 - BER vs. Distância na modulação GFSK .....	68
Figura 58 - BER vs. Distância na modulação GMSK.....	69
Figura 59 - BER vs. Distância na modulação MQAM .....	69
Figura 60 - BER vs. Distância na modulação DBPSK .....	70
Figura 61 – Exemplificação de abertura de canais de comunicação.....	71
Figura 62 - Emissor modulação GFSK para envio mensagens via terminal.....	71
Figura 63 - Recetor modulação GFSK para envio mensagens via terminal .....	72
Figura 64 - Emissor recetor modulação GFSK .....	73
Figura 65 - Troca de Mensagens entre emissor e recetor.....	74
Figura 66 –Ilustração do Emissor e recetor.....	75
Figura 67 - Emissor modulação GFSK para envio de ficheiros.....	76
Figura 68 - Emissor modulação GFSK para envio de ficheiros.....	77
Figura 69 - Exemplo código GNU Radio. Imagem extraída de [10]. .....	89
Figura 70 - Exemplo GNU Radio. ....	90
Figura 71 - Exemplo Frequência.....	90
Figura 72 - Simulador GMSK em canal AWGNN .....	91
Figura 73 - Simulador MQAM em canal AWGNN.....	92
Figura 74 - Simulador DBPSK em canal AWGNN.....	93
Figura 75 - Simulador GMSK em canal <i>Fading Model</i> .....	94
Figura 76 - Simulador MQAM em canal <i>Fading Model</i> .....	95
Figura 77 - Simulador DBPSK em canal <i>Fading Model</i> .....	96
Figura 78 - Simulador GMSK em canal <i>Selective Fading Model</i> .....	97
Figura 79 - Simulador QAM em canal <i>Selective Fading Model</i> .....	98
Figura 80 - Simulador DBPSK em canal <i>Selective Fading Model</i> .....	99
Figura 81 - Emissor GMSK .....	101
Figura 82 - Recetor GMSK .....	102
Figura 83 - Emissor MQAM .....	103
Figura 84 - Recetor MQAM.....	104
Figura 85 - Emissor DBPSK .....	105

Figura 86 - Recetor DBPSK.....	106
Figura 87 - Emissor para troca de mensagens entre terminais na modulação GMSK.....	107
Figura 88 - Recetor para troca de mensagens entre terminais na modulação GMSK.....	108
Figura 89 - Emissor para troca de mensagens entre terminais na modulação MQAM.....	109
Figura 90 - Recetor para troca de mensagens entre terminais na modulação MQAM .....	110
Figura 91 - Emissor para troca de mensagens entre terminais na modulação DBPSK.....	111
Figura 92 - Emissor para troca de mensagens entre terminais na modulação DBPSK.....	112



## Índice tabelas

Tabela 1 - Variações da velocidade do som .....	19
Tabela 2- Especificações dos modems da Link-Quest [38] .....	31
Tabela 3 - Exemplo pacote enviado por modem da Teledyne. Tabela extraída de [28]. .....	32
Tabela 4 - Comparação entre modems acústicos subaquáticos comerciais .....	42
Tabela 5 - Comparação entre modems acústicos subaquáticos propostos em trabalho de investigação .....	42



## Índice Equações

Equação 1 - Equação do sonar .....	13
Equação 2 - Relação Sinal - Ruído SNR.....	15
Equação 3 - Tensão eficaz do ruído térmico .....	15



## Lista Acrónimos

RSSF	Rede Sensores Sem Fios
UWSN	Underwater Sensors Network
MAC	Media Access Control – Subcamada de acesso ao meio
AUV's	Autonomous Underwater vehicle – Veiculo subaquático autónomo
SNR	Signal to noise ratio - Relação sinal ruído
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
FSK	<i>Frequency Shift keying</i>
PSK	<i>Phase-Shift Keying.</i>
8PSK	<i>Phase Shift Keying, com constelação de 8 símbolos</i>
8QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation, com constelação de 8 símbolos</i>
16QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation, com constelação de 16 símbolos</i>
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
ALOHA	Protocolo
<i>Slotted</i> ALOHA	Protocolo
MACA	Multiple Access with Collision Avoidance
MACAW	Multiple Access with Collision Avoidance for Wireless
FAMA	Protocolo Floor Acquisition Multiple Access
<i>Slotted</i> FAMA	Protocolo Floor Acquisition Multiple Access
UW-MAC	<i>Underwater MAC</i>
UWAN-MAC	<i>Underwater Acoustic Network MAC</i>
R-MAC	<i>Reservation Based MAC</i>
ACK	<i>Acknowledgement</i>
RTS	<i>Request to send</i>
CTS	<i>Clear to send</i>
ADC	<i>Analog to Digital Convert</i>
DAC	<i>Digital do Analog Convert</i>

USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
ROVs	Remotely Operated Vehicles.
NRZ	<i>Non-Return-to-Zero</i>
RZ	<i>Return-to-Zero</i>
S2C	<i>Sweep Spread Carrier</i>
FH	<i>Frequency – hopping frequency</i>

## Capítulo 1 – Introdução

### 1.1 - Motivação e Enquadramento

Nos anos 60 começou-se a investigar as comunicações subaquáticas tendo por base as ondas eletromagnéticas. Porém como estas comunicações sempre foram muito afetadas pela atenuação da água do mar e pelo ruído nunca foram almejados grandes progressos neste tipo de comunicações o que conseqüentemente levou a que tenham sido poucas as aplicações práticas para o uso subaquático [1].

O estudo e investigação aqui desenvolvidos devem-se à constante necessidade de monitorização e controlo dos oceanos pelos mais diversos motivos. Quer seja pela investigação da fauna marinha, monitorização do ambiente [2] [3], indústria de extração de gás e petróleo [4], e até mesmo pela defesa.

Certas partes dos nossos oceanos, conforme se pode observar a título ilustrativo na figura 1, estão cobertos por oleodutos submarinos que se encontram concentrados numa área até 100km da costa e com profundidades de 60 a 1000m. Nesses locais, existe a necessidade constante de inspeção e monitorização. Estas áreas são extramente complexas, devido às severas condições do ambiente subaquático, onde em alguns pontos, são de grande inclinação e extrema instabilidade [5].



Figura 1 - Exemplo Exploração Petrolífera Imagem extraída de [86].

Grandes grupos da indústria petrolífera procuram cada vez mais e estão predispostos, a investir em veículos submarinos autónomos. Com vista a colmatar esta falta, um grupo de investigadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) está a testar um novo tipo de veículo [30]. A particularidade do referido veículo é a utilização de sinais acústicos para a comunicação entre si, à semelhança da comunicação que as baleias e os golfinhos estabelecem entre si debaixo de água, ultrapassando assim as limitações das ondas de rádio.

No entanto, as limitações outrora existentes continuam a complicar o trabalho de investigação nos dias de hoje, e são disso exemplos a profundidade, a densidade, a temperatura e a salinidade. Porém, já se conseguem transmissões com cerca de 20km [6]. A velocidade do som na água, por sua vez, sofre com estes fatores, onde a velocidade varia desde a superfície até ao fundo, propagando-se ao longo de caminhos curvos, devido à refração causada pelas diferentes velocidades que o som atinge [7]. O canal acústico apresenta, também, algumas características que podiam vir a restringir o seu uso, tais como a velocidade variável, a baixa largura de banda e o alto consumo de energia. A juntar a tudo isto, as ondas são afetadas por ruídos causados por obstáculos e até mesmo turbulência. Podemos então concluir que são transmissões influenciadas diretamente pela velocidade do som (que na água é de cerca de 1.500m/s, ou seja, quatro vezes mais rápido que a velocidade do som no ar, mas ainda cinco ordens de grandeza menor que a velocidade das ondas eletromagnéticas no ar). Esta característica implica uma grande latência, de aproximadamente 0,67 s/Km [8].

Por sua vez, a largura de banda disponível para comunicações subaquáticas é afetada pela variação da frequência do canal acústico, que diminui com a distância. Isto acontece devido às perdas na transmissão, com os ruídos captados pelo recetor, pelo espalhamento de energia e a absorção do som na água. A perda de energia por sua vez depende da distância entre o emissor e o recetor, e aumenta com a frequência [8]. Mas todas estas limitações podem ser contornadas e ajustadas de forma a possibilitar a comunicação.

RSSF (redes de sensores sem fios *wireless*) de comunicação acústica subaquática, têm sido investigadas lado a lado com a comunicação acústica. Estas são compostas por um conjunto de nós autónomos com recursos energéticos limitados, que podem ser móveis ou fixos, nos quais as comunicações são de baixo nível e não dependem da localização da rede. Têm características particulares como a utilização de recursos restritos de energia, uso de topologias de rede dinâmicas e grande quantidade de nós [21]. O aspeto que mais impõe



restrições no tempo de vida útil da rede é a questão energética [22]. A energia necessária para transmitir ondas acústicas é maior do que a energia necessária para as ondas de rádios terrestres, isto verifica-se devido à diferença da tecnologia na camada física. Onde o alto consumo de energia é devido às longas distâncias e ao processamento de sinal mais complexo, que deve tentar compensar a natureza de ruídos, dispersão, interferência e atenuação do canal aquático. Mas as RSSF (redes de sensores sem fios) de comunicação acústica subaquática têm evoluído e demonstrado a sua utilidade para as mais variadas aplicações subaquáticas, como é disso exemplo a monitorização ambiental (química, biologia ou até mesmo nuclear) de forma a ser detetada num curto espaço de tempo, reduzindo dessa forma os danos causados por catástrofes maiores [14].

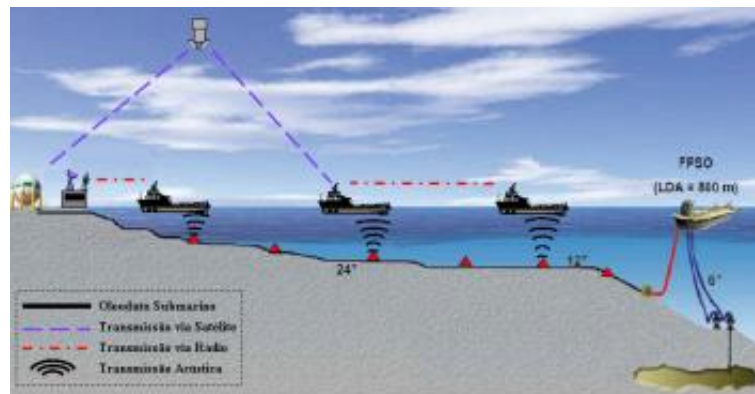


Figura 2 - Exemplo sistema de monitorização subaquático. Imagem Extraída de [5].

As figuras 2 a 5 ilustram a disposição dos sensores subaquáticos e de como podem ser uteis na defesa, investigação e indústria [9]. Utilizando deste modo as melhores técnicas de modulação, calibração, desenho e acima de tudo a escolha correta da potência a utilizar nas transmissões, requerendo sempre atenção à escolha da frequência a utilizar.

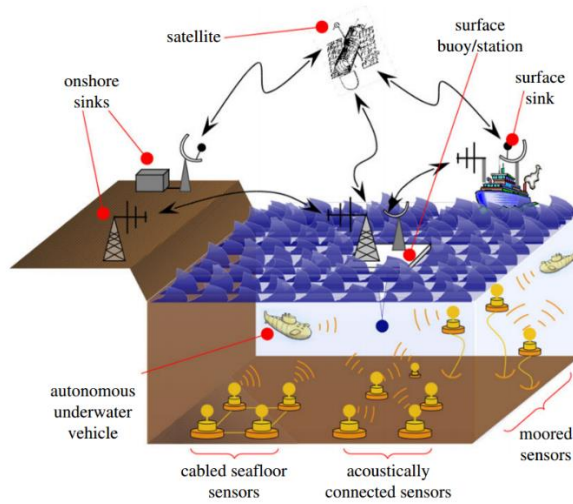


Figura 3 - Exemplo de rede Sensores para uso na defesa Imagem extraída de [87].

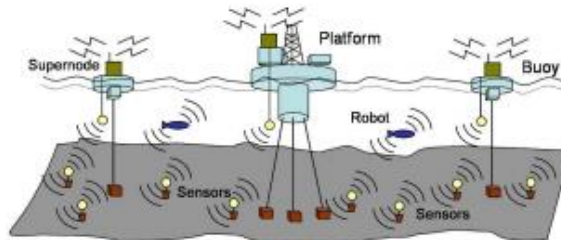


Figura 4 - Exemplo Rede Sensores uso da Industria Imagem extraída de [88].

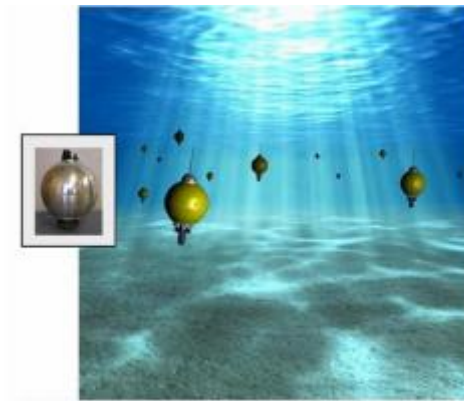


Figura 5 - Exemplo rede sensores subaquáticos para monitorização Imagem extraída de [89].

Para o desenvolvimento deste trabalho foram usadas ferramentas de *Software Defined Radio* (SDR).

O termo SDR foi utilizado pela primeira vez em 1991, no entanto os SDR são utilizados desde o final da década 1970 nos EUA e na Europa, em aplicações militares.

Trata-se de um sistema de rádio comunicação que possibilita a implementação em *software* de emissores, recetores, moduladores, desmoduladores, filtros entre muito outros que normalmente são implementados em hardware [23].

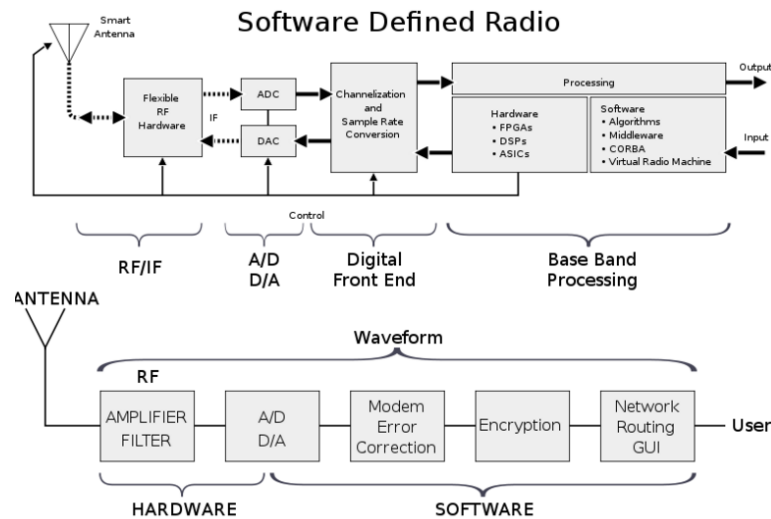


Figura 6 - Exemplo Rádio definido por software SDR. Imagem extraída de [10].

Conforme a figura 6 demonstra, o sistema básico do SDR é simples, necessitando apenas de um computador equipado com uma placa de som ou um conversor analógico para digital.

Este trabalho é baseado em inúmeros artigos sobre as comunicações acústicas, contudo a maior contribuição para o estudo e desenvolvimento vem de dois artigos em especial. O primeiro artigo destaca-se pelas dificuldades impostas pelos meios de comunicação e por as restrições do canal acústico, sendo eles a interferência, a largura de banda, as reflexões, a taxa de erros e o alcance [24]. No segundo são apresentados os aspetos fundamentais relacionados com as redes acústicas submarinas, tais como arquiteturas da rede e as características do canal acústico, demonstrando os principais desafios para o desenvolvimento de eficientes soluções em redes acústicas submarinas [1]. Contudo, apesar da existência de algumas aplicações e estudos, o alcance e as interferências continuam nos dias de hoje a ser algumas das limitações nas comunicações acústicas, por onde este trabalho pretende contribuir para estudar e ajudar a melhorar os mesmos.

## 1.2 - Estado de Arte

As redes submarinas com transmissão acústica, ou redes acústicas submarinas, têm vindo a ser estudadas com maior empenho, dedicação e motivação nos últimos anos graças às necessidades emergentes no desenvolvimento de novas aplicações nesta mesma área, não só pela indústria, mas também pela proteção dos oceanos, resultando no aparecimento de algumas soluções e aplicações que se têm mostrado úteis nos dias de hoje.

De acordo com algumas investigações [1] [11] [12], as redes acústicas submarinas podem ser descritas através de critérios discretos como sendo os mais comuns nas redes, nomeadamente a mobilidade, onde a rede acústica submarina pode ser composta única e exclusivamente por nós fixos, móveis, ou até mesmo por uma composição dos dois tipos de nós. Redes com nós fixos são de implementação mais fácil. Contudo a mobilidade e flexibilidade proporcionada pelos nós moveis são cada vez mais interessantes, nomeadamente no desenvolvimento de AUVs como é o caso do exemplo da figura 7.



Figura 7 - Robô UAV Russo. Imagem extraída de [90].

A primeira sugestão para comunicação em meios subaquáticos foi realizada por Da Vinci. Contudo, foram necessários cerca de 5 séculos para serem desenvolvidos.

Com o início da primeira Guerra Mundial, os primeiros sistemas de comunicação começaram a aparecer. Onde o âmbito desta tecnologia era para fins militares, e assim se manteve até fins da segunda Guerra Mundial [34]. A natureza destas comunicações, era essencialmente analógica. Um bom exemplo destes primeiros sistemas pode ser encontrado em [35], que descreve um primeiro sistema de comunicação desenvolvido pela marinha americana em 1945, para comunicação por voz entre submarinos a longas distâncias. Para tal

fazia uso da *Single Side Band* com supressão da portadora, na banda de frequências acústicas entre os 8 kHz e os 11 kHz.

Os ultrassons são utilizados, pela natureza, em certos animais que dispõem da capacidade de emitir ondas ultrassónicas. Os morcegos, golfinhos, mariposas são exemplos de animais que procuram alimento e fogem de perigos através de ondas ultrassónicas. Com a observação do procedimento desses animais desenvolveu-se a ideia do sonar. Estando o ultrassom fora da faixa de frequências que o homem pode ouvir, pode ser utilizado com intensidades bastante altas.

O projeto SUNRISE [39] desenvolveu um sistema de comunicação com base em sinais sonoros. Equiparam robôs submarinos (figura 8) com modems acústicos baseados nas técnicas usadas pelos golfinhos e baleias, e permitem mergulhar até aos 100 metros de profundidade.

O processo de comunicação consiste em passar de uma frequência baixa para uma alta ou percorrer uma gama variável de frequências num curto espaço de tempo.



**Figura 8 - Projeto SUNRISE. Imagem extraída de [39].**

Uma outra solução existente, que faz uso da comunicação acústica, são os sistemas de posicionamento acústico subaquático [40]. Estes sistemas recorrem à utilização de sinais acústicos para determinar a distância e a direção de um ou de vários dispositivos emissores em relação aos recetores. Dispositivos estes que podem ser utilizados nas mais variadas aplicações, desde a construção de plataformas, atividades militares e de vigilância, arqueologia e geologia.

### 1.3 - Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo o estudo, simulação e implementação de um emissor / recetor acústico definido por Software para comunicações subaquáticas.

Nesta dissertação o esquema de emissão e receção é desenvolvido utilizando o GNU Radio - *Graphical Radio Companion* (uma ferramenta de desenvolvimento de *software* livre e de código aberto que fornece bibliotecas de processamento de sinal, permitindo a implementação e desenvolvimento de rádios por software, que podem ser usados por hardwares externos de baixo custo [10]).

O grande desafio no desenvolvimento do emissor / recetor de baixa complexidade, prende-se com os constrangimentos do canal de propagação acústico e com o fato de se pretender que o esquema seja adequado para RSSF, ou seja, deverá ter uma complexidade reduzida e eficiência espectral elevada.

Ao longo da dissertação é avaliada a viabilidade da comunicação acústica através de simulações das quais se espera obter resposta a alguns questões chave, tais como:

- Se é possível uma comunicação acústica de longo alcance (uma vez que o alcance atingido com o esquema proposto implica indiretamente o espaçamento máximo / densidade dos nós da rede de sensores);
- Se existe viabilidade na comunicação acústica;
- Se é possível alcançar o desempenho desejado.

### 1.4 – Contribuições

A nível de contribuições, com esta dissertação foi possível desenvolver um emissor / recetor usando técnicas/ferramentas de Software Defined Radio que possibilita a comunicação acústica entre dois equipamentos fazendo uso de várias modulações. Neste caso, GFSK, GMSK, MQAM, QPSK. Possibilitando em trabalhos futuros uma simples alteração de blocos afim da utilização de novas modulações. Demonstrando através de casos reais e simulados os valores de BER para as diferentes modulações.

Importante referir que, por constrangimentos de hardware, a implementação e testes foram realizados através de comunicações acústicas terrestres.

## 1.5 – Organização da dissertação

Este documento encontra-se organizado em seis capítulos.

No primeiro capítulo é feita a Introdução à dissertação.

No segundo capítulo, designado por comunicação / canal acústico são apresentados os aspetos genéricos sobre a comunicação acústica audível e ultrassónica, falando das limitações do canal submarino, não esquecendo os tipos de equipamentos.

No terceiro capítulo, denominado por Comunicação acústica e digital do canal acústico, referem-se os modelos de canal, baseadas em técnicas de *software defined radio*, são apresentadas as diferentes modulações, técnicas de transmissão, combate ao multipercurso, interferência e aplicações já existentes.

No quarto capítulo, intitulado por Transceivers de baixa complexidade para canais acústicos são apresentados os esquemas implementados juntamente com as modulações utilizadas.

O quinto capítulo, denominado por Avaliação dos esquemas de baixa complexidade para canais acústicos, enquadra as realizações da avaliação dos esquemas de comunicação acústica em ambiente real.

Por fim, o sexto capítulo a conclusão.





## Capítulo 2 – Comunicação / Canal Acústico

Este capítulo inicia com uma introdução ao estudo da comunicação acústica subaquática. Vão ser apresentadas as bases sobre este tema, as principais limitações do canal submarino, seja terrestre seja indoor, os aspetos genéricos sobre a comunicação acústica audível e ultrassónica, não esquecendo os tipos de equipamentos.

As ondas acústicas consistem na propagação de uma onda mecânica, sendo que as compressões e dilatações do meio são transmitidas de um ponto para outro, de onde é necessário um meio elástico que suporte a sua propagação. Na água do mar por exemplo, a velocidade é de aproximadamente 1500 m/s, embora dependa de parâmetros característicos como é o caso da pressão, salinidade e temperatura, mas será explicado com mais detalhe ao longo deste capítulo.

A relação entre a SNR e a frequência é apresentado na figura 9 para quatro distâncias diferentes. 5, 10, 50 e 100 km. Tornando possível entender que quanto maior a distância entre o emissor e o recetor, menor será a largura de banda disponível. Além disso é possível observar que a frequência central de comunicação depende da distancia entre emissor e recetor, tornando-se maior, quanto menor for a distancia entre o emissor e o recetor.

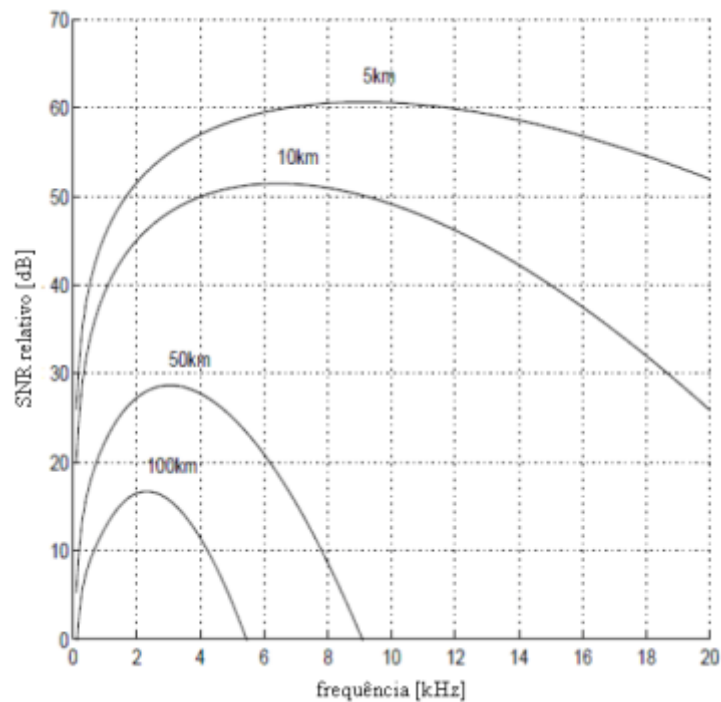


Figura 9 - Relação Sinal Ruído vs. Frequência. Imagem extraída de [5].

De onde se pode concluir pelo gráfico da figura 9 que para distâncias entre 10 a 100 km a largura de banda ronda os 2 e os 5 kHz, e para distâncias entre 1 a 10 km. A largura de banda é de aproximadamente 10 kHz.

## 2.1 - Parâmetros de Sonar

Como já referido, a propagação das ondas acústicas no meio subaquático é afetada por diversos fatores, de modo que, por razões de simplicidade estes fatores são agrupados e expressos recorrendo a um conjunto de parâmetros, os parâmetros de sonar, mais conhecido por *Sound Navigation and Ranging*.

Sonar é uma técnica que utiliza a propagação do som para navegar ou comunicar. É uma técnica normalmente utilizada em meios subaquáticos, mas se necessário também funciona no ar. Por curioso que pareça, esta técnica foi desenvolvida logo após o desastre ocorrido com o navio Titanic em 1912. Na época as pesquisas começaram com a finalidade de detetar obstáculos a frente do navio com o intuito de evitar acontecimentos como o do Titanic. Com o passar dos anos, foram surgindo dispositivos com capacidade de deteção de obstáculos e de comunicação, que foram sendo utilizados em submarinos. Nos dias de hoje, SONAR tem sido cada vez mais utilizado e pode vir a ser muito útil no futuro. Sonar [36] é bastante semelhante ao sistema de localização e comunicação de morcegos e golfinhos. Criam um pulso de som, e escutam o eco do som refletido pelo objeto. Por sua vez, a distância é calculada pela medida do tempo entre ida e volta do pulso enviado, como pode ser observado na figura 10 [37].

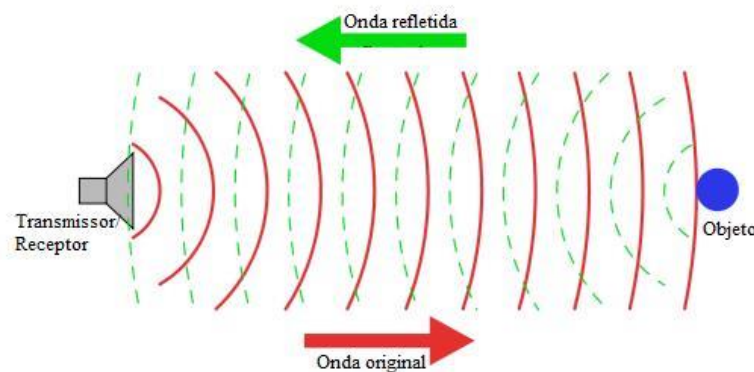


Figura 10 - Exemplo do modo funcionamento do Sonar Ativo. Imagem extraída de [37].

Os parâmetros do sonar podem ser característicos do equipamento acústico utilizado. Nomeadamente:

- Intensidade do sinal no emissor (SL)
- Intensidade do ruído próprio (NL)
- Diretividade do recetor (DI)

Ou podem ser impostos pelo meio:

- Perdas na propagação (TL)
- Intensidade da reservação no recetor (NL)
- Intensidade do ruído ambiente (NL)

De salientar que três parâmetros são representados pelo mesmo símbolo (NL) porque, mesmo tendo diferentes origens, os seus efeitos podem ser considerados um só. Estes são expressos em dB em relação a uma intensidade de referência, que é, usualmente a da onda plana onde  $1\mu Pa$  [38].

A equação do sonar, que relaciona os parâmetros acima apresentados é dada por:

$$SNR = (SL - TL) - (NL - DI) \quad (1)$$

A onda acústica total recebida pelo recetor é composta por duas partes. Uma das partes, corresponde ao que foi enviado pelo emissor e que vai ser detetado, a qual se dá o nome de sinal e a outra a que foi provocada pelas diferentes fontes ou interferências a que se pode chamar de ruído. O parâmetro denominado por SNR na equação 1 é precisamente a relação sinal – ruído no recetor.

Deve notar-se que, pelo fato dos parâmetros da equação 1 serem representados em dB, este quociente transforma-se numa subtração, onde os termos (SL-TL) e (NL-DI) representam respetivamente o nível de sinal e o nível de ruído.

Com o parâmetro TL associado as perdas de transmissão, pretende-se que num único valor se encontre resumido todos os fenómenos que ocorrem durante o processo de propagação do sinal, de forma a poder analisar e quantificar as perdas sofridas pelo sinal. Estas perdas de transmissão são fundamentalmente de dois tipos, as perdas associadas à propagação e as perdas por atenuação.

As perdas associadas a propagação têm uma natureza geométrica pois resultam do fato da onda, consoante se vai afastando da fonte, se ir espalhando por uma superfície cada vez maior. Ou seja, a potência gerada pela fonte é emitida em variadas direções, sendo distribuída na superfície que aumenta consoante o percurso da onda.

As perdas por atenuação incluem efeitos como *scattering*, *refraction* e absorção, são um processo de troca de energia entre o meio onde se dá a propagação e a onda, perdendo desta forma uma parte da sua energia acústica que se transforma em calor. O sinal por sua vez, ao chegar o recetor tem uma intensidade que pode ser quantificada com o valor  $SL - TL$ . O recetor, não irá apenas ouvir o sinal que foi enviado, vai ouvir também o ruído que existe do meio subaquático. E mesmo com a intensidade do ruído a ser representada unicamente com o parâmetro  $NL$ , o ruído tem inúmeras origens. Desde o ruído próprio, que é o ruído que tem origem no local onde o recetor esta instalado, e pode ser causado por uma fonte externa. Seja ele um barco ou um submarino a passar. Ou o ruído natural do ambiente marinho, que não é diretamente proveniente de uma fonte que se possa identificar ou localizar. Pode ser originado pela ondulação do oceano, pelo movimento das correntes marítimas ou até mesmo por embarcações a grandes distâncias. A reflexão é um tipo de ruído que pode existir provisoriamente após a emissão do sinal e resulta da presença deste no meio. A água é composta por partículas, bolhas, fauna, etc. Estas heterogeneidades provocam uma intermissão nas propriedades físicas do meio onde se dá a propagação, intercetando e refletindo de forma difusa uma parte da energia acústica nelas incidente.

O nível de ruído pode ainda ser afetado por causas pontuais, como é o caso da passagem de uma embarcação ou atividades humanas. O nível de ruído total no recetor,  $NL$ , supõe-se ser isotrópico, e é atenuado pela diretividade do recetor, que resulta deste não ter igual ganho em todas as direções, e passa a ser dado por  $NL - DI$ . Este tipo de atenuação não é sofrido pelo sinal porque se supõe que o mesmo seja proveniente de uma direção coincidente com a do eixo do recetor.

A equação 1 é desta forma uma aproximação ao que se espera ser o comportamento do sistema. Na fase de decisão, quanto maior a  $SNR$  à entrada do detetor maior a probabilidade de o sistema detetar a presença do sinal.

## 2.2 - Canal Acústico

Uma vez que o objetivo é a comunicação acústica subaquática através de sinais sonoros, é necessário entender as principais particularidades do canal acústico.

Uma onda acústica não é nada mais que uma natureza mecânica, que distribui a sua energia no espaço através da vibração das partículas que constituem o meio ao seu redor [43].

As variações de pressão que descrevem uma onda acústica são dependentes de inúmeros fatores como já referido anteriormente. Desde a temperatura da água, a velocidade das correntes, a salinidade até mesmo a presença de animais marinhos e embarcações. Logo, o estudo do canal acústico subaquático deve ser analisado segundo os mecanismos de atenuação, velocidade de propagação do sinal acústico e variabilidade temporal, espectral e até mesmo espacial do próprio meio submerso.

Num sistema de comunicação, é imprescindível obter a maior potência de forma a que o recetor consiga receber toda a informação enviada. Para tal, não basta analisar a pressão acústica obtida pelo recetor. É necessário ter em atenção a relação sinal – ruído SNR do sinal elétrico recebido pelo recetor que no caso em estudo, converte o sinal acústico em elétrico.

Nos sistemas de comunicação acústicos a relação sinal ruído é descrita pela equação 2. Que corresponde a uma relação de amplitude do sinal recebido  $V_R$  sobre os níveis de ruído elétrico do meio acústico ( $V_{ANoise}$ ).

$$SNR = 20 \log_{10} \left( \frac{V_r}{V_{ANoise} + V_{ENoise}} \right) \quad (2)$$

Neste caso, o ruído é originado por diferentes efeitos físicos, mas é necessário dar particular atenção ao ruído térmico, uma vez que é originado pela deslocação das cargas nos condutores. A tensão eficaz do ruído térmico  $V_{ENoise}$  é descrito pela equação 3, dependendo da constante de Boltzmann  $k_b$ , da temperatura ambiente  $T_A$  em Kelvin, da resistência equivalente  $R_{eq}$  e da largura de banda  $\Delta f$ .

$$V_{ENoise} = \sqrt{4 \times k_b \times T_A \times R_{eq} \times \Delta f} \quad (3)$$

Segundo [44], o ruído pode ser delineado como sendo ruído gaussiano, não branco, e com uma densidade espectral de potência que diminui com a frequência a uma relação de 18 dB/década.

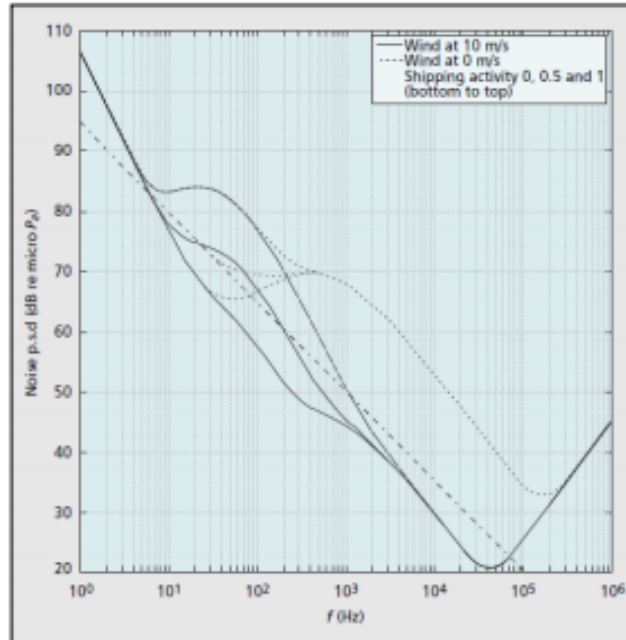


Figura 11 - Densidade Espectral de potência acústica do ruído ambiente num canal acústico em função da frequência. Imagem extraída de [34].

Analisando a figura 11 verifica-se que com o aumento do vento obtêm-se valores superiores da PSDn às frequências mais baixas.

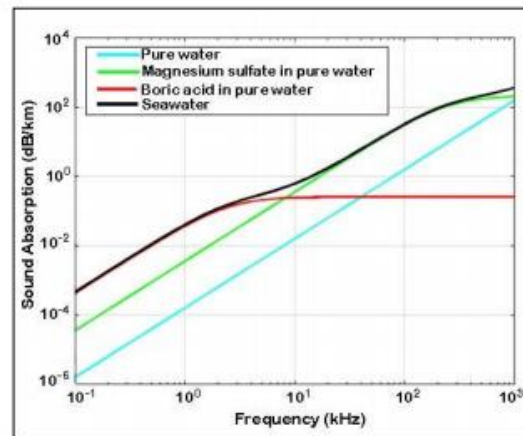


Figura 12 - Absorção da onda acústica em água salgada em função da frequência. Imagem extraída de [44].

Pode-se observar-se na figura 12 as variações das diferentes componentes que maioritariamente contribuem para o coeficiente de absorção  $\alpha$  em função da frequência, segundo o modelo de Ainslie e McCol, 1998 [44].

É possível observar que para frequências mais reduzidas a componente de ácido bórico é a mais significativa, possuindo dessa forma um comportamento constante para frequências superiores a 1 kHz. Por outro lado, a água pura é a que mais contribui para o coeficiente de  $\alpha$  em frequências mais elevadas.

Segundo [45] é possível verificar-se que no cenário típico de água do oceano, de salinidade de 35ppt, acidez de 8 numa escala de pH, a 50 metros de profundidade e uma temperatura de 20°C, obtém-se para uma frequência de 200 kHz um coeficiente de absorção  $\alpha$  próximo de 80 dB/km. Já em água doce, considerando uma salinidade máxima de 0.5ppt, acidez de 7 pH, profundidade a 50 m e Temperatura de 20°C, obtém-se para uma frequência de 200 kHz um coeficiente de absorção  $\alpha$  aproximado de 10 dB/km [46].

De referir que o espalhamento geométrico  $\beta$  quantifica as perdas energéticas pela propagação do sinal acústico a distâncias cada vez mais longínquas, resultando que a frente da onda ocupe uma área de superfície cada vez maior.

De acordo com a lei da conservação da energia, ao aumentarmos a superfície, vamos dessa forma diminuir a energia por unidade de superfície [44].

No que diz respeito à dispersão geométrica do meio, e com a existência de regiões de fronteira no meio, o espalhamento de energia não se dá de um modo uniforme, tende neste caso a dispersão a aproximar-se da forma cilíndrica como ilustra a figura 13. Uma vez que o meio está delimitado pela superfície e pelo fundo marítimo.

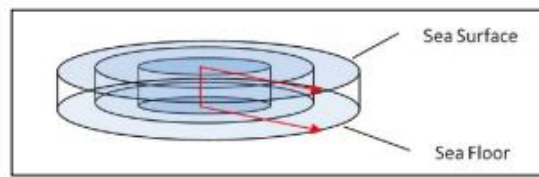


Figura 13 - Dispersão geométrica da onda acústica no meio subaquático. Imagem extraída de [46].

### 2.3 - Velocidade de propagação do Sinal

A velocidade de um sinal acústico em qualquer ambiente é determinada em função da densidade do meio. Desta forma, a propagação dos sinais é preferível em meios sólidos, líquidos ou gaseificados.

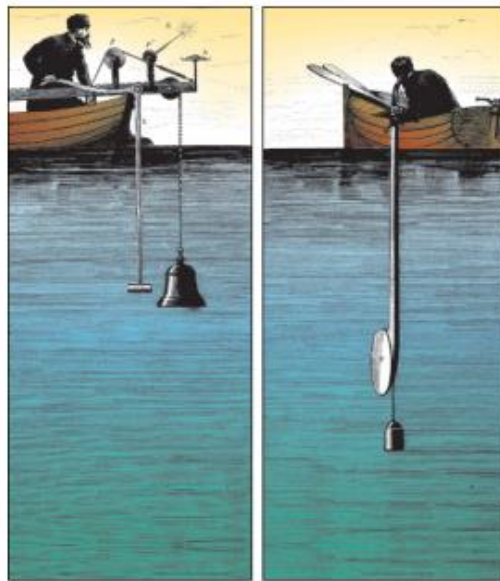


Figura 14 - Primeira medição da velocidade do som na água. Imagem extraída de [55].

Como já referido, Leonardo da Vinci em 1490 havia proposto e demonstrado a sua teoria para a deteção de navios através do seu ruído na água. Porém, só em 1826 é que Jean Daniel Collado, engenheiro físico, juntamente com Charles-Francois Sturn, matemático, realizaram a primeira experiência de medição da velocidade do som na água. Esta medição foi feita em Genebra, na Suíça conforme se pode observar na figura 14.



Nesta experiência a conclusão foi de uma velocidade de 1435m/s e conseguiram provar que o som na água viaja mais rápido do que no ar, uma vez que no ar o som viaja a cerca de 340 m/s.

Considerando as condições comuns do meio subaquáticos encontrados a superfície, com uma temperatura de 25°C, 35 de salinidade e uma profundidade de 10 metros, a velocidade da onda é de 1520 m/s. Se for feita uma comparação com os sinais eletromagnéticos ou óticos, uma onda sonora viaja a uma velocidade cinco vezes inferior.

Dos parâmetros fundamentais, de notar que o que mais influencia as variações na velocidade da onda é a temperatura. Uma vez que o aumento de 1°C a velocidade aumenta em cerca de 4 m/s. Por outro lado, um aumento de 1 ppt de salinidade a velocidade decresce 1.3m/s [46].

Na tabela 1 abaixo é possível observar as variações da velocidade do som, dependendo de vários fatores e na figura 15 o gráfico da atenuação do som na água.

<b>Dependência da velocidade do som</b>	<b>Valor</b>
<b>Temperatura</b>	+4.6m/s por Grau Celsius que baixa
<b>Salinidade</b>	+1.3m/s por ppt de salinidade
<b>Profundidade</b>	+0.016m/s por metro de profundidade

Tabela 1 - Variações da velocidade do som

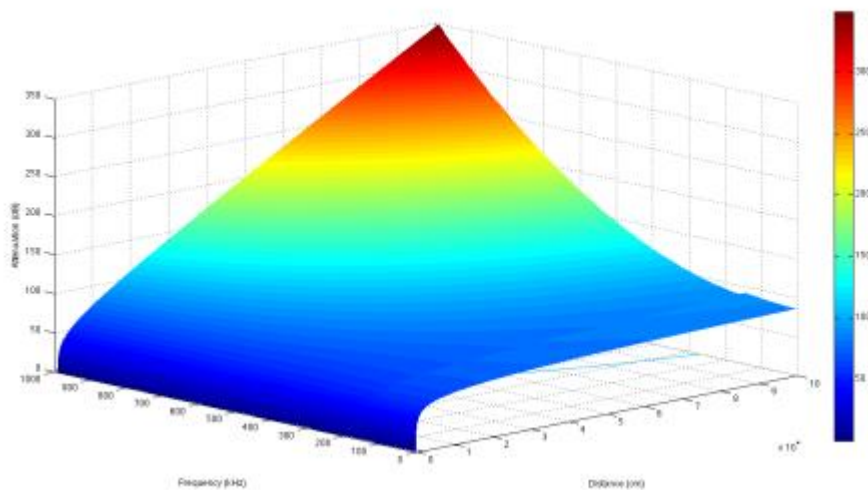


Figura 15 - Atenuação do som na água. Imagem extraída de [49].

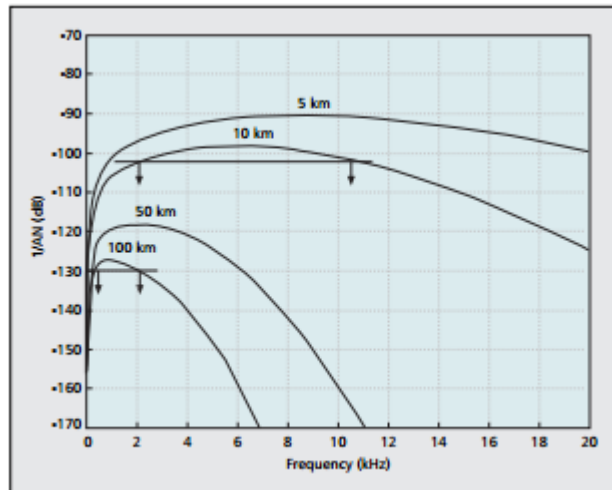


Figura 16 - Relação sinal ruído em função da frequência para diversas distâncias. Imagem extraída de [50].

Na figura 16 é possível observar a atenuação combinada com o ruído nas comunicações acústicas subaquáticas. Em altas frequências e longas distâncias obtemos uma maior atenuação. De onde se comprova que com o aumento da distância a largura de banda diminui.

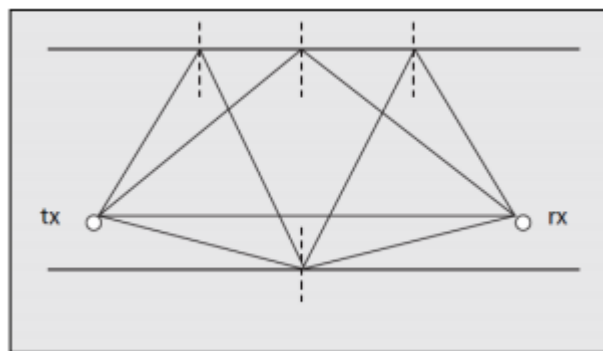


Figura 17 - Propagação sinal em água pouco profundas. Imagem extraída de [43]

Na figura 17 é possível observar de que forma os sinais acústicos se difundem em águas pouco profundas e como estes sinais são fortemente influenciados pela geometria do canal [44]. Este cenário leva a elevados atrasos na ordem das dezenas de milissegundos. Já em águas profundas, as condições de pressão e temperatura presentes em cada camada determinam a velocidade dos sinais.

As figuras 18 e 19, representam os principais níveis da zona oceânica e a típica variação da velocidade do som com o aumento da profundidade.

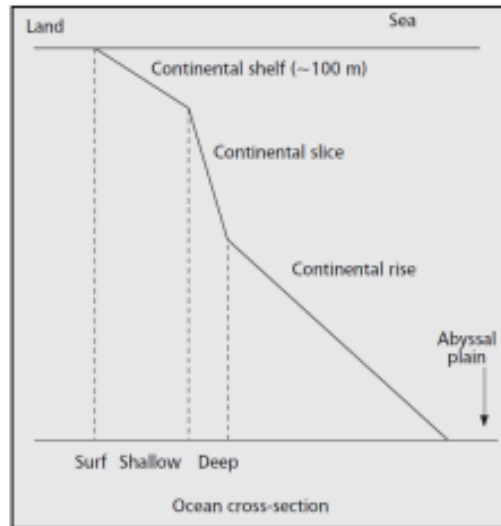


Figura 18 - Exemplo das diferentes camadas oceânicas. Imagem extraída de [43].

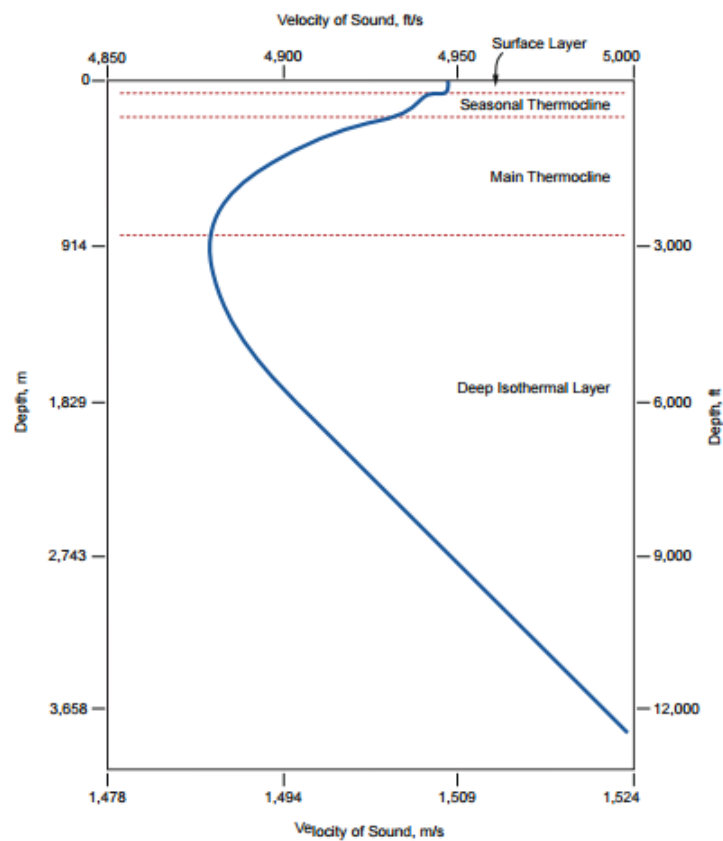


Figura 19 - Velocidade de propagação do sinal em função da profundidade. Imagem extraída de [46].

Posto isto, e de acordo com a lei de Snell, alterações da velocidade de propagação entre dois meios adjacentes origina variações na relação entre angulo incidente e angulo refratado [48]. Desta forma, em águas profundas, as ondas sofrem do efeito da refração em função da profundidade, levando a um encurvamento dos raios [43], como se pode observar na figura 20.

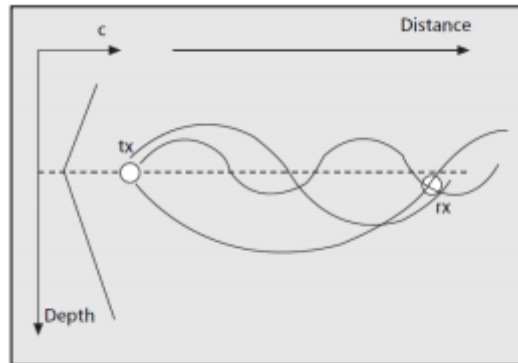


Figura 20 - Ilustração da propagação de sinais sonoros. Imagem extraída de [43].

Os movimentos causados pelas correntes e pelas ondas são outros dos fatores que afetam a velocidade do som.

Embora o emissor e o recetor possam estar fixos, os movimentos criam o efeito de Doppler, levando a uma mudança de frequência e espalhamento [49]. Este fenómeno pode ver observado na figura 21, onde a onda acústica vai do ponto A ao B dando origem ao efeito de Doppler. O efeito de deslocamento da frequência é representado a vermelho e as ondas negras são as frequências de espalhamento.

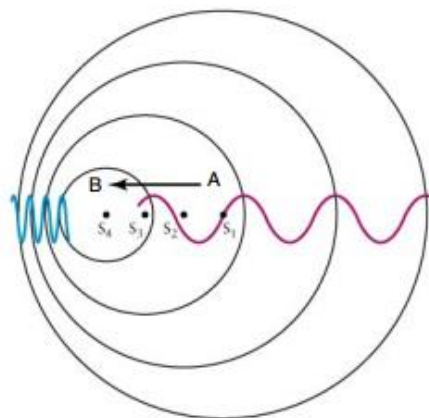


Figura 21 - Efeito Doppler. Imagem extraída de [49].

## 2.4 - Variações temporais

As variações temporais de um canal acústico ocorrem essencialmente devido a dois fenómenos, nomeadamente alterações nas características de propagação que são inerentes ao meio e o deslocamento entre os elementos de transmissão e receção de um sistema [43].

No âmbito das comunicações digitais, a análise do espalhamento de Doppler (também designado na literatura por desvio de Doppler) torna-se particularmente importante pela relação inversa desta grandeza com o tempo de coerência do canal. Em definição, o tempo de coerência de um canal indica o período durante o qual a sua resposta impulsional possui um grau mínimo de correlação entre si, sendo para o efeito importante que o tempo do símbolo digital não ultrapasse esta duração.

A modelação dos fenómenos que caracterizam a variabilidade temporal num canal subaquático está, ainda hoje, longe de ser consensual. Como para a generalidade dos canais subaquáticos não existem modelos teóricos viáveis e facilmente extrapoláveis para outros cenários, recorre-se tipicamente à caracterização por experimentação no próprio local, ou em cenários com características semelhantes.

Segundo alguma literatura [43], em diferentes canais subaquáticos ocorrem distribuições estatísticas de desvanecimento do tipo *K*, *Rice* e *Rayleigh*. Destes resultados, é possível concluir que é uma boa aproximação considerar um tempo de coerência do canal subaquático na ordem das várias centenas de ms.

## 2.5 - Multi Percurso e Fenómeno de “bolhas”

Multi percurso é outro problema comum nos sistemas de comunicação subaquáticos. Este consiste na receção no recetor de dois ou mais sinais vindo de diferentes caminhos. Isto faz com que o recetor obtenha mais do que um sinal. Conforme se pode verificar na figura 22. Este fenómeno leva a criação de interferências, uma vez que o sinal é recebido em diferentes momentos.

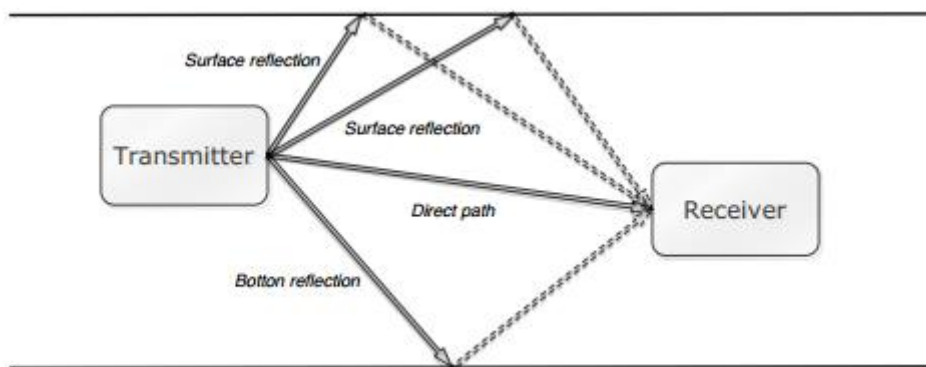


Figura 22 - Efeito multi percurso. Imagem extraída [49].

Pode ser provado pela ocorrência de reflexão ou refração de ondas acústicas. No caso da reflexão, que é o resultado da comunicação acústica com a superfície ou o fundo ou até mesmo com algum objeto presente na água. Este tipo de fenómenos acontece mais frequentemente em águas pouco profundas. Por outro lado, a refração ocorre em locais onde as ondas acústicas variam de acordo com fatores como a temperatura, salinidade, pressão e já em águas profundas.

No que concerne o fenómeno das “bolhas” [52] pode causar interferência na propagação do sinal acústico, onde as altas frequências são geralmente mais afetadas que as baixas. Este fenómeno pode ser criado devido a inúmeros fatores, incluído a vibração dos recetores, emissores ou até mesmo pela rebentação das ondas. A rebentação das ondas tem uma grande influência nas altas frequências onde uma grande quantidade de “bolhas” pode causar uma grande atenuação ao sinal.

## 2.6 - Equipamentos Acústicos

Para colocar em prática o trabalho desenvolvido seria necessário utilizar alguns diversos dispositivos destinados a receber ou enviar sinais sonoros. Dispositivos esses que apresentam diversas formas de funcionamento. Dos quais podem ser referidos:

*Transducer* – Um emissor e recetor que permite enviar um sinal acústico e aguarda uma resposta ao sinal enviado.

*Transponder* – Um recetor e emissor que funciona em conjunto com o *Transducer*. Após receber o sinal vindo do *Transducer* envia-lhe o sinal de resposta que ele está à espera.

*Pinger* – Emissor que envia continuamente e com intervalos fixos o sinal predefinido.

*Hidrofone* – Recetor que é possível instalar em veículos subaquáticos, por exemplo, permite detetar a presença de um sinal enviado por um dos emissores anteriores.

*Responder* – Um emissor que apenas permite ao *Transducer* ou *Hidrofone* receber o sinal.

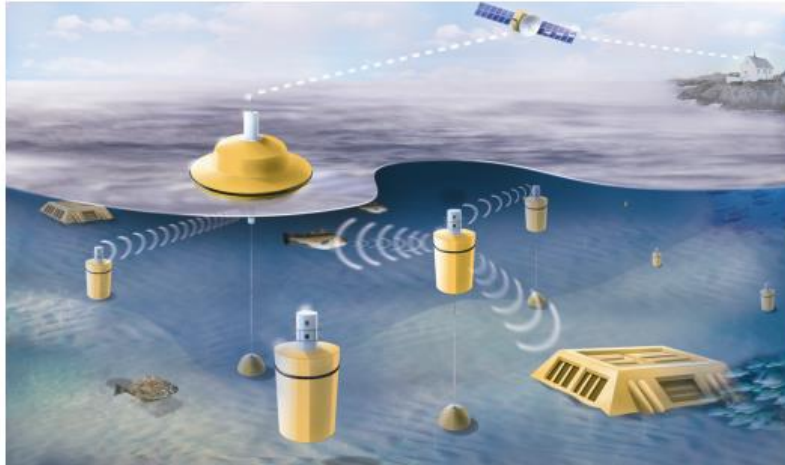


Figura 23 - Exemplo do uso de Hidrofones e Transducers. Imagem extraída de [54].

De uma forma simples, o *Transducer* converte a energia de uma forma para outra, ou seja, converte o sinal elétrico num sinal acústico para ser propagado na água. Do outro lado, o recetor *Hidrofone* converte o sinal acústico em sinal elétrico. No exemplo da figura 23 é possível observar esse funcionamento. E é um exemplo de uma rede de sensores.





## Capítulo 3 – Comunicação Acústica e digital

Este capítulo foca-se na comunicação acústica e digital. Serão abordadas, neste caso, as várias modulações utilizadas e técnicas de transmissão. Sem esquecer o SDR bem como as soluções acústicas e estudos já existentes.

### 3.1 – Protocolos e Modulações

No que concerne os protocolos utilizados nas redes acústicas, devem ser suficientemente robustos de forma a poderem suportar os elevados níveis de interferência, suportar a limitação da largura de banda e o ruído do meio.

Nas décadas de 80 e 90 foi feito um estudo que relata experiências e apresenta dados referentes ao que foi conseguido e respetivas taxas de transmissão obtidas com diversos tipos de modulação [17] dos quais:

- FSK (*Frequency Shift Keying*)
- DPSK (*Differential*
- *Phase Shift Keying*)
- BPSK (*Binary Phase Shift Keying*)
- QPSK (*Quadrature Phase ShiftKeying*),
- 8PSK (*Phase Shift Keying*, com constelação de 8 símbolos),
- 8QAM e 16QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*, com constelação de 8 e 16 símbolos, respetivamente).

Este estudo aborda o aumento das taxas de transmissão e faz uma relação da distância em relação da transmissão de dados, conforme se verifica na figura 24.

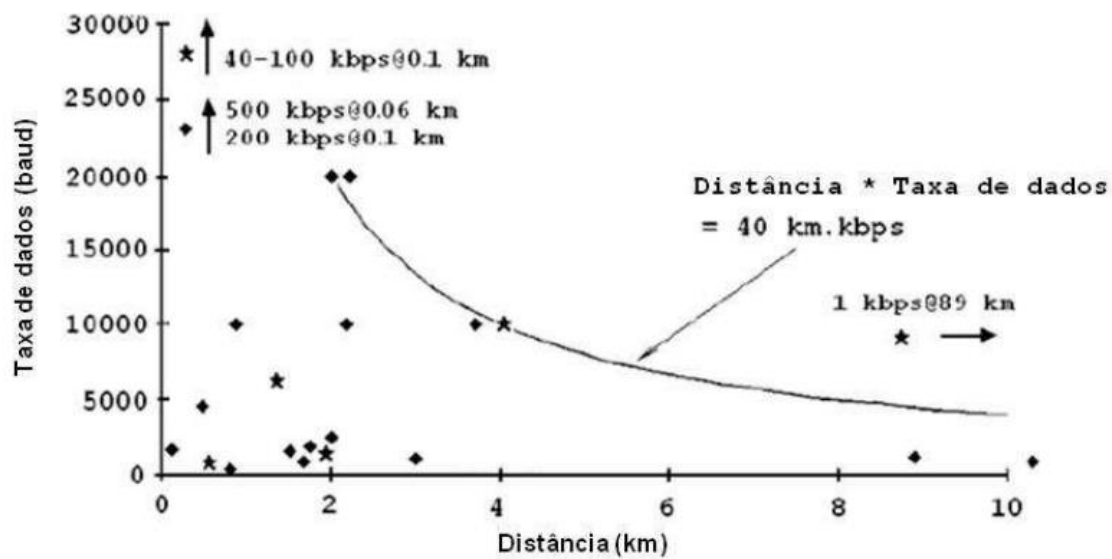


Figura 24 - Transmissão vs. Relação à distância. Imagem extraída [17].

O que se concluí com este estudo [17], realizado em águas profundas, é que as comunicações acústicas submarinas são bastante limitadas quando comparadas com as comunicações eletromagnéticas terrestres.

Inicialmente os modems acústicos eram implementados com a modulação de frequência FSK [25] [18]. Este tipo de modulação, faz uso de uma deteção não coerente para a qual não existe a necessidade da informação de fase, o que torna a modulação FSK bastante simples. Porém, e de forma a poder aumentar a taxa de transmissão, faz-se uso da modulação FSK multinível, com múltiplas portadoras, denominado por M-FSK, onde cada símbolo, representa dois ou mais bits, em vez de apenas um bit por símbolo, como acontece na modulação FSK. Nesta modulação quanto maior for o número de portadoras, maior a quantidade de informação que é possível de transmitir. Contudo o canal de comunicação limita a banda disponível para a transmissão, limitando assim o número de portadoras MFSK.

Sendo a modulação FSK simples, com um custo reduzido e de grande robustez, é uma boa escolha para o uso em redes acústicas, uma vez que apresenta baixas taxas de transmissão, transmitindo a informação de forma consistente. Temos como exemplo o modem acústico “AquaNode” [16] projetado pelo MIT. Modem este que opera com portadoras de 30kHz e *bitrate* bps a 400m de distância. Por sua vez, o modelo “Telesonar – Serie ATM 900” da Teledye, usa M-FSK.

O desenvolvimento de técnicas de deteção coerentes, juntamente com os canais acústicos, leva à utilização de técnicas mais eficientes espectralmente, como são as modulações PSK, e as de amplitude QAM que permitem obter taxas de transmissão mais elevadas [30].

O BPSK e o OFDM são atualmente os esquemas de modulação com melhores prestações para o uso de transmissões através do canal acústico [13] [1] [19], onde o BPSK apresenta uma maior imunidade à interferência inter simbólica e onde cada bit é representado por um símbolo, ou seja, para uma frequência de transmissão de 10kHz, temos uma taxa de transmissão de 10kbps. Já modulação OFDM consiste numa técnica de multiplexagem na frequência, e faz uso de um sistema de múltiplas portadoras, ortogonais entre si [29]. Para melhor compreender as características desta modulação, pode-se comparar esta técnica com outro método comum de multiplexagem de frequência: o FDM. Num sistema FDM a informação é transferida através de um único canal de comunicação, fazendo apenas uso de uma portadora. Deste modo, o débito binário transmitido vai incrementar e conseqüentemente ocupar uma maior largura de banda, fruto da menor duração dos símbolos digitais. Por sua vez, uma maior ocupação espectral possui implicações na vulnerabilidade do sinal, desde ruído a interferências no canal de comunicação. Devido a estes efeitos, no sistema recetor são necessários implementar algoritmos de maior complexidade, nomeadamente nos blocos calculadores de canal e decodificadores binários. Outra das principais desvantagens dos sistemas FDM é a presença de múltiplos sistemas que pretendam partilhar o mesmo meio, transferindo assim informação paralelamente por vários canais de comunicação. Neste cenário, a minimização de interferência entre canais adjacentes no espectro é realizada através da utilização de bandas de guarda em torno da banda útil de cada portadora, decrementando razoavelmente a ineficiência espectral. É possível observar um exemplo do espectro de um sistema FDM na parte superior da figura 25, comparando com o espectro de um sistema OFDM na mesma figura, na parte inferior.

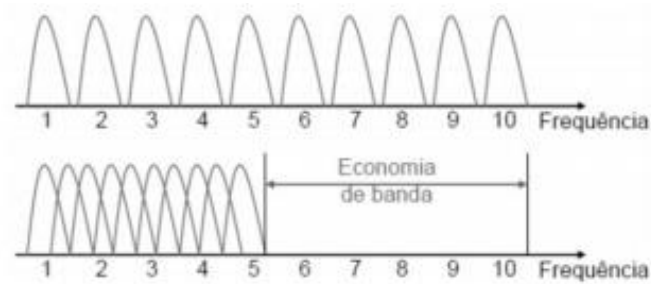


Figura 25 - Espectro FDM e Espectro OFDM. Imagem extraída [29].

Como se pode verificar pela figura 25, no espectro OFDM existe uma maior economia de banda e, por sua vez, uma maior eficiência espectral, através da utilização de portadoras que se sobrepõem no espectro.

Broadcast MAC [20] é um dos protocolos de controlo de acesso mais convencional da subcamada MAC. O seu funcionamento é bastante simples, uma vez que para transmitir dados, escuta o canal a fim de identificar se existem transmissões a decorrer. Se o canal estiver livre envia, caso contrário o protocolo usa o algoritmo *backoff*.

O protocolo R-MAC [15] é um dos melhores protocolos no que respeita a poupança de energia e é dedicado a redes acústicas submarinas. Este é o protocolo de eleição para as redes sensores submarinos, uma vez que o seu modo de funcionamento é de escutar / hibernar, reduzindo a energia gasta em alturas que não necessita de estar a escutar.

Existem ainda um conjunto de requisitos básicos para a viabilidade das aplicações acústicas subaquáticas, devido às próprias limitações do canal acústico, onde devem ser implementados alguns requisitos chave nas redes de sensores, nomeadamente:

- Transmissão – Sabendo que a comunicação é limitada pela propagação no meio, as taxas de transmissão não devem ser consideradas acima dos 10 kbps. Uma vez que é o valor máximo que se consegue atingir com os modems acústicos mais modernos.
- Distância entre os nós – Dependendo do modem utilizado o alcance pode variar. Por exemplo o modem UWM 10000 da Link-Quest [27] tem um alcance máximo de 7km quando opera numa banda entre 7,5 a 12,5kHz. Já o modem UWM 1000 consegue alcançar taxas úteis na ordem dos 10kbps, contudo o alcance fica limitado a 1km. O modem UWM 1000 apresenta uma taxa útil de 7kbps para bandas na ordem dos 26,77 a 44,62kHz e uma distância de 350 metros. A tabela 2 abaixo, apresenta as características dos modems UWM1000, UWM 4000 e UWM 10000 da Link-Quest.

- Os modems acústicos subaquáticos ligados aos sensores realizam a transmissão acústica dos dados, possibilitando a recolha e o envio de informação em tempo real. Onde um só sensor pode operar com diferentes tipos de modems, dependendo das especificações da aplicação. Empresas como a Link-Quest e a Benthos Teledyne já desenvolvem modems acústicos em serie a fim de dar resposta a empresas petrolíferas, facilmente melhoram os seus modems para outro tipo de aplicações.

Modelo	UWM 1000	UWM 4000	UWM 10000
Parâmetro	Valor	Valor	Valor
Link acústico	17800 bps	8000 bps	5000 bps
Taxa útil máxima ( <i>payload</i> )	7000 bps	3200 bps	2000 bps
Distância máxima de operação	350 m	4000 m	7000 m
Taxa de erro de bits	$\sim 10^{-9}$	$\sim 10^{-9}$	$\sim 10^{-9}$
Profundidade máxima	200 m	3.000 m	4000 m
Consumo em TX	1 Watt	7 Watt	40 Watt
Consumo em RX	0,75 Watt	0,8 Watt	0,9 Watt
Consumo em repouso	8 mW	8 mW	9 mW
Frequência de operação	26,77 a 44,62 kHz	12,75 a 21,25 kHz	7,5 a 12,5 kHz

Tabela 2- Especificações dos modems da Link-Quest [38]

Os modems da Teledyne [28] são mais direccionados para operar a grandes profundidades e estão preparados para serem utilizados de forma a obterem dados sobre a velocidade das marés, sedimentos no solo e na água de entre outros.

- Na geração dos dados devem ser tidos em consideração, as taxas de transmissão no canal acústico, uma vez que as são bastante reduzidas. Desta forma, as aplicações ao gerarem os dados não devem gerar uma grande quantidade, caso contrário iriam limitar o bom funcionamento da rede. Logo, os pacotes devem ser pequenos, de forma a serem transmitidos com sucesso, sem perdas, evitando ao máximo as interferências no meio. A tabela 3 mostra um exemplo de um pacote enviado por alguns modelos da Teledyne.

Bytes	Conteúdo
20	Cabeçalho geral
53	Cabeçalho de configuração
65	Cabeçalho de dados
242	Dados de velocidade
122	Dados de correlação de amplitude
122	Intensidade dos ecos
122	Percentual de dados válidos
81	<i>Bottom track</i>
2	Reservado
2	Checksum
<b>831</b>	<b>bytes</b>

Tabela 3 - Exemplo pacote enviado por modem da Teledyne. Tabela extraída de [28].

### 3.1. – Modulações Digitais

#### 3.1.1 – Modulação GFSK

A modulação GFSK [79] é parecida à modulação básica (FSK), mas utiliza filtragem gaussiana nos dados digitais na banda base antes de transmitir.

A filtragem gaussiana tem o objetivo de limitar a banda espectral do sinal de dados de modo a fazer suaves transições de frequência. Por sua vez, o resultado diminui a largura de banda na saída do modulador.

O esquema comparativo básico é ilustrado na figura 26.

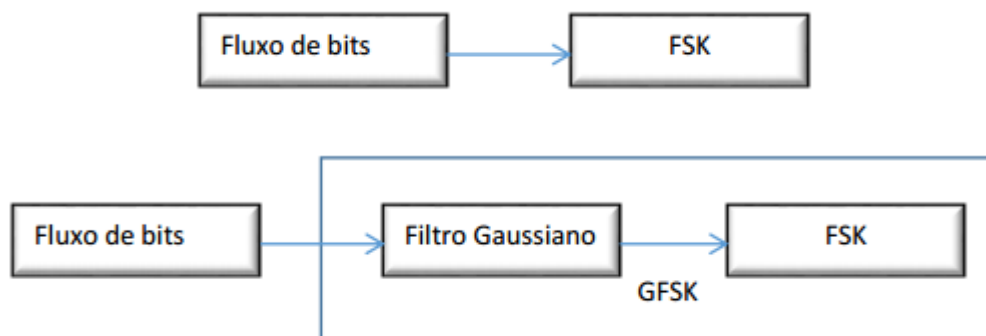


Figura 26 - Esquema do Modulador FSK acima e GFSK em baixo.

No GFSK os dados são codificados na forma de variações na frequência na portadora, de maneira similar à modulação FSK. Portanto, o modulador utilizado pode ser o mesmo que para a modulação FSK. Porém, antes dos pulsos entrarem no modulador, eles passam por um filtro gaussiano, de modo a reduzir a largura espectral dos mesmos. O filtro gaussiano é uma espécie de alinhador do pulso que serve para suavizar a transição entre os valores dos pulsos. A figura 27 ilustra a transformação dos pulsos após passagem pelo filtro gaussiano.



Figura 27 - Transformação do pulso após passagem pelo filtro Gaussiano. Imagem extraída de [81].

### 3.1.2 – Modulação GMSK

A modulação GMSK [80] *Gaussian Minimum Shift Keying* é a modulação de banda estreita principalmente utilizada no GSM (*Global System Mobile*) e no AIS (*Sistema de identificação Automática*) para a navegação marítima.

No seu funcionamento insere os dados na fase da portadora, permitindo desta forma o uso de amplificadores mais simples, obtendo desta um sinal constante.

GMSK é semelhante ao padrão de codificação mínimo MSK, no entanto, o fluxo de dados digital é primeiro filtrado pelo filtro Gaussiano antes de ser aplicado a um modulador de frequência.

Desta forma, reduz-se a banda lateral, que por sua vez reduz a interferência entre portadoras de sinais em canais de frequências adjacentes. No entanto o filtro de Gauss aumenta a memória de modulação no sistema e faz com que aumente a interferência entre símbolos tornando mais difícil diferenciar os valores transmitidos. O GMSK tem uma alta eficiência espectral, mas necessita de uma maior potência.

### Modo de funcionamento

GMSK filtra os sinais através de um filtro Gaussiano e, em seguida aplica um modulador de frequência onde o índice de modulação é definido para 0.5. Este método é muito simples, contudo o índice de modulação deve ser exatamente 0.5, conforme se pode observar na figura 28.

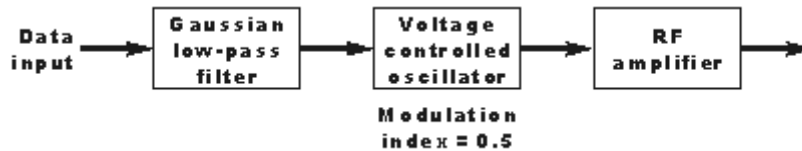


Figura 28 - Gerador GMSK. Imagem extraída de [80].

### 3.1.3 – Modulação PSK / QPSK

O PSK [81] é uma forma de modulação em que a informação do sinal digital é embutida nos parâmetros de fase da portadora. Neste sistema de modulação, quando há uma transição de um bit 0 para um bit 1 ou de um bit 1 para um bit 0, a onda portadora sofre uma alteração de fase de 180 graus. Esta forma particular do PSK é chamada de BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Quando não há nenhuma destas transições, ou seja, quando bits subsequentes são iguais, a portadora continua a ser transmitida com a mesma fase. Esta variação de fase em função da transição de bit do sinal é ilustrada na figura 29.

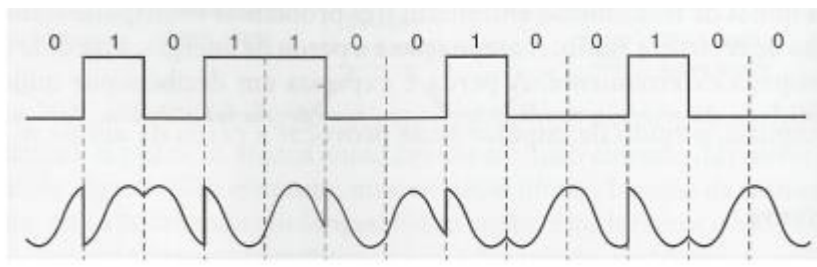


Figura 29 - Variação de fase em função da transição de Bit – Modulação PSK. Imagem extraída [81]

A modulação QPSK [81] por sua vez é uma técnica de modulação derivada do PSK, porém neste caso, são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para ser possível fazer a modulação do sinal de informação. Como agora são utilizados dois



parâmetros, existem mais tipos possíveis de símbolos nesta constelação, o que permite que sejam transmitidos mais bits por símbolo. É agora possível transmitir dois bits por símbolo, ao invés de 1 bit por símbolo como no caso PSK acima, neste caso, como teremos quatro tipos de símbolos possíveis, a portadora pode assumir quatro valores de fase diferentes, cada um deles correspondendo a um bit, como por exemplo  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  e  $315^\circ$ .

A figura 30 demonstra num diagrama de fase e quadratura os 4 possíveis símbolos gerados pela modulação QPSK usando 2 bits por símbolo.

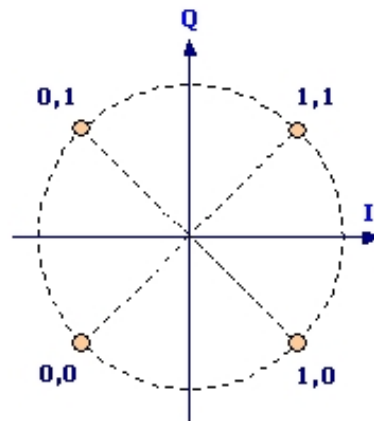


Figura 30 - Diagrama de fase e quadratura para 4 possíveis símbolos gerados pela modulação QPSK. Imagem extraída de [81].

### 3.1.4 – Modulação MQAM

Nesta modulação QAM, os símbolos são mapeados num diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama que representa a sua amplitude, diferentemente da modulação PSK, na qual todos os símbolos estão a igual distância da origem. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora.

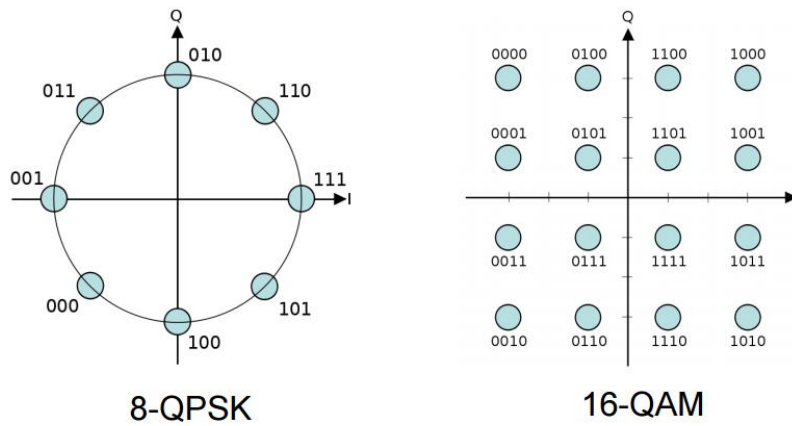


Figura 31 - Exemplos de diagrama de constelação. Imagem extraída de [81].

Eixo horizontal (real): sinal em fase, e no eixo vertical (imaginário) sinal em quadratura. Conforme se pode observar os exemplos da figura 31. Os pontos no diagrama são chamados de pontos de constelação, onde se forma um conjunto de símbolos de modulação (M). A cada instante de tempo o módulo e a fase do sinal representam um único símbolo contido no alfabeto. A modulação digital é um caso particular da QAM, onde o módulo do sinal modulado é constante, havendo alteração apenas na sua fase.

Na figura 32 é possível observar quatro exemplos de diagramas de constelação

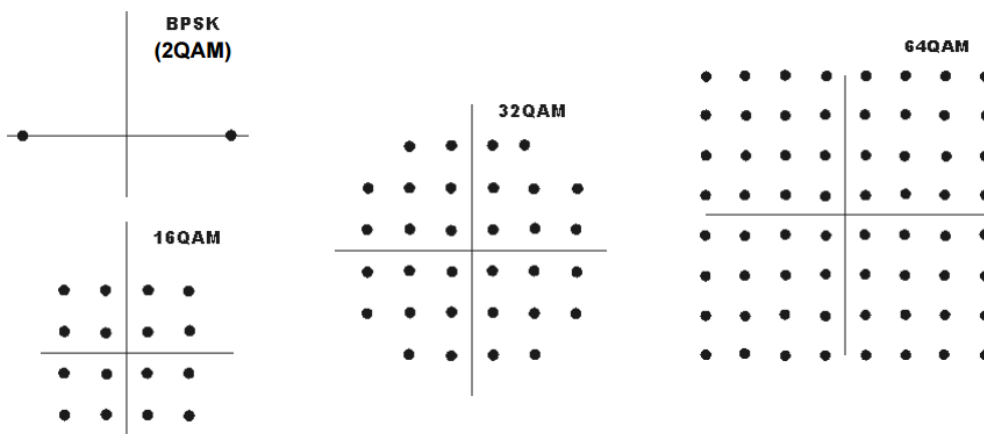


Figura 32 - Exemplos de diagrama de constelação. Imagem extraída de [81].

No que toca as características, quanto maior o alfabeto, ou seja, número de símbolos M da constelação, maior a eficiência de transmissão e maior a proximidade entre os símbolos distintos (amplitude e fase). No que respeita a probabilidade de erros também esta aumenta.

### 3.1.5 – Modulação OOK

Um caso particular da modulação ASK é a modulação OOK [82]. Esta técnica permite transmitir um pulso sinusoidal correspondente a um determinado bit e o valor zero no bit complementar. Neste caso particular, o bit 1 é codificado de forma idêntica à modulação ASK e o bit 0 é codificado com o valor zero com duração de tempo de bit.

A modulação OOK é uma técnica binária que utiliza dois símbolos para representar os bits 0 e 1. Os dois símbolos consistem em duas amplitudes de uma grandeza física, tal como a corrente ou a tensão de um sinal elétrico. A figura 33 mostra um sinal OOK, onde  $T_b$  representa a duração temporal de cada bit.

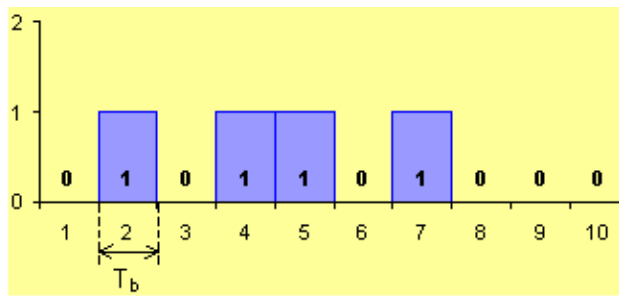


Figura 33 - Sinal OOK NRZ. Imagem extraída de [82].

Quando, como na Figura 33, o impulso que representa o bit "1" tem uma duração igual ao período de um bit, diz-se que o sinal é do tipo não-retorno-a-zero (NRZ - *Non-Return-to-Zero*). Quando a duração dos impulsos é inferior à duração de um bit, o sinal é do tipo retorno-a-zero (RZ - *Return-to-Zero*), tal como se verifica na Figura 34.

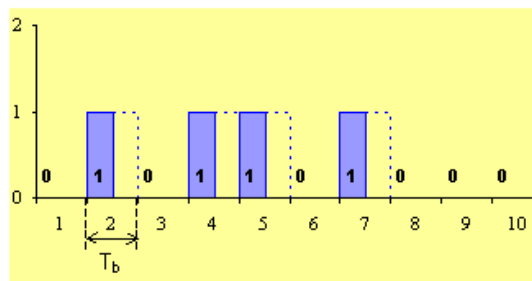


Figura 34 Sinal OOK RZ. Imagem extraída de [82].

### 3.2 – Técnicas de Transmissão e combate a multi percurso

No que concerne aos mecanismos de transmissão dos sinais acústicos podemos afirmar que além de estarem dependentes de inúmeros fatores, são extremamente complexos [7]. Sofrem com a presença de ruído ambiente, extremamente variável [5], que é emitido por diversas fontes, sejam elas naturais ou artificiais.

Na comunicação acústica subaquática a propagação de sinais é feita por diversos percursos que apresentam diferentes comprimentos [1]. Isto acontece, porque o sinal transmitido não segue todo pelo mesmo caminho, ora sobe, ora desce ou segue em frente. Ao chegar ao recetor, o sinal recebido é a soma de todos os sinais que percorrem os diferentes percursos. No recetor o sinal recebido pode ou não estar em fase. Isto é, os que estiverem somam-se construtivamente, os restantes somam-se destrutivamente. O que resulta é um sinal dependente dos vários percursos.

Nos sistemas com nós móveis, a posição do emissor ou do recetor podem ser alteradas. Esta alteração leva a uma variação do sinal recebido, onde a onda sonora que viaja no meio aquático vai sofrer atrasos, distorção e até mesmo enfraquecimento, dependente da distância [38]. De onde se pode concluir que à medida que o som se propaga no meio, as perdas vão aumentando.

O multi percurso no meio subaquático além de ser influenciado pelas reflexões da onda, é também afetado pelas condições do meio. Ora por objetos, animais e até mesmo pela temperatura e profundidade, onde as ondas ao incidirem com os animais ou objetos sofrem espalhamento aleatório. Podendo então concluir que tanto o ruído ambiente como as perdas variam de local para local, e as transmissões dependem desses mesmos fatores. Onde são necessários sistemas capazes de avaliarem o local onde são inseridos adaptando-se e moldando-se às condições do meio. Uma vez que todos estes fatores são responsáveis por determinar a largura de banda disponível, que por si só já é bastante limitada.

O multi percurso além de depender da configuração da ligação, onde canais verticais apresentam grandes espalhamentos e com uma grande distorção é também responsável pela degradação do sinal de comunicação, visto gerar bastante interferência inter simbólica. Neste sentido a Evologics [83] desenvolveu, uma linha de modems acústicos subaquáticos que usa uma tecnologia patenteada S2C (*Sweep Spread Carrier*) para a transmissão subaquática. Foi desenvolvida para utilizar o padrão do som emitido pelos golfinhos, que espalham ininterruptamente a energia do sinal numa vasta gama de frequências. Já o Woods Hole

Oceanographic Institute [84] projetou um modem de arquitetura aberta que utiliza modulação na camada física FH (*Frequency hopping*) FSK ou PSK. Onde a modulação FH/FSK é usada em meios onde a comunicação é mais difícil e a modulação PSK, por sua vez, é usada em canais de comunicação relativamente simples.

No ponto 3.4 as soluções existentes são abordadas com mais detalhe e é possível ficar a entender melhor algumas das soluções disponíveis.

### 3.3 – SDR

Assim, todos os fenómenos presentes no ambiente subaquático e que influenciam a propagação das ondas acústicas foram abordados e analisados. Todos estes aspetos têm de ser tidos em consideração no desenvolvimento de um sistema de comunicação acústico. Dai a grande utilidade do uso de um *Software Defined Radio*. Os rádios definidos por *software* permitem obter e simular sistemas de transmissão e receção facilmente, sendo eles configuráveis e adaptáveis, de forma a ser possível implementar diversos rádios num só sistema.

O SDR [85] dispõe de alguns aspetos básicos tais como:

- Sample Rate, que não é nada mais que a frequência de amostragem.
- Recetor de rádio Analógico
- Misturador
- Conversores Ascendentes e descendentes, os chamados DDC e DUC. Estes conversores funcionam como um pré processador para *hardware*, e permitem para o caso de o conversor ascendente fazer uma seleção dos sinais desejados e remove todos os outros. Isto proporciona uma largura de banda máxima e mínima. O mesmo se aplica ao descendente, onde permite gerar e entregar os sinais de banda base amostrados na taxa de amostragem. Aumenta a taxa de amostragem no filtro de interpolação, e executa a conversão de frequência digital. Desta forma, e com a redução da frequência de amostragem, pode-se reduzir drasticamente o custo e a complexidade dos sistemas.
- Filtros de Interpolação responsável por aumentar a banda base, ou seja, vai aumentar a frequência de amostragem do sinal.

De uma forma genérica, um sistema de comunicação pode ser dividido em três elementos básicos sendo eles, o emissor, o canal e o recetor. O canal é o meio que une o emissor ao recetor. O emissor converte a mensagem de uma fonte de informação e envia pelo

canal. Ao propagar-se no canal, o sinal transmitido sofre distorção e efeitos do ruído. O sinal ao chegar ao recetor é diferente do enviado. O recetor processa o sinal afim de obter a mensagem original.

Para implementar tudo isto seria necessário mais que um *hardware* uma vez que o emissor e recetor são *hardwares* diferentes. Estes podem chamar-se de rádios e têm uma implementação particular. Uma implementação diferente ou uma mudança da tecnologia torna necessário trocar de *hardware*, além de que usar um rádio para cada tecnologia é algo dispendioso. É aqui que surge o *software defined radio*, que permite a implementação virtual de vários rádios, fazendo uso de apenas um *hardware*. Este conceito de rádio foi proposto por Joseph Mitola III [53]. A ideia é implementar as etapas necessárias a transmissão e receção de sinais.

Na figura 35 é possível observar o exemplo do conceito de rádio definido por *software*. Em cima o emissor e em baixo o recetor. Onde o ADC *Analog to Digital Convert* e DAC *Digital do Analog Convert*.

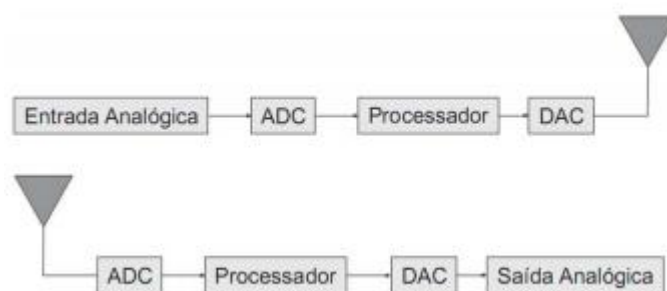


Figura 35 - Exemplo do conceito de Rádio Definido por software.

A implementação de rádio definidos por *software* requer uma plataforma de *software* na qual os blocos do radio possam ser implementados. De entre as plataformas disponíveis, a que tem crescido mais, e dado mais “frutos” é o GNU Radio.

No apêndice A consta a informação mais detalhada sobre o GNU Radio.

### 3.4 - Soluções existentes

Os modems acústicos subaquáticos nos dias de hoje são utilizados tanto por instituições privadas como por públicas, para as mais diversificadas utilidades.

A Link-Quest por exemplo, dispõe de modems de curto e longo alcance [27]. O UW M1000, é utilizado essencialmente em águas pouco profundas, enquanto que o UW M10000, é um modem de profundidade.

A Bentos Teledyne, outro fabricante de modems, têm-se especializado no desenvolvimento de modems para comunicações a grande profundidade [28].

A TriTech Internacional desenvolveu o Micron Data Modem [56] para o uso em veículos controlados remotamente.

A Aquatec projeta modems acústicos [56], de longo alcance até 5 km.

A DSPComm produz o AquaComm, um modem que permite que seja o utilizador a definir a capacidade de potência na transmissão e receção. Ideal para aplicações que comuniquem a distâncias inferiores a 3km [58].

O MicroModem [59] desenvolvido pelo WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) tem sido desenvolvido em open source e é a melhor alternativa para as restantes soluções comerciais. Uma vez que é programável e tem a capacidade de suportar inúmeros instrumentos. O MicroModem na camada física usa a modulação FSK ou a modulação PSK. Dependendo se o pretendido é modulação na frequência ou na fase.

Na tabela 4 estão resumidos os modems de cada uma das empresas em termos de frequência, potência, transmissão, alcance e custo.

Empresa	Modem Modelo	Frequência (kHz)		Potência (W)		Taxa de Transmissão (bps)	Alcance (km)	Custo (€)
		Centro	Largura de Banda	Tx	Rx			
LinkQuest	UW M1000	35.7	17.9	1	0.75	17800	0.35	
	UW M2000	35.7	17.9	2	0.8	17800	1.5	
	UW M2000H	35.7	17.9	2	0.8	17800	1.5	
	UW M2200	71.4	35.7	6	1	35700	1	
	UW M3000	10	5	12	0.8	5000	3	> 6000
	UW M3000H	10	5	12	0.8	5000	3	
	UW M4000	17	8.5	7	0.8	8500	4	
	UW M10000	10	5	40	0.8	5000	10	
TELEDYNE	ATM9XX (PSK)	11.5/18.5/24.5	5	20	0.7	2400	6	
BENTHOS	ATM9XX (MFSK <sup>2</sup> )	11.5/18.5/24.5	5	20	0.7	15360	6	> 6500
	ATM885	18.5	5	84	0.7	15360	0.7	
TriTech	MicronModem	22	4	8	0.7	40	0.5	~ 3000
Aquatec	AQUAModem 500	29	4	NS	NS	100	0.25	> 7000
	AQUAModem 1000	9.7	4.5	20	0.6	2000	5	
EvoLogics	S2CR 48/78	63	30	18	1.1	31200	1	
	S2CR 40/80	51	26	40	1.1	27700	1	
	S2CR 18/34	26	16	35	1.3	13900	3.5	> 10000
	S2CR 12/24	18.5	11	15	1.1	9200	6	
	S2CR 7/17	12	10	40	1.1	6900	8	
DSPComm	AquaComm Marlin	23	14	1.8	0.3	480	1	
	AquaComm Mako	23	14	1.8	0.3	240	1	> 5300
	AquaComm Orca	23	14	1.8	0.3	100	3	
WHOI	MicroModem (FSK)	25	4	100	0.2	80	2	> 6000
	MicroModem (PSK)	25	4	100	2.2	5400	2	

Tabela 4 - Comparação entre modems acústicos subaquáticos comerciais

### 3.4.1 - Soluções Propostas por Projetos de Investigação

Em projetos de investigação tem surgido alguns modelos e protótipos.

Na tabela 5 estão representadas as instituições bem como os seus modems, de forma a ser possível de se comparar plataformas, frequências, alcances, transmissões e modulações.

Instituição	Modem	Plataforma	Frequência (kHz)	Alcance (km)	Taxa de Transmissão (bps)	Modulação
University of Southern California	USC	ATMEGA 128L MCU (Mica2)	18	0.5	600	FSK
University of California, Irvine	UCI	Tmote (MSP430 MCU)	1.5	0.01	48	FSK
University of Connecticut	uConn	TMS320C6713 DSP	12.5	(Lab)	6200	OFDM (QPSK <sup>4</sup> )
Massachusetts Institute of Technology	rModem	TMS320C6713 DSP	12	0.016	550	QPSK
University of California, Santa Barbara	AquaModem	TMS320C6713 DSP	24	0.44	133	DSSS <sup>5</sup>
Kookmin University	Kookmin	ATMEGA 128 MCU	30	0.03	5000	OOK <sup>6</sup>
Massachusetts Institute of Technology	AquaNode	ADBlackfin B533 DSP	30	0.4	300	FSK
University of California, San Diego	UCSD	FPGA	NS	NS	NS	NS
Northwestern Polytechnical University in China	NPUC	ADSP-TS101 + FPGA	NS	(Lab)	1000	OFDM (BPSK <sup>7</sup> )
North Carolina State University	NCSU	ATmega 168 MCU	47.5	0.1	31	4-FSK
Gangneung-Wonju National University	GaWoNU	ARMCortex-M3	70	0.07	200	OOK
ITACA Institute	ITACA	C8051F920	85	0.1	1000	FSK

Tabela 5 - Comparação entre modems acústicos subaquáticos propostos em trabalho de investigação



O Instituto de Ciências da Informação da Universidade do Sul da Califórnia desenvolveu o SNUSE [60] um projeto experimental de redes de sensores subaquáticas.

A Universidade da Califórnia em Irvine [61] desenvolveu modems acústicos constituídos por altifalantes e microfones genéricos de forma a comunicar entre redes de sensores.

O AquaModem [62], da Universidade da Califórnia foi projetado para aplicações de curto alcance em águas pouco profundas [63].

A Universidade Kookmin, Coreia [64], projetaram um modem que usa quatro transdutores para comunicar com outros nós.

Universidade de Connecticut desenvolveram um modem baseado em OFDM [68, 69, 70, 71, 72, 73] e MIMO [74, 75], que permite uma elevada taxa de transmissão [65, 66].

O rModem [67] foi desenvolvido de forma a ser um modem acústico reconfigurável.



## Capítulo 4 – Transceivers de baixa complexidade para canais acústicos

Neste trabalho, o objetivo foi a criação de um emissor / recetor de forma a poder realizar comunicações acústicas. Inicialmente desenvolveu-se o modelo simulado como exemplificado na figura 36 onde é utilizada a modulação GFSK e canal AWGNN. O emissor, o canal e o recetor são desenvolvidos e utilizados num só *hardware*.

Ao longo deste capítulo vão ser apresentadas as quatro modulações consideradas, nomeadamente GFSK, GMSK, MQAM, QPSK fazendo uso dos canais AWGNN, *Fading Model* e *Selective Fading Model*.

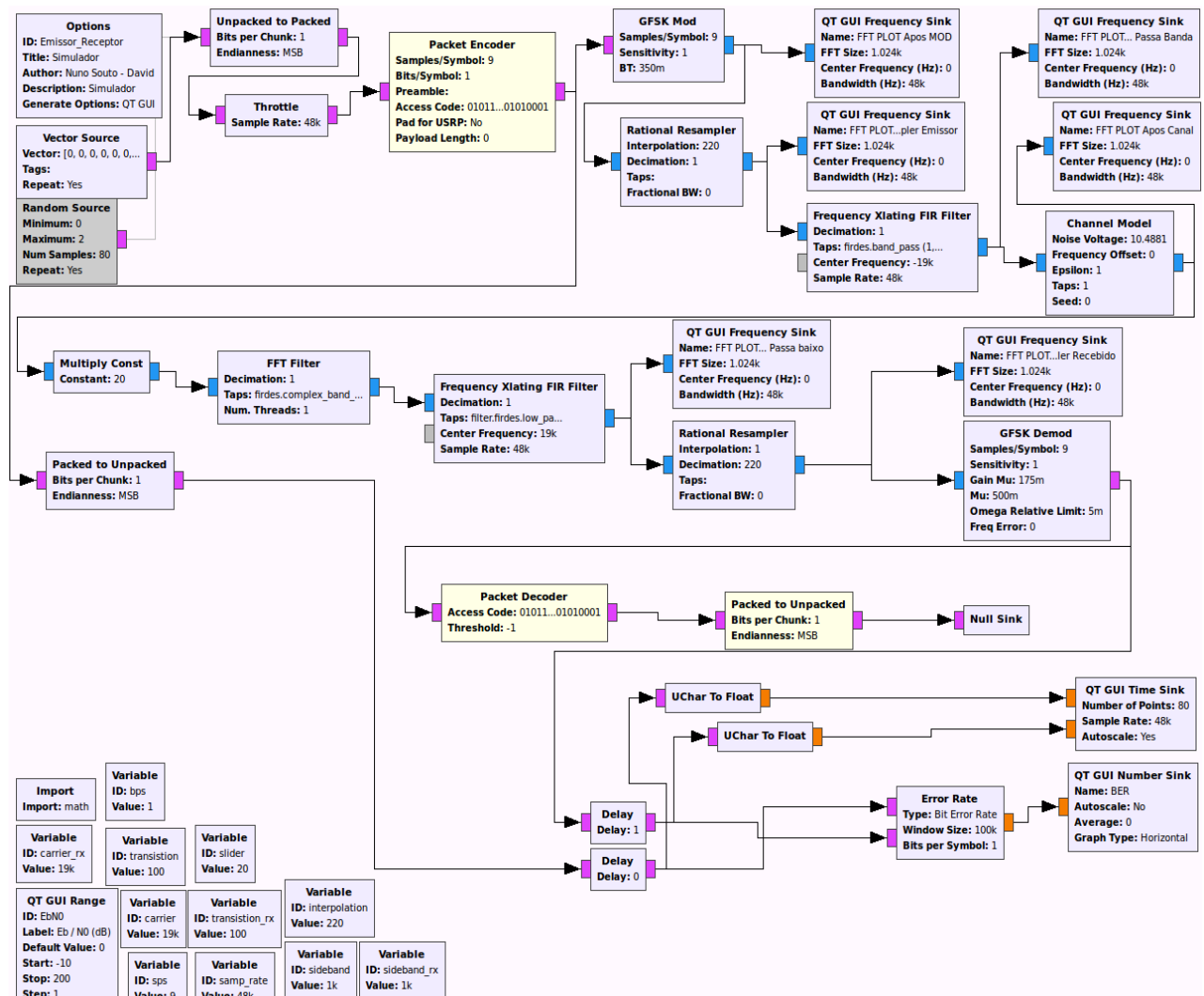


Figura 36 – Simulador GFSK em canal AWGNN

## 4.1 – Esquemas Emissão / Recepção

### 4.1.1 – Esquema Emissão / Recepção em canal AWGNN (Additive White Gaussian Noise)

Na figura 36 é possível observar o esquema do simulador GFSK fazendo uso do canal AWGNN. Analisando esse mesmo esquema é possível identificar que o mesmo é composto por vários blocos. Em baixo apresenta-se em detalhe cada bloco do simulador.

**Vector Source** – Cria um vetor de bits que representa a mensagem a transmitir.

**Random Source** – Como o próprio nome indica, é uma fonte que gera valores uma mensagem aleatória, sendo uma alternativa ao “Vector Source”.

**Unpacked to Packed** – Converte um fluxo de bytes que não se encontram empacotados num fluxo de bytes empacotados.

**Throttle** – Este bloco permite que apenas uma certa quantidade de bits passe pelo bloco. A quantidade não é certa, mas os que passarem por este bloco dizem respeito a taxa de amostragem. Este bloco é bastante importante, evita que as simulações consumam 100% do CPU do *hardware*.

**Packet Encoder** – Permite empacotar os dados num pacote, com um determinado comprimento, cabeçalho é código de acesso.

**GFSK Mod** – Permite fazer a modulação dos dados recebidos

**QT GUI Frequency Sink** – Permite observar o gráfico da frequência, do género da figura 71 apêndice A. Neste caso, está a analisar a frequência a saída do modulador GFSK.

**Rational Resampler** – Permite alterar a taxa de amostragem para outra. Desde que seja possível a seguinte relação: Taxa Entrada Saída x *Interpolation / Decimation*.

**Frequency Xlaring FIR Filter** – Permite implementar um filtro de resposta impulsiva. Este tipo de filtro digital é caracterizado por uma resposta ao impulso que se acaba por tornar nula após um tempo finito. Este bloco permite fazer conversão de frequência e seleção do canal.

**Channel Model** – Este bloco permite simular canais de comunicação. Neste caso o bloco é essencial pois permite um canal de ruído branco gaussiano aditivo (AWGNN) com alguns extras. Este modelo de canal além de simular AWGNN, permite simular diferentes

frequências e diferentes tempos transmissão entre emissor e recetor num ambiente de caminhos múltiplos, estáticos e simples.

**Multiply const** – Bloco que permite aumentar o sinal por exemplo. No caso aplicado, na saída do bloco Multiply Const,  $OUT (Saída) = IN (Entrada \text{ no bloco}) \times \text{Contante}$ .

**FFT Filter** – Filtro, neste caso passa-banda, implementado usando a Transformada Rápida de Fourier

**GFSK Demod** – Bloco que faz a desmodulação GFSK

**Packet Decoder** – Ao contrário do Packet Encoder, este bloco vai desempacotar toda a informação nele contida.

**Packed do Unpacked** – Os dados ao chegar a este bloco estão todos empacotados. Ao passar neste bloco deixam de estar e passam a ser novo um fluxo de bytes.

**Delay** – Bloco que permite adicionar atrasos ao fluxo.

**Error rate** – Bloco que permite calcular o BER (*BIT – Error – Rate*).

**uChar to Float** – Converte um char num float.

**QT GUI Time Sink** – Bloco que permite analisar graficamente vários valores de entrada. Neste caso, para comparar o sinal original com o sinal recebido no final.

**QT GUI Number Sink** – Bloco que permite demonstrar valores. Utilizado para demonstrar o valor do BER.

**Variable** – Variáveis ambiente para os blocos, para predefinir os vários valores das variáveis.

Após todos os blocos estarem interligados o emissor e o recetor funcionam do seguinte modo. A mensagem é gerada na Source, e no bloco seguinte “unpacked to packed” a mensagem é empacotada. De seguida passa no bloco “Throttle” que vai limitar a quantidade de informação que por ele passa. Dessa forma o sistema não nos vai consumir os 100% do *hardware*. Ao chegar ao bloco de modulação a mensagem é modulada e segue para o bloco “Rational Resampler”. Aqui a taxa de amostragem será alterada. No filtro FIR dá-se a conversão de frequência e a seleção do canal. Ao chegar a este ponto a mensagem está pronta para ser enviada pelo canal. No canal são simulados os canais de simulação, quer seja *AWGNN*, *Fading Model* ou *Selective Fading Model*. Após o canal estamos na parte do recetor. Neste lado os blocos são utilizados para fazer o inverso do que foi feito inicialmente.

Nas modulações GMSK, MQAM e DBPSK poucas diferenças apresentavam nos esquemas face ao da modulação GFSK. No apêndice B, figuras 72, 73 e 74 estão representados os esquemas. Onde é possível de observar que a diferença entre o GMSK e o

GFSK é apenas no bloco do modulador e no desmodulador. Blocos esses que permitem fazer a modulação e a desmodulação do sinal GMSK. O Bloco Qui Constelation Sink na figura 72 do apêndice B é apenas de modo ilustrativo. A sua finalidade é observar e analisar a constelação do sinal à saída do modulador.

Uma diferença que se pode observar quer no Simulador do QAM figura 73 apêndice B quer no simulador DBPSK figura 74 apêndice B face aos das modulações GFSK e GMSK é no tempo de delay pois enquanto que no GMSK e GFSK o delay era de 1ms, nestes é de 12ms. O restante é idêntico.

#### 4.1.2 – Esquema Emissão / Receção em canal *Fading Model*

A figura 37 diz respeito ao simulador com canal *Fading Model* na modulação GFSK. Comparando com os simuladores do ponto 4.1.1, para a modulação GMSK (ver figura 75 apêndice B) e GFSK apenas se alterou o “canal”.

Enquanto que nos anteriores se fazia uso de um bloco “Channel Model” canal simples que introduzia ruído, nos 4 seguintes usou-se o bloco de canal “*Fading Model*”. Bloco esse que construi uma simulação básica de desvanecimento utilizando a soma das sinusóides. Tendo em conta o número de trajetórias esperados.

Ao contrário do bloco “Channel Model” que permitia adicionar ruído diretamente no bloco, este bloco não dispõe dessa funcionalidade. Pelo que foi necessário acrescentar mais dois blocos ao esquema. Um deles o bloco “Add” que permite fazer a soma de duas componentes, e o bloco “*Noise Source*” bloco esse que gera um ruído.

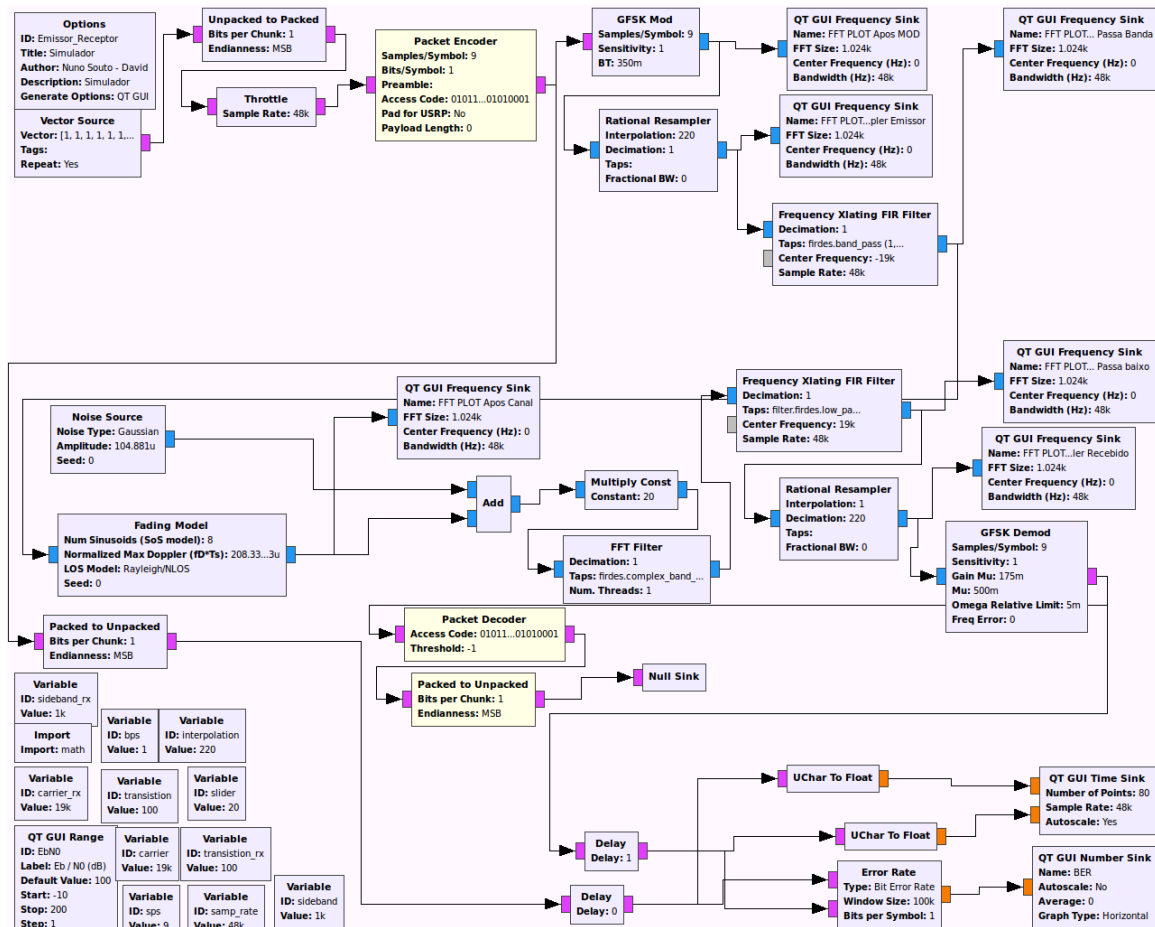


Figura 37 - Simulador GFSK em canal *Fading Model*

Na modulação MQAM e DBPSK, (figuras 76 e 77 apêndice B), além da alteração do canal foi necessário adicionar blocos que permitissem recuperar o sincronismo, fazer a equalização do sinal e a correção fina da frequência. Para tal adicionaram-se três novos blocos.

**Polyphase Clock Sync** – Este bloco faz a sincronização do relógio. Para tal age como sendo um filtro de interpolação. Executa desta forma a sincronização do sinal, minimizando a derivada do sinal filtrado, que por sua vez maximiza a SNR.

**Cma Equalizer** – Bloco que permite fazer uma equalização do sinal.

**Costas Loop** – Permite fazer o sincronismo e correção de frequência. Para tal centra a frequência do sinal e converte para a banda base.

### 4.1.3 – Esquema Emissão / Recepção em canal *Selective Fading Model*

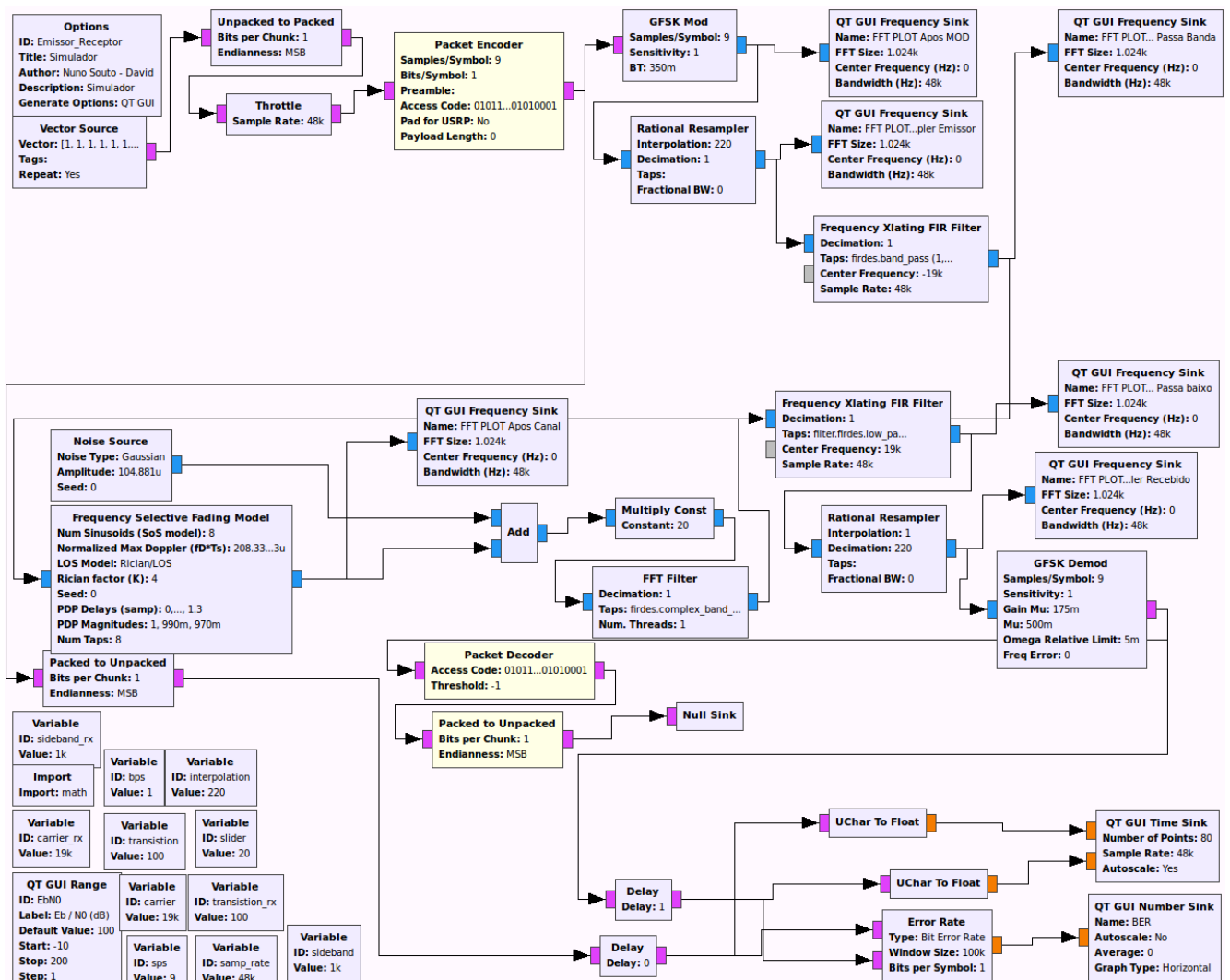


Figura 38 - Simulador GFSK em canal *Selective Fading Model*.

## 4.2 - Resultados em Canal AWGNN

Esta seção diz respeito à apresentação de resultados em canal AWGNN. Segue-se uma introdução relativamente às condições e em que parâmetros foram obtidos os referidos resultados.

- O sinal enviado foi um vetor de bytes a [10011001] \*10 gerado pelo bloco “Vector Source”.
- Utilizado um Sample Rate de 48 kHz.
- No Bloco do Modulador usou-se 9 amostras por símbolo.
- No Resampler antes do Modulador, 220 de Interpolation e 1 de decimation.



- Frequency Xlating FIR Filter, 1 de decimation, centrado na frequência de -19 kHz.
- Canal de ruído branco gaussiano aditivo (AWGNN).
- Multiply Const de 20.
- Rational Resampler antes do desmodulador, 1 de Interpolation e 220 de decimation.
- A frequência utilizada nas simulações foi 19 kHz.

Todas estas simulações foram realizadas num só *hardware*. Um AirBook com processador Intel I5 com uma velocidade 1.6 GHz. O tempo de simulação rondou as seis horas por simulador.

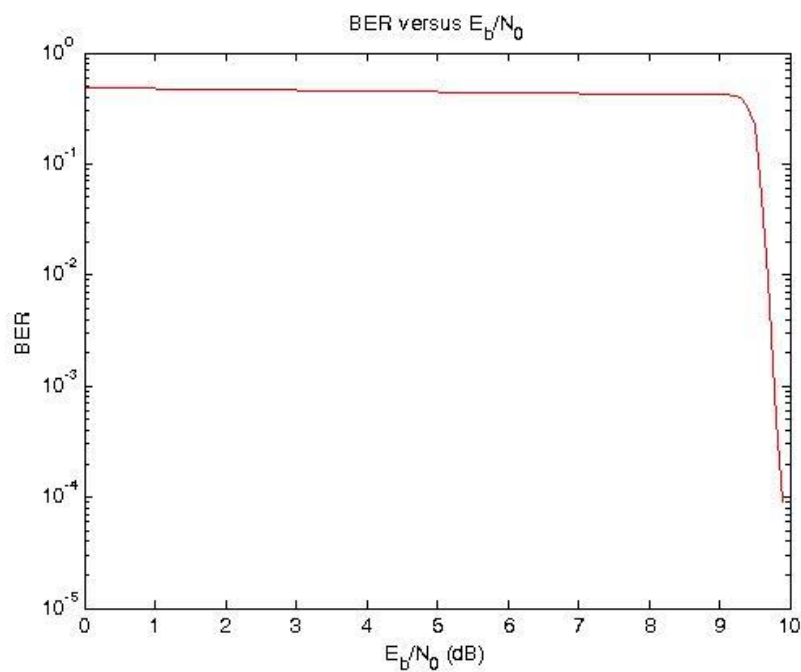


Figura 39 - Resultado da Simulação com canal AWGNN na modulação GFSK

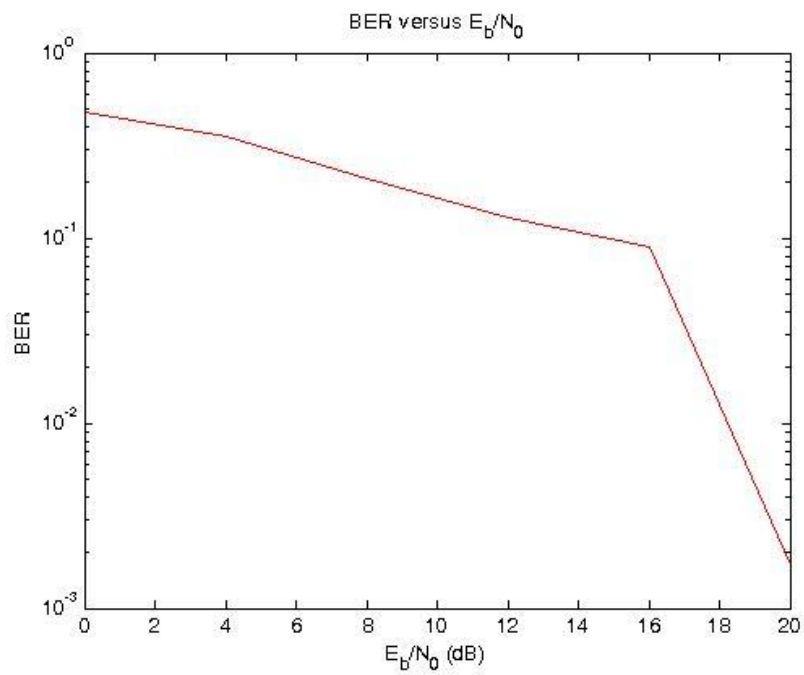


Figura 40 - Resultado da Simulação com canal AWGNN na modulação GMSK

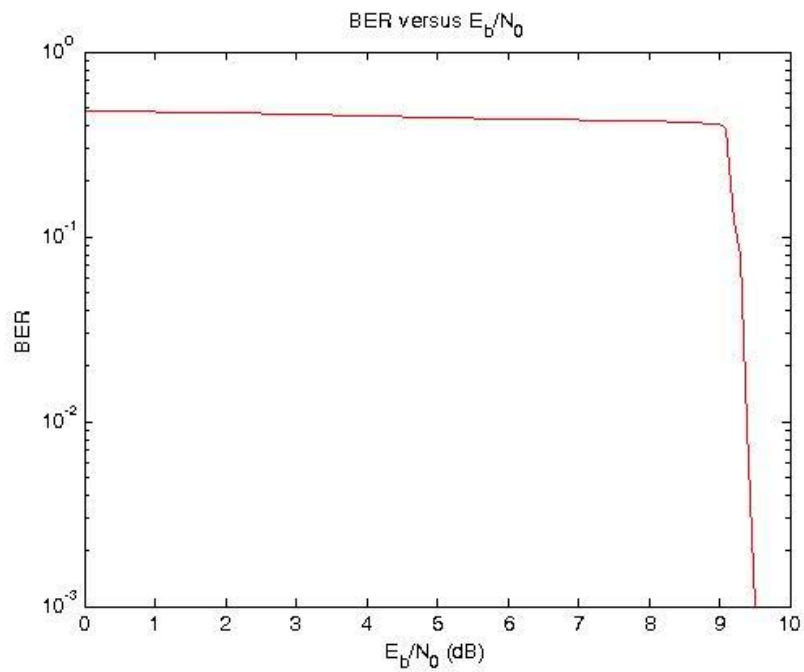


Figura 41- Resultado da Simulação com canal AWGNN na modulação DBPSK

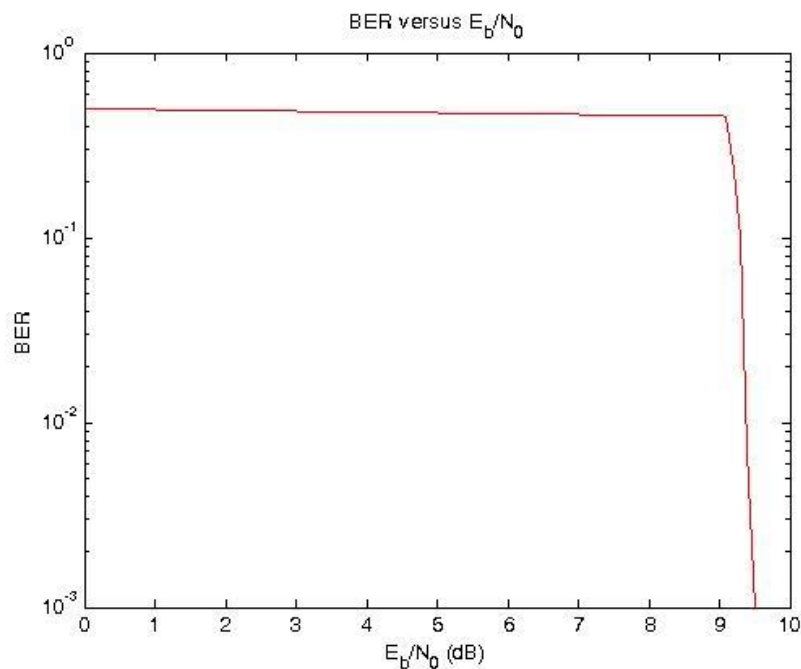


Figura 42- Resultado da Simulação com canal AWGNN na modulação MQAM

Nas figuras 39, 40, 41 e 42 estão representados os resultados da simulação em canal AWGNN para as respetivas modulações.

À primeira vista pode observar-se que as modulações GFSK, MQAM e DBPSK têm a mesma curvatura. A GMSK apresenta uma descida bem mais acentuada.

Com o aumento do valor de  $E_b/N_0$  as modulações GFSK, MQAM e DBPSK apresentam o mesmo comportamento e tipo de curvatura. A diferença entre elas começa no valor de  $E_b/N_0$  em que a descida se torna mais acentuada.

Na modulação GFSK figura 39 até valores de  $E_b/N_0$  de 9.4 o valor de BER é superior a 0.33 e a curvatura é ligeira. Abaixo desse valor a descida já é mais acentuada. Os valores de BER seguintes já são 0.22, 0.05, 0.009 para valores de  $E_b/N_0$  de 9.5, 9.6 e 9.7.

Já a Modulação GMSK figura 40, que se esperava ser idêntica ao GFSK, têm um comportamento um pouco diferente. Começa com valores de BER na ordem dos 0.48 para valores de  $E_b/N_0$  igual a zero, mas de seguida obtém uma descida acentuada. Os valores seguintes têm grandes quedas num curto espaço de valores de  $E_b/N_0$ . Bem como o valor de BER só acaba por tender para zero para valores de  $E_b/N_0$  superiores. Pois nas restantes modulações os valores de BER na ordem dos 9.5 – 10 de  $E_b/N_0$  já são zero ou perto disso, na modulação GMSK só acontece para valores de  $E_b/N_0$  igual ou superior a 20.

Nas modulações MQAM figura 41 e DBPSK figura 42 até valores de  $E_b/N_0$  na ordem dos 9.1 o valor de BER ronda os 0.23 e 0.12. Abaixo desses valores a curvatura é mais acentuada até se aproximar de zero para valores superiores a 9.5 de  $E_b/N_0$ .

Podemos concluir que para o canal AWGNN a modulação GFSK, MQAM e DBPSK têm um comportamento idêntico e são uma boa aposta. A modulação GMSK não deixa de ter boas prestações, mas comparando com as restantes é a que apresenta piores resultados.

### 4.3 – Resultados em Canal *Fading Model*

Nesta secção estão representados nas figuras 43, 44, 45 e 46 os resultados das simulações em canal *Fading Model*.

Numa primeira análise a modulação GMSK, figura 43, apresenta uma melhor curvatura que as restantes que têm uma descida mais constante. Porém o valor de BER na modulação GMSK só se aproxima de valores muito baixos para valores de  $E_b/N_0$  superiores.

A grande diferença entre as modulações dá-se no momento em que o valor de BER tende para zero. Nas modulações GFSK, MQAM e BPSK o valor de BER vai descendo gradualmente desde os 0,49 na GMSK, 0,50 na MQAM e 0,48 DBPSK até perto de valores de  $E_b/N_0$  igual a 9.6 na modulação GFSK onde obtêm um BER de 0,33, 9 na modulação MQAM que obtêm um BER de 0,39 e 8 na modulação DBPSK que apresenta um BER de 0,35. A modulação GMSK perto destes valores de  $E_b/N_0$  apresenta um BER inferior as restantes, contudo o BER na modulação GMSK só se aproxima de zero para valores de  $E_b/N_0$  superiores a 20, enquanto que, nas modulações GFSK, MQAM e DBPSK a partir dos valores acima descritos apresentam uma descida quase que na vertical atingindo valores de BER muito baixo para se conseguir medir para um  $E_b/N_0$  superior a 9.9 na GFSK, 9.5 na MQAM e DBPSK. O que na prática é metade do valor da modulação GMSK.

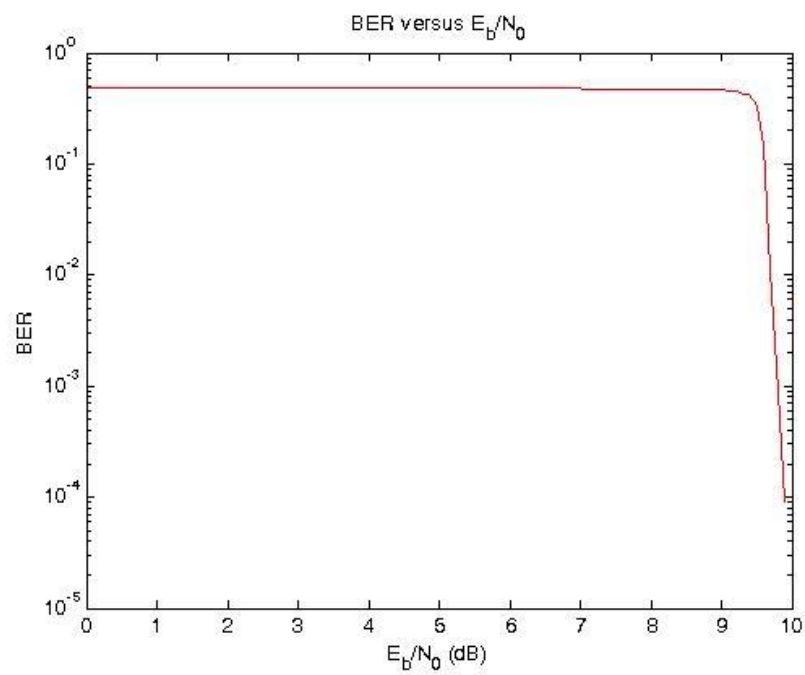


Figura 43 - Resultado da Simulação com canal *Fading Model* na modulação GFSK

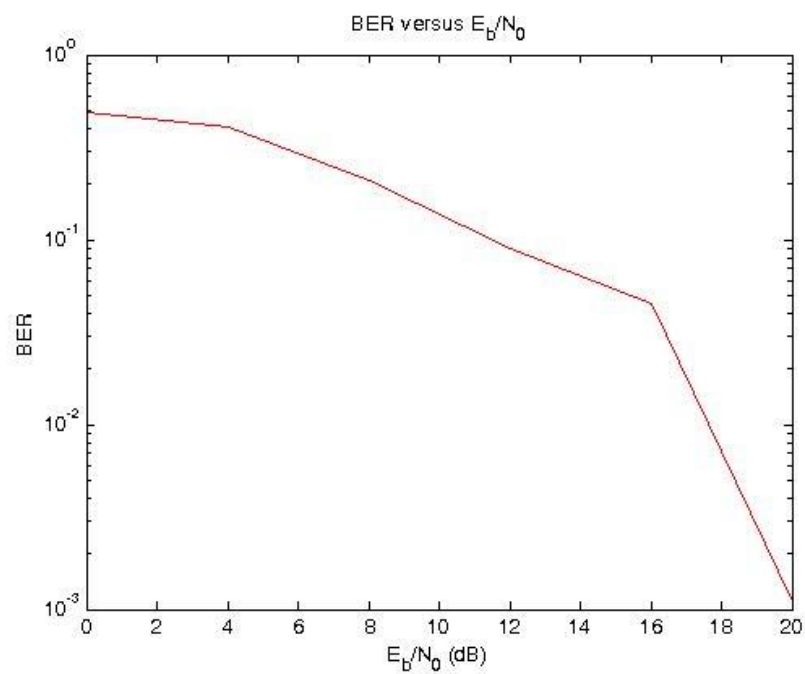


Figura 44 - Resultado da Simulação com canal *Fading Model* na modulação GMSK

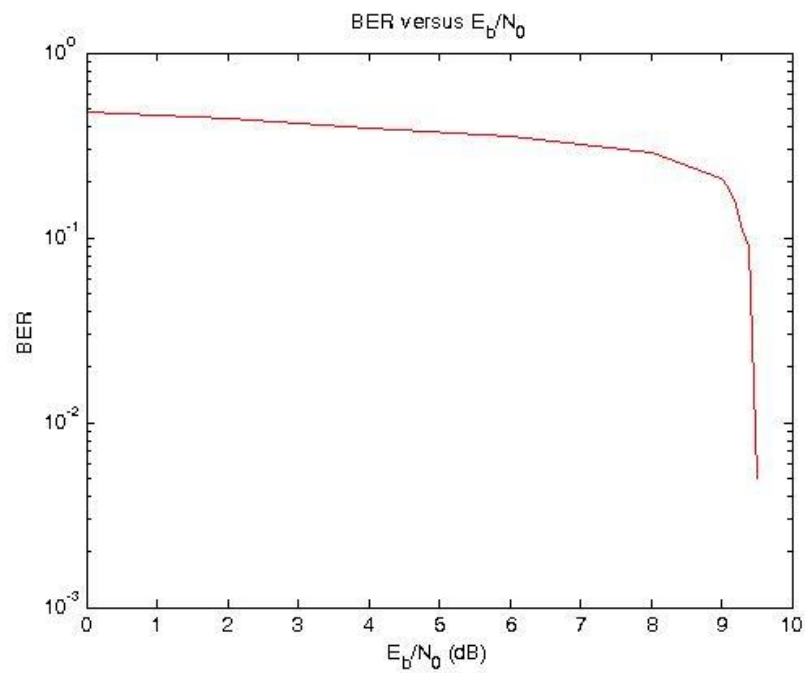


Figura 45 - Resultado da Simulação com canal *Fading Model* na modulação DBPSK

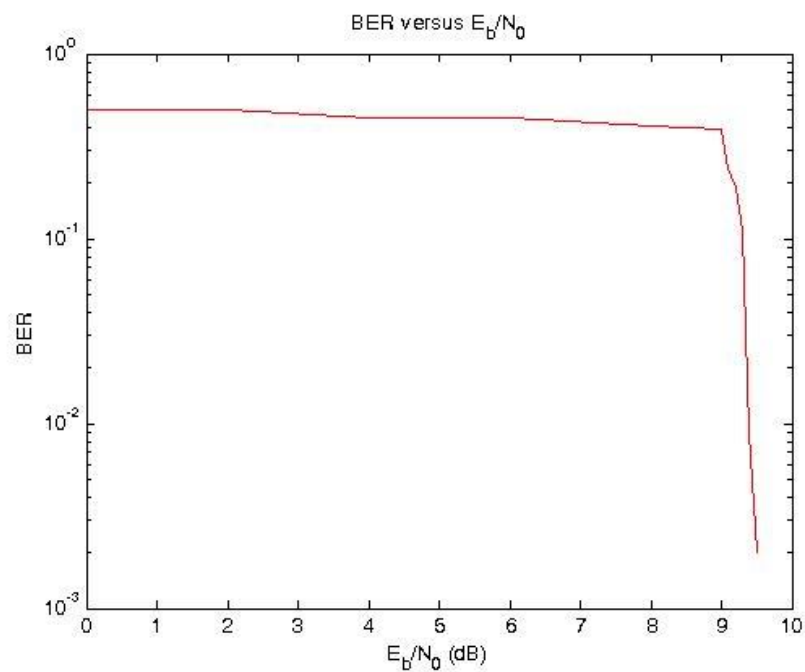


Figura 46 - Resultado da Simulação com canal *Fading Model* na modulação MQAM

#### 4.4 – Resultados em Canal *Selective Fading Model*

Nestas simulações foi utilizado um canal *Selective Fading Model*. Este canal, ao contrário dos anteriores, têm a particularidade de permitir estruturar o canal, ou seja, permite definir os parâmetros do canal de forma a escolher quantos multipercursos, quais as potências de cada canal e quais os atrasos. Nesta simulação foi utilizada a seguinte estrutura:

- Oito Sinusoides para simular o ganho.
- Frequência de Doppler máxima de 10 / Sample Rate (48kHz).
- Fator K de 4.
- PDP Delay de 0.0, 0.1, 1.3.
- PDP Magnitude de 1.0, 0.99, 0.97.
- 8 Taps.

Em relação a comparação de resultados, e tal como aconteceu nos canais anteriores a modulação GMSK é a que apresenta a curva mais acentuada. Porém a modulação GMSK, figura 48, apresenta um BER inferior às restantes modulações até cerca de  $E_b/N_0$  igual a 8.

Com o aumento do valor de  $E_b/N_0$  a modulação GMSK continua a sua queda acentuada até atingir um BER próximo de zero para valores de  $E_b/N_0$  superiores a vinte, enquanto que as restantes modulações apresentam uma descida constante e reduzida até valores de  $E_b/N_0$  de 9.4 na GFSK onde o BER é de 0.31, na MQAM para um valor de  $E_b/N_0$  de 9.1 o seu BER é de 0.38 e por fim na DBPSK para um  $E_b/N_0$  de 8 obtém um BER de 0.39. Abaixo destes valores de  $E_b/N_0$  a descida deixa de ser constante e os valores começam a decair repentinamente como se pode observar nas figuras até atingir valores próximos de zero em valores de  $E_b/N_0$  superiores a 9.9 na modulação GFSK e em valores superiores a 9.5 na MQAM e DBPSK.



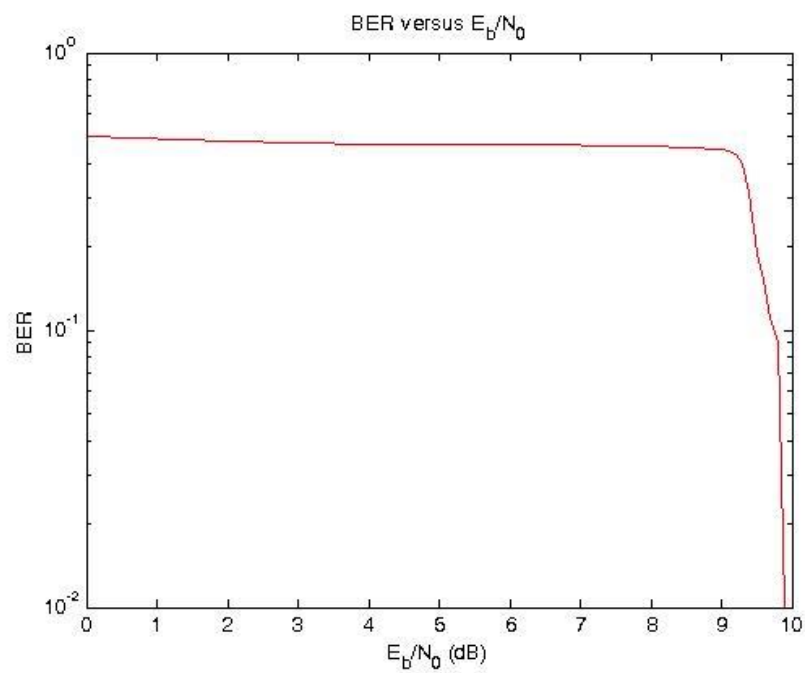


Figura 47 - Resultado da Simulação com canal *Selective Fading Model* na modulação GFSK

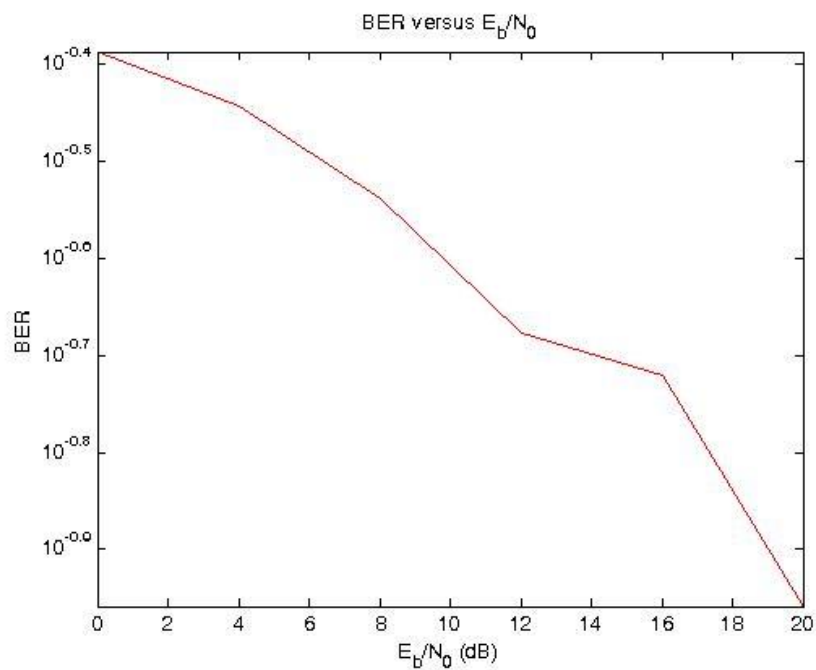


Figura 48 - Resultado da Simulação com canal *Selective Fading Model* na modulação GMSK

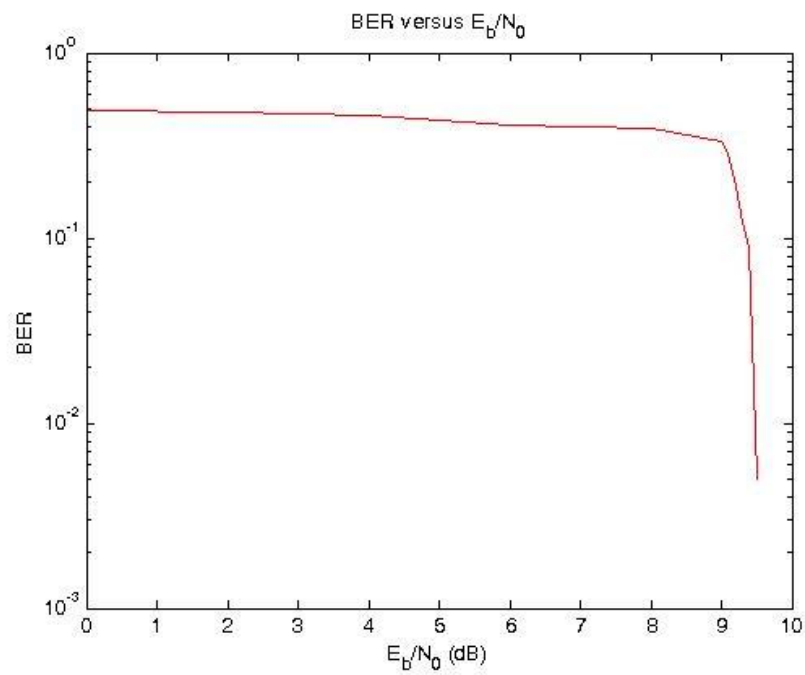


Figura 49 - Resultado da Simulação com canal *Selective Fading Model* na modulação DBPSK

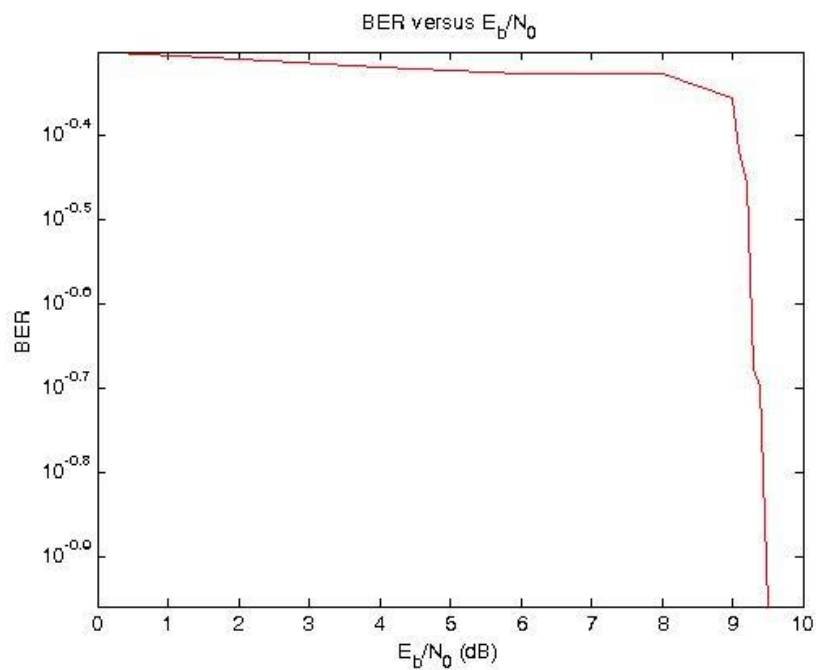


Figura 50 - Resultado da Simulação com canal *Selective Fading Model* na modulação MQAM

## Capítulo 5 – Avaliação dos esquemas de baixa complexidade para canais acústicos

Ao longo deste capítulo, vão ser apresentados os esquemas de emissão e receção reais que permitiram o envio e receção de mensagens. Serão também apresentadas as diferenças entre o modelo de simulação e o modelo real.

Nas apresentações de resultados existem duas subsecções distintas: uma dedicada ao desempenho em função da distância e outra dedicada ao desempenho em função da frequência. Em cada subsecção apresentam-se as várias modulações e a comparação entre elas.

A última secção deste capítulo destina-se à aplicação que foi implementada e testada para envio de mensagens entre terminais e para envio de imagens.

Infelizmente os testes em canal real não foram possíveis de se realizar como previsto inicialmente. De início planeou-se que estes testes seriam realizados no meio aquático, porém, o estudo foi realizado em canal terrestre, devido a constrangimentos do hardware. O emissor e o recetor foram instalados em *hardwares* distintos e fez-se uso do ar como canal de comunicação.

### 5.1 – Esquemas emissão e receção para envio vetores

Nesta secção estão representados o emissor e o recetor acústico para o envio de vetores.

A principal diferença face aos modelos de simulação para o modelo real é o canal em uso. Como mencionado no capítulo, anterior, os canais utilizados foram o *AWGNN*, *Selective Fading Model* e *Fading Model*. Tudo foi simulado no mesmo hardware. Na parte real tal não aconteceu. Removeram-se os blocos que introduziam o ruído ao canal, removeram-se os blocos de canal e foram introduzidos dois novos blocos: o bloco de “Audio Sink” e o bloco de “Audio Source”.

O emissor e recetor também foram separados em 2 esquemas diferentes para poderem ser usados em *hardwares* diferentes. Em termos de *hardware* para emissão utilizaram-se as colunas de som e para a receção os microfones dos PCs.

O bloco “Audio Sink” permite ao sinal, que inicialmente era digital, seja transformado num formato áudio e por sua vez seja enviado através da placa de som do *hardware* do emissor. O bloco “Audio Source” presente no recetor faz o inverso, escuta o sinal recebido e transforma-o num sinal digital. Para o uso de sinais de áudio, foi necessário trabalhar os mesmos com variáveis do tipo *float*, para tal, adicionou-se dois outros blocos. Um no emissor o “complex to Real” que converte o sinal complexo num sinal real, para ser possível transmitir, e no recetor um bloco “float to complex” que permite converter o sinal à saída do “Audio Source” que era *float* num sinal complexo.

Nas figuras 51 e 52 estão representados os esquemas do emissor e recetor real na modulação GFSK.

No apêndice C figuras 83 a 88 estão representados os emissores e recetores das modulações GMSK, MQAM e DBPSK.

Para o emissor foi utilizado um MacBook air, placa de som do Macbook para enviar o sinal, modelo Apple modelo A1304.

O recetor ficou a cargo de um Sony Vaio com um microfone estéreo e colunas da Realtek – High Definition Audio modelo CODAUD-00255519.

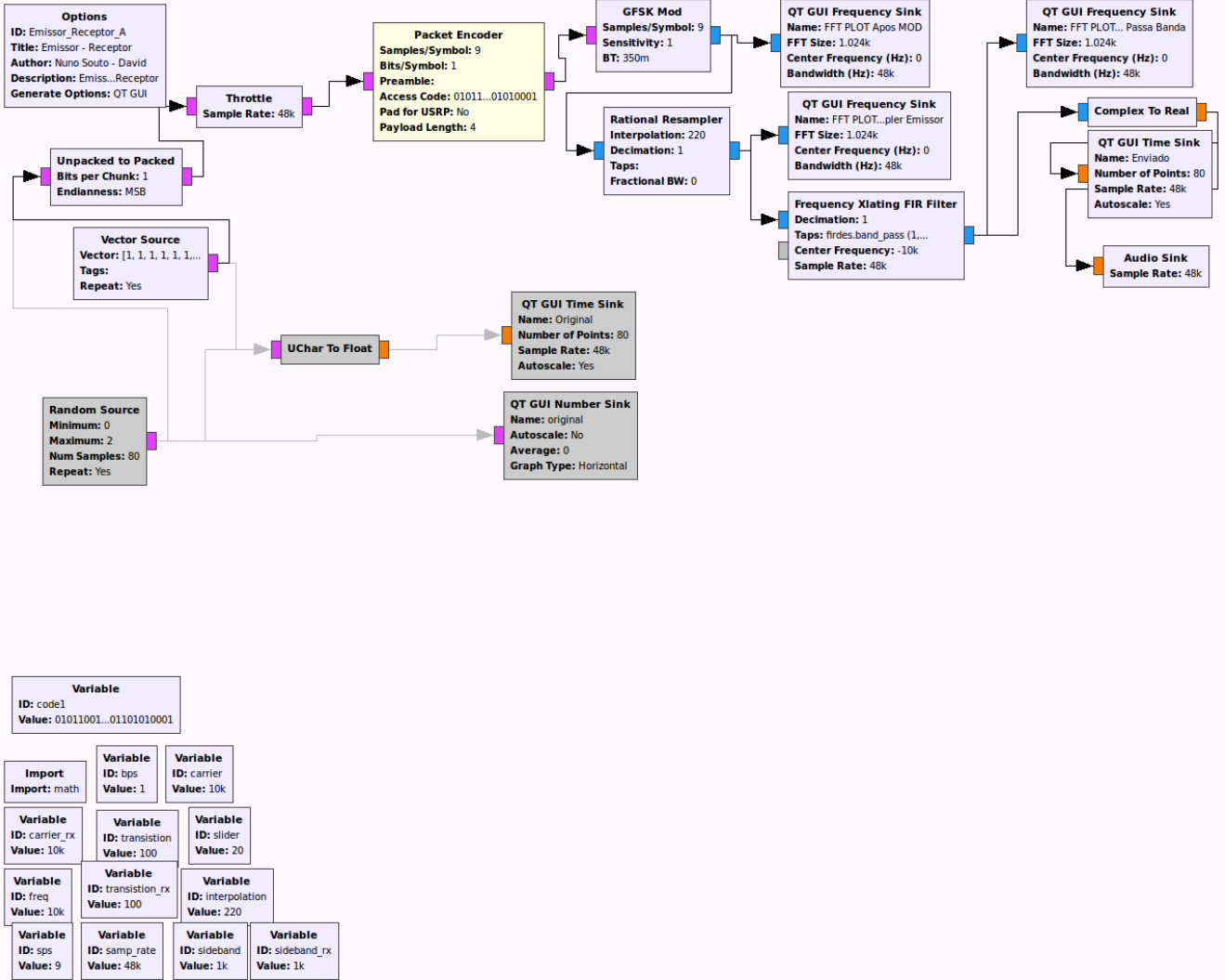


Figura 51 - Emissor GFSK

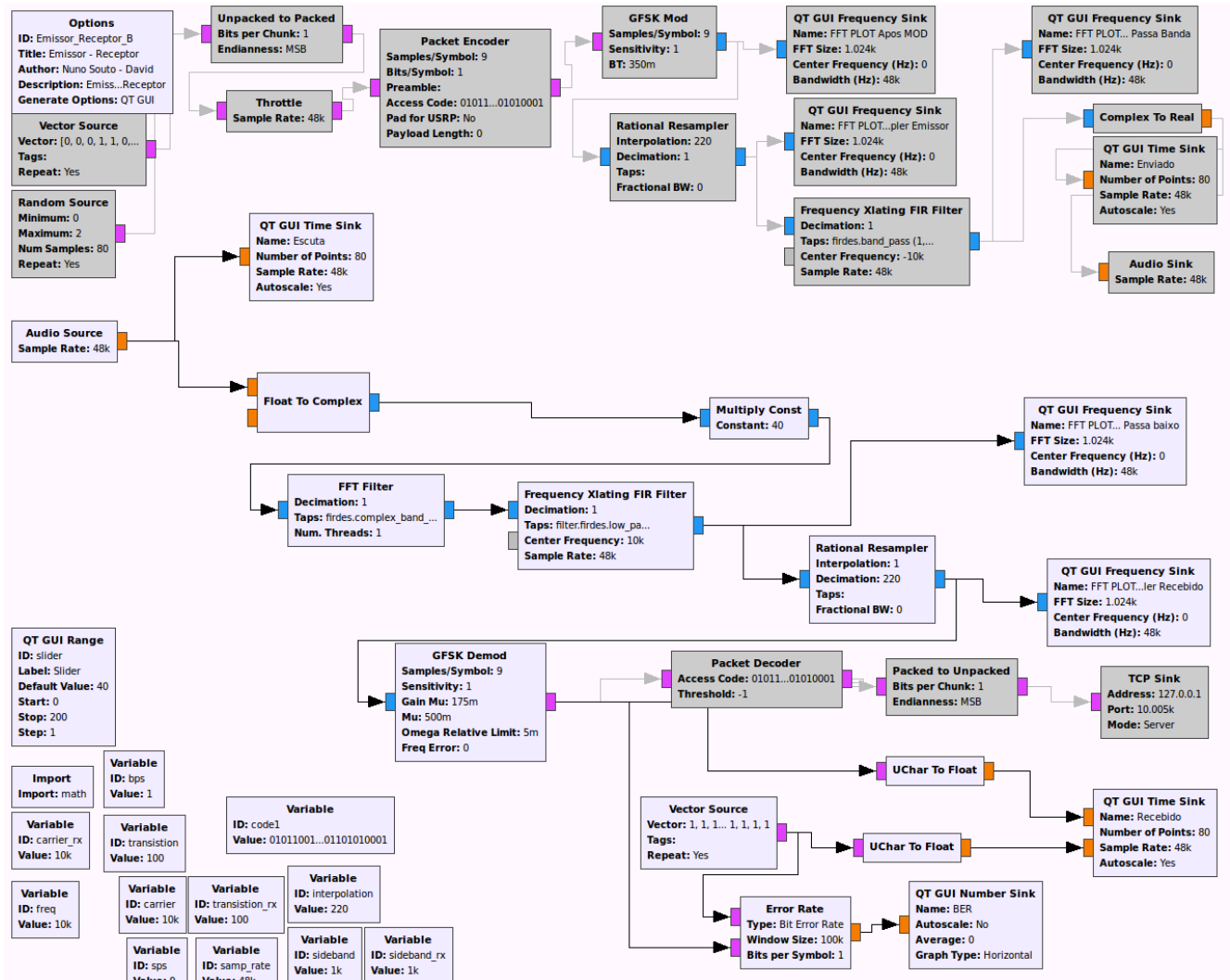


Figura 52 - Recetor GFSK

## 5.2 – Resultados em Canal real

Nesta secção vão ser apresentados os resultados das simulações em canal real. Na secção 5.2.1 estão representadas as simulações e a comparação entre modulações em relação ao BER vs. A Frequência. Por sua vez na secção 5.2.2 apresentam-se os resultados das simulações para o BER vs. a distância.

Nos emissores aplicou-se um gerador de vetores de bytes  $[10011001] * 10$ . No recetor, aplicou-se o mesmo gerador no final do diagrama, de forma a fazer a comparação do sinal recebido com o sinal original.

Importante referir que estas simulações foram feitas num ambiente fechado sem ruídos extras, sem vento e a temperatura do ar rondava os 26 graus.

### 5.2.1 – BER vs. Frequência

Para a simulação do BER vs. a Frequência, colocaram-se o emissor e o recetor a uma distância de 20 cm entre si e foi-se alterando a frequência.

Os resultados estão apresentados nas figuras 53, 54, 55 e 56.

Após uma análise dos gráficos é possível observar-se que até uma frequência de 19 kHz a modulação que apresenta o BER mais baixo é a MQAM figura 55, de seguida nessa mesma frequência aparece a modulação GFSK figura 53 e a GMSK figura 54. A modulação DBPSK figura 56 por sua vez tem um BER baixo entre os 10kHz e os 16 kHz, contudo muito superior as restantes modulações. Acima dessa frequência o BER já começa a aumentar rapidamente. Com frequências mais altas é difícil confirmar-se se os valores de BER obtidos estão corretos.

Confirmamos em síntese com estes resultados que as modulações GFSK, GMSK e MQAM têm um bom comportamento com frequências até os 19 kHz. Acima dessa frequência já começa a haver muito erros no sinal recebido. Contudo não é certo, uma vez que os resultados podem dever-se às limitações dos micros e/ou dos speakers.

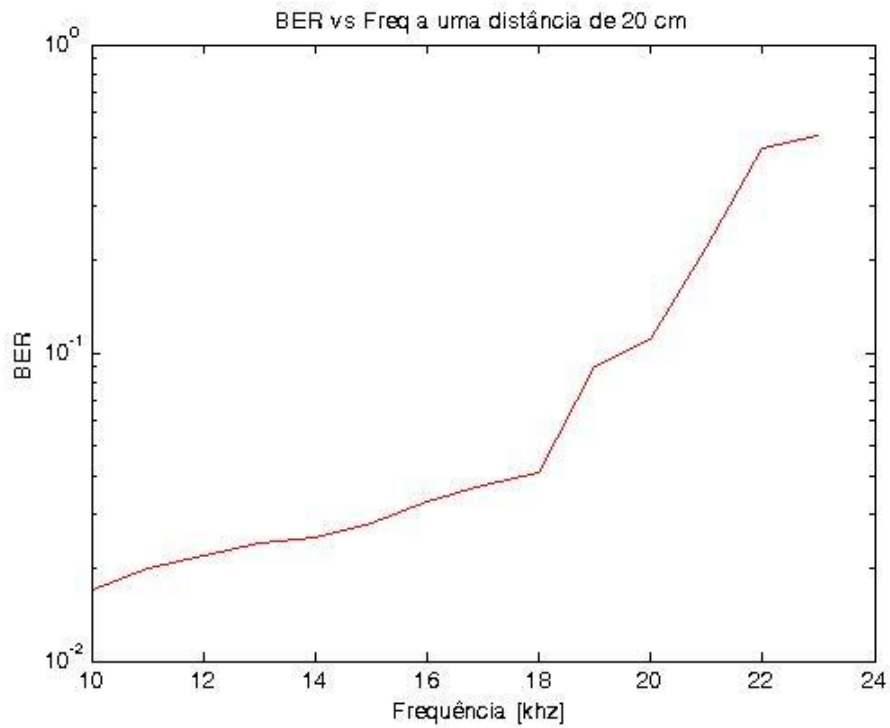


Figura 53 - BER vs. Frequência modulação na GFSK

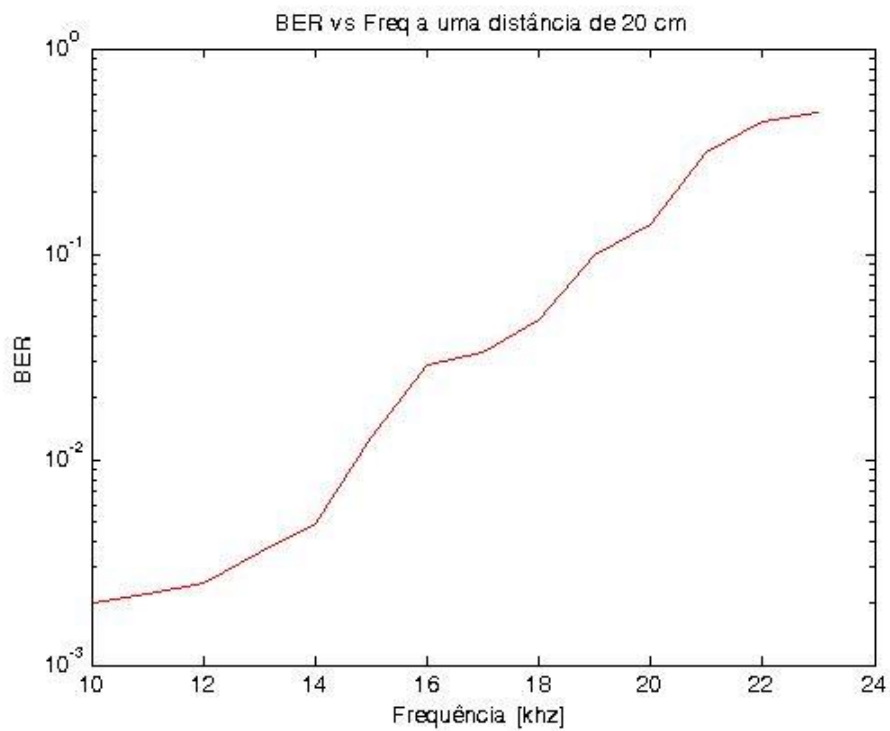


Figura 54 - BER vs. Frequência na modulação GMSK



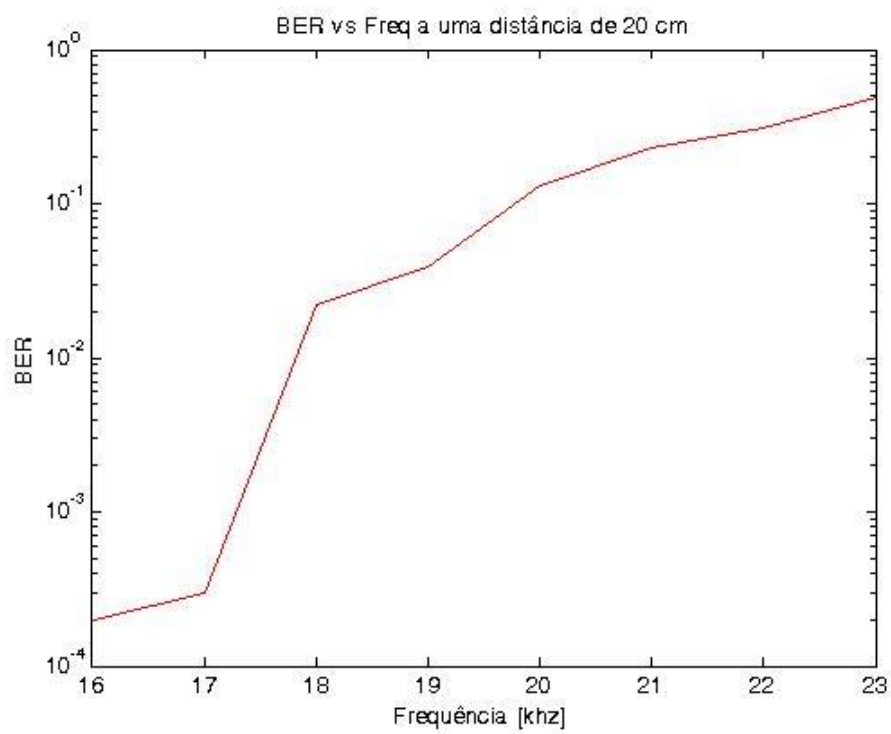


Figura 55 - BER vs. Frequência na modulação MQAM

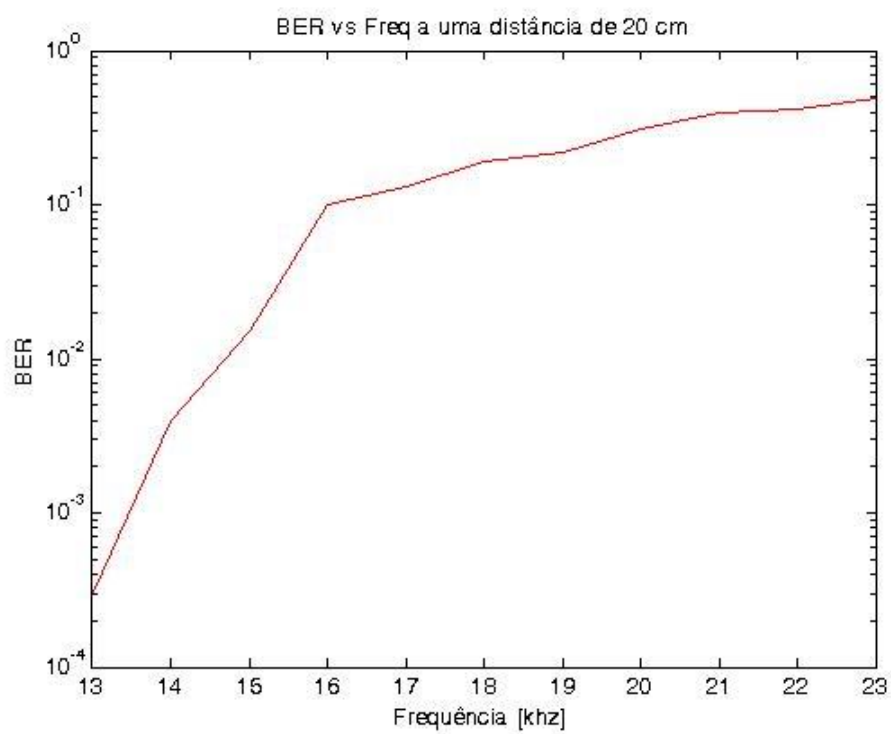


Figura 56 - BER vs. Frequência na modulação DBPSK

### 5.2.2 – BER vs. Distância

Esta secção destina-se aos resultados das simulações, onde foi fixado o valor da frequência nos 10 KHz e foi-se aumentando a distância entre o emissor e o recetor.

Podemos desta forma observar que à medida que a distância entre o emissor e o recetor aumenta o valor do BER tende a aumentar. Isto deve-se ao facto de a potência recebida ir diminuindo com a distância.

Das quatro modulações a que apresenta piores prestações é a DBPSK figura 60, pois mesmo a uma curta distância de 40 cm já se nota um BER elevado. E quanto mais se aumenta a distância maior é o seu BER onde a 100 cm do emissor a taxa de erro já é quase 50%. Já a modulação MQAM figura 59 é um pouco melhor que a DBPSK, pois consegue um alcance um pouco superior. As modulações GFSK figura 57 e GMSK figura 58 têm um bom alcance e comportamento. foina qual foi possível a troca de mensagens a uma distância de 300 cm, obtendo desta forma um baixo BER face à distância. Daqui se pode concluir que face às condições apresentadas estas duas modulações são bastante idênticas e adequadas para a troca de mensagens no meio.

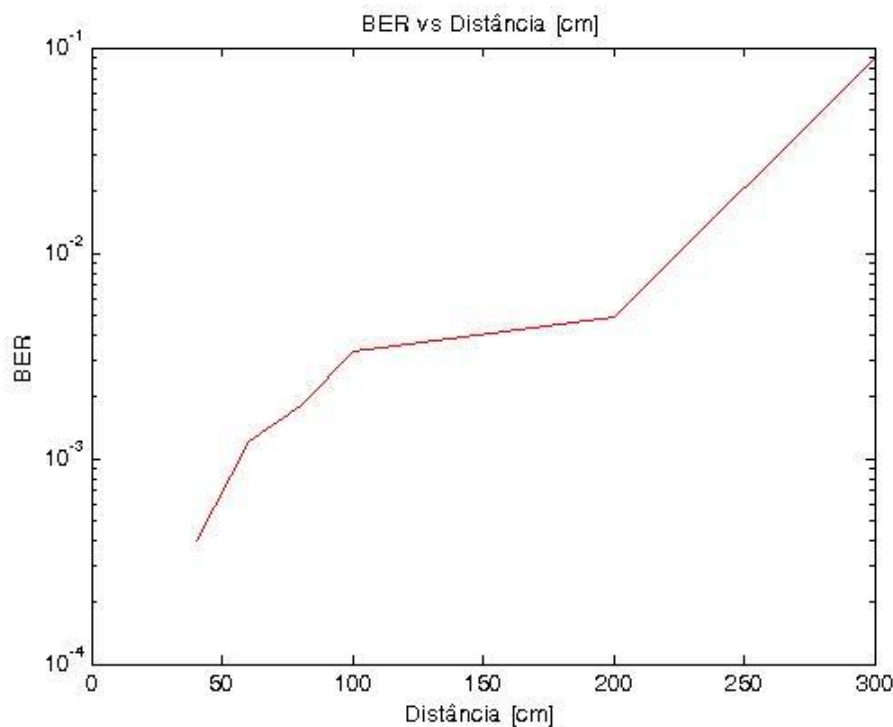


Figura 57 - BER vs. Distância na modulação GFSK

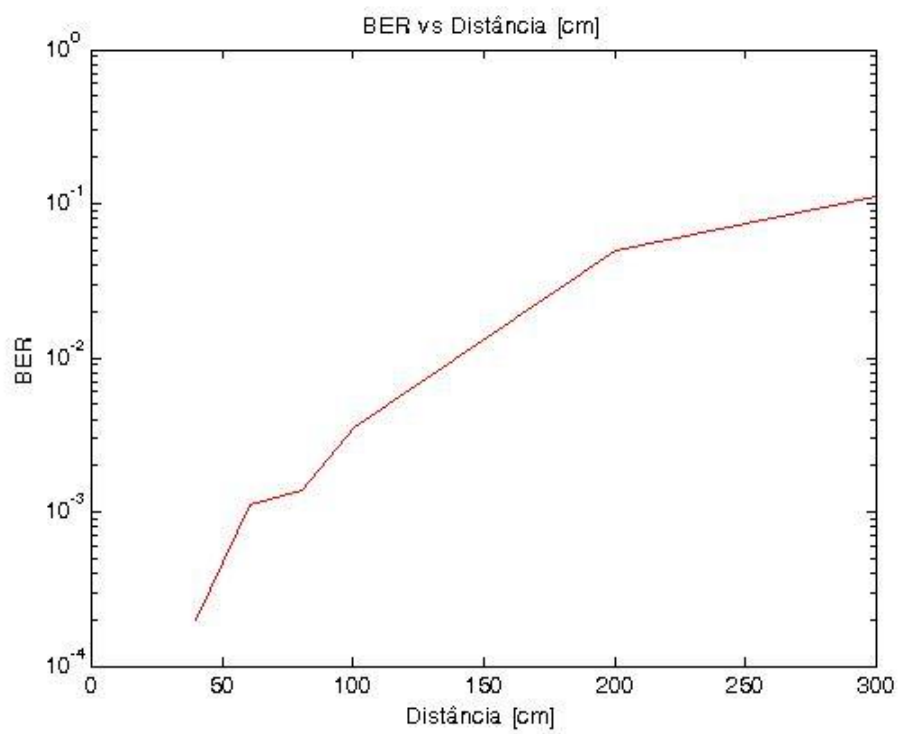


Figura 58 - BER vs. Distância na modulação GMSK

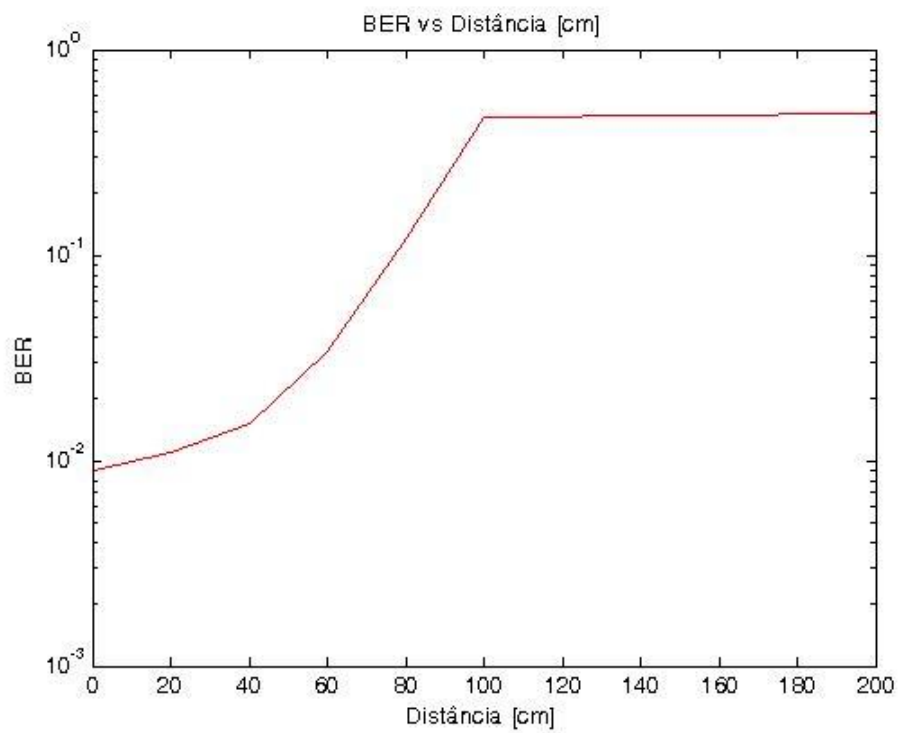


Figura 59 - BER vs. Distância na modulação MQAM

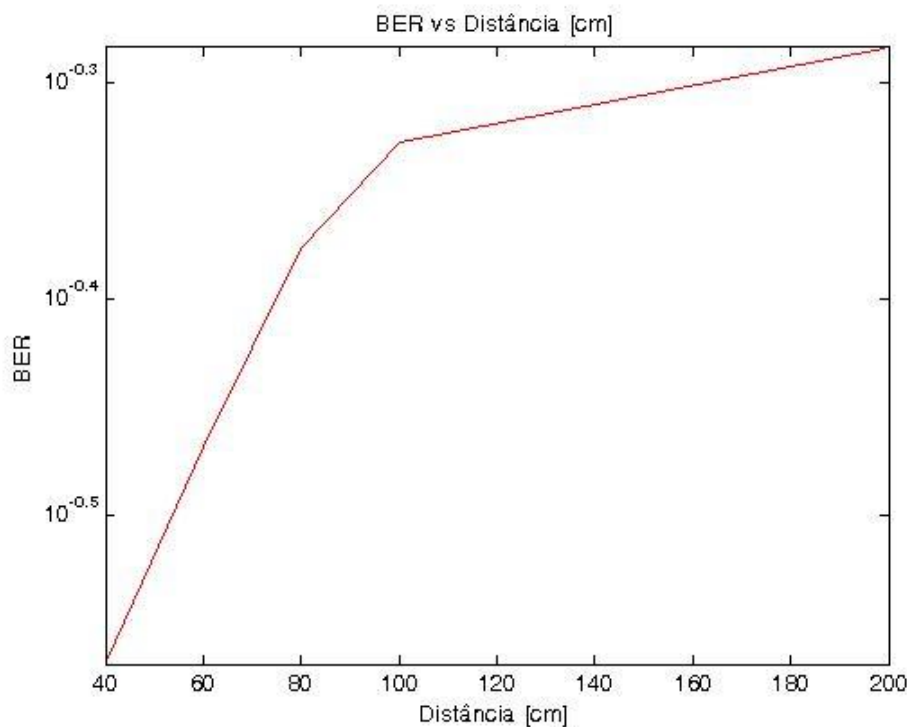


Figura 60 - BER vs. Distância na modulação DBPSK

### 5.3 – Apresentação da aplicação

Esta secção destina-se à aplicação simples que foi implementada e que permite o envio de ficheiros /ou o uso do terminal para a troca de mensagens entre o emissor e o recetor.

A aplicação funciona em dois *hardwares* distintos. Na figura 62 está representado o esquema emissor e na figura 63 o esquema recetor.

Os esquemas das figuras seguintes apenas permitem o envio e receção de mensagens pelo terminal, para o envio de imagens é necessário fazer alterações aos mesmos.

O que podemos observar nestes modelos de diferente, em relação aos apresentados até agora, é no bloco de origem e no bloco de destino final. São estes dois blocos que são necessários alterar também para o envio e receção de imagens.

Desta forma, para o envio e receção de imagens, como ilustrado nas figuras 62 e 63 fez-se uso de dois novos blocos. O TCP Source na figura 62 e o TCP Sink na figura 63. São estes dois blocos que nos possibilitam definir os canais de comunicação entre o emissor e o recetor, de forma a que seja possível iniciar o modo telnet como exemplificado na figura 61.

```
ubuntu@ubuntu:~$ telnet localhost 10005
Trying 127.0.0.1...
```

```
ubuntu@ubuntu:~$ telnet localhost 10004
Trying 127.0.0.1...
```

Figura 61 – Exemplificação de abertura de canais de comunicação

Após os canais se encontrarem definidos pode ser iniciada a troca de mensagens, conforme ilustrado na figura 65.

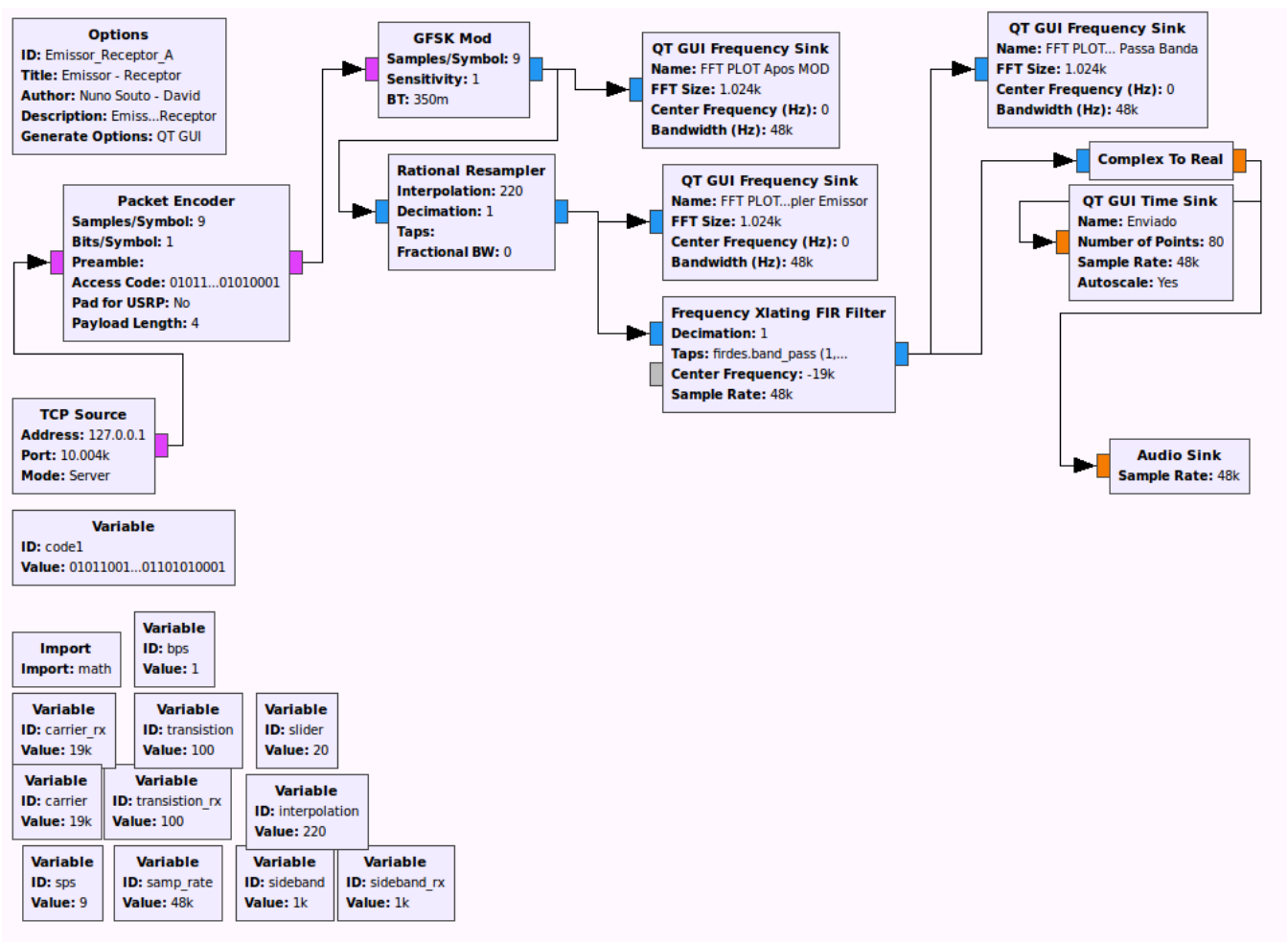


Figura 62 - Emissor modulação GFSK para envio mensagens via terminal

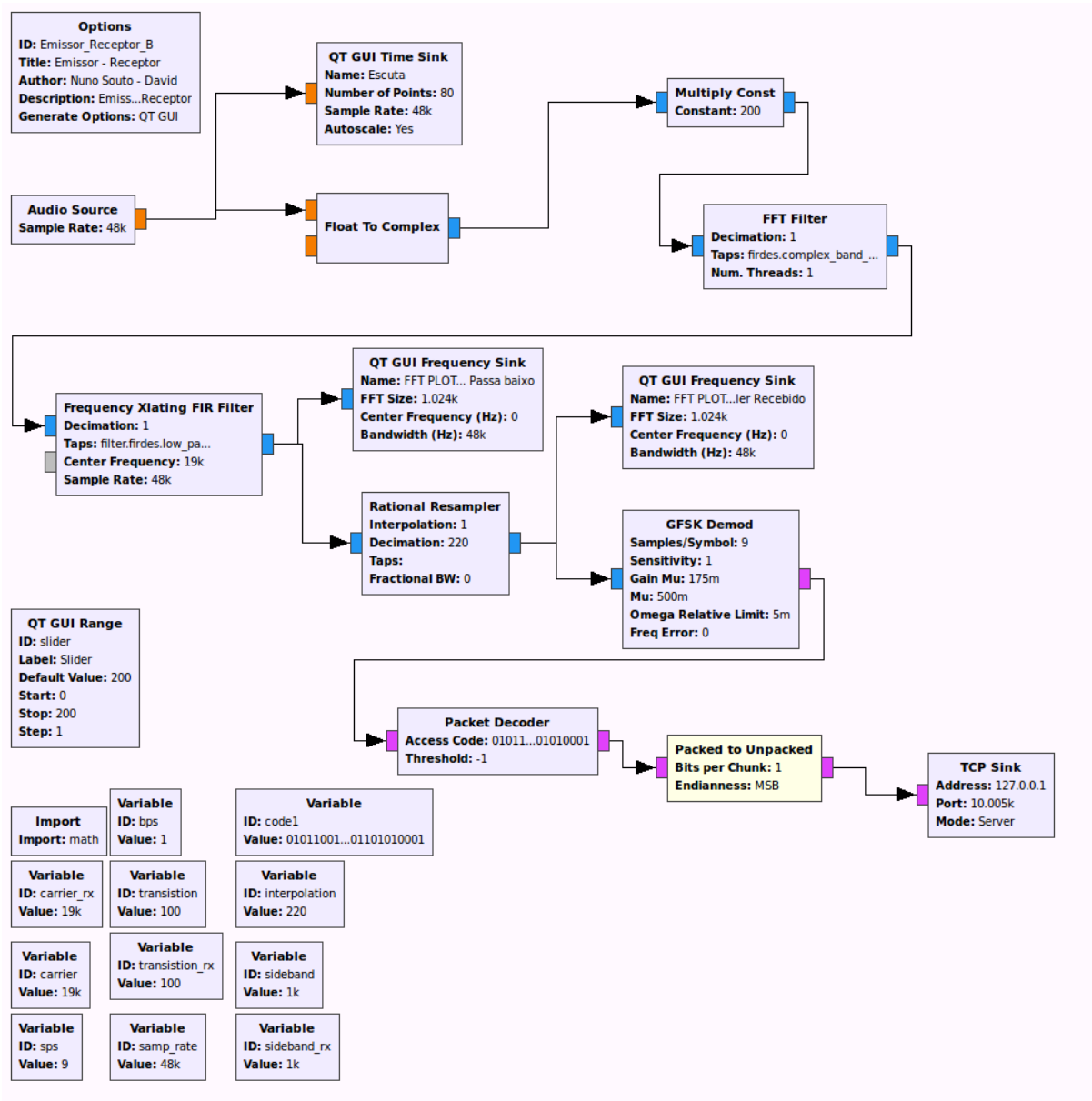


Figura 63 - Recetor modulação GFSK para envio mensagens via terminal

O emissor e recetor acima exemplificado está definido para o envio e receção de mensagens num só sentido. Isto é, o emissor apenas pode enviar e o recetor apenas pode receber. Contudo, basta uma alteração de um bloco variável para que essa situação seja contornada.

Na figura 64, está representado o esquema de emissão e receção que permite enviar e receber mensagens de terminal no mesmo *hardware*. Apenas é necessário alterar o valor da frequência em uso. Isto é, definir uma frequência para a comunicação de A para B e outra de B para A.

Emissor/Recetor Acústico definido por Software para comunicações subaquáticas

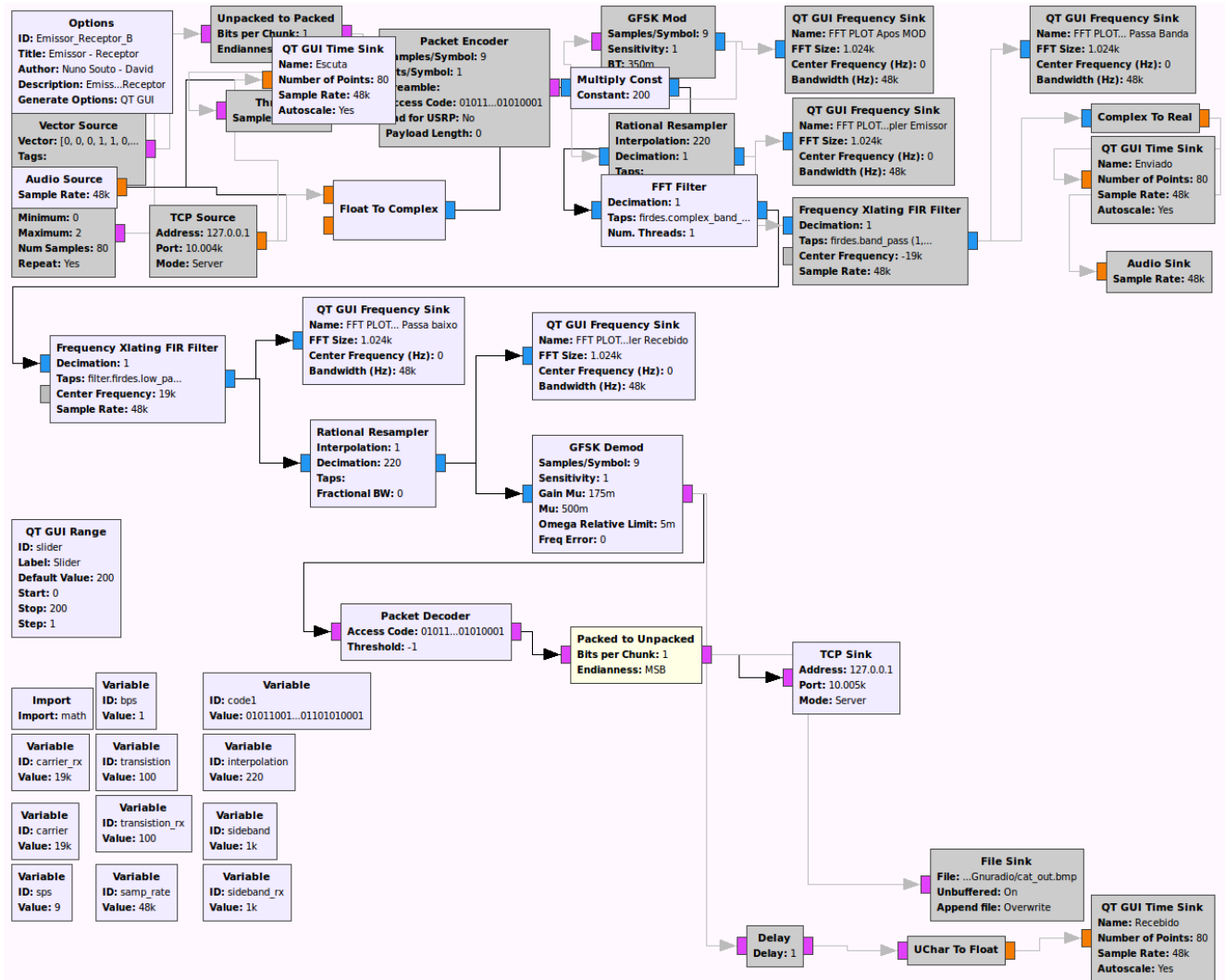


Figura 64 - Emissor recetor modulação GFSK

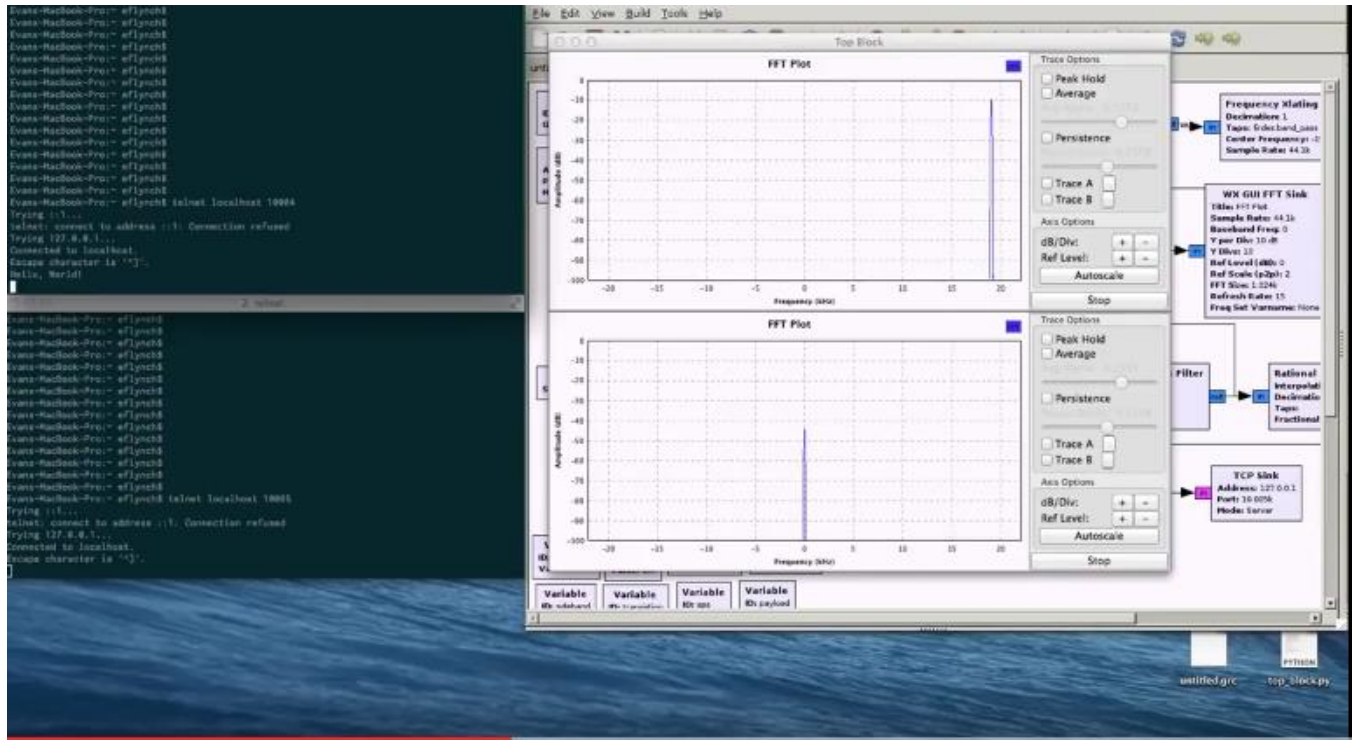


Figura 65 - Troca de Mensagens entre emissor e recetor

Conforme ilustrado na figura 65, foi enviada uma mensagem entre terminais. A mensagem enviada foi “Hello, World!”, enviada via modulação GFSK e levou cerca de 19 segundos a ser recebida pelo recetor. A distância entre emissor e recetor era de cerca de 20 cm entre *hardwares* conforme ilustra a figura 66.



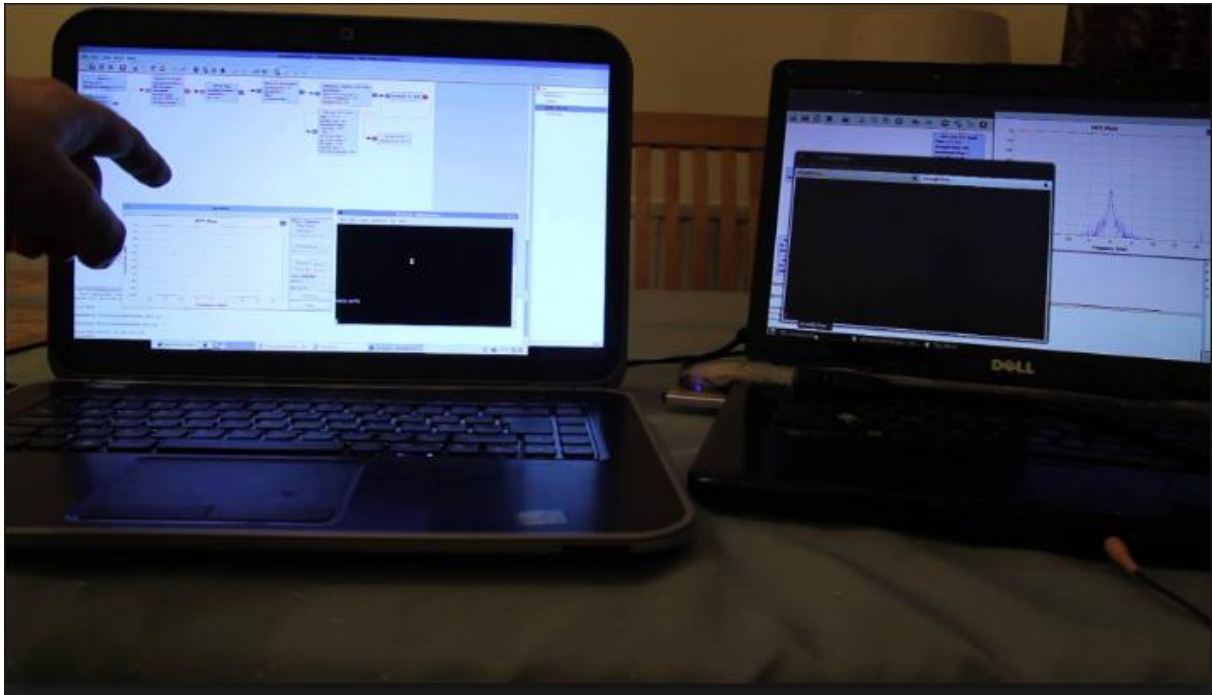


Figura 66 – Ilustração do Emissor e recetor

Como já referido, para o envio de ficheiros entre emissor e recetor seria necessário fazer algumas alterações aos emissores e recetores. Nomeadamente nos blocos de origem e de destino. Nas figuras 67 e 68 estão representados o esquema emissor e recetor, respetivamente, para o envio de ficheiros.

Os novos blocos utilizados foram o File Source que permite ir ler a origem do ficheiro e File Sink que permite escrever num ficheiro.

Neste caso foram realizados dois novos testes, um de ler um ficheiro de texto com a mesma mensagem enviada via terminal anteriormente e outro de um envio de uma imagem.

O envio do ficheiro de texto tinha um tamanho de 14 bytes e levou cerca de 22 segundos a ser recebido pelo recetor. Já o tamanho da imagem era de 3.76 KB e levou cerca de 8 minutos a ser transmitida.

Foi possível enviar e receber com sucesso mais que uma imagem. No entanto, em alguns casos, no final do envio ao observar-se a imagem recebida verificava-se que esta não estava em condições, havia erros que o sistema não conseguia resolver, pois não tem forma de detetar e contornar os erros.

Mais uma vez, para o envio de ficheiros o emissor e recetor estavam a 20cm.

Estes mesmos testes foram repetidos nas restantes modulações, quer na GMSK, MQAM e DBPSK. Na modulação GMSK foi também possível o envio de um ficheiro e a

troca de mensagens por terminal, os tempos para os envios eram praticamente os mesmos da modulação GFSK. Só nas modulações MQAM e DBPSK é que não foi possível provar, a mensagem era enviada e ao final apenas chegava parte da mensagem original e o tempo de comunicação era bastante superior, não tendo sido possível obter conclusões.

No apêndice D, estão representados os emissores e recetores das modulações GMSK, MQAM e DBPSK.

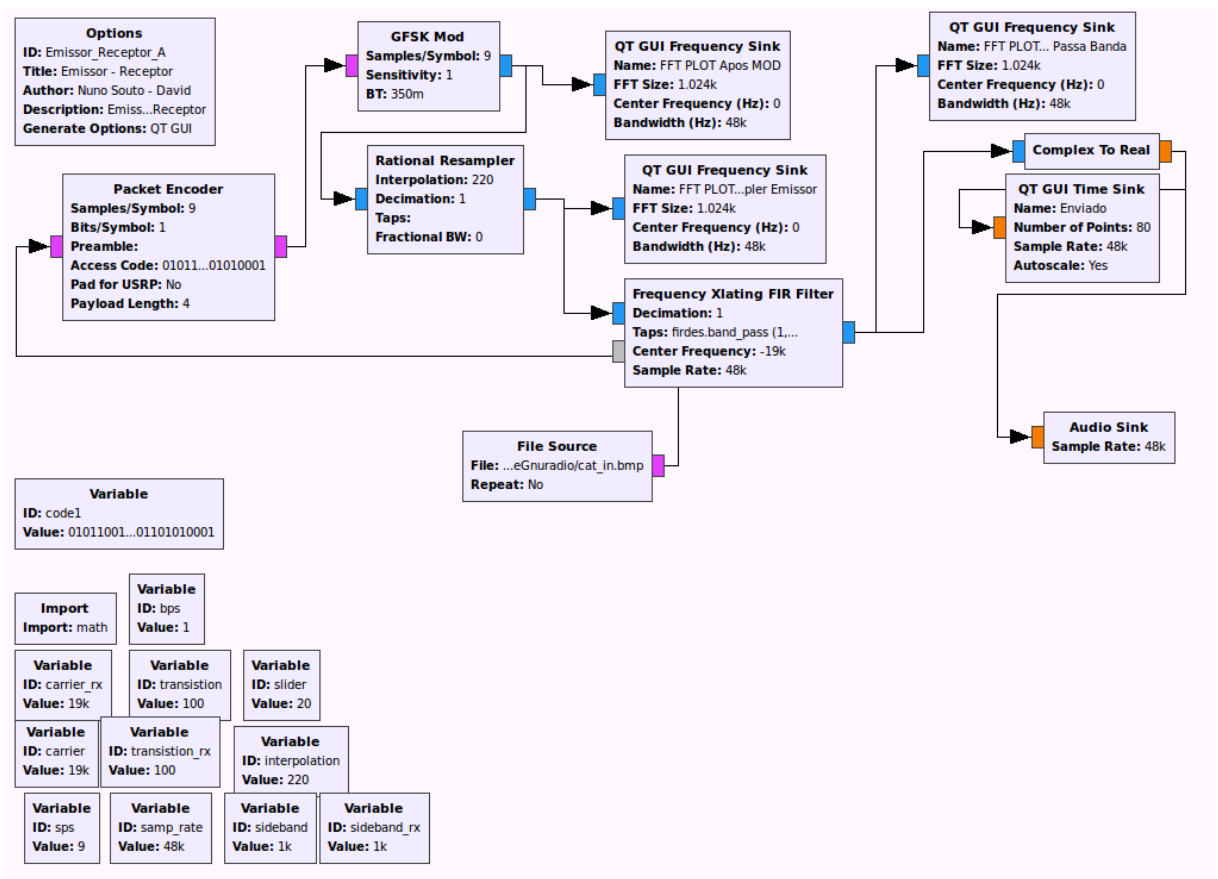


Figura 67 - Emissor modulação GFSK para envio de ficheiros

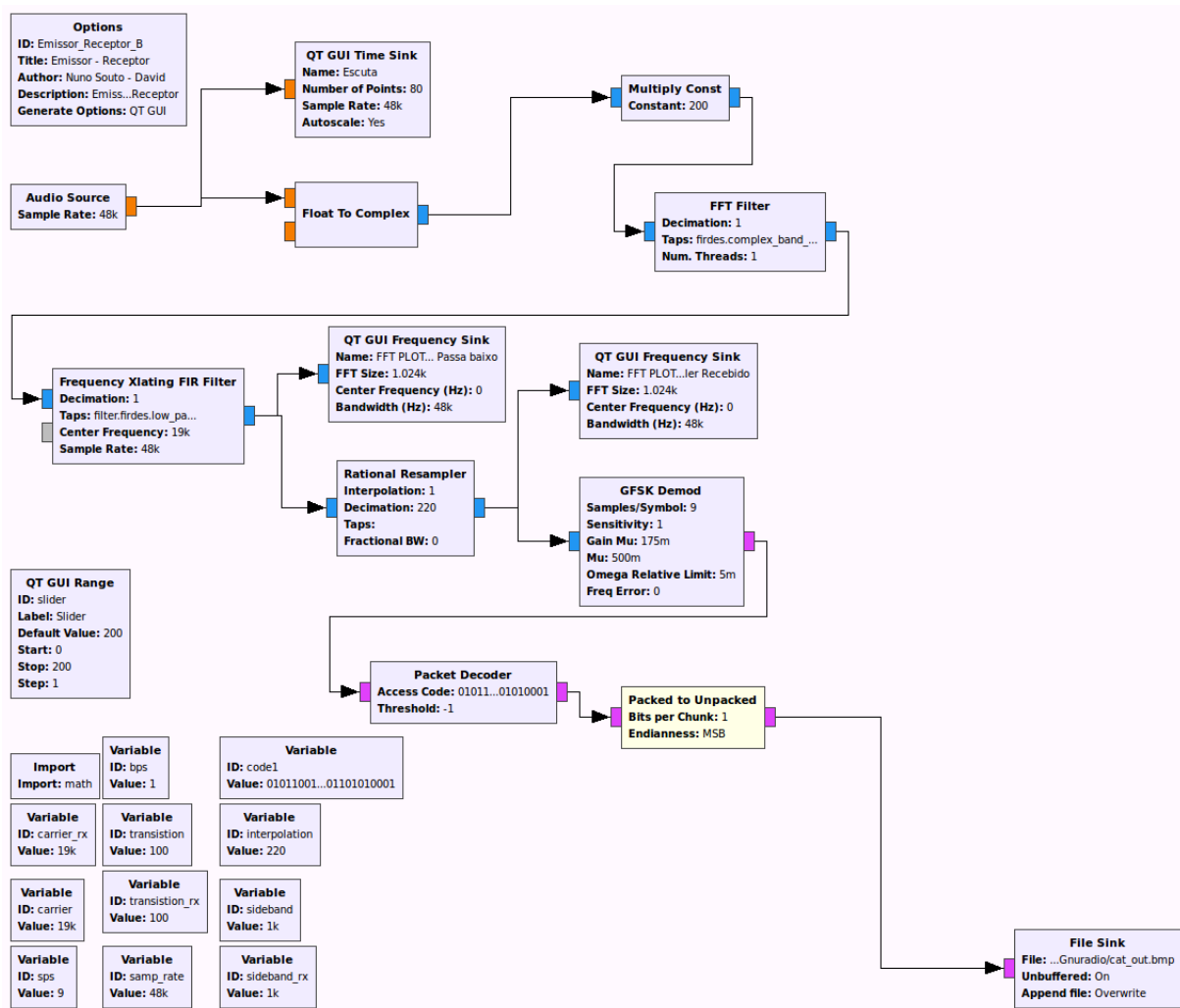


Figura 68 - Emissor modulação GFSK para envio de ficheiros



## Capítulo 6 – Conclusões

A presente dissertação teve como principal objetivo a descrição do trabalho de investigação levado a cabo para a implementação de um emissor e um recetor para comunicações acústicas definido por *software*.

Tanto o emissor como o recetor devem ser simples, ter a particularidade de ser reconfiguráveis, e ter suporte para o envio e receção de mensagens e ficheiros, sejam eles de texto ou imagem. Isto deve ocorrer em ambiente subaquático de curto alcance, recorrendo desta forma a componentes de *hardware* e *software*.

Sabe-se que o ambiente subaquático é conhecido por ser um meio pouco favorável para as comunicações digitais, sendo afetado por inúmeros fatores que dificultam a propagação das ondas acústicas.

Assim, foi necessário, antes de iniciar o trabalho, um estudo e uma revisão da literatura existente sobre o assunto. Após essa leitura e revisão foi possível entender como são afetadas as comunicações. No seguimento foi realizada uma pesquisa relativamente às soluções já existentes. Estas foram o grande impulsionador deste projeto.

Para a implementação e estudo do emissor / recetor usou-se a ferramenta GNU Radio, que permitiu o desenvolvimento, a simulação e os testes em modo real da comunicação.

Inicialmente foi simulada a comunicação num só *hardware* para as modulações GFSK, GMSK, MQAM e DBPSK. Estas quatro modulações foram por sua vez simuladas em três canais distintos. No canal AWGNN, no canal *Fading model* e no canal *Selective Fading Model*.

De um modo geral e nas simulações realizadas, as modulações GMSK e GFSK foram as que obtiveram os BERs mais aceitáveis em todos os canais. Nos testes reais, uma vez mais, foi na modulação GFSK e GMSK que foram obtidos bons resultados. Pois só nessas modulações foi possível enviar imagens e texto com sucesso entre o emissor e o recetor, nas restantes tal não aconteceu.

Durante o processo de desenvolvimento dos simuladores, mais propriamente na comunicação real foram surgindo novas ideias e conceitos que podiam aperfeiçoar algumas características do projeto desenvolvido, tentado dessa forma resolver algumas limitações identificadas.

É de senso comum que em qualquer trabalho existem limitações, sendo que este não é uma exceção, tendo o mesmo sido limitado no que aos recursos diz respeito, uma vez que não foi possível implementar todos os princípios idealizados.

Desta feita sugere-se, para futuros trabalhos e incremento da performance do sistema, a implementação de algoritmos de deteção de erros no recetor com pedido de retransmissão. Uma das dificuldades sentidas ao longo dos testes reais foi o facto dos ficheiros recebidos por vezes chegarem com erros e o recetor não ter forma de tratar esses mesmos erros.

A implementação de esquemas fazendo uso de ferramentas SDR (GNU Radio) de forma a efetuar a modelação do canal acústico poderá também ser uma ideia a desenvolver no futuro.

O estudo, a caracterização do canal acústico e a comunicação digital em meio aquático poderia ser alargada a outros ambientes submersos, quer seja de água doce ou água salgada, pelo que seria interessante um meio subaquático com maior dinâmica, possuindo um comportamento dispersivo no domínio da frequência mais acentuado. Desenvolvendo-se desta forma um protótipo capaz de ser totalmente submerso, suportando pressões razoáveis de forma a realizar testes em águas profundas, tendo uma necessidade de consumo reduzido de energia, essencialmente no transmissor, onde seria útil a adição de circuitos de baixa potência como é o caso *wake-up* e *sleep-mode*.

## Referências

- [1] I. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia. *Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges*. Ad Hoc Net, vol. 3, pp. 257 – 79, 2005.
- [2] A. Cerpa, J. Elson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, J. Zhao. Habitat monitoring: Application driver for wireless communications technology. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean*, Apr. 2001.
- [3] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the ACM Workshop on Sensor Networks and Applications*, Atlanta, Georgia, USA, Sept. 2002
- [4] N. Ramanathan, M. Yarvis, J. Chhabra, N. Kushalnagar, L. Krishnamurthy, D. Estrin. A stream oriented power management protocol for low duty cycle sensor network applications. In *Proceedings of the IEEE W. Maio, 2005*.
- [5] F. Ribeiro, A. Pedroza e L. Costa, “Protocolo de Roteamento para Sistemas Subaquáticos de Comunicação”, *9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium” - I2TS’2010*, vol. 1, pp. 1-7, Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro, 2010.
- [6] I. Vasilescu, K. Kotay, D. Rus, M. Dunbabin, P. Corke, “Data collection, storage, and retrieval with an Underwater Sensor Network ” *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems – SenSys” ’05*, pp. 154-165, Nova Iorque. November 2005.
- [7] L. Brekhovskikh, Y. Lysanov, “*Fundamentals of OceanAcoustics*”, Springer-Verlag, 2a edição, 199. 2003.
- [8] R. Urick, “*Principles of Underwater Sound*”, McGraw-Hill, 1983.
- [9] V. Tunnicliffe, C. Barnes, R. Dewey, “*Major advances in cabled ocean observatories (VENUS and NEPTUNE Canada) in coastal and deep sea settings*”. In *IEEE/OES US/EUBaltic Int. Symp., Tallinn, Estonia, May 2008*.
- [10] Gnu Radio [ONLINE] [https://pt.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1dio\\_Definido\\_por\\_Software](https://pt.wikipedia.org/wiki/R%C3%A1dio_Definido_por_Software) [dezembro de 2015].
- [11] A. Syed, W. Ye, J. Heidemann, T. Lohi, A New Class of MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks, “*INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*”, pp. 231 235.

- [12] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, Y. Li, “*Research challenges and applications for underwater sensor networking*. In *Proceedings of the IEEE wireless communications and networking conference*”, pp. 228–235. Las Vegas, Nevada, USA. 2006
- [13] L. Vieira, A. Loureiro, A. Fernandes, M. Campos, *Redes de Sensores Aquáticas, XXVIII “Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Gramado”*, RS, Brasil, 24 a 28 de maio de 2010.
- [14] B. Zhang, G. Sukhatme, A. Requicha, “*Adaptive sampling for marine microorganism monitoring*”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004.
- [15] G. Xie, J. Gibson, *A Networking Protocol For Underwater Acoustic Network*, SCS Department, Naval Postgraduate School, dezembro de 2000.
- [16] Aquanode [ONLINE] <http://aquadnode.ece.ucsb.edu/> [dezembro 2015].
- [17] D. Kilfoyle, B. Baggeroer, a B.. The state of the art in underwater acoustic telemetry. “*Oceanic Engineering*”, *IEEE Journal of*, 25(1), 4–27. 2000.
- [18] M. Chitre, S. Shahabudeen, M. Stojanovic, “*Underwater Acoustic Communications and Marine Technology Society Journal*”, 42(1), 103–116. Canada, September 2008
- [19] I. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia. “*State of the Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks*. *ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet)*”, Los Angeles, CA, EUA, 2006.
- [20] A. Harris, M. ZORZI, “*Modeling the Underwater Acoustic Channel in ns2, ValueTools’07: Proceedings of the 2nd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*”, pp. 1–8, ICST, Bélgica, 2007.
- [21] R. Shelke, G. Kulkarni, R. Sutar, P. Bhore, D. Nilesh,, S. Belsare, “*Energy management in wireless sensor network*”. UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, pages 668–671. 2013.
- [22] N. Pantazis, S. Nikolidakis, D. Vergados, “*Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey*”. *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, 15(2):551–591, 2013.
- [23] Wikipedia – Software defined radio [ONLINE] [https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined\\_radio](https://en.wikipedia.org/wiki/Software-defined_radio) [dezembro 2015]
- [24] J. Heidemann, M. Stojanovic, M. Zorzi, “*Underwater sensor networks: applications, advances and challenges*”, The Royal Society, 2 Ago 2012.
- [25] A. Sing, J. Nelson, S. Kozat, “*Signal processing for underwater acoustic communications*,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 1, pp. 90–96, Jan. 2009.



- [26] J. Yeo, Y. Lim, H. Lee, “*Modified MAC (Media Access Control) Protocol Design for the Acoustic-based Underwater Digital Data Communication*”, Industrial Electronics, 2001.
- [27] Link-Quest [ONLINE] [www.link-quest.com](http://www.link-quest.com) [dezembro 2015].
- [28] Benthos [ONLINE] [www.benthos.com](http://www.benthos.com) [dezembro 2015].
- [29] Wikipedia – OFDM [ONLINE] [https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency\\_division\\_multiplexing](https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency_division_multiplexing) [dezembro 2015].
- [30] [ONLINE] <http://noticias.up.pt/feup-ajuda-a-desvendar-o-universo-subaquatico-atraves-de-sinais-acusticos/> [em dezembro 2015].
- [31] X. Lurton, *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 2 ed., 2010.
- [32] B. Benson, Y. Li, R. Kastner, B. Faunce, K. Domond, D. Kimball, C. Schurgers, *Design of a low-cost, underwater acoustic modem for short-range sensor networks*. IEEE, 2010.
- [33] N. Farr, A. Bowen, J. Ware, C. Pontbriand, M. Tivey, “An integrated, underwater optical/acoustic communications system,” in *OCEANS 2010 IEEE-Sydney*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [34] M. Stojanovic, “Underwater Acoustic Communication,” For the Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2000.
- [35] A. Quazi, W. Konrad, “Underwater acoustic communications,” *Communications Magazine*, IEEE, 1982.
- [36] Humminbird, “Sonar Applications,” [ONLINE] [http://www.humminbird.com/leading\\_innovation/humminbird-sonar.aspx](http://www.humminbird.com/leading_innovation/humminbird-sonar.aspx) [maio 2016].
- [37] Wikipedia – SONAR [ONLINE] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Sonar> [maio 2016].
- [38] SONAR [ONLINE] <http://www.ebah.pt/content/ABAAAfmwIAD/geofisica-aquatica-introducao?part=2> [maio 2016].
- [39] SUNRISE [ONLINE] [http://www.ciencia20.up.pt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1317](http://www.ciencia20.up.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=1317) [maio 2016]
- [40] Posicionamento Acústico Subaquático [ONLINE] <http://tecnologiamaritima.blogspot.pt/2012/07/posicionamento-dinamico-parte-5.html> [maio 2016]
- [41] Marshal Day [ONLINE] <http://marshallday.com/projects> [maio 2016]
- [42] HydroNode [ONLINE] <http://www.dcc.ufmg.br/dcc/?q=pt-br/node/1964> [maio 2016]

- [43] M. Stojanovic, J. Preisig, "Underwater Acoustic Communication channels - Propagation models and statistical characterization," *Communications Magazine*, IEEE Volume 47, 2009.
- [44] L. Liu, S. Zhou, J. Cui, "Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks," *Wiley WCMC Special Issue On Underwater Sensor Networks*, 2008.
- [45] C. Brennan, "Basic Acoustic Theory," R2Sonic, 2009. [ONLINE] [http://www.r2sonic.com/pdfs/R2Sonic\\_BasicAcousticTheory.pdf](http://www.r2sonic.com/pdfs/R2Sonic_BasicAcousticTheory.pdf). [maio 2016]
- [46] S. Robinson, "Calculation of absorption of sound in seawater," NPL, [ONLINE] <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/seaabsorption/>. [maio 2016].
- [47] N. P. Laborat, "Technical Guides - Speed of Sound in Sea-Water," 2000. [ONLINE] <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundseawater/content.html>. [maio 2016].
- [48] N. R. Center, "Refraction and Snell's Law," [ONLINE] <http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Physics/refraction/snells.htm>. [junho 2016].
- [49] D. Mendes, A matlab/simulink model to evaluate underwater acoustic communication systems. Master's thesis, Universidade do Minho, Dezembro 2011.
- [50] M. Stojanovic, J. Preisig, "underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization". *IEEE Communications Magazine*, pages 84–89, January 2009.
- [51] Doppler [ONLINE] [https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito\\_Doppler](https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Doppler) [maio 2016].
- [52] J. Preisig, "acoustic propagation considerations for underwater acoustic communications network development". *Underwater Networks (WUWNet'06)*, pages 1–5, 25 September 2006.
- [53] J. Mitola, *Software Radio Architecture: Object-Oriented Approaches to Wireless Systems Engineering*. Third Edition. John Wiley and Sons, 1996.
- [54] European Community's Seventh Framework Programme. Uan - underwater acoustic network. [ONLINE] <http://www.ua-net.eu/> [maio 2016].
- [55] H. Vosbein. *"Introduction to Ocean Acoustics"*. University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), COMET Program, 2010.
- [56] Aquatec Group, AQUAmodem 500 overview. [ONLINE] <http://www.aquatecgroup.com/aquamodem.html> [agosto 2016].

- [57] EvoLogics, underwater acoustic modem. [ONLINE] [www.evologics.de/en/products/acoustics/index.html](http://www.evologics.de/en/products/acoustics/index.html) [agosto 2016].
- [58] DSPComm, AquaComm: underwater wireless modem. [ONLINE] <http://www.dspcomm.com/productsaquacomm.html> [agosto 2016].
- [59] J. Wills, W. Ye, J. Heidemann, M. Rey. “Low-Power Acoustic Modem for Dense Underwater Sensor”. Em: Proceedings of ACM International Workshop on Underwater Networks (2006).
- [60] R. Jurdak, C. Lopes, P. Baldi. “Software Acoustic Modems for Short Range Mote-based Underwater Sensor Networks”. Em: OCEANS - Asia Pacific (2006).
- [61] R. Iltis, R. Kastner, D. Doonan, R. Moore, M. Chin. “An Underwater Acoustic Telemetry Modem for Eco-Sensing”. Em: Proceedings of OCEANS MTS/IEEE (2005).
- [62] T. Fu, D. Doonan, C. Utley, B. Benson, R. Kastner, R. A. Iltis, H. Lee. “AquaModem Field Tests in Moorea”. Em: Proceedings of ACM International Workshop on Underwater Networks (2007).
- [63] J. Namgung, N. Yun, S. Park, C. Kim, J. Jeon, “Adaptive MAC Protocol and Acoustic Modem for Underwater Sensor Networks”. Em: Proceedings of ACM International Workshop on Underwater Networks (2009).
- [64] I. Vasilescu, C. Detweiler, D. Rus. “AquaNodes: An Underwater Sensor Network”. Proceedings of ACM International Workshop on Underwater Networks (2007).
- [65] S. Zhou, Z. Shi, J. Cui, H. Zhou, J. Liu, P. Carroll. “Aqua-fModem: A Stand-alone Underwater Acoustic Modem Based on OFDM Technology”. Em: Demo Presentation (2009).
- [66] M. Sozer, M. Stojanovic. “Reconfigurable Acoustic Modem for Underwater Sensor Networks”. Proceedings of ACM International Workshop on Underwater Networks (2006).
- [67] Gendron. “Orthogonal Frequency Division Multiplexing with On-Off-Keying: Noncoherent Performance Bounds, Receiver Design and Experimental Results”. Em: Navy Journal of Underwater Acoustics 56 (2006), pp. 267–300.
- [68] M. Stojanovic. “Low Complexity OFDM Detector for Underwater Acoustic Channels”. Em: Oceans (2006).
- [69] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, P. Willett. “Multicarrier Communication over Underwater Acoustic Channels with Non-Uniform Doppler Shifts”. Em: IEEE Journal of Oceanic Engineering 33 (2008), pp. 198–209.

- [70] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, P. Willett. “Non-Uniform Doppler Compensation for Zero-Padded OFDM over Fast-Varying Underwater Acoustic Channels”. Em: OCEANS - Europe (2007).
- [71] B. Li, S. Zhou, J. Huang, P. Willett. “Scalable OFDM Design for Underwater Acoustic Communications”. Em: Acoustics, Speech and Signal Processing (2008).
- [72] R. Iltis. “Matching Pursuits Channel Estimation for an Underwater Acoustic OFDM Modem”. Em: IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (2008).
- [73] D. B. Kilfoyle, J. Preisig, A. Baggeroer. “Spatial Modulation Experiments in the Underwater Acoustic Channel”. Em: IEEE Journal of Oceanic Engineering 30 (2005), pp. 406–415.
- [74] S. Roy, T. Duman, V. McDonald, J. Proakis. “High Rate Communication for Underwater Acoustic Channels using Multiple Transmitters and Space-Time Coding: Receiver Structures and Experimental Results”. Em: IEEE Journal of Oceanic Engineering 32 (2007), pp. 663–688.
- [75] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, J. Huang, P. Willett. “MIMO-OFDM over an Underwater Acoustic Channel”. Em: Oceans (2007).
- [76] P. C. Etter. “Underwater Acoustic Modeling and Simulation”. Press, CRC (2003).
- [77] H. Medwin, C. Clay, T. Stanton. “Fundamentals of acoustical oceanography”. The Journal of the Acoustical Society of America (1999).
- [78] X. Lurton. An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications. 2002.
- [79] Wikipedia – GFSK [ONLINE] [https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift\\_keying#Gaussian\\_frequency-shift\\_keying](https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-shift_keying#Gaussian_frequency-shift_keying) [agosto 2016].
- [80] GMSK [ONLINE] <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pm-phase-modulation/what-is-gmsk-gaussian-minimum-shift-keying-tutorial.php> [agosto 2016]
- [81] Modulações [ONLINE] [http://www.gta.ufrj.br/grad/04\\_2/Modulacao/](http://www.gta.ufrj.br/grad/04_2/Modulacao/) [agosto 2016]
- [82] Modulação OOK [ONLINE] <http://www3.dsi.uminho.pt/adriano/Teaching/Comum/TecModul.html> [agosto 2016].
- [83] Evologics [ONLINE] <https://www.evologics.de/> [agosto 2016].
- [84] Woods Hole Oceanographic Institute [ONLINE] <http://www.whoi.edu/> [agosto 2016].
- [85] R. Hosking, *Software Defined Radio Handbook* New Jersey 2010
- [86] [http://apriliani15511036.blogspot.pt/2015/01/deepwater-pipeline\\_24.html](http://apriliani15511036.blogspot.pt/2015/01/deepwater-pipeline_24.html)

[87]

[https://www.researchgate.net/publication/303535931\\_A\\_Comparative\\_Assessment\\_of\\_Floating\\_and\\_Submerged\\_Sensor\\_Network\\_Deployments\\_for\\_Monitoring\\_Underwater\\_Sediment\\_Transport\\_Processes](https://www.researchgate.net/publication/303535931_A_Comparative_Assessment_of_Floating_and_Submerged_Sensor_Network_Deployments_for_Monitoring_Underwater_Sediment_Transport_Processes)

[88] [http://cseweb.ucsd.edu/~fezhang/CSE237D/Project\\_Proposal.html](http://cseweb.ucsd.edu/~fezhang/CSE237D/Project_Proposal.html)

[89] <http://www.networkworld.com/article/2232406/security/swarms-of-networked-robots-to-probe-the-ocean.html>

[90] <http://navaltoday.com/2012/02/28/russian-navy-to-receive-iceland-underwater-robots/>

[91] Harris, A., F. e Zorzi, M. (2007) “Modeling the Underwater Acoustic Channel in ns2”, ValueTools '07: Proceedings of the 2nd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, pp. 1–8, ICST, Bélgica



## Apêndices A – Introdução ao Gnu Radio

Gnu radio tem obtido grande destaque devido à facilidade de utilização, à completa biblioteca de blocos funcionais que dispõe, e pela simplicidade como permite aos utilizadores adicionar ou manipular os atuais blocos.

O GNU Radio [10] tem sido desenvolvido e mantido numa comunidade aberta e ativa. O Site *gnuradio.org* tem toda a informação e arquivos necessários para se poder usar o mesmo.

Todos os rádios desenvolvidos no GNU Radio devem ser vistos como um diagrama de fluxo, onde os blocos devem estar ligados numa sequência correta, tendo sempre um início e um fim.

As aplicações em GNU Radio são desenvolvidas na linguagem de programação *Python*, onde são construídas ligações entre os blocos de processamento. Os blocos em si são desenvolvidos em C++ por questões de desempenho.

Um exemplo simples para mostrar o funcionamento do GNU Radio é o da figura 69. Mostra um programa que gera duas sinusóides e envia para a placa de som.

```
#!/usr/bin/env python
from gnuradio import gr
from gnuradio import audio
def build_graph ():
    sampling_freq = 48000
    ampl = 0.1
    fg = gr.flow_graph ()
    src0 = gr.sig_source_f (sampling_freq,
        gr.GR_SIN_WAVE, 350, ampl)
    src1 = gr.sig_source_f (sampling_freq,
        gr.GR_SIN_WAVE, 440, ampl)
    dst = audio.sink (sampling_freq)
    fg.connect ((src0, 0), (dst, 0))
    fg.connect ((src1, 0), (dst, 1))
    return fg
if __name__ == '__main__':
    fg = build_graph ()
    fg.start ()
    raw_input ('Press Enter to quit: ')
    fg.stop ()
```

Figura 69 - Exemplo código GNU Radio. Imagem extraída de [10].

De formar a tornar o GNU Radio uma plataforma mais versátil, é possível uni-lo com placas USRP através de *drivers* especialmente desenvolvidos para os suportar. Esta união permite criar uma série de sistemas aplicáveis nas mais diversas áreas, uma vez que se tem

vindo a mostrar bastante versátil, além de oferecer uma base sólida para o desenvolvimento de aplicações de processamento digital de sinal.

Na figura 70 é possível observar o esquema no GNU Radio e na figura 71 o resultado, onde demonstra a potência de um sinal gerado com 48000 de Sample Rate a uma frequência de 1k e amplitude 1.

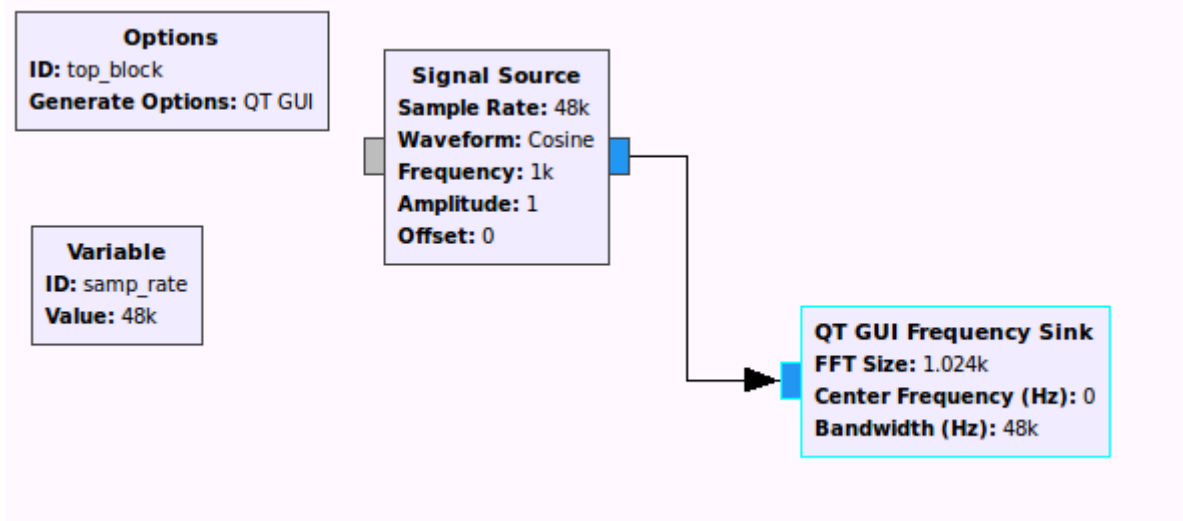


Figura 70 - Exemplo GNU Radio.

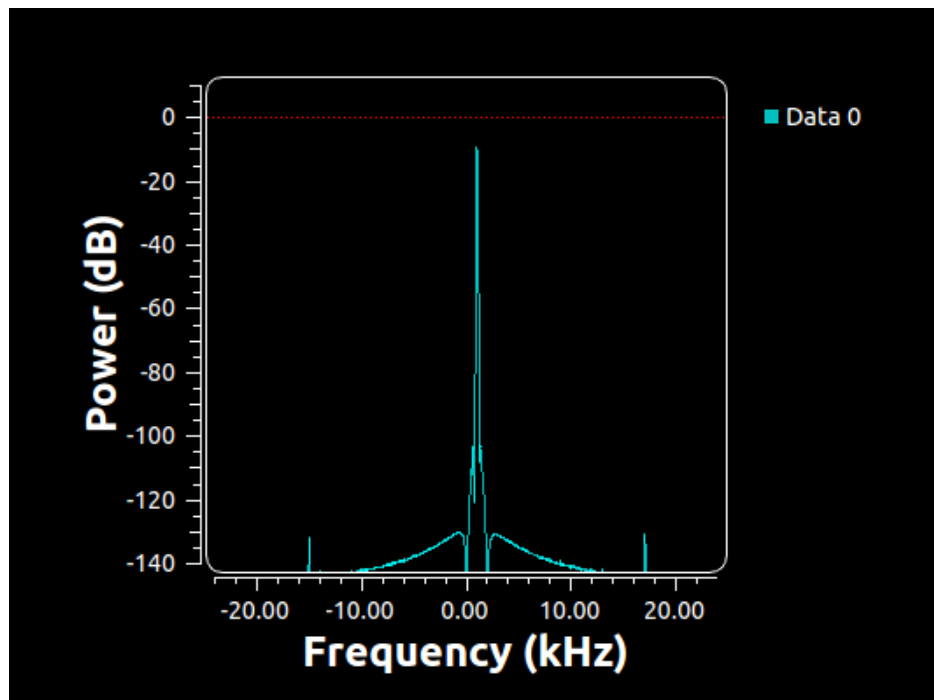


Figura 71 - Exemplo Frequência.



## Apêndices B – GnuRadio flowgraph para simulações

Os apêndices abaixo representados dizem respeito ao capítulo quatro.

Nas figuras 72, 73 e 74 estão representados os esquemas de simulação das modulações GMSK, MQAM e DBPSK em canal AWGNN. Já as figuras 75, 76 e 77 dizem respeito as mesmas modulações, mas em canal *Fading Model* e por fim as figuras 78, 79 e 80 correspondem ao canal *Selective Fading Model* nas respetivas modulações.

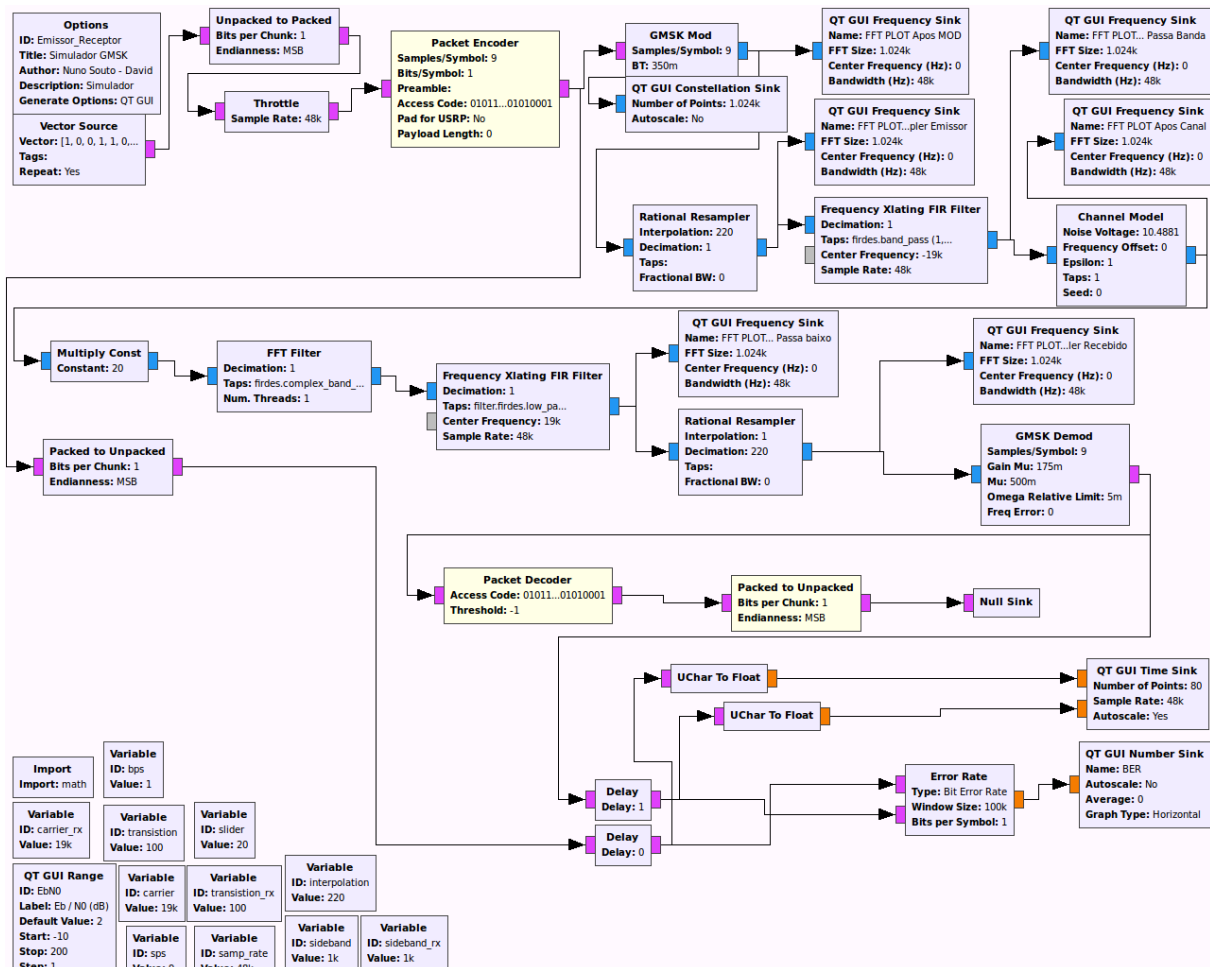


Figura 72 - Simulador GMSK em canal AWGNN

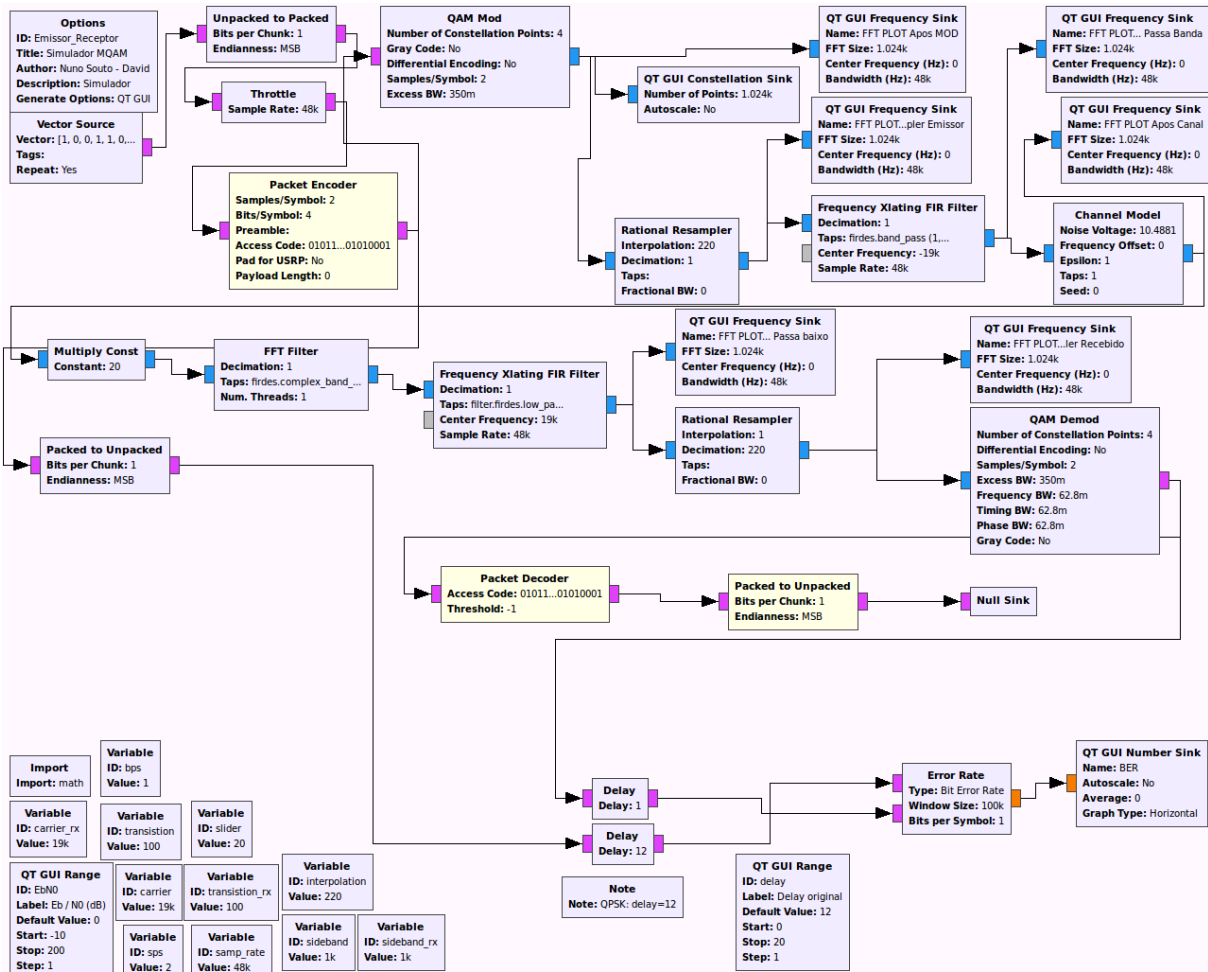


Figura 73 - Simulador MQAM em canal AWGN

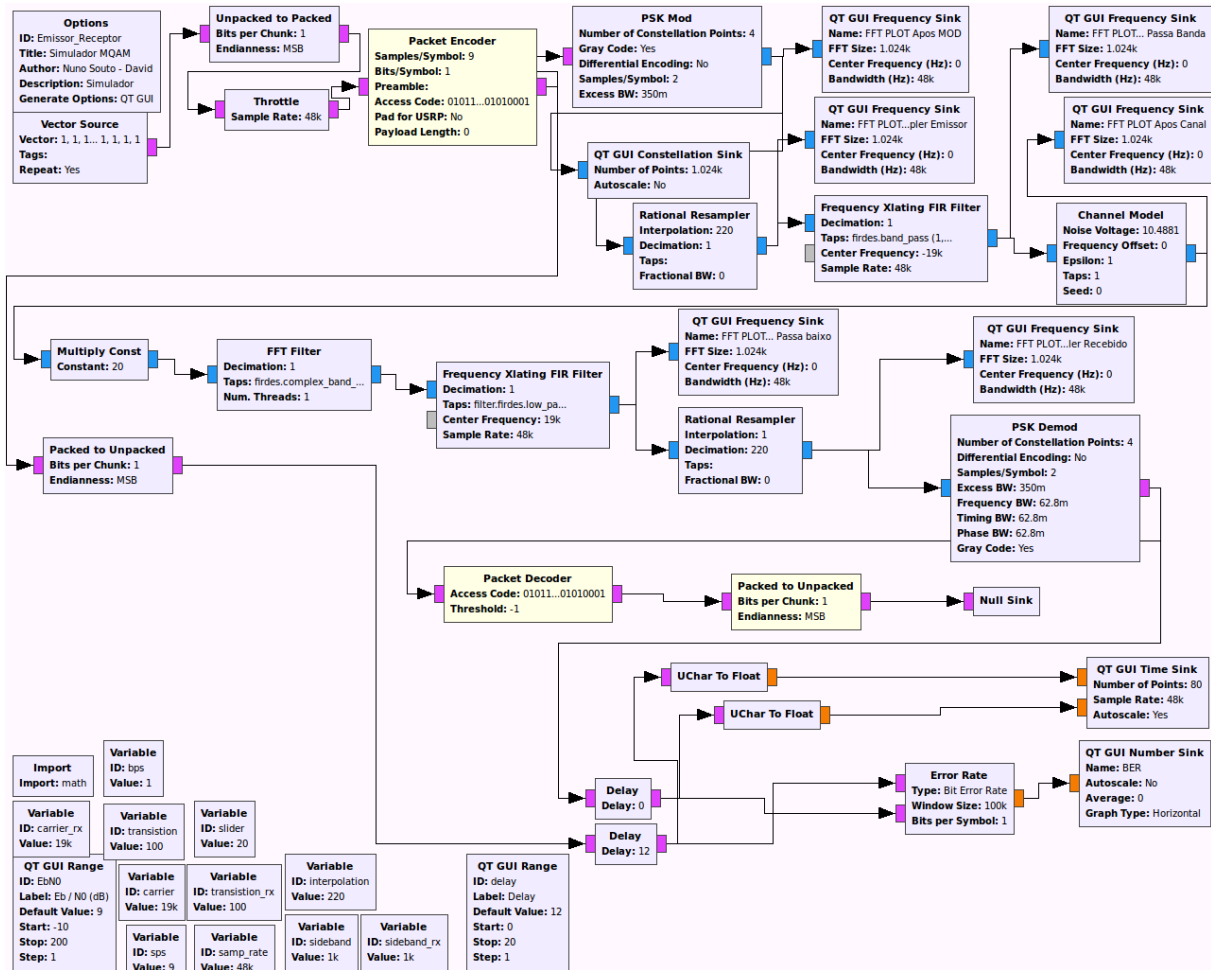


Figura 74 - Simulador DBPSK em canal AWGN

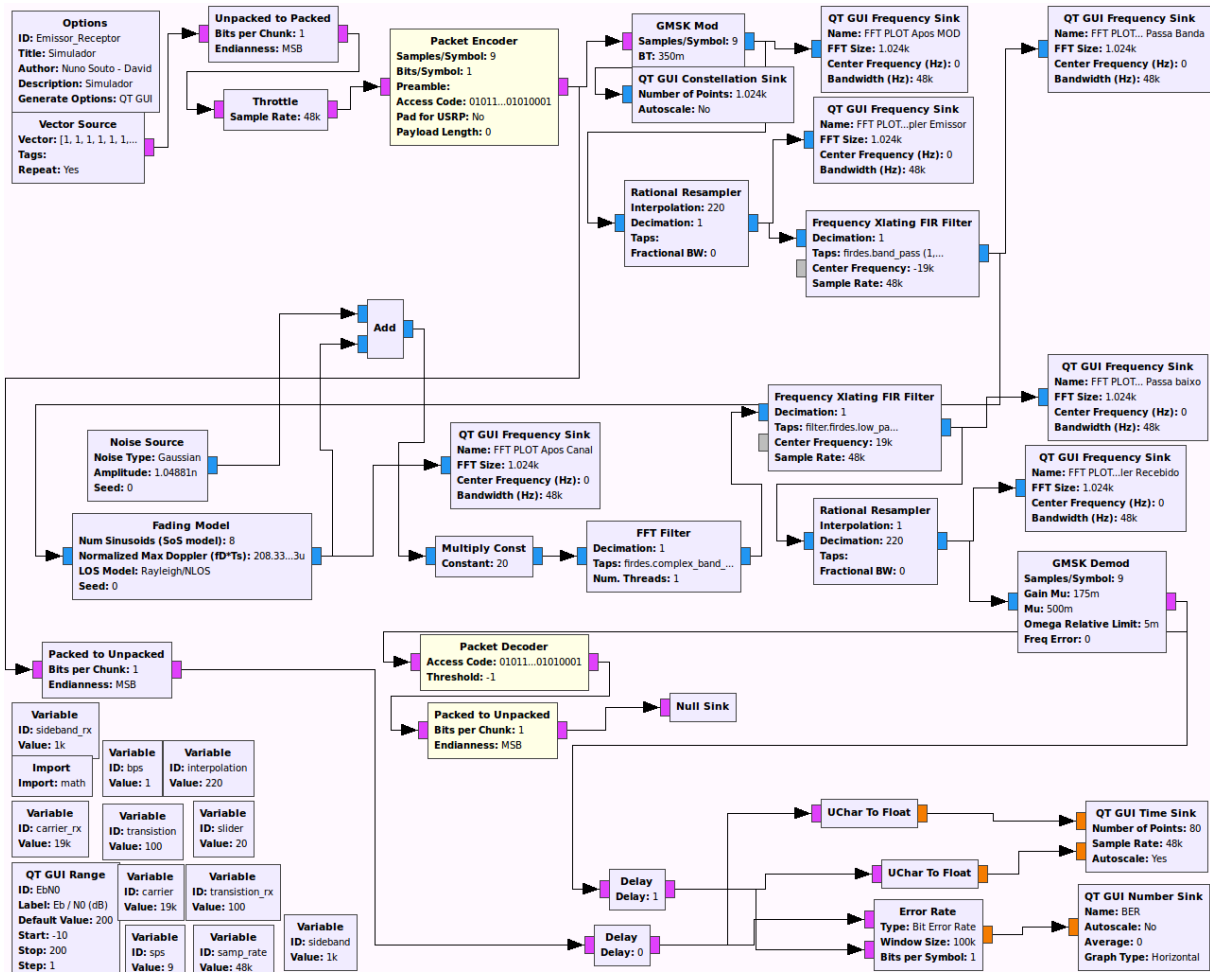


Figura 75 - Simulador GMSK em canal *Fading Model*

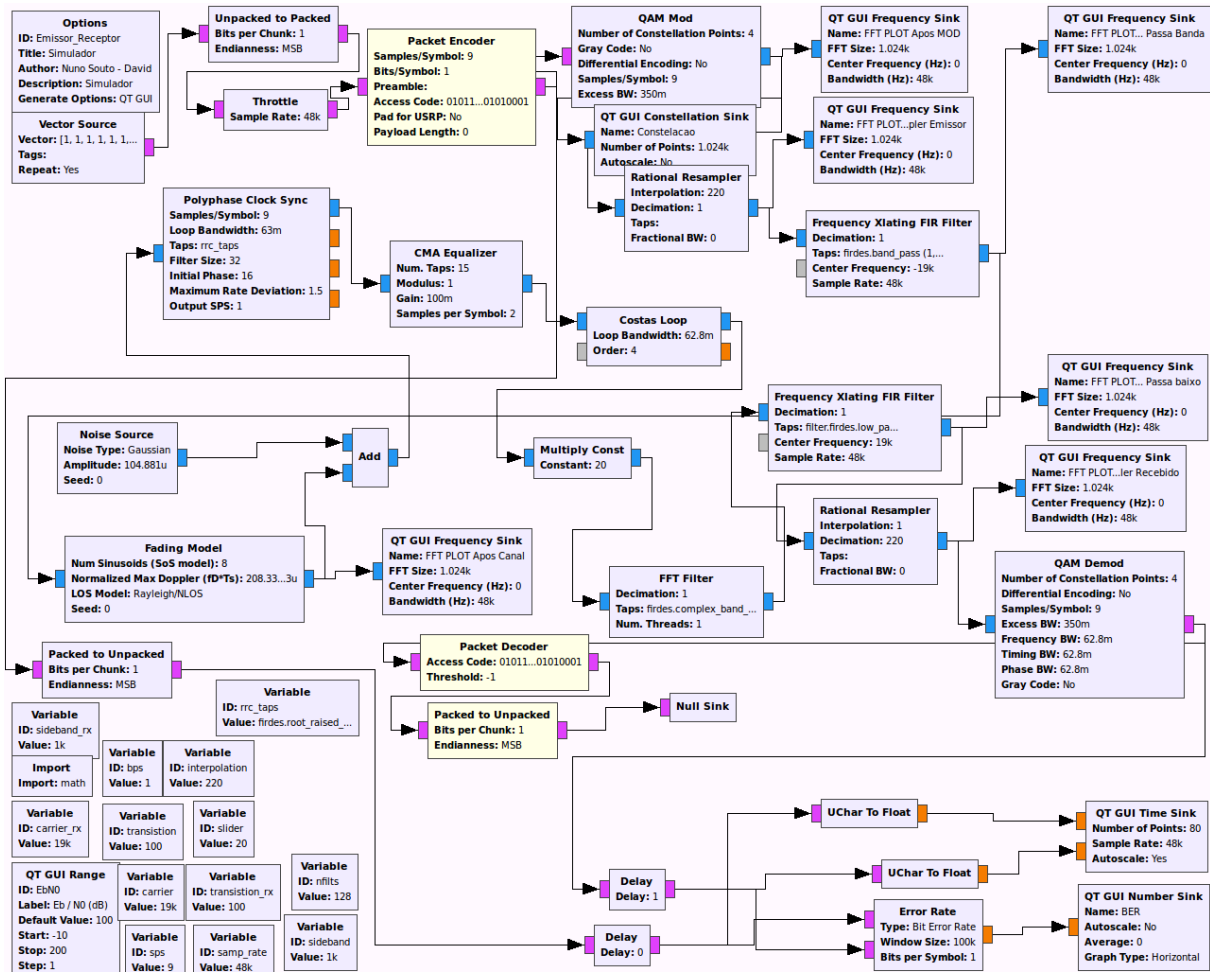


Figura 76 - Simulador MQAM em canal *Fading Model*

Emissor/Recetor Acústico definido por Software para comunicações subaquáticas

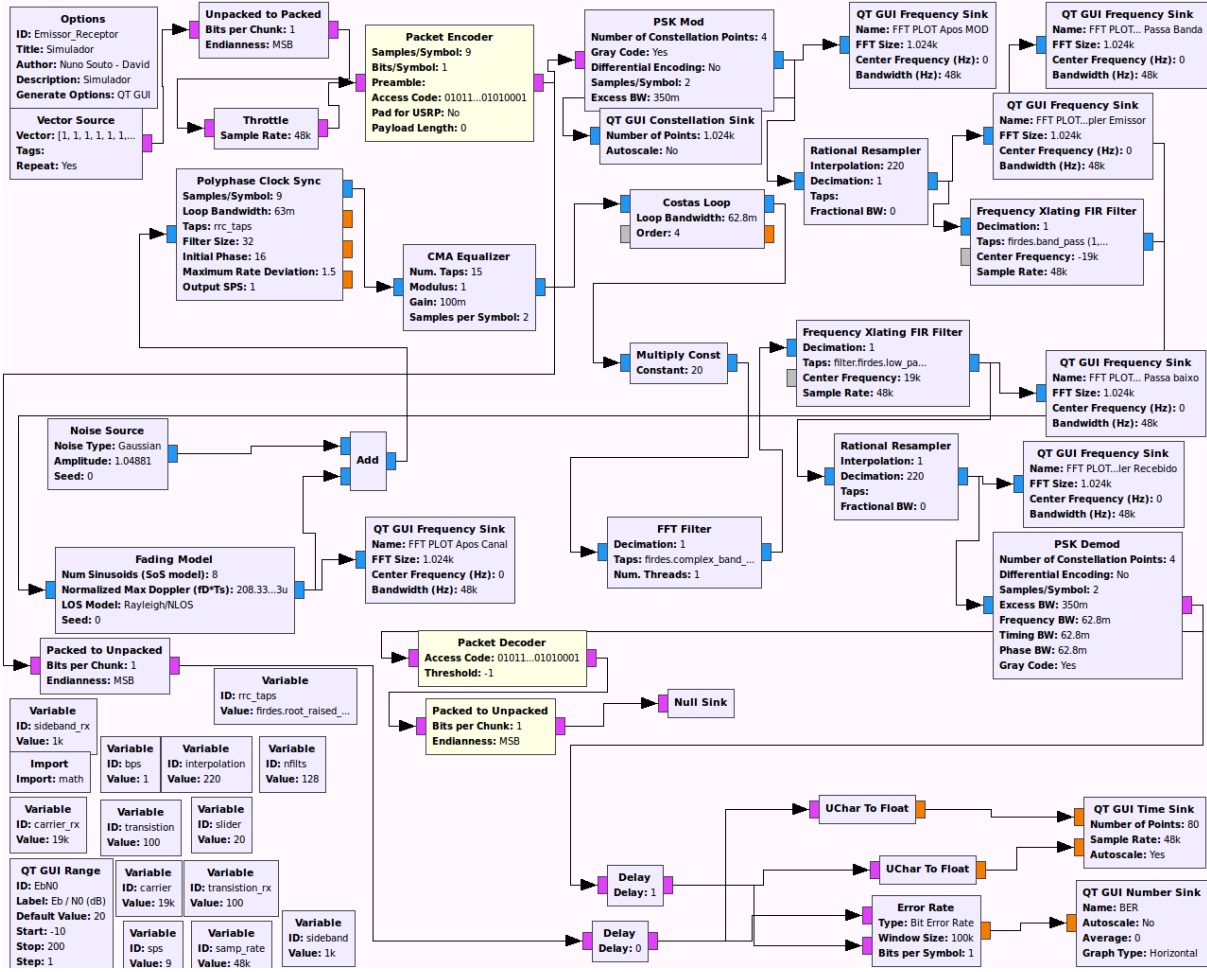


Figura 77 - Simulador DBPSK em canal *Fading Model*

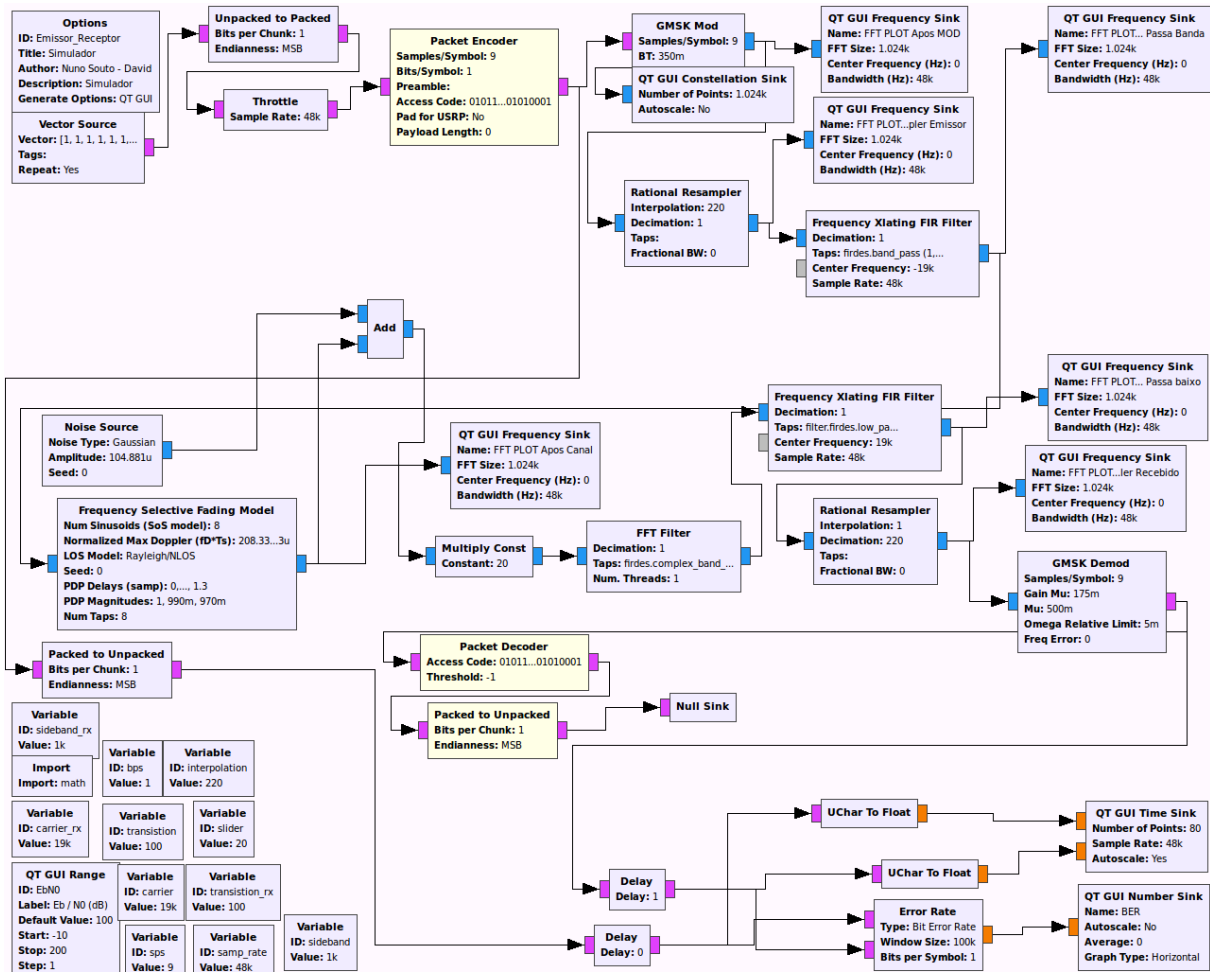
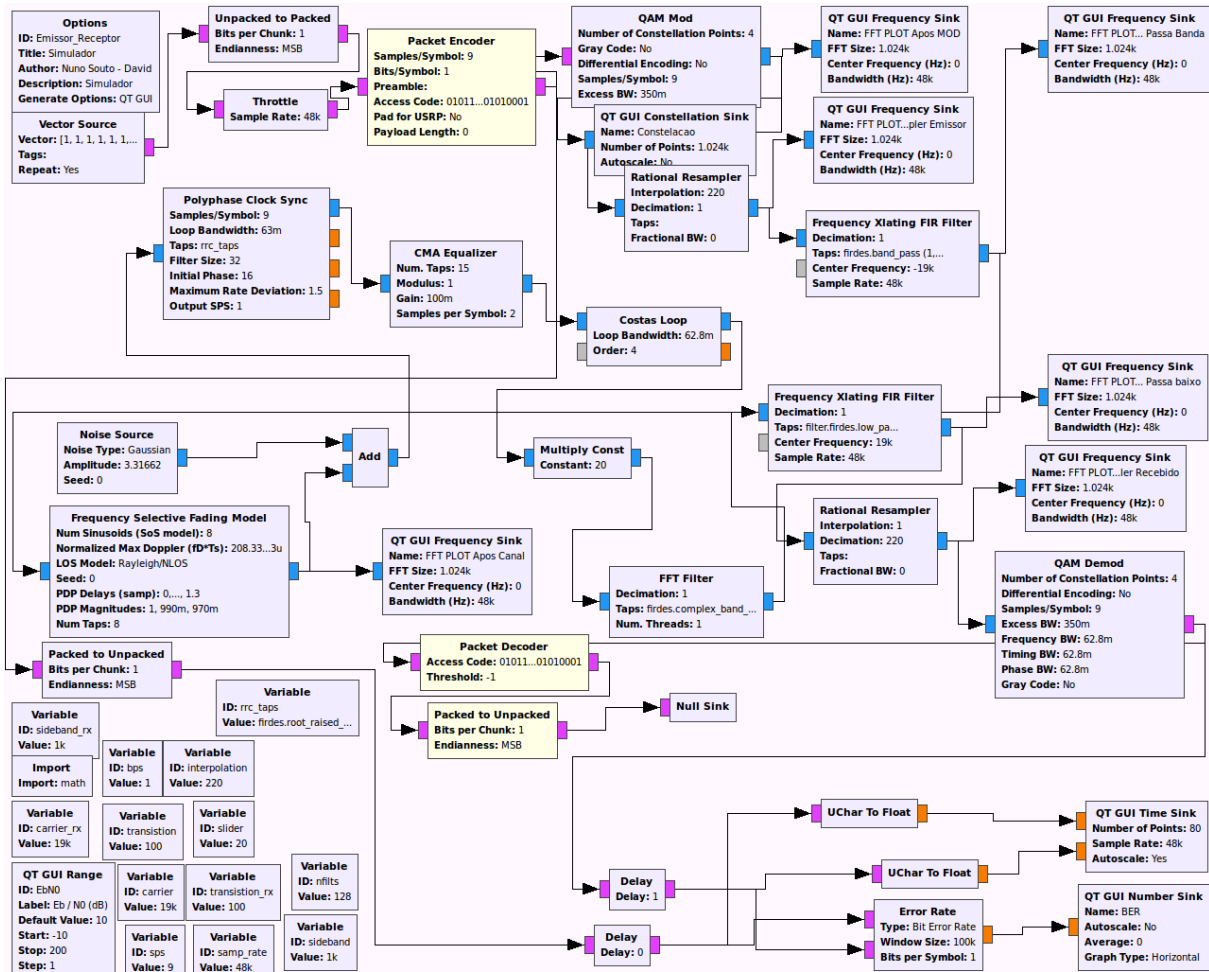


Figura 78 - Simulador GMSK em canal Selective Fading Model

Figura 79 - Simulador QAM em canal *Selective Fading Model*



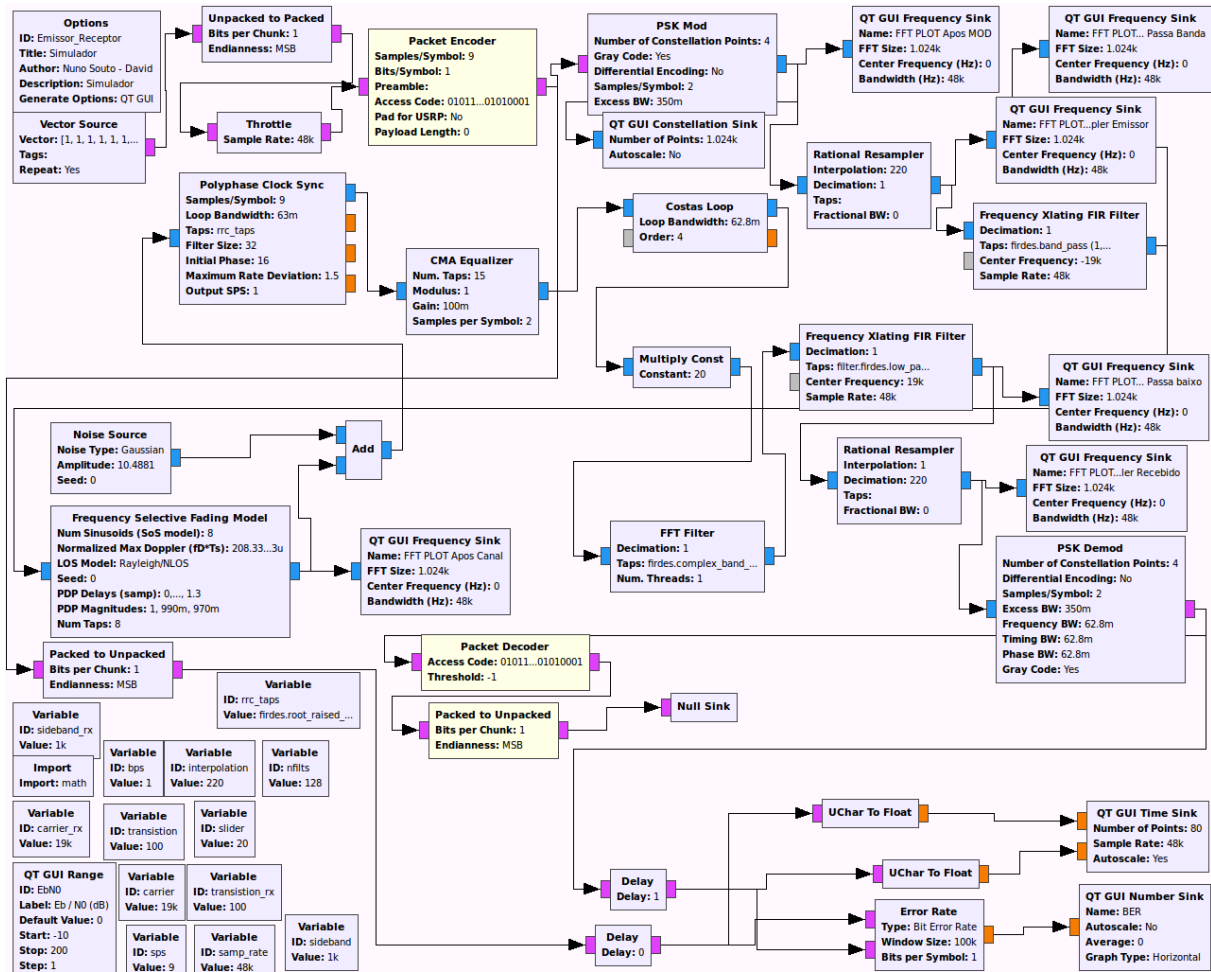


Figura 80 - Simulador DBPSK em canal *Selective Fading Model*



## Apêndices C - GnuRadio flowgraph para testes reais

Os esquemas abaixo dizem respeito aos emissores e recetores para os testes reais no envio de vetores, analisados e exemplificados no capítulo cinco. As figuras 81 e 82 dizem respeito à modulação GMSK, as figuras 83 e 84 à modulação MQAM e por fim as figuras 87 e 88 à modulação DBPSK.

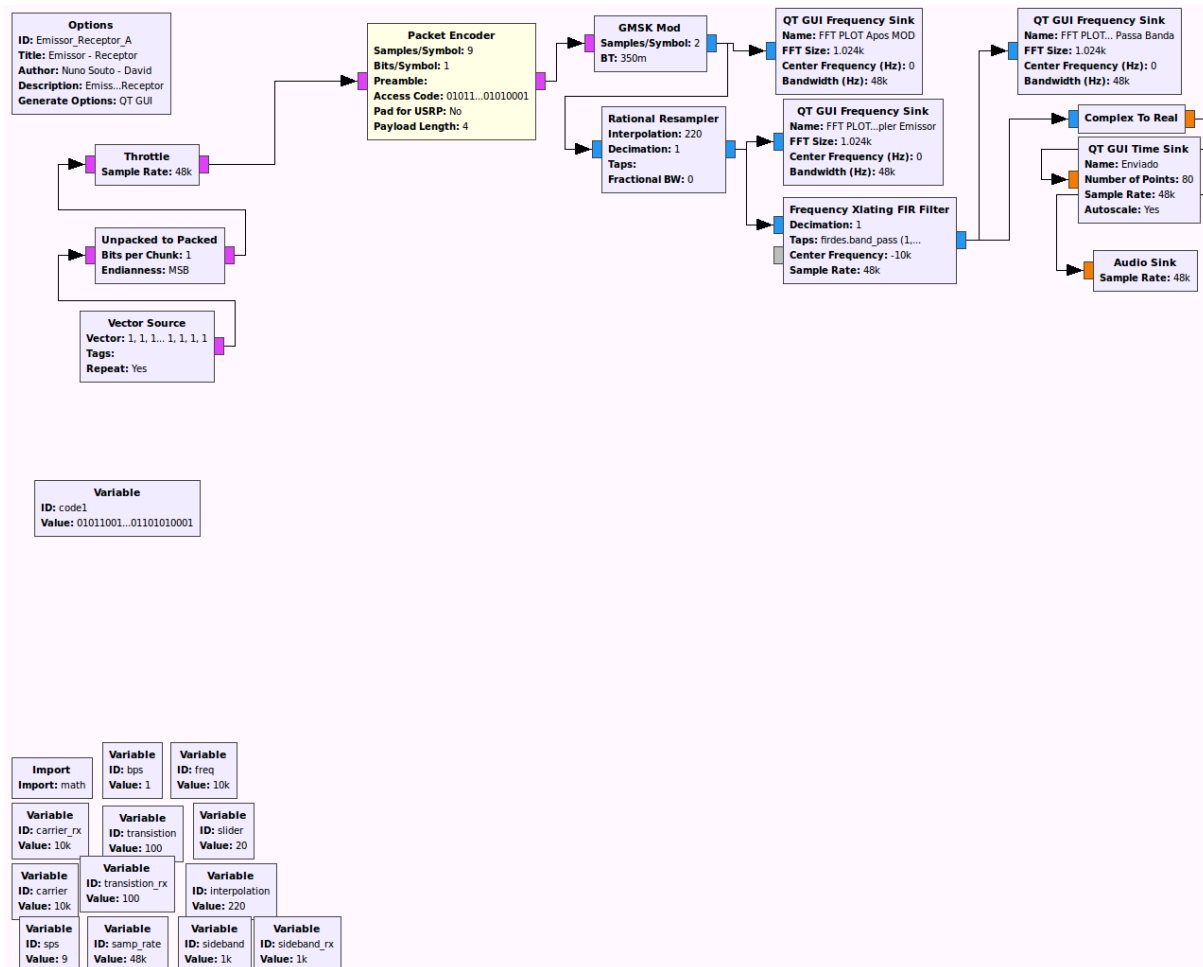


Figura 81 - Emissor GMSK

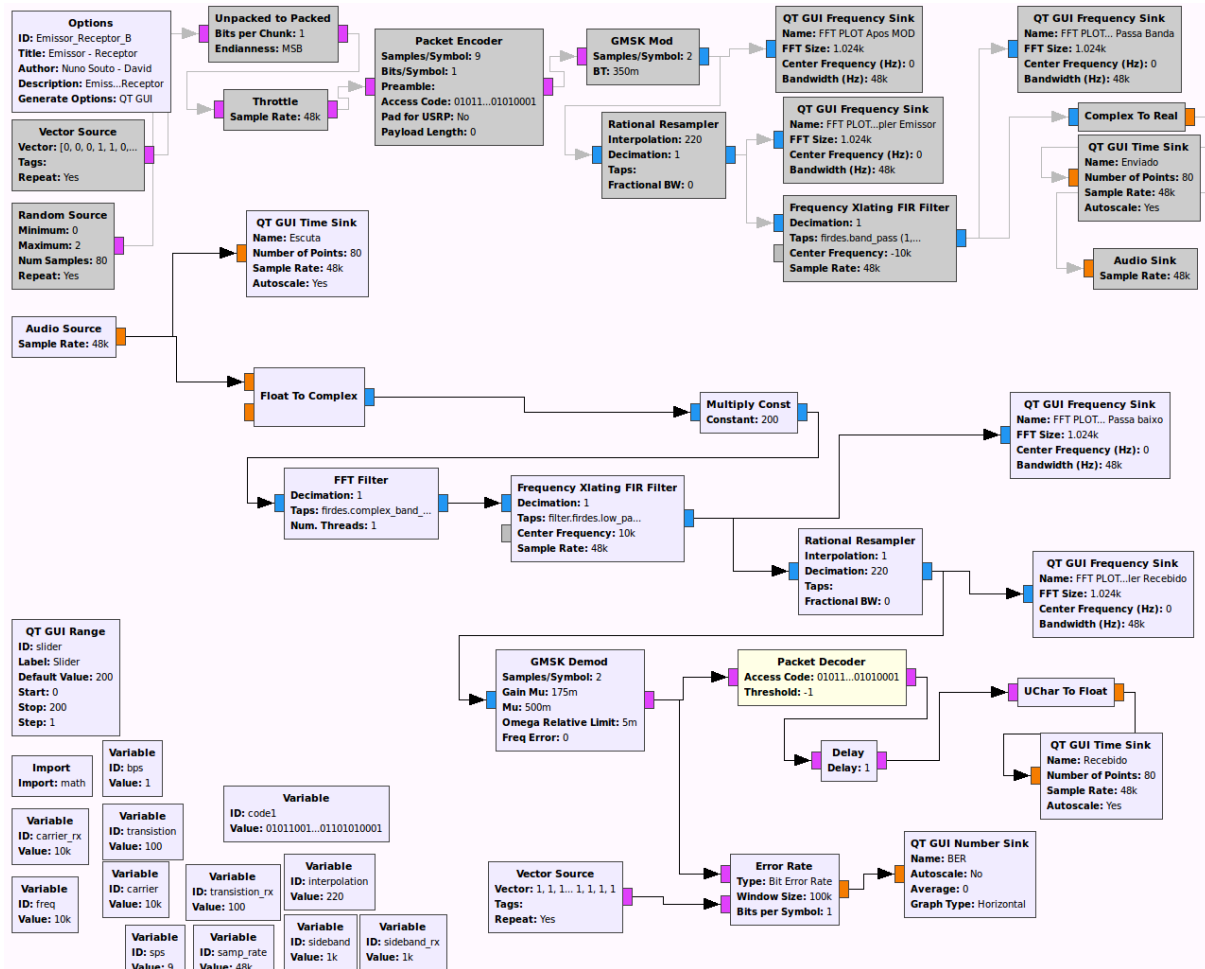


Figura 82 - Recetor GMSK

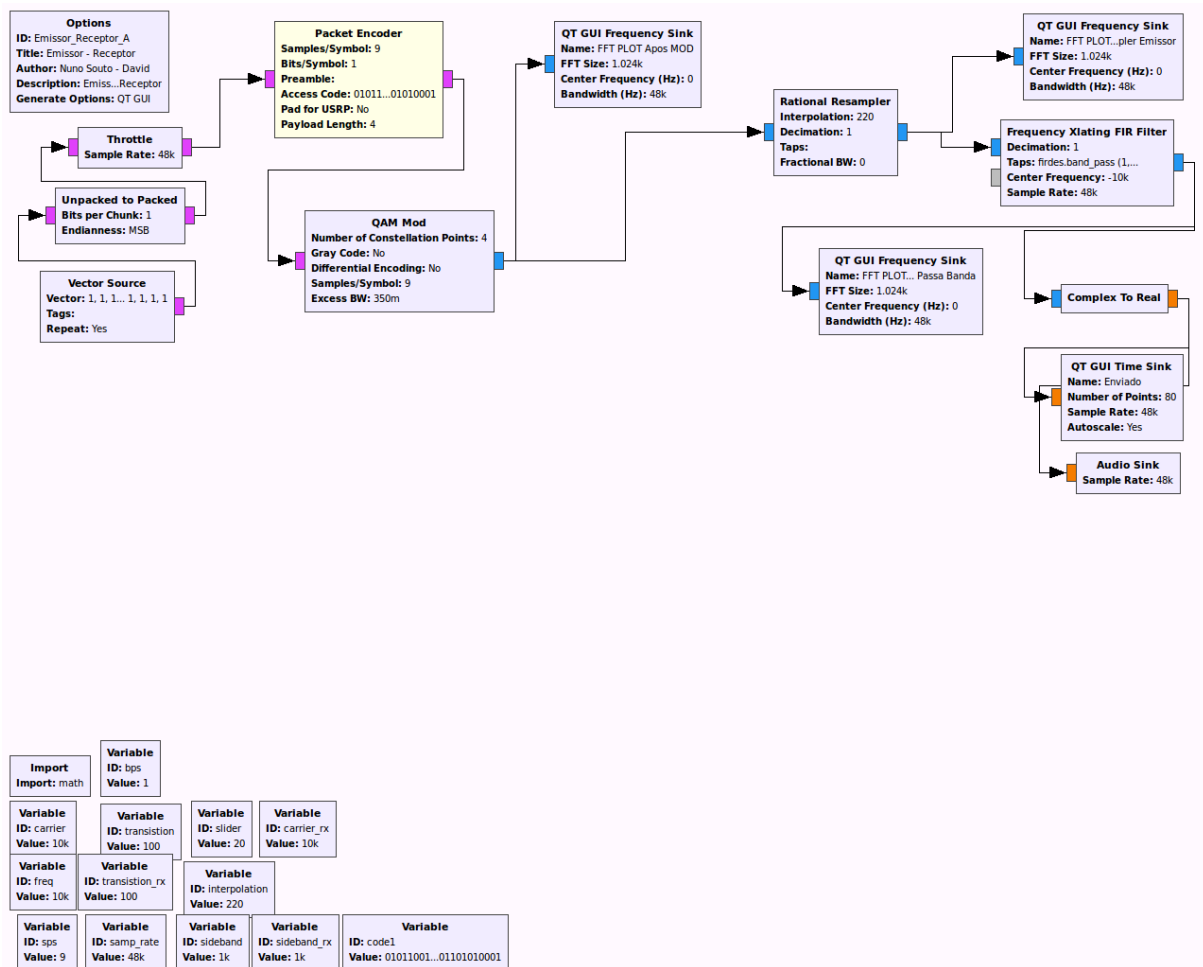


Figura 83 - Emissor MQAM

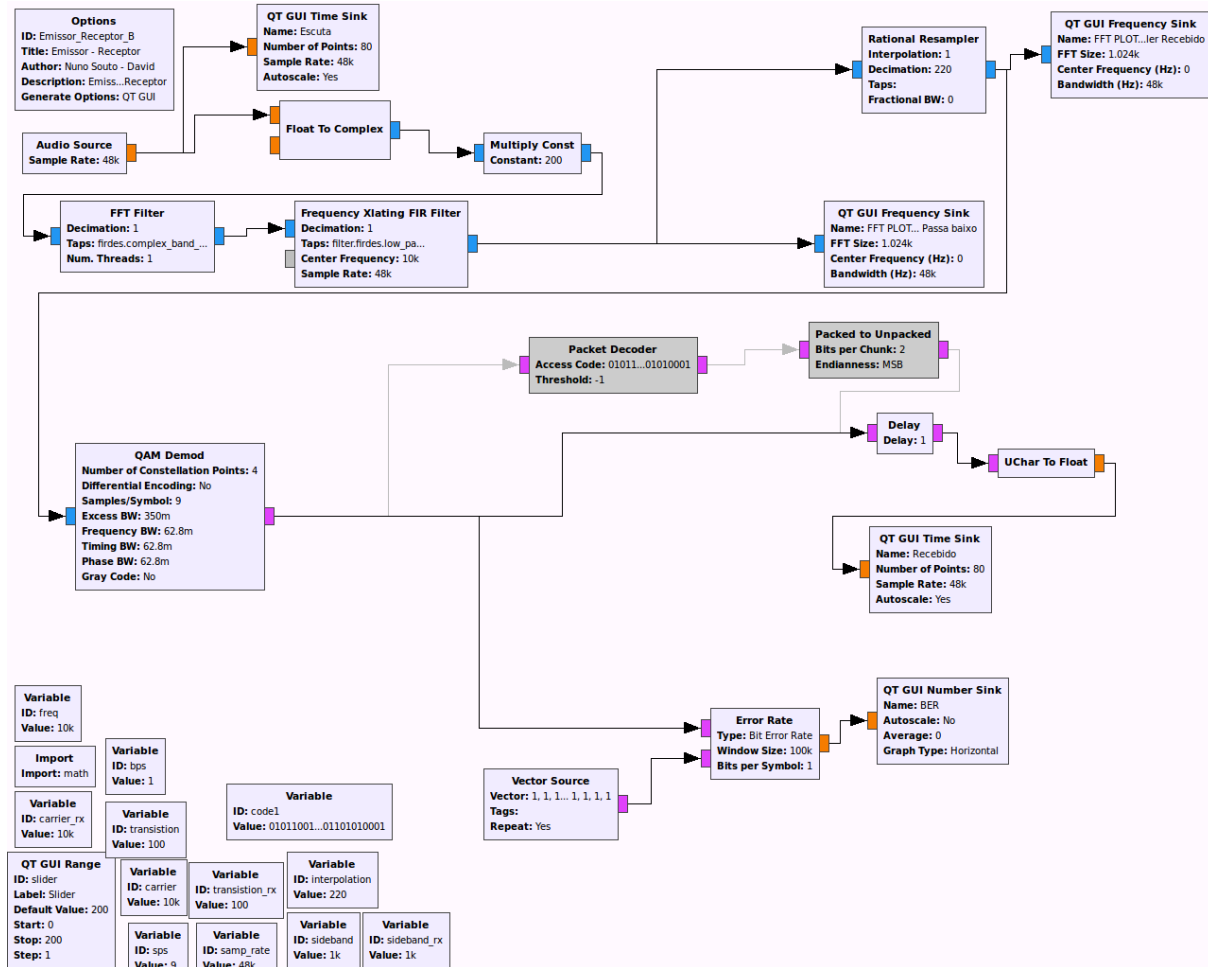


Figura 84 - Recetor MQAM

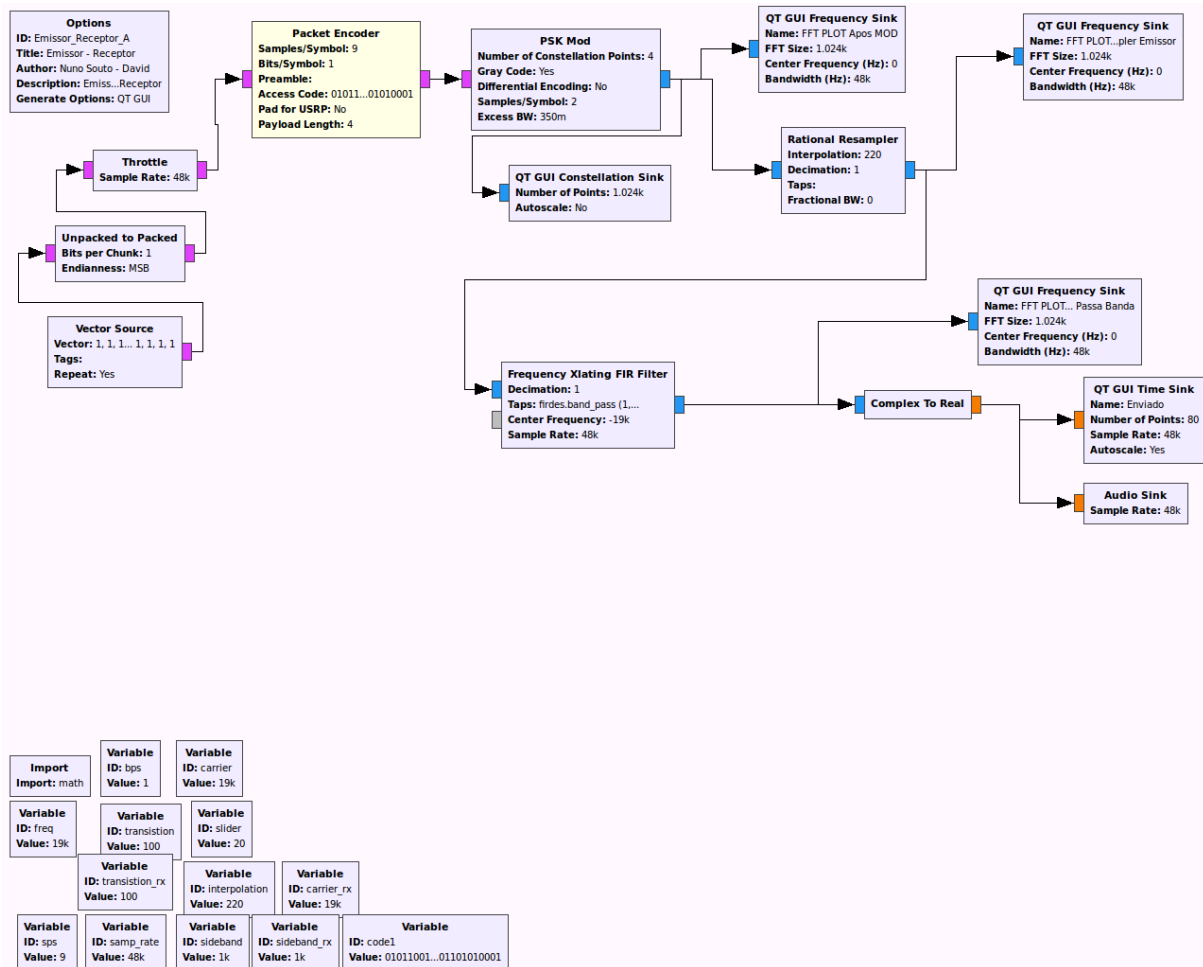


Figura 85 - Emissor DBPSK

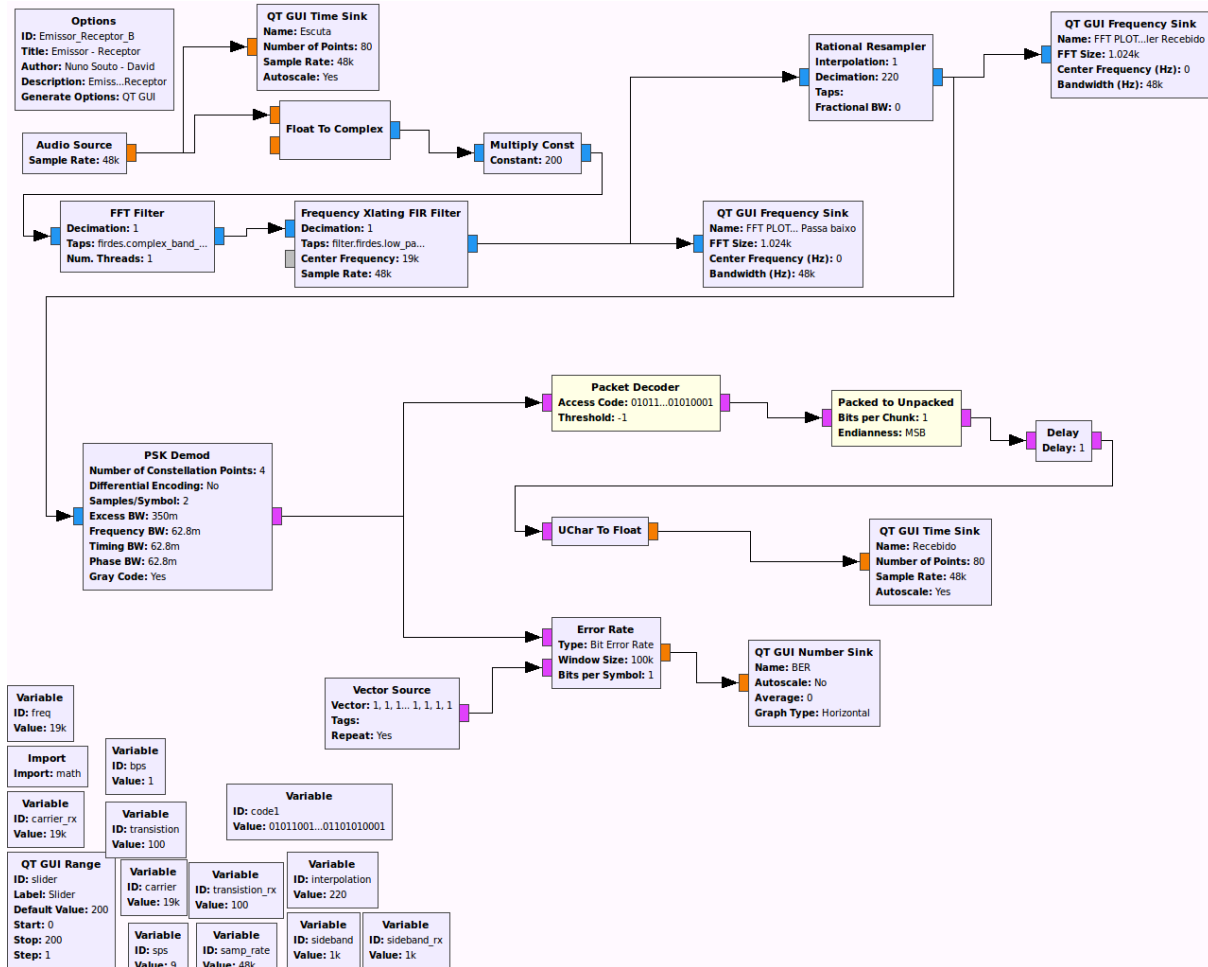


Figura 86 - Recetor DBPSK



## Apêndices D - GnuRadio flowgraph para a aplicação

Os apêndices abaixo representados dizem respeito ao capítulo 5.3. Onde nas figuras seguintes estão representados os esquemas de emissão e recepção para a troca de mensagens entre terminais, conforme exemplificado no capítulo 5, secção 5.3.

Nas figuras 87 e 88 modulação GMSK, figuras 89 e 90 MQAM e por fim nas figuras 91 e 92 DBPSK.

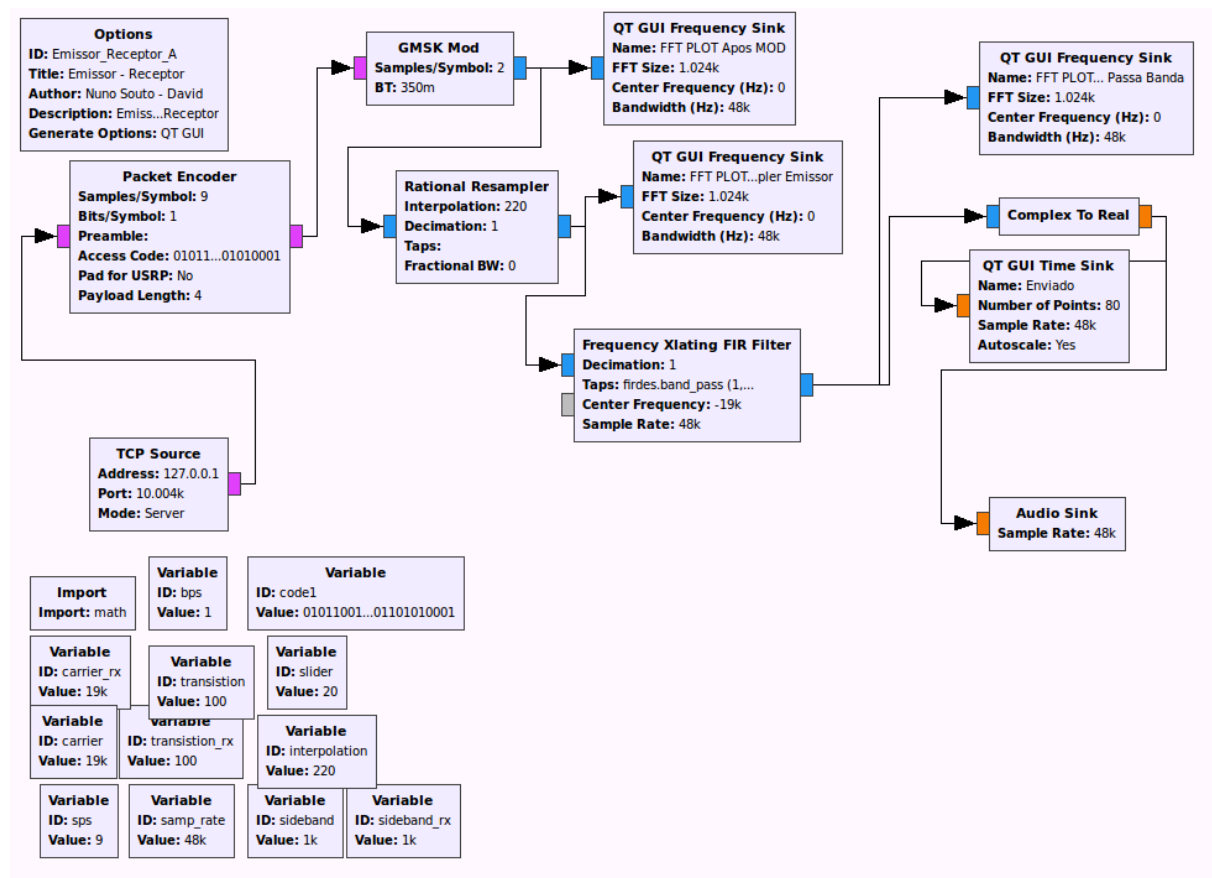


Figura 87 - Emissor para troca de mensagens entre terminais na modulação GMSK

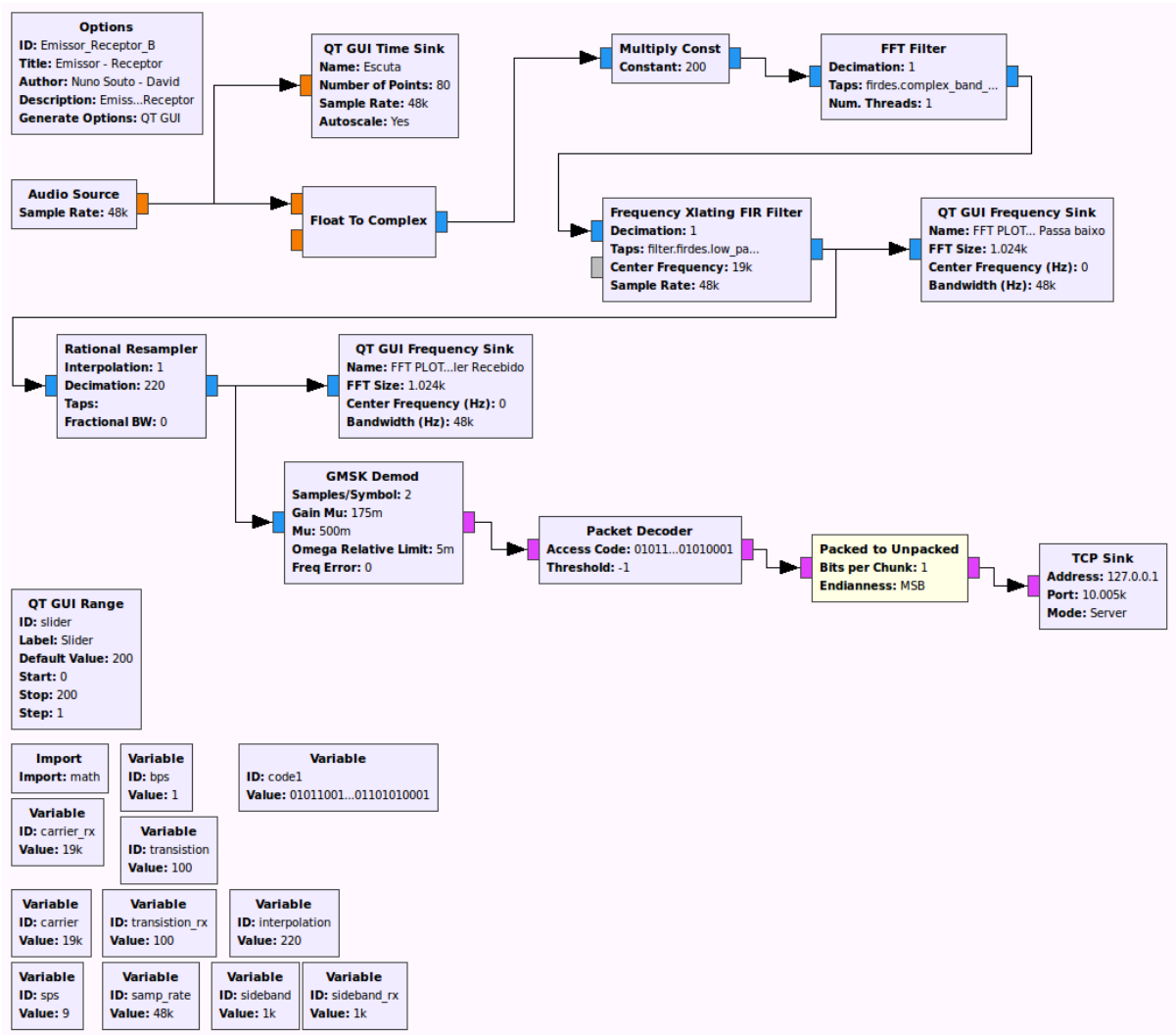


Figura 88 - Recetor para troca de mensagens entre terminais na modulação GMSK

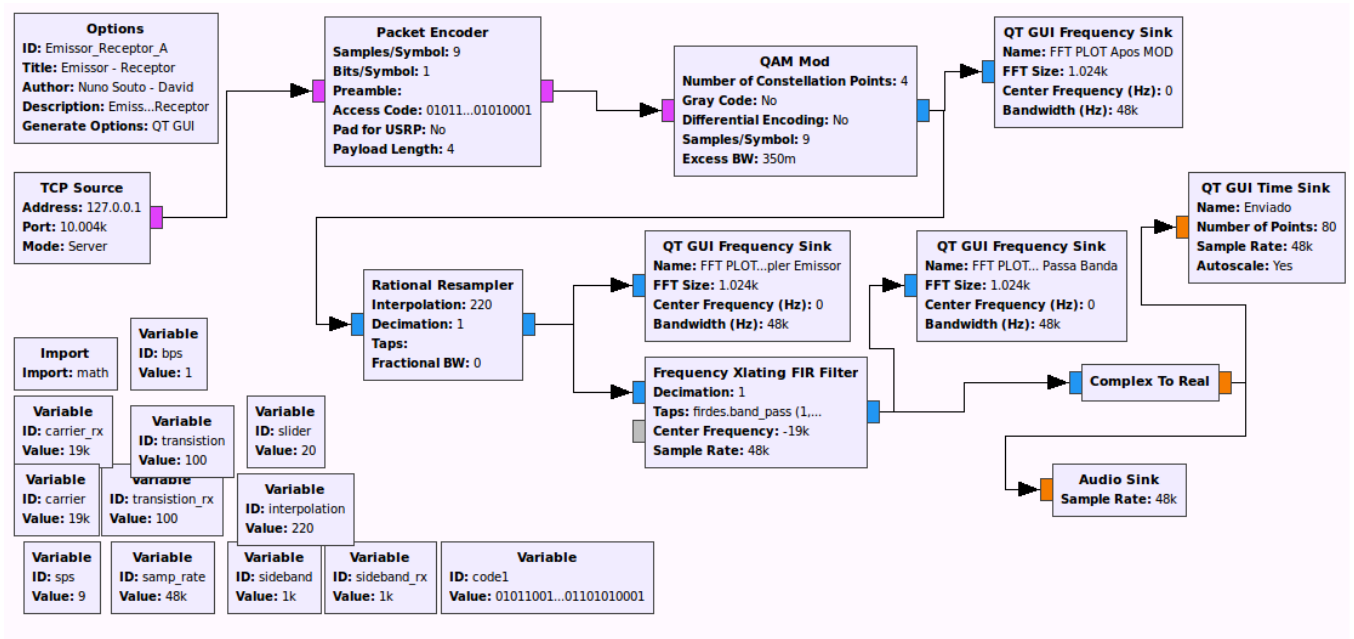


Figura 89 - Emissor para troca de mensagens entre terminais na modulação MQAM

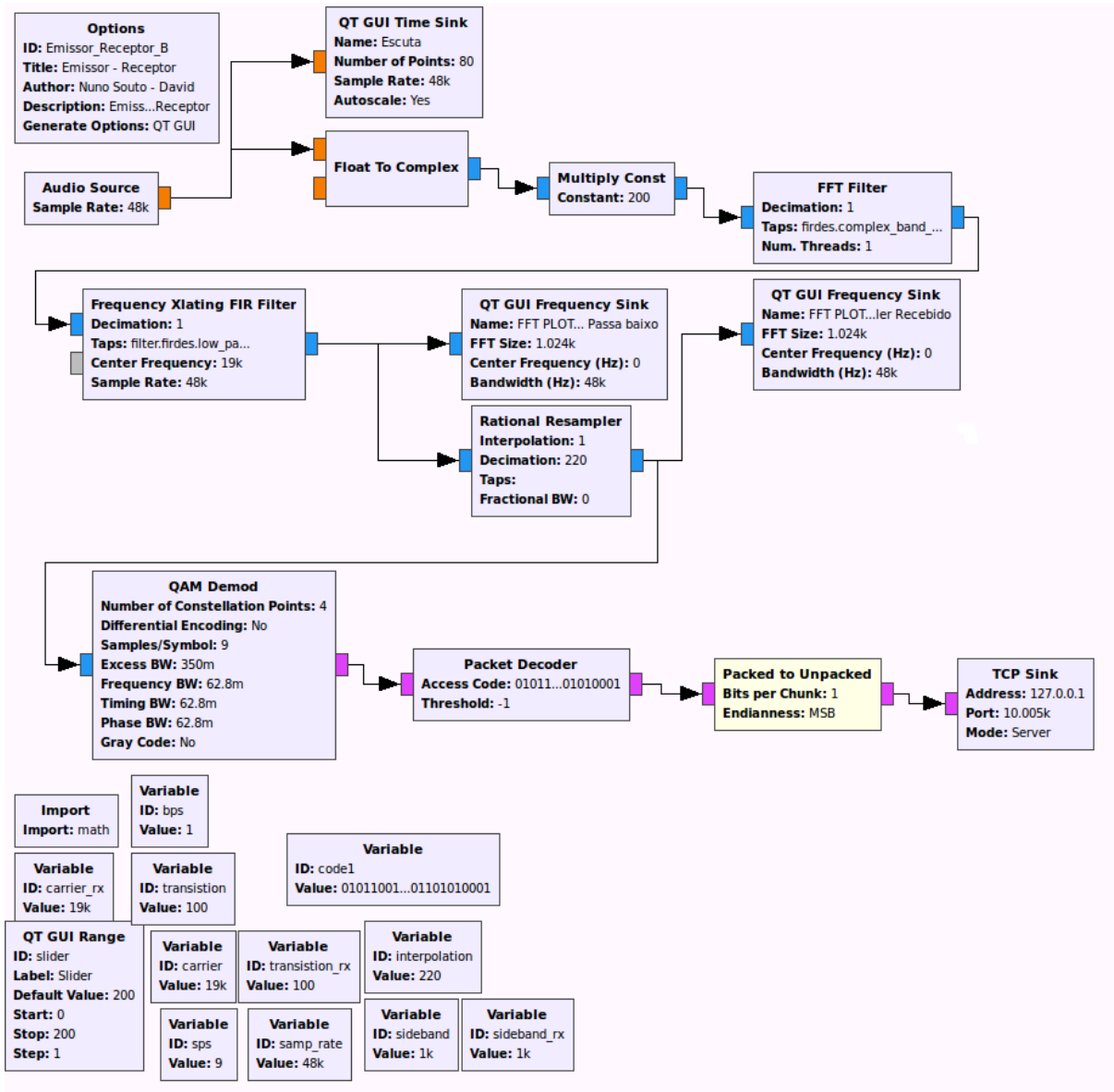


Figura 90 - Recetor para troca de mensagens entre terminais na modulação MQAM

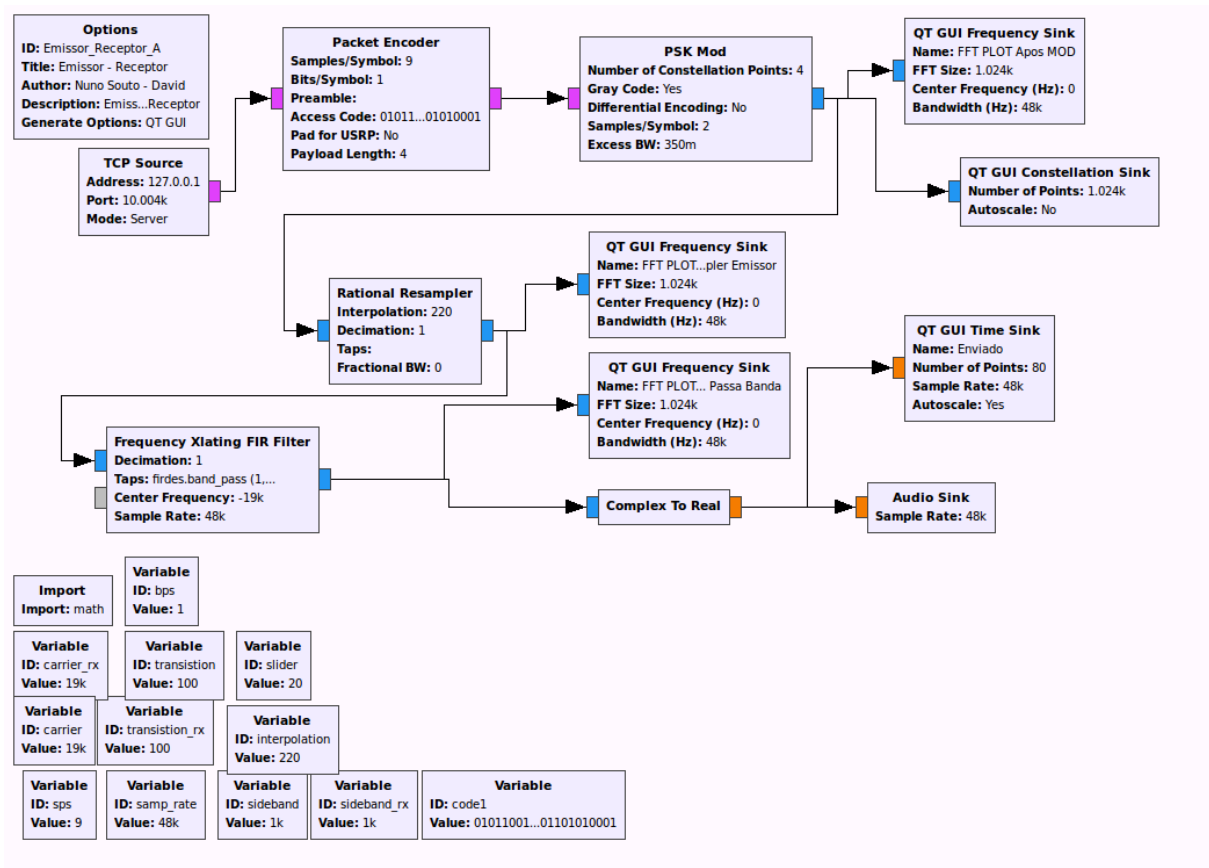


Figura 91 - Emissor para troca de mensagens entre terminais na modulação DBPSK

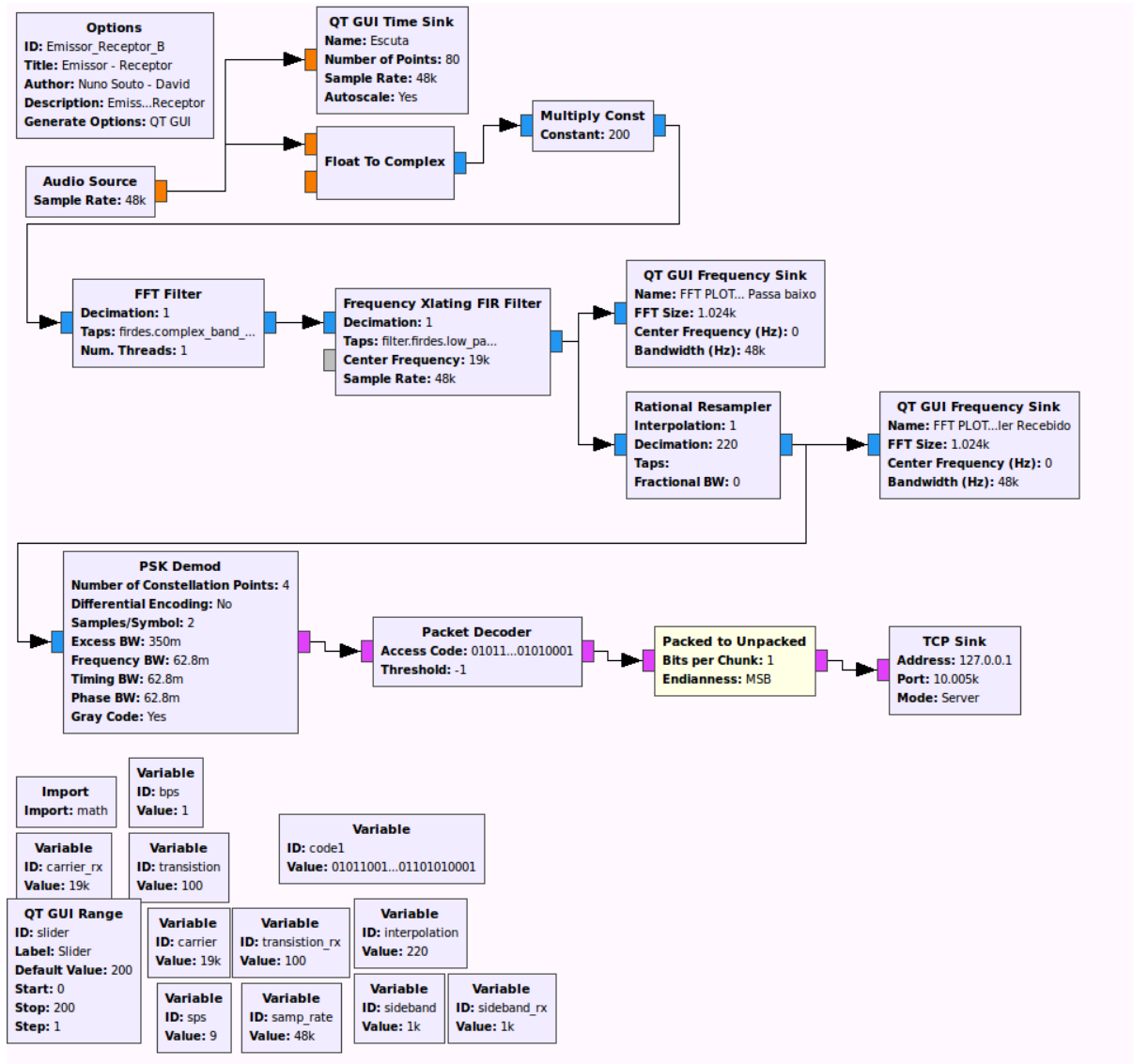


Figura 92 - Emissor para troca de mensagens entre terminais na modulação DBPSK