



Ana Carolina Correia Soares **Óculos para a deteção de obstáculos para cegos**



**Ana Carolina Correia
Soares**

Óculos para a deteção de obstáculos para cegos

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para o cumprimento dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Materiais e Dispositivos Biomédicos, realizada sob orientação científica do Dr. José Manuel Neto Vieira, Professor do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor José Maria da Fonte Ferreira
professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Doutor Pedro Nicolau Faria, da Fonseca
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Manuel Neto Vieira
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero agradecer ao professor José Manuel Neto Vieira pela paciência, disponibilidade, motivação e excelente orientação que me ofereceu durante a realização desta dissertação.

Um obrigada especial ao meu namorado, Nelson que me deu ideias, me ouviu e me motivou nesta etapa da minha vida.

Por último agradeço à minha família por me ter dado a oportunidade de enriquecer a minha formação académica encorajando-me a nunca desistir.

palavras-chave

Deficiência Visual, Efeito de Doppler, Frequência inteira, Frequência fracionária, Super-resolução, Transformada de Fourier, Ultrassons.

resumo

Segundo os dados da Organização Mundial de Saúde (OMS), existem diversas pessoas com deficiência visual que enfrentam, diariamente diversas barreiras à sua mobilidade quando se deslocam num dado ambiente.

Existem diversas soluções para auxiliar as pessoas com deficiência visual, no entanto, os dispositivos mais frequentes são a bengala branca e o cão-guia. Estes equipamentos são os mais usuais porque são aqueles que garantem alguma autonomia e segurança ao utilizador.

Por outro lado, a bengala branca não é eficaz na deteção de obstáculos acima da cintura e o cão-guia é muito dispendioso. Assim, uma possível solução seria a incorporação de sensores de ultrassons nos óculos dos cegos que poderiam detetar obstáculos à altura da cabeça e avisar os cegos com avisos sonoros. No entanto, estes sistemas são demasiado intrusivos na audição dos cegos e, por esse motivo, não são adotados pelos cegos.

Assim, o principal objetivo deste projeto é contruir um algoritmo, que permita avisar o cego apenas dos obstáculos que se aproximam da sua cabeça a uma velocidade perigosa tirando partido do efeito de Doppler sobre os sinais recebidos. Para tal foi necessário recorrer a algoritmos de super-resolução que permitam detetar desvios de frequência muito pequenos no sinal recebido.

Foram realizados vários testes com transdutores de ultrassons para avaliar o desempenho dos diferentes algoritmos implementados. Os testes realizados com ultrassons, na gama dos 40kHz revelaram que os algoritmos são capazes de medir velocidades inferiores a 0,5m/s o que constitui um desempenho bastante favorável.

keywords

Doppler effect, Fractional frequency, Fourier Transform, Integer part frequency, Super fine resolution, Ultrasounds, Visually Impaired.

abstract

According to data from the World Health Organization (WHO), there are several people with visual impairment who face daily barriers to their mobility when moving in a given environment.

There are several solutions to assist people with visual impairments; however, the most frequent devices are the white cane and guide dog. These equipments are the most common because they are the ones that guarantee some autonomy and security to the user.

On the other hand, the white cane is not effective in detecting obstacles above the waist and the guide dog is very expensive. Thus, a possible solution would be the incorporation of ultrasound sensors in the spectacles of the blind that could detect obstacles at the height of the head and warn the blinds with sonorous warnings. However, these systems are too intrusive in the hearing of the blind and therefore are not adopted by the blind.

Thus, the main objective of this project is to construct an algorithm, which allows to warn the blind only of the obstacles that approach his head at a dangerous speed, taking advantage of the Doppler effect on the signals received. For this, it was necessary to use super-resolution algorithms to detect very small doppler shifts in the received signal.

Several tests were carried out with ultrasound transducers to evaluate the performance of the different implemented algorithms. The tests performed with ultrasonics, in the 40kHz range revealed that the algorithms are able to measure speeds of less than 0.5m / s which is a very good performance.

Índice

LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE ACRÓNIMOS E SIGLAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 CAUSAS, EQUIPAMENTOS E SOLUÇÕES PARA AUXILIAR AS PESSOAS COM DEFICIÊNCIA VISUAL.....	5
2.2 DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS EXISTENTES	8
2.2.1 <i>Bengala de apoio a cegos – versão 2008/2009</i>	9
2.2.2 <i>Brain Port V100</i>	10
2.2.3 <i>Blinput</i>	12
2.2.4 <i>TACIT</i>	13
2.2.5 <i>Ultracane</i>	14
2.2.6 <i>Ray</i>	16
2.2.7 <i>SmartVision</i>	17
2.2.8 <i>Blind Guide</i>	19
2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS OBSTÁCULOS	22
3 FUNCIONAMENTO DOS ÓCULOS.....	25
3.1 ÓCULOS 3D.....	25
3.2 ULTRASSONS.....	26
3.3 EFEITO DE DOPPLER E ONDAS SONORAS.....	27
3.4 MEDIÇÃO DE DISTÂNCIAS UTILIZANDO ULTRASSONS.	32
4 DETERMINAÇÃO DO DESVIO EM FREQUÊNCIA DO SINAL RECEBIDO.....	34
4.1 ANÁLISE ESPECTRAL SIMPLES E INTERPOLAÇÃO	34
4.2 MÉTODO DE SUPER-RESOLUÇÃO	41
4.2.1 <i>Algoritmo de regra única</i>	41
4.2.2 <i>Algoritmo 2 e 3 – “Método de três regras”</i>	43
5 ANÁLISE DA ROBUSTEZ DOS VÁRIOS MÉTODOS – SIMULAÇÃO EM MATLAB	48
6 TESTES AO ALGORITMO COM SINAIS REAIS	56
6.1 EXPERIÊNCIA COM O MICROFONE E PLACA DE SOM	56
6.2 TESTES PRÁTICOS – “CHAPA VOADORA” E OS TRANSDUTORES DE 40 KHZ	63
6.2.1 <i>Deslocar o sinal para a banda-base</i>	65
6.2.2 <i>Avaliar a resposta a um sistema passa-banda</i>	69
6.2.3 <i>Redução da frequência de amostragem por um fator inteiro ($\downarrow M$)</i>	71
6.2.4 <i>Configuração da duração dos pulsos e detecção dos pulsos</i>	71
7 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
ANEXO 1 – DIAGRAMA DE BLOCO DO PROCESSAMENTO NO SINAL DA EXPERIÊNCIA: “CHAPA VOADORA”	89

ANEXO 2 – TESTES PARA A DIMINUIÇÃO DO ACOPLAMENTO DIRETO	91
---	-----------

Lista de Figuras

Figura 1: Classificação da deficiência visual [7].	5
Figura 2: Protótipo da bengala de apoio a cegos [7], [12].	9
Figura 3: BrainPort V100 [13].	11
Figura 4: Equipamento Blinput	12
Figura 5: Equipamento Tacit.	14
Figura 6: Distâncias na detecção dos obstáculos [17].	15
Figura 7: Ultracane [17].	16
Figura 8: Ray [18].	17
Figura 9: SmartVision.	18
Figura 10: Evolução do SmartVison para o CE4Blind [20].	19
Figura 11: Protótipo do Blind Guide [16].	21
Figura 12: Protótipo dos óculos em 3D com microprocessador.	25
Figura 13: Gama de frequências do som. [22].	26
Figura 14: Inseto parado em relação aos observadores A e B.	27
Figura 15: Inseto se movendo em relação ao observador B.	28
Figura 16: Esquema do efeito de Doppler com uma fonte e um recetor.	30
Figura 17: Esquema do efeito de Doppler entre um autofalante e um obstáculo.	30
Figura 18: Esquema equivalente ao da figura 18.	31
Figura 19: Reflexão do ultrassom [22].	32
Figura 20: Impulso retangular no domínio do tempo.	34
Figura 21: Sinal no domínio da frequência - sinc.	35
Figura 22: Análise no domínio da frequência para $F=100$ Hz.	37
Figura 23: Análise no domínio da frequência para $F=100.5$ Hz.	38
Figura 24: Erro relativo, em percentagem, para FFT simples.	39
Figura 25: Erro relativo, em percentagem, para FFT interpolada.	40
Figura 26: Erro associado a cada método.	45
Figura 27: Erro associado a cada método ampliado.	45
Figura 28: Robustez dos métodos ao ruído – média para 106 tentativas	50
Figura 29: Robustez dos métodos ao ruído - desvio padrão para 106 tentativas	51
Figura 30: Histograma do método “superfreq1”	52
Figura 31: Histograma método “superfreq2&3”	53

Figura 32: Histograma método “superfreDFT” para L=32.	53
Figura 33: Esquema do ciclo trigonométrico.....	54
Figura 34: Histograma do método "superfreqDFT" para L=256.....	55
Figura 35: Análise do sinal utilizando a janela.....	56
Figura 36: Espectrograma da simulação com senoide de 1kHz.	58
Figura 37: Esquema da experiência em laboratório.....	59
Figura 38: Espectrograma do sinal da “Exp1” com o método superfreq2&3.	61
Figura 39: Espectrograma da "Exp1” com o método “superfreq2&3” ampliado....	61
Figura 40: Espectrograma da "Exp2" para o método superfreq2&3.	62
Figura 41: Espectrograma da " Exp2" para o método "superfreq2&3" ampliado. ...	62
Figura 42: Esquema da experiência: “Chapa Voadora”.	64
Figura 43: Espectro sinal passa-banda.....	66
Figura 44: Espectro sinal banda-base	66
Figura 45: Espectro de $ G(f) $	67
Figura 46: Espectro de $ G_+(f) $	67
Figura 47: Espectro de $ \tilde{G}(f) $	68
Figura 48: a) Esquema para obter as componentes em fase e em quadratura de um sistema passa-banda.....	69
Figura 49: Esquema para obter as componentes em fase e quadratura do sinal $g(t)$ passa-banda.....	70
Figura 50: Esquema sistema em banda-base.	70
Figura 51: Desvio de frequência de 58 Hz	73
Figura 52: Desvio de frequência de 700 Hz	74
Figura 53: Esquema de montagem para a experiência da "Chapa Voadora".	75
Figura 54: Pulsos produzidos pela experiência da "Chapa Voadora".	77
Figura 55: Pulsos gerados pela experiência da “Chapa Voadora” - ampliado.	78
Figura 56: Gráfico três dimensões para analisar os ecos referentes à experiência da “Chapa Voadora”.....	78
Figura 57: Valores dos desvios de frequência práticos encontrados através do método "superfreq2&3".....	80
Figura 58: Velocidade estimada pelo método “superfreq2&3” para a experiência da “Chapa Voadora” em função do tempo.....	81

Figura 59: Velocidade estimada pelo método “superfreq2&3” para a experiência da “Chapa Voadora” em função do tempo (ampliado).	81
Figura 60: Desvios de frequência estimados pelo método "superfreq2&3" para a experiência da “Chapa Voadora” em função do tempo.....	82
Figura 61: Desvios de frequência estimados pelo método "superfreq2&3" para a experiência da “Chapa Voadora” em função do tempo (ampliado).	82
Figura 62: Versão 2 - rebordo de 0.5 cm	91
Figura 63: Versão 2 tubos de alumínio à face	92
Figura 64: Versão 3 - rebordo 0.5 cm.....	92
Figura 65: Versão 3 - tubos à face.	92
Figura 66: Versão 4 - tubos à face.	93
Figura 67: Vista lateral da peça V3.	94
Figura 68: Posicionamento dos transdutores no interior do tubo com a peça V3. .	94

Lista de Acrónimos e Siglas

ACAPO – Associação de Cegos e Amblíopes de Portugal

ATM – Automatic Teller Machine

DFT – Discrete Fourier Transform

FFT– Fast Fourier Transform

GPS – Global Positioning System

IPL – Instituto Politécnico de Leiria

IR – InfraRed

LEDs – Light Emitting Diodes

ODFT – Odd Discrete Fourier Transform

OMS – Organização Mundial de Saúde

POIs – Pontos de interesse

RFID – Radio Frequency IDentification

SGI – System Geographic Information

SNR– Signal Noise Ratio

SNR– Signal noise ratio/ Relação sinal ruído

STFT– Short Time Fourier Transform

TF– Transformada de Fourier

UTAD – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores da variância da variável erro de cada método.	47
Tabela 2: Dados retirados das Experiências.	59
Tabela 3: Desvios teóricos.....	72
Tabela 4: Desvios estimados para os ecos detetados.....	73
Tabela 5: Desvios estimados para os ecos detetados.....	74
Tabela 6: Intervalo de tempo que os ecos demoram a chegar.	76
Tabela 7: Tabela com os valores de energia e módulo do valor máximos dos sinais adquiridos.	95

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O número de pessoas com deficiência visual em Portugal tem vindo aumentar gradualmente. Segundo o censo de 2011, cerca de 17,8% (taxa de prevalência) da população com cinco ou mais anos de idade afirmou ter muita dificuldade, ou não conseguir realizar, pelo menos, uma das seis atividades diárias (ver, ouvir, andar, memória/concentração, tomar banho/vestir-se, compreender/fazer-se entender). Na população com 65 ou mais anos de idade, este indicador atinge os 50%. Através do censo de 2011 pudemos também retirar que nas pessoas com cinco ou mais anos de idade com pelo menos uma dificuldade, ver é a segunda limitação mais manifestada, cerca de 23% das respostas identificam a dificuldade em ver, mesmo usando óculos ou lentes de contacto[1].

Por outro lado, a Organização Mundial de Saúde (OMS), estima em números atualizados em outubro de 2017 que cerca de 253 milhões de pessoas vivem com deficiência visual: 36 milhões são cegas e 217 milhões têm comprometimento de visão grave a moderado e que 81% dessas pessoas têm idade igual ou superior a 50 anos[2].

Assim, e através destes dados podemos concluir que existem imensos indivíduos com dificuldade em ver ou mesmo cegos que precisam da ajuda da nossa sociedade para se incluírem nela. Para essa inclusão e para possuírem uma boa qualidade de vida é necessário adaptar as ruas, transportes, tecnologias, bens alimentares entre outras áreas e setores. Além dessas adaptações os indivíduos com incapacidade visual necessitam de produtos de apoio que são caracterizados por equipamentos, instrumentos, tecnologia ou software produzidos para compensar as incapacidades e limitações decorrentes da doença [3].

Em relação à locomoção estes indivíduos utilizam a bengala branca, conhecida por todos nós, e alguns adquirem ou adotam um cão guia complementando a ajuda da bengala e tornando o indivíduo mais confiante. Apesar de ser uma simples bengala ainda é o método

mais cómodo para estas pessoas pois conseguem detetar os obstáculos não prejudicando a sua capacidade auditiva, ferramenta essencial para estes indivíduos.

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), as principais causas de deficiência visual são erros de refração não corrigidos (miopia, hipermetropia ou astigmatismo), catarata não operada, degeneração macular relacionada à idade, glaucoma e retinopatia diabética. Podemos dizer que cada uma destas causas tem uma percentagem associada sendo que os erros de refração não corrigidos é o que apresenta maior percentagem 53% e a catarata não operada 25% [2], [4].

Desta forma é necessário auxiliar a melhorar a qualidade de vida destas pessoas investigando e pesquisando novos dispositivos capazes de ajudar nas atividades diárias destas pessoas de forma a sentirem-se mais confiantes e mais autónomas.

1.2 Objetivos e Motivação

O principal objetivo do projeto de dissertação é melhorar o protótipo dos óculos, já existente, na deteção dos obstáculos.

A bengala utilizada pelas pessoas portadoras de deficiência visual não lhes permite detetar obstáculos suspensos localizados ao nível da cabeça.

A utilização de sinais de ultrassons para detetar os obstáculos é uma boa alternativa, pois se colocarmos os sensores nos óculos podemos informar os cegos, através de sinais sonoros, quando é detetado o obstáculo. Apesar de esta ser uma boa solução, os cegos utilizam a audição como auxílio à navegação não tolerando quaisquer interferências.

Assim, uma das formas de contornar este problema é soar um alarme apenas quando o obstáculo vem na direção do cego. Esta situação ocorre quando o cego se desloca e encontra obstáculos estáticos no seu caminho.

Neste projeto propomo-nos resolver este problema medindo o efeito de Doppler dos ecos dos sinais recebidos e só quando a medição indica que o eco recebido corresponde a um obstáculo em aproximação é que o utilizador é informado com um sinal sonoro não causando, com tanta frequência, distúrbios ao sistema auditivo.

1.3 Organização da dissertação

Este projeto de dissertação está dividido em sete capítulos. Cada um deles divide-se em doze secções, que por sua vez, se dividem em subsecções.

Desta forma, podemos resumir, por capítulos, os temas e conceitos que vão ser abordados.

Capítulo I, “Introdução”: Aqui é feita um breve enquadramento ao tema de forma a enquadrar o leitor para a temática. São também mencionados os objetivos e a motivação para a realização deste projeto.

Capítulo II, “Revisão Bibliográfica”: É feita uma análise do número de pessoas com deficiência visual, da sua condição social, os obstáculos enfrentados diariamente, causas e tipos de deficiência visual entre outras noções gerais e importantes para a compreensão desta dissertação. Além disto, podemos encontrar um resumo dos dispositivos eletrónicos existentes para o auxílio de pessoas com deficiência visual, com base na tecnologia utilizada- os ultrassons. Não menos importante e de forma a compreender as lacunas presentes atualmente houve a necessidade de descrever e segmentar os obstáculos enfrentados pelos cegos.

Capítulo III, “Funcionamento dos óculos”: Neste capítulo é mencionado o princípio básico da tecnologia aqui apresentada, nomeadamente os fenómenos relacionados com os ultrassons, efeito de Doppler e quais os mecanismos e princípios dos óculos.

Capítulo IV, “Determinação do desvio em frequência do sinal recebido”: É feita uma breve apresentação dos conceitos estudados para compreender os métodos propostos, nomeadamente análise espectral, métodos de super-resolução, transformada de Fourier. São ainda apresentados alguns resultados de testes realizados para avaliar se o algoritmo calculava corretamente os desvios e ainda se este era adaptável aos óculos

Capítulo V, “Análise da robustez dos métodos”: Foi feita uma análise mais exaustiva aos métodos para concluir se estes apresentavam, resultados igualmente bons quando se introduzia ruído Gaussiano branco.

Capítulo VI, “Teste ao algoritmo com sinais reais”: - Nesta secção são apresentados os testes realizados com sensores ultrassónicos e uma “Chapa Voadora”. Aqui são também expostos testes realizados para solucionar alguns problemas decorrentes, nos testes, e ainda a exposição de conceitos indispensáveis para a realização dos mesmos. Por fim, são apresentados os resultados para o método “superfreq2&3”

Capítulo VII, “Conclusões e Trabalho futuro”: - Aqui são divulgadas as conclusões finais dos resultados apresentados ao longo deste projeto. São dadas algumas sugestões do que melhorar para ultrapassar alguns problemas encontrados ao longo deste projeto e do

trabalho que ainda deve ser feito para que se possa obter o protótipo dos óculos com este novo algoritmo.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Causas, equipamentos e soluções para auxiliar as pessoas com deficiência visual

Podemos definir a deficiência visual em quatro níveis: a visão normal, défice visual moderado, défice visual grave e cegueira e são todos classificados de acordo com os valores de acuidade visual[2].

A acuidade visual define-se pela capacidade de o olho humano distinguir dois objetos distintos que estão muito próximos, em função da distância desses elementos ao olho e o campo visual refere-se à área visível quando a cabeça e os olhos estão fixos num ponto, ou seja, é toda a área que a pessoa consegue ver quando fixa o olhar num ponto [5].

Segundo a ACAPO (Associação dos Cegos e Amblíopes de Portugal) a deficiência visual define-se pela condição visual que afeta a nossa capacidade de realizar tarefas do dia-a-dia e que é agravada pelo meio em que vivemos [6]. Engloba a cegueira e a baixa visão. A cegueira é definida, em termos legais como a ausência total de visão, situações irreversíveis em que a acuidade visual seja inferior a 0,05 a um campo visual inferior a 10° em torno do ponto de fixação. A baixa visão integra duas categorias: a visão moderada (relativa a acuidades visuais entre 0,3 e 0,1) e a visão severa (relativa a acuidades visuais compreendidas entre 0,1 e 0,05) [7].

categorias da visão	Visão normal		Visão subnormal (Amblíopia)			Cego	
grau de dificuldade	nula	ligeira	moderada	grave	profunda	quase total	total
acuidade visual	>0,8<		0,3<	0,12<	0,05<	0,02<	Ausência da percepção da luz

Figura 1:Classificação da deficiência visual [7].

A cegueira consoante a altura que se manifesta pode ser de dois tipos: a congénita e/ou adquirida. Existem várias perspetivas para definir estes dois tipos de cegueira, no entanto podemos dizer que a congénita é assim designada quando nasce já com o indivíduo ou ocorre pouco depois deste nascer já a adquirida surge em qualquer outro período da vida da pessoa.

Estes dois tipos de cegueira devem ser diferenciados e abordados de forma diferente pois um indivíduo que já nasce cego, ou seja, que nunca teve percepção da luz ou do ambiente

envolvente consegue mais rapidamente se enquadrar na sociedade do que um indivíduo que adquire a cegueira durante a sua fase adulta, pois este já teve noção do ambiente envolvente e assim será mais difícil aceitar essa perda [8].

O termo ambliopia ou baixa visão significa uma reduzida capacidade visual que não melhora através da correção ótica. Existem dois tipos de ambliopia: a orgânica e a funcional, sendo que a orgânica caracteriza-se por uma lesão do globo ocular ou vias óticas e a funcional não apresenta danos orgânicos [7] [8].

Por outras palavras, a baixa visão caracteriza-se pela capacidade de perceção de formas e cores e por limitação de ver ao longe, embora com possibilidade de diferenciar e identificar objetos e materiais situados no plano próximo, a uma distância de poucos

O sistema visual é um complexo aparelho formado pelo olho, conjunto de vias nervosas e por estruturas do sistema nervoso. A função do olho é captar a luz do meio ambiente e convertê-la em impulsos nervosos, que são transmitidos através das vias óticas ao córtex visual, situado no lobo occipital [7]. Como tal, a “maior parte da informação sobre o mundo que nos rodeia é detetada pelo sistema visual. A nossa educação baseia-se largamente na informação visual e depende da nossa capacidade de ler palavras e números. A informação visual inclui dados sobre o claro e o escuro, as cores e os matizes”[9].

O surgimento de alterações nestas estruturas e no funcionamento de qualquer uma provoca défices com variadas etiologias e consequências na visão.

As causas de deficiência visual são diversas e já foram mencionadas acima, no entanto o fator idade também está intimamente relacionado pois com o avançar da idade os problemas com cataratas, diabetes e degeneração macular aumentam levando aos problemas de visão.

Segundo a OMS as principais causas de cegueira são catarata não operada, erros de refração não corrigidos e glaucoma com as seguintes percentagem, 35%, 21% e 8 %, respetivamente[2], [4].

Os meios de comunicação e a sociedade em geral utiliza o termo “invisual” para se referir aos cegos, no entanto, não é a palavra apropriada e mesmo o termo cego deve ser apenas utilizado para pessoas com cegueira, o que não é o caso da maioria dos indivíduos.

Existem diversos equipamentos de apoio como por exemplo audiolivros, amplificadores de ecrã, amplificador eletrónico (lupa TV), autodescrição, leitores de ecrã

entre outros. Todos estes apoios servem de interface entre o equipamento e o indivíduo com deficiência visual para uma melhor compreensão do ambiente envolvente.

O braille é um sistema de leitura e escrita de alto-relevo desenvolvido por Louis Braille em 1824. Este sistema de leitura e escrita é baseado na célula braille constituída por seis pontos, cada uma com duas colunas e três pontos cada, resultando 63 combinações. Inicialmente o braille foi inventado para ser praticado em papel por pontos de alto relevo. Atualmente, devido às dificuldades sentidas pelos indivíduos com dificuldades visuais este sistema internacional de leitura e escrita encontra-se também em medicamentos, produtos alimentares entre outros setores.

A navegação destes cidadãos é normalmente feita por dois principais meios: a bengala branca e o cão guia. A bengala branca é assim designada pela sua cor, com o intuito de ser vista. Atualmente já existem outras versões, nomeadamente em alumínio. Podemos encontrá-las desdobráveis de forma a armazená-la na carteira ou apenas num módulo, sendo que esta última não é a opção mais aceite por estas pessoas[3], [6].

A bengala branca já sofreu várias alterações, iniciou-se com Hoover que revolucionou a forma e estrutura da bengala após a segunda guerra mundial aquando a chegada de soldados cegos. Após vários testes com os olhos vendados e com pessoas com deficiência visual apercebeu-se que esta tinha que ser leve e movida em arco à frente da pessoa, com a bengala a tocar no lado oposto do pé que avança. *Hoover* contribuiu para que a bengala fosse ergonómica e deixasse de ser um instrumento de apoio, mas sim de orientação e exploração[10].

O cão guia é outra alternativa que pode ser complementada à bengala, no entanto, não é acessível a todos devido aos custos associados.

É conhecido e facilmente aceite por todos nós que uma pessoa que fique privada de um dos cinco sentidos tenha a capacidade de desenvolver mais e melhor os outros com o objetivo de compensar essa limitação. No caso das pessoas com deficiência visual, esta premissa é bastante assertiva pois ao interagir com uma pessoa com esta limitação apercebemo-nos que o tato e a audição estão muito mais desenvolvidos.

O tato é o sentido que auxilia o indivíduo a reconhecer os objetos do dia-a-dia e o fio condutor para incluir estas pessoas no mundo dos relacionamentos e afetos. Por isso é que a bengala é preferivelmente escolhida por estas pessoas, pois é um prolongamento das suas mãos. Outro exemplo, onde o tato é imprescindível é na perceção plantar, pois é através

desta que o indivíduo com deficiência visual recolhem informação acerca dos pavimentos, seja calçada, alcatrão, terra batida e é aqui que se torna importante a implementação de passarelas táteis para que estas pessoas consigam mais facilmente perceber o seu meio envolvente, nomeadamente a presença de uma passarela.

A audição é o outro pilar de extrema importância porque auxilia estes cidadãos a distinguir diferentes fontes sonoras. Como por exemplo, a aproximação ou afastamento de um carro para atravessar uma estrada e ainda a comunicação com os outros [11].

Existem diversas adaptações que podem facilitar muito a vida destas pessoas, tais como: sinalizações adequadas das passarelas, linhas de metro, elevadores e bens alimentares com informações em braille entre outras. No entanto, muitas delas não são cumpridas pelos cidadãos com visão normal. Muitas vezes, os cidadãos com deficiência visual deparam-se com um grande desafio causado pelo uso indevido de passeios como local de estacionamento.

Contudo, se houvesse um dispositivo eletrónico aliado à bengala que ajudasse as pessoas com incapacidade visual, fielmente, nas suas atividades diárias, de forma a terem uma completa noção da distância dos obstáculos acima do nível da cintura e que não compromettesse a audição era uma grande mais valia tanto para estas pessoas como para a nossa sociedade, no geral.

2.2 Dispositivos eletrónicos existentes

Para que estas pessoas se movam em segurança, nos últimos anos, alguns investigadores preocuparam-se em desenvolver soluções que pelo menos, pudessem minimizar os problemas colocados aquando a deslocação de um cego. Assim, foi feito um levantamento dos dispositivos/protótipos que estão ativos para ajudar as pessoas com deficiência visual. Vários equipamentos já foram desenvolvidos ou estão em desenvolvimento e utilizam tecnologia como infravermelho (IR), ultrassons, georreferenciação entre outros. São utilizados para localizar obstáculos e oferecer uma perceção mais realista e fiel do mundo exterior através dos restantes sentidos mais desenvolvidos por estas pessoas.

De acordo com a pesquisa efetuada sobre as soluções desenvolvidas para minimizar os problemas colocados pelos obstáculos foram encontrados os seguintes dispositivos.

2.2.1 Bengala de apoio a cegos – versão 2008/2009

A bengala de apoio a cegos, versão 2008 e 2009 desenvolvida por alunos do departamento de eletrónica e computadores da universidade de Aveiro rege-se pelo fenómeno dos ultrassons, ou seja, é uma bengala branca padrão à qual foram adicionados transdutores de ultrassons para com o auxílio de hardware e software apropriado dar alertas por meio de vibração e/ ou áudio.

Este projeto tem como objetivo ajudar o indivíduo portador de deficiência visual na deteção de desníveis, como buracos, subir e descer escadas, tampas de esgotos abertas ou colocadas acima do nível do resto do pavimento entre outros obstáculos presentes nas ruas e instalações públicas.

Na sua estrutura contém LEDs para a sua maior segurança, de modo a ser visto pelos outros cidadãos.

Na Figura 2, podemos observar o protótipo da última versão da bengala após realização de alguns ajustes, nomeadamente colocação varetas em fibra de carbono para reduzir a amplitude de oscilação da bengala e aumentar a capacidade lateral de reconhecimento do ambiente[7], [12].



Figura 2: Protótipo da bengala de apoio a cegos [7], [12].

As vantagens inerentes a este dispositivo são as seguintes:

- Baixo Custo;
- Deteta desníveis no solo;
- Elevada autonomia;
- Pode ser utilizada como uma bengala normal;
- Alertas de obstáculos automática;

As desvantagens são:

- Não deteta obstáculos acima da cintura;
- Robusto e de elevado peso;
- Algoritmo de deteção é um pouco lento;

2.2.2 Brain Port V100

O Brain Port V100 é um dispositivo eletrónico de apoio para pessoas com deficiência visual concebido pela empresa Wicab. A Wicab é uma empresa privada norte americana e certificada pelos seus dispositivos médicos que investiga e cria soluções para pessoas cegas ou deficientes visuais.

Este equipamento possui uma câmara de vídeo implementada em um par de óculos de sol, um controlador portátil para processamento de imagem e uma matriz de elétrodos (400) colocada na língua.

A matriz de elétrodos está ligada ao par de óculos através de um cabo flexível. As imagens capturadas pela câmara, são transmitidas em tempo real para a língua em forma de pequenos choques elétricos, cuja intensidade é proporcional à escala de cinzas. Os pixéis brancos correspondem a estimulações fortes, os pretos a ausência de estimulação e os cinzentos a estimulação média.

A câmara com 1.5 cm de diâmetro captura as imagens, envia para o dispositivo portátil que traduz essa imagem em pulsos eletrónicos e que são enviados para a matriz de elétrodos que se encontra na língua. Quando as células recetoras são estimuladas por pequenos choques elétricos enviam a informação para o córtex somatossensorial em resposta à estimulação.

O dispositivo portátil possui ainda um controlo do zoom, configurações da quantidade de luz e níveis de intensidade de choque.

Este sistema não pretende substituir a bengala branca, mas sim complementá-la, melhorando a mobilidade, segurança e qualidade de vida dos utilizadores.

Através da Figura 3 podemos ver esta tecnologia[7], [12], [13].



Figura 3: BrainPort V100 [13].

As vantagens do Brain Port V100 são as seguintes:

- Ajuda a recuperar sensações óticas por outro “caminho”;
- Utiliza uma bateria recarregável como os telemóveis;
- Possibilita a identificação de formas, tamanho e direção dos objetos e ainda números e letras;
- A informação recebida pelo utilizador é bastante clara;
- O zoom auxilia na melhor compreensão de objetos em regiões de interesse.

As desvantagens são as seguintes:

- Não dispensa do uso de uma bengala ou cão guia;
- Requer um treinamento do cérebro para conseguir interpretar as imagens sentidas de uma forma rápida;
- Custo elevado;

2.2.3 Blinput

O blinput é outra alternativa que consiste apenas em um *smartphone* e uns auriculares.

Este conceito foi desenvolvido por Erik Hals, um designer norueguês, no entanto ainda não se encontra disponível para comercializar.

Com a câmara do *smartphone* voltada para o mundo exterior, colocando o telemóvel, por exemplo, ao pescoço este equipamento dá informação através do áudio do ambiente envolvente. Para navegar no sistema apenas é necessário colocar a mão em forma de “c” a frente da câmara e percorrer as opções existentes que são lidas e ouvidas nos auriculares, movendo a mão de cima para baixo. Assim é possível encontrar lojas, correios entre outros pontos de interesse, através de Bluetooth ou identificação por radiofrequência (RFID). Nos supermercados também é possível informar o utilizador acerca do produto que têm na mão colocando apenas o código de barras em frente à câmara do *smartphone*, sendo que esta funcionalidade ainda não está disponível pois é necessária uma base de dados com todos os produtos do supermercado.

Os auriculares deste equipamento são “abertos” de maneira a não interromper a sua audição [7], [12][14].

Pela seguinte figura podemos ver o dispositivo:



Figura 4: Equipamento Blinput

As vantagens desta tecnologia são:

- Interação com máquinas de venda de bilhetes, e máquinas de *vending*;
- Possibilita obtenção de direções;
- Custos relativamente baixos, apenas necessitamos de um smartphone, auriculares e o software.

As desvantagens são:

- Não deteta obstáculo fora do alcance da câmara;
- A interação com o sistema ser feita pela audição pode trazer interferências com o ambiente exterior;
- Necessita de um bom conhecimento do software para ser uma ferramenta fácil e objetiva;

2.2.4 TACIT

O TACIT é um protótipo desenvolvido por Steve Hoefler que não se encontra à venda, apenas está disponível todo o processo para a sua construção, desde o hardware e software utilizado.

É um dispositivo háptico que determina a proximidade de objetos em ambientes complexos e confusos. O dispositivo é colocado no pulso do utilizador e contém sensores de ultrassons posicionados na frente do aparelho, com o objetivo de detetar objetos com uma distância entre 2 centímetros e 3.5 metros. As distâncias são traduzidas pela pressão sentida no pulso, que em simultâneo localiza os obstáculos.

A resposta é rápida (frações de segundos) mesmo em ambientes complexos. Os sensores de ultrassons, os motores de vibração e o microcontrolador fazem parte deste aparelho. Os sensores de ultrassons enviam pulsos ultrassónicos, estes pulsos atingem o obstáculo e são novamente devolvidos aos sensores. O microcontrolador deteta o tempo que os pulsos ultrassónicos demoram a ser devolvidos e os motores de vibração alertam através de pressões quando o obstáculo está perto. Quanto mais perto do obstáculo mais vibram[7], [15].

Na seguinte figura conseguimos ver a constituição e a sua forma real.



Figura 5: Equipamento Tacit.

Em relação as vantagens deste equipamento são as seguintes:

- Não necessita de treino por parte do utilizador;
- Autónomo – bateria de 9V;
- Não interfere com o sentido auditivo pois o utilizador é avisado por pressões;
- Custo relativamente baixo;

As desvantagens são as seguintes:

- Não deteta obstáculo nem muito abaixo nem muito acima do nível da cintura – não dispensa o uso da bengala branca;
- Sensores não são à prova de água;
- Não está comercializado;
- Motores são muito barulhentos;

2.2.5 Ultracane

O ultracane é uma bengala branca que pode detetar obstáculos ao nível do pé, nível das pernas, nível do tórax e mesmo ao nível da cabeça usando sensores de ultrassons. Esta solução deteta obstáculos até uma distância de 4 metros e até 1,5 metros acima do tórax. Os utilizadores são alertados através de vibrações emitidas junto ao punho. Os dois botões, ao vibrarem, indicam a direção do obstáculo e a frequência das vibrações permitem ao usuário reconhecer a proximidade a que estes se encontram dos obstáculos.

Esta solução pode ser personalizada, personalizando o comprimento e a ponteira da bengala conforme as necessidades do utilizador[16][17].

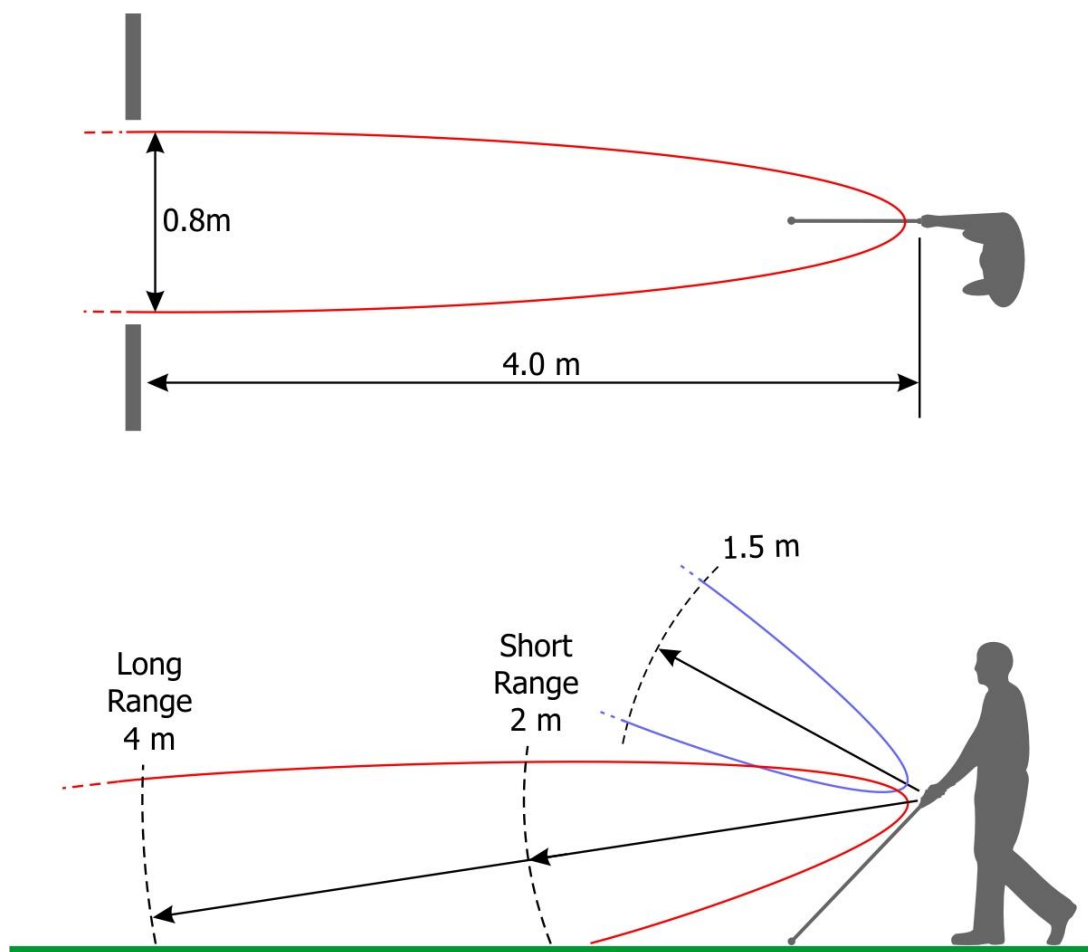


Figura 6: Distâncias na deteção dos obstáculos [17].



Figura 7: Ultracane [17].

As vantagens¹ deste equipamento são as seguintes:

- Intuitivo;
- Ergonómico;
- Deteta fielmente os obstáculos acima da cabeça;

As desvantagens¹ associadas são:

- Dispendioso;
- Má localização dos sensores²;
- Sensores não são à prova de água;
- Pesada;

2.2.6 Ray

Ray é um dispositivo eletrónico que auxilia na mobilidade do indivíduo cego em parceria com a bengala branca. Deteta obstáculos até 2.85 m e alerta o utilizador através de sinais acústicos ou táteis. Funciona com duas baterias AAA e é fácil e simples de utilizar. O utilizador pode colocar o Ray ao pescoço ou optar por trazê-lo na mão, com ele é mais fácil deslocar-se pois este deteta barreiras que a bengala branca não deteta.

Esta solução foi desenvolvida pela empresa austríaca CaraTec[16][18].

¹As vantagens e desvantagens elencadas foram retiradas de comentários e opiniões de utilizadores do ultracane.

²Segundo utilizadores do ultracane o dedo indicador e o polegar é que apresentam uma grande sensibilidade devido ao braille sendo uma melhor opção colocar os sensores perto destes dois dedos e não no topo da bengala.



Figura 8: Ray [18].

As vantagens deste equipamento são as seguintes:

- Leve;
- Fácil usar;
- Não necessita de um treino intenso;
- Acessível economicamente;

As desvantagens do Ray são:

- Pode ser pouco prático quando utilizado com uma mão, pois a outra está ocupada com a bengala;

2.2.7 SmartVision

O *SmartVision* é uma outra opção para ajudar as pessoas com deficiência visual a se deslocarem para os vários locais no seu quotidiano. Este projeto foi desenvolvido pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD).

Esta solução é um apoio à navegação das pessoas com deficiência visual. É constituído por um módulo de navegação: um GPS (Sistema de posicionamento Global ou do inglês Global Positioning System), wi-fi e um GIS (Sistema informação geográfica ou do inglês, Geographic Information System). Foi desenvolvido para planear rotas, dar informações sobre pontos de interesse (POIs), auxiliar a chegar ao destino pretendido de forma detalhada, precisa e persistente.

Todas esta ajuda é fornecida através do módulo de navegação mencionado anteriormente. Com este módulo a posição do utilizador é constantemente atualizada para que esteja disponível, em qualquer momento, a localização do indivíduo.

A aplicabilidade desta solução é diversa centralizando-se num mesmo objetivo. Como por exemplo, orientação do utilizador num local desconhecido por ele, a deteção de obstáculos onde a bengala branca não tem alcance, o reconhecimento de objetos e serviços (produtos alimentares nos supermercados e a localização dos correios, cabines telefónicas, caixas de multibanco (ATM)...). Todos estes objetos e serviços podem ser reconhecidos por imagem através de um sinal específico ou ainda através da etiqueta RFID específica para pessoas cegas. O RFID permite ao cego ter conhecimento de marcos importantes como por exemplo, o hospital ou a esquadra da polícia e, também, reconhecer produtos alimentares num supermercado. A utilização de identificadores perto destes locais e, por sua vez com códigos armazenados numa base de dados será possível alertar o utilizador.

O SmartVision é uma extensão da bengala branca e não a pretende substituir. Está equipado com um pequeno leitor de RFID, uma antena e uma câmara que é colocada junto ao tórax do utilizador.

O módulo de navegação funciona através de algoritmos, desenvolvidos na UTAD, que calculam as rotas dos seus utilizadores.

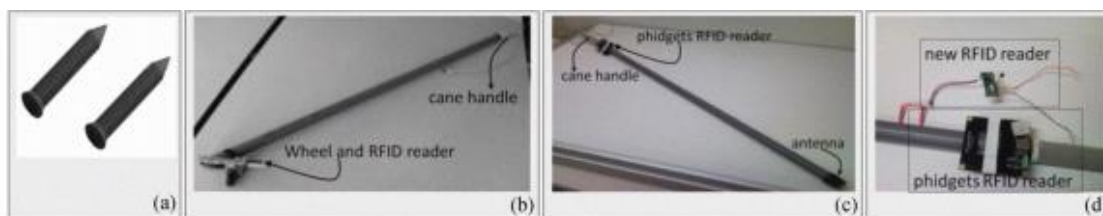


Figura 9: SmartVision.

O CE4Blind surgiu na UTAD na sequência de dois projetos: SmartVison e o Blavigator. O CE4Blind iniciou em maio de 2015 e terminou a meados de novembro de 2016. Com este projeto nasceu um protótipo que alcançou a fase de testes com o intuito de ser comercializável ou apenas para as instituições e associações ligadas a este tipo de deficiências o pudessem adquirir.

Assim, o CE4Blind é uma aplicação informática que pode ser instalada em qualquer dispositivo móvel e funciona através de quatro elementos: a bengala eletrónica, uma câmara, um *smartphone* e um auricular.

Todos estes elementos interligados entre si fornecem as informações e orientações adequadas ao utilizador de forma a este se tornar uma pessoa mais independente e facilitar nas atividades diárias do dia-a-dia como ler o jornal, o menu do restaurante, identificar um percurso ou ainda reconhecer uma embalagem no supermercado.

Além da UTAD este projeto também teve como parceiros a universidade do Texas em Austin, nos EUA e a ACAPO[19][20].

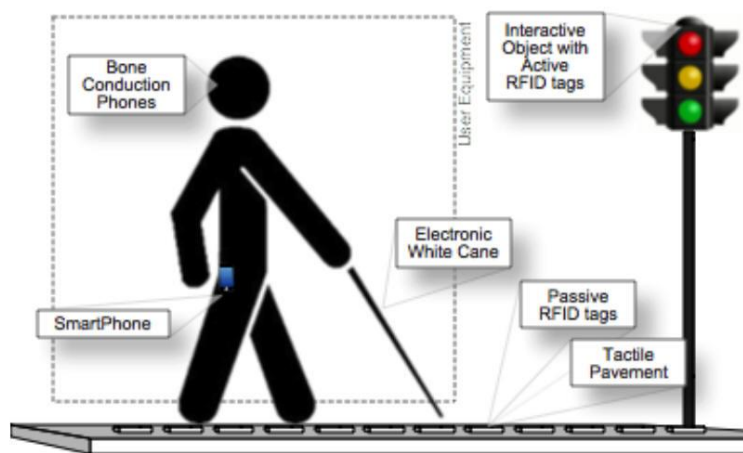


Figura 10: Evolução do SmartVison para o CE4Blind [20].

2.2.8 Blind Guide

O Blind Guide é uma outra solução desenvolvida em parceria com o instituto politécnico de Leiria (IPL) e a universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD).

Esta solução pretende complementar a deteção de obstáculos realizado pela bengala branca e ou cão guia. Esta solução é constituída por dois módulos com o intuito de alcançar vários tipos de necessidades apresentadas por pessoas com deficiência visual.

A primeira solução integra uma rede de sensores colocada na parte superior do vestuário do utilizador, libertando-o para o manuseio da bengala branca e/ou cão guia.

Já o outro módulo é constituído por bandas elásticas colocadas junto aos membros inferiores e deve ser utilizada pelas pessoas portadoras de cegueira adquirida. Estas pessoas são caracterizadas, desta forma, por adquirem cegueira numa idade mais avançada e, conseqüentemente manifestam mais dificuldade em se adaptar à bengala e/ou cão guia devido a esta limitação se ter desenvolvido em idade tardia causada, por exemplo, pelos diabetes.

A tecnologia presente no Blind Guide, como na maior parte das outras soluções existentes no mercado, é baseada em sensores de ultrassons que produzem um feedback através do som.

Assim, o Blind Guide é um conjunto de sensores de ultrassons, sem fios, estrategicamente colocados no vestuário do utilizador. Esta solução consegue detetar os obstáculos descritos anteriormente, nomeadamente obstáculos onde a parte inferior está, **mas próxima** do que a parte superior do tronco.

O hardware, presente no casaco, deteta obstáculos ao nível da cabeça e tórax enquanto as bandas elásticas contêm hardware para detetar obstáculos ao nível do pé. Estas bandas elásticas devem ser usadas nas pernas, junto aos joelhos para as pessoas que não utilizam a bengala branca ou o cão guia. Para as pessoas que utilizam a bengala branca e/ou cão guia não devem usar as bandas elásticas, no entanto os sensores têm capacidade para os detetar.

O hardware, que encontramos no casaco é para ser usado por qualquer utilizador cego.

Neste protótipo são utilizados dois sensores de ultrassons com rede *wireless* - Mica2 motes, posicionados na parte frontal dos ombros. Estes sensores de ultrassons são colocados em cada lado do casaco para que cada um detete obstáculos diferentes, cabeça e tórax. Foi também utilizada uma placa MDA10CB, programada em linguagem C, para que existe a conexão com os sensores.

Estes sensores, através dos testes elaborados, conseguem detetar obstáculos num período igual a 1 segundo. O utilizador é alertado através de uma ‘buzina’ anexada à placa e para este distinguir o tipo de obstáculo detetado pelos sensores foram programados sons e durações diferentes.

As bandas elásticas utilizam outro tipo de hardware, sensores Mica2Dot e cada nó do sensor possui um sensor de ultrassons conectado com uma placa de aquisição de dados MDA500CA, programada similarmente em C. Quando existe perigo de um obstáculo ao nível do pé o alerta é emitido através de um sinal sonoro com um atraso diferente para avisar, antecipadamente o utilizador do obstáculo ao nível do pé.

Em suma, e tendo em conta os testes efetuados com pessoas cegas pode-se concluir que o Blind Guide respondeu positivamente às expectativas tendo detetado os obstáculos enunciados.

Um dos aspetos menos positivos deste projeto foi o facto do casaco colocar os sensores do ombro na direção do chão e por vezes, estes não responderam positivamente, no entanto quando posicionados da forma correta funcionavam em pleno.

O trabalho futuro enunciado por estes investigadores é a substituição dos sensores Mica2 e Mica2Dot por circuitos impressos no casaco e ajustáveis aos diferentes tipos de corpos e ainda um mecanismo para desligar/ligar automaticamente os sensores de forma a reduzir o consumo de energia quando as pessoas cegas se encontram inativas [16].

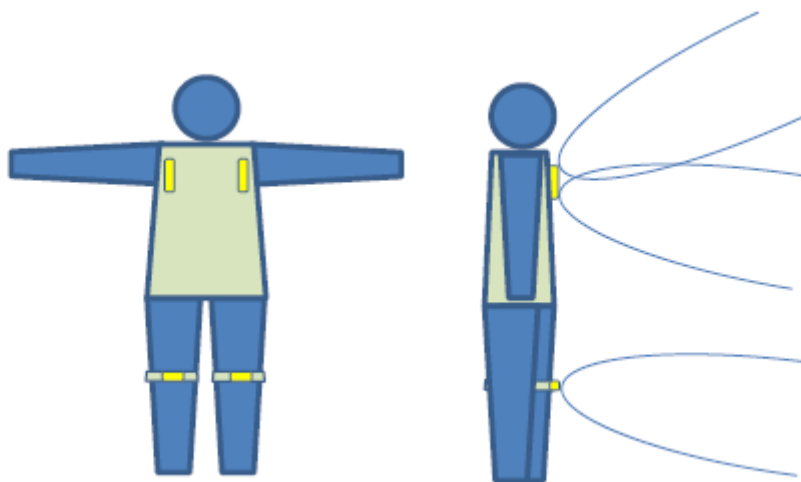


Figura 11: Protótipo do Blind Guide [16].

As vantagens desta solução são as seguintes:

- Deteta obstáculo onde a parte inferior está mais próxima que a parte superior;
- É facilmente integrado com a bengala;
- Não necessita de muita aprendizagem, é intuitivo;

As desvantagens encontradas relativamente a este protótipo são as seguintes:

- O uso de sensores no casaco e calças pode ser desconfortável;
- Sensores alteram a sua posição durante a locomoção do utilizador;
- Autonomia é limitada;

2.3 Caracterização dos obstáculos

Para que possamos desenvolver novos dispositivos eletrónicos que ajudem as pessoas com deficiência visual a serem cada vez mais independentes e autónomas é imperativo conhecer e segmentar os diferentes tipos de obstáculos que encontramos no quotidiano. Assim, a partir do ponto de vista de uma pessoa cega os obstáculos podem ser divididos nos seguintes segmentos.

- Obstáculos ao nível da cabeça;
- Obstáculos ao nível do tórax;
- Obstáculos ao nível do pé;
- Obstáculos onde a parte inferior está, **mais distante** do que a parte superior do tronco;
- Obstáculos onde a parte inferior está, **mais próxima** do que a parte superior do tronco.

Considerando estes tipos de obstáculos e fazendo uma análise aos dispositivos mencionados anteriormente podemos verificar que existe uma grande lacuna nos dispositivos eletrónicos que auxiliam perante obstáculos ao nível da cabeça, pois é do conhecimento de todos nós, que a bengala branca e o cão guia não conseguem detetar este tipo de obstáculos.

Em relação aos obstáculos ao nível da cabeça encontramos diversos no nosso dia a dia nomeadamente:

- Ramos de árvores
- Varandas superiores;
- Toldos;
- Sinais de Trânsito;

Obstáculos ao nível do tórax não são detetados pela bengala branca, mas o cão guia já os pode detetar. São exemplos:

- Mesas;
- Cadeiras;
- Motocicletas;

Obstáculos ao nível do pé são os mais vulgares e normalmente são detetados pela bengala branca e/ou cão guia. São os mais fáceis de mencionar, principalmente:

- Vasos de plantas;
- Bancos de jardim;
- Lancel do passeio;
- Buracos no chão;
- Tampas de esgotos mais altas que o pavimento;
- Bocas de água;
- Degraus;
- Entre outros.

Exemplos de obstáculos em que a parte superior do corpo está mais próxima do que a parte inferior são as varandas e obstáculos em que a parte inferior do corpo encontra, primeiramente, o obstáculo são exemplos escadas.

Sabendo todas as limitações e tipos de obstáculos que as pessoas com deficiência visual enfrentam no dia-a-dia estamos consciencializados de que tipos de dispositivos e problemas devemos desenvolver e resolver para as ajudar[16].

3 Funcionamento dos óculos

3.1 Óculos para detecção de obstáculos

Na Figura 12 podemos ver o protótipo dos óculos para cegos, capaz de detectar obstáculos usando ultrassons e que foi desenvolvido por um grupo de alunos na disciplina de projeto do curso de Engenharia Eletrônica, Telecomunicações e Informática.

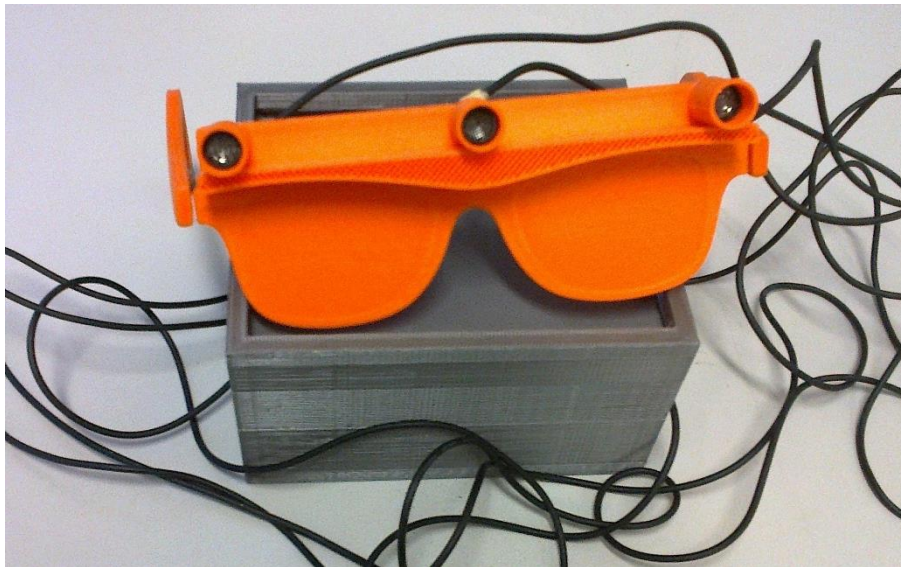


Figura 12: Protótipo dos óculos em 3D com microprocessador.

Este protótipo dispõe de um transmissor de ultrassons colocado no centro dos óculos e dois recetores colocados nos extremos. O transmissor envia de forma periódica pulsos constituídos por uma senoide de 40 kHz que são refletidos pelos obstáculos situados em frente e captados pelos recetores laterais. Os ecos recebidos são convertidos para a banda base pelo microprocessador do sistema e a envolvente é reproduzida no ouvido correspondente ao recetor que recebeu o pulso. Este protótipo permite assim ao cego tirar partido da capacidade do sistema auditivo humano para determinar o azimute de uma fonte sonora para determinar a localização do obstáculo.

Este protótipo emite de forma constante os pulsos e sempre que o cego estiver em frente a um obstáculo recebe os sinais correspondentes aos ecos mesmo que o obstáculo esteja estático e não constitua qualquer perigo. Esta característica torna os óculos inúteis para o seu uso pelos cegos no dia a dia por provocar interferência na audição de outros eventos sonoros. O ideal seria que os óculos apenas avisassem o cego quando um obstáculo vem na sua direção enquanto este caminha.

Assim, pretende-se desenvolver um algoritmo que utiliza o efeito de Doppler para alertar o utilizador apenas quando existe um obstáculo a aproximar-se.

3.2 Ultrassons

A audição humana consegue detetar um som na faixa dos 20 Hz e 20kHz, sendo que o limite superior vai diminuindo consoante a progressão de idade. Designamos as frequências abaixo dos 20 Hz infrassons e as frequências acima dos 20kHz ultrassons.

Algumas espécies animais como os morcegos, golfinhos, peixes e pássaros utilizam os ultrassons para ecolocalização com o intuito de caçar as suas presas ou para se deslocarem. No entanto, os morcegos distinguem-se dos outros animais mencionados, devido à eficiência com que realizam a ecolocalização. A ecolocalização é a capacidade de detetar a distância e/ou posição a que se encontra um obstáculo através da emissão de ondas ultrassónicas, no ar ou água, e analisando o tempo gasto entre o som emitido e a reflexão do mesmo no alvo, voltando para a fonte de emissão em forma de eco. [21]

Assim, é possível para os morcegos determinar a velocidade relativa da presa e realizar a sua identificação. Sem esta característica estes animais teriam bastante dificuldade em caçar e em se deslocar, pois, os morcegos tem uma baixa visão. Já para os golfinhos e baleias utilizam a ecolocalização para a navegação e deteção de presas em águas turvas.

Para a produção de ultrassons podemos recorrer ao conceito de piezoelectricidade. A piezoelectricidade é a produção de cargas elétricas superficiais, devido a pressão ou tração, em diversos cristais, como o quartzo e a turmalina.

No efeito piezoelétrico as deformações variam com a frequência do campo, quando a frequência é igual à do cristal (o que depende da sua forma e do seu tamanho), obtém-se um efeito de ressonância, gerando ultrassons (gama correspondente 20Hz e 200MHz). [21]



Figura 13: Gama de frequências do som. [22]

3.3 Efeito de Doppler e ondas sonoras

O efeito de Doppler foi descoberto em 1842 pelo físico austríaco Christian Doppler que verificou a variação da frequência do som ouvido quando uma fonte sonora se desloca em relação a um observador. Esta variação foi descoberta independentemente por Fizeau (*efeito Doppler ou efeito Doppler- Fizeau*). [5]

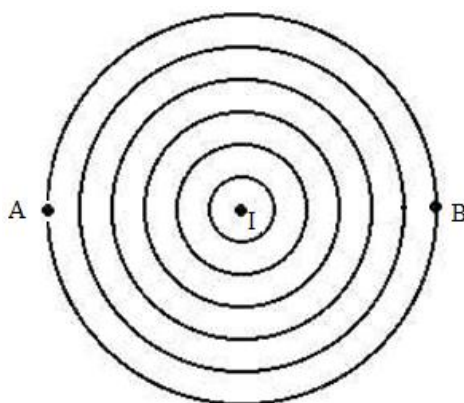
As aplicações deste efeito físico são variadas desde a medicina (ecografias e ecocardiograma), meteorologia, radares que a polícia utiliza para detetar a velocidade a que o condutor se desloca, ou explosões sónicas são tudo exemplos do efeito de Doppler. Outra aplicação deste efeito é a determinação da velocidade relativa do obstáculo/recetor. [9]

Para perceber o efeito de Doppler de uma forma simples e clara consideramos uma fonte que emite uma onda acústica e um observador/recetor/obstáculo que recebe essa mesma onda, no entanto a fonte e o recetor podem descrever uma destas situações:

1. Fonte parada, observador aproximar-se da fonte.
2. Fonte parada, observador afastar-se da fonte.
3. Observador parado, fonte aproximar-se do observador.
4. Observador parado, fonte afastar-se do observador.

Desta forma, podemos dizer que o efeito de Doppler é a mudança aparente de frequência de uma onda sonora devido ao movimento relativo da fonte e/ou recetor.

Se considerarmos um inseto (fonte), parado, no meio de uma poça de água, os distúrbios, agitação provocados por ele seriam sentidos da mesma forma no ponto A e no ponto B, ou seja, as perturbações (“círculos”) atingem a extremidade da poça de água à mesma frequência, como mostra a seguinte figura:



$$f_A = f_B$$

Figura 14: Inseto parado em relação aos observadores A e B.

Nota: como as perturbações estão a serem produzidas no mesmo meio estas viajam à mesma velocidade em todas as direções.

Outra situação, importante de analisar, é quando o inseto se move em direção ao observador B, o que acontece neste caso é o seguinte: o inseto ao mover-se vai produzir perturbações que vão estar mais próximas do observador B e mais distantes do observador A, assim cada perturbação têm um comprimento de onda (λ) superior, para percorrer, antes de alcançar o observador A. Em relação ao observador B o λ é menor e, conseqüentemente o tempo também.

O observador B observa que a frequência de chegada das perturbações é maior do que a frequência das perturbações emitidas pelo inseto.

Se considerarmos que o inseto produz 2 agitações/segundo o observador B observa uma frequência superior a 2 agitações /segundo e o observador A, inferior a 2 agitações/segundo.

As frentes das ondas acústicas sofrem compressão, diminuindo o seu comprimento de onda e, conseqüentemente a frequência aumenta.

Atrás da fonte o processo é o oposto, com o alongamento das ondas sonoras há uma diminuição da frequência.

$$\begin{array}{l} f_A < 2 \text{ Hz} \\ f_B > 2 \text{ Hz} \end{array}$$

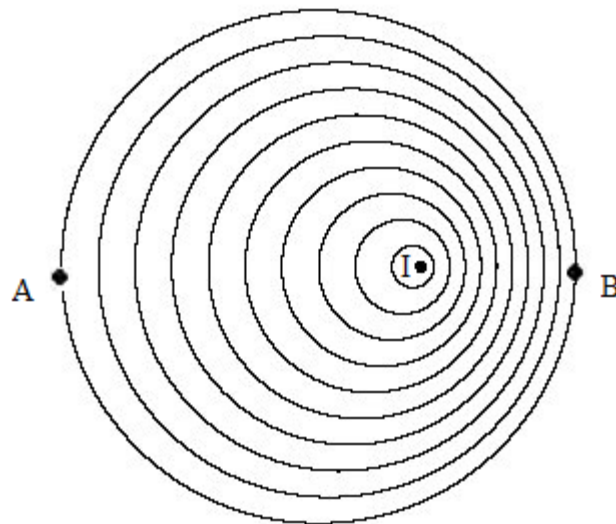


Figura 15: Inseto se movendo em relação ao observador B.

É importante salientar que a frequência da fonte não muda, apenas o observador observa uma frequência maior ou menor, pois as agitações consecutivas estão a uma distância menor ou maior.

É claro que este exemplo mencionado com a poça de água se pode transferir para um som produzido por um autofalante que quando se encontra estático a frequência ouvida pelos observadores/obstáculos estáticos é a mesma, mas quando o obstáculo se move em relação à fonte a frequência com que os pulsos são recebidos é maior como podemos analisar mais à frente.

Toda esta análise é comprovada pela seguinte fórmula, onde a frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda.

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

Onde,

f – frequência da onda
λ – comprimento de onda;
v – velocidade da onda no meio;

Uma onda sonora ou acústica é uma onda longitudinal onde a perturbação ocorre na mesma direção que a direção de deslocação da energia, resultando em regiões de compressão (aumento de densidade) e rarefação (diminuição de densidade).[22]

A velocidade a que as ondas se propagam é proporcional à raiz quadrada da razão entre a elasticidade e densidade do material que atravessam, bem como da temperatura ambiente. Durante o meu projeto o meio de propagação das ondas é apenas o ar, estando o seu valor tabelado para 343 m/s a uma temperatura ambiente igual a 25°C[12]

Quando a onda sonora, ou outro tipo de onda, interagem com o meio ambiente quatro fenómenos característicos das ondas acontecem, transmissão ou refração, absorção, reflexão e difração[22].

Para analisar o efeito de Doppler é importante arbitrar o sentido da velocidade da fonte e do observador para, posteriormente efetuarmos uma análise clara e objetiva.

Assim, considerando uma fonte e um recetor é possível demonstrar o efeito de Doppler pela seguinte Figura 16.

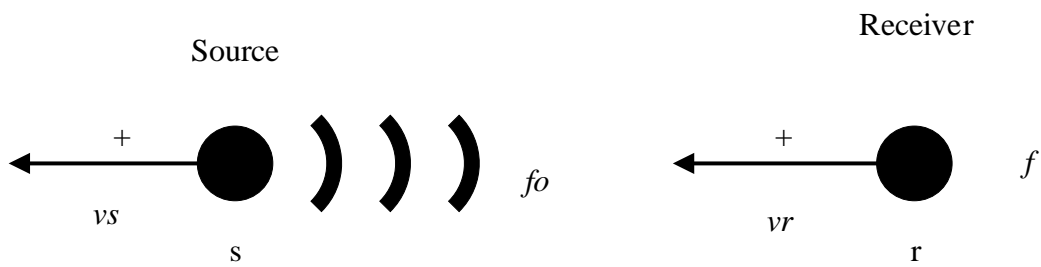


Figura 16: Esquema do efeito de Doppler com uma fonte e um recetor.

A fórmula que representa o esboçado na Figura 16 é a equação (2).

$$f = \left(\frac{c + v_r}{c + v_s} \right) \times f_0 \quad (2)$$

Onde,

f_0 – frequência emitida;
 f – frequência observada;
 c – velocidade do som no ar;
 v_s – velocidade da fonte;
 v_r – velocidade do recetor;

Analisando a Figura 16 é possível compreender que quando o recetor se move em relação à fonte, ou seja, quando este se aproxima dela a velocidade tem sentido positivo, no entanto, para o caso da fonte a velocidade é positiva quando esta se afasta do recetor.

Se considerarmos o caso de um autofalante que emite um sinal sonoro e encontra um obstáculo o raciocínio é exatamente o mesmo e pode ser representado pelas seguintes figuras:

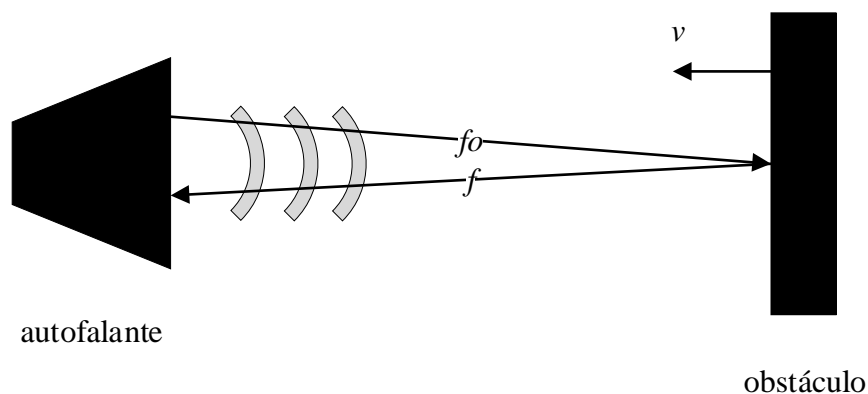


Figura 17: Esquema do efeito de Doppler entre um autofalante e um obstáculo.

O que está representado na Figura 17 é equivalente ao representado na Figura 18 como podemos ver seguidamente:



Figura 18: Esquema equivalente ao da figura 18.

Através da Figura 18 é possível retirar a fórmula que é frequentemente utilizada durante este projeto e nos indica os desvios de frequência esperados para os testes efetuados.

$$f = \frac{c + 0}{c + v_s} \times f_0 \quad (3)$$

Para o caso da Figura 18, se considerarmos que a fonte se desloca a -6 m/s , pois a fonte aproxima-se do receptor, portanto tem sentido negativo é possível determinar o desvio e se a frequência observada é efetivamente maior, como o esperado.

$$f = \left(\frac{c + 0}{c + (-6)} \right) \times 40000 = \left(\frac{343}{337} \right) \times 40000 = 40712 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Perante a equação (3.1) é possível concluir que a frequência observada é superior à frequência emitida como o previsto.

O representado na Figura 18 assemelha-se ao cenário elaborado para a experiência com a “Chapa Voadora”. Nesta situação as ondas refletidas são equivalentes a ter uma fonte no obstáculo. Por outras palavras, as ondas refletidas são a “fonte verdadeira”. Portanto, a fonte aproxima-se do receptor com velocidade negativa.

Na utilização dos óculos é desejável que o cego consiga detetar obstáculos estáticos a aproximar-se numa gama de distância mínima de 50 cm e máxima de 2 metros. Se o utilizador viajar a uma velocidade mínima de 0.5m/s e máxima de 6m/s os desvios teóricos encontrados são respetivamente 58 Hz e 700 Hz, como podemos comprovar no capítulo 6.

Para contemplar distâncias menores ou iguais a 0.5m é necessário enviar os pulsos de ultrassons curtos e com pouca energia para que os ecos não se sobreponham ao *cross-talk*.

Por outro lado, colocar os pulsos transmitidos (40kHz) em banda base e, posterior decimação resulta na diminuição do número de amostras. Estas podem não serem suficientes para determinar o desvio de frequência.

Logo, é crucial utilizar métodos de super-resolução e ainda a FFT interpolada para que se possa avaliar quais os métodos que conseguem estimar, com alguma precisão os desvios de frequência.

Consoante o valor encontrado para o desvio, podemos afirmar que existiu ou não efeito de Doppler. Se o valor for diferente de zero podemos calcular a distância a que o obstáculo se encontrava e a que velocidade viajava. Caso o desvio seja igual a zero é evidente que não houve efeito de Doppler, concluindo apenas, que não existe nenhum obstáculo a aproximar-se.

Todas estas considerações podem ser analisadas no capítulo 6.

3.4 Medição de distâncias utilizando ultrassons.

Qualquer material, (líquido, sólido ou gasoso) reflete, transmite, absorve e difrata parte da onda incidente. A porção de onda refletida, mencionado anteriormente, é designada de eco e é através dela que calculamos distâncias. Este mecanismo é utilizado no sonar[12]

Se recorrermos ao uso de transdutores piezoelétricos cuja sua frequência de ressonância se encontra na faixa dos ultrassons é possível emitir e receber ondas desta natureza. Através da seguinte figura podemos observar o comportamento gerado pela produção de uma onda de ultrassom. [21]

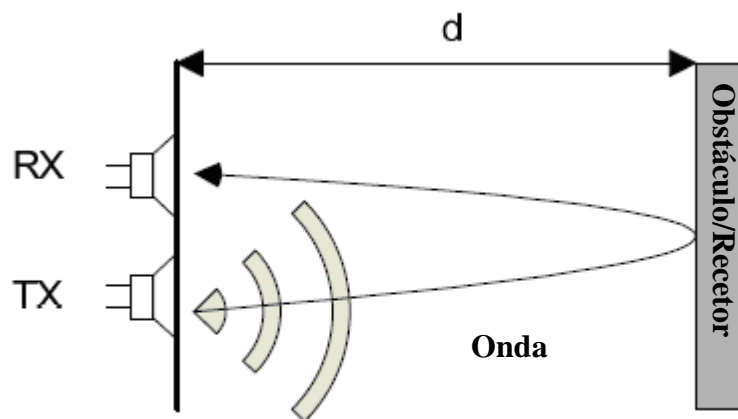


Figura 19: Reflexão do ultrassom [22].

Visualizando a Figura 19 que para calcular a distância a que o obstáculo se encontra é necessário determinar o tempo que a onda demora a viajar e a sua velocidade.

É importante salientar que é necessário ter em conta que o tempo de voo da onda contempla a ida e volta pelo que a distância a que o obstáculo se encontra é determinada dividindo por dois o valor de d .

$$d = \frac{v \times t}{2} \quad (4)$$

Onde,

v – *velocidade de propagação do som no ar;*
 d – *distância a que se encontra o objeto;*
 t – *tempo de voo;*

Todos estes fenómenos e conceitos descritos são bastante intuitivos e de simples compreensão, no entanto, existem algumas dificuldades referentes a este método.

Como mencionado anteriormente, quando uma onda interage com o meio ambiente ocorrem diversos fenómenos ondulatórios, nomeadamente a quantidade de energia perdida na reflexão associado à natural atenuação da onda no ar, pode resultar na eliminação total do eco. Superfícies irregulares produzem reflexões em inúmeras direções, produzindo vários ecos que, devido a interferências destrutivas, se podem cancelar mutuamente no recetor.[12]

O acoplamento direto existente entre o recetor e o transmissor interferem na identificação dos ecos podendo acreditar que estamos perante um eco, e é apenas acoplamento direto. Algumas técnicas e soluções de processamento de sinal e de hardware, respetivamente podem ajudar a combater este problema.

4 Determinação do desvio em frequência do sinal recebido.

4.1 Análise espectral simples e interpolação

Para a construção dos óculos com efeito de doppler é necessário analisar os ecos recebidos com o intuito de determinar os desvios de frequência.

Assim, uma das técnicas estudadas para determinar a frequência de um sinal recebido foi a análise espectral simples.

Para isto foi imperativo recordar alguns conceitos, nomeadamente a análise de Fourier pois é através desta que observamos o comportamento dos sinais no domínio da frequência.

A análise de Fourier permite decompor um sinal nas suas componentes em frequência. Na presença de um sinal periódico utilizamos a série de Fourier para decompor o sinal em exponenciais complexas, já em sinais não periódicos utilizamos a transformada de Fourier.

Considerando um sinal não periódico de tempo contínuo, como por exemplo um impulso retangular podemos imprimir esse sinal no domínio da frequência através da transformada de Fourier. O resultado dessa transformação corresponde a um outro sinal, no domínio da frequência, designado de sinc.

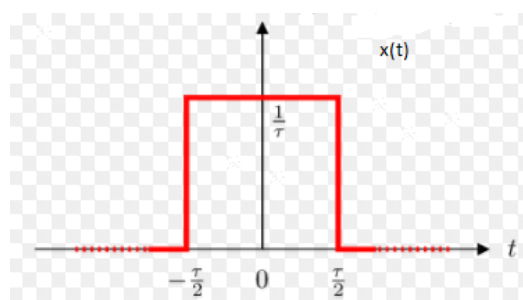


Figura 20: Impulso retangular no domínio do tempo.

A equação (5) designada por equação de análise, representa esta transformação e é apresentada e desenvolvida seguidamente.

$$X(jw) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \times e^{-jw t} dt \quad (5)$$

$$X(j\omega) = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \frac{1}{\tau} \times e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{\tau} \times \left(-\frac{1}{j2\pi f t} \right) \times [e^{-j2\pi f t}]_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \quad (5.1)$$

$$= -\frac{1}{j2\pi f \tau} [e^{-j2\pi f \frac{\tau}{2}} - e^{j2\pi f \frac{\tau}{2}}] \quad (5.2)$$

$$= \frac{1}{\pi f \tau} \left[\frac{e^{j\pi f \tau} - e^{-j\pi f \tau}}{2j} \right] \quad (5.3)$$

$$= \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau} = \text{sinc}(\pi f \tau) \quad (5.4)$$

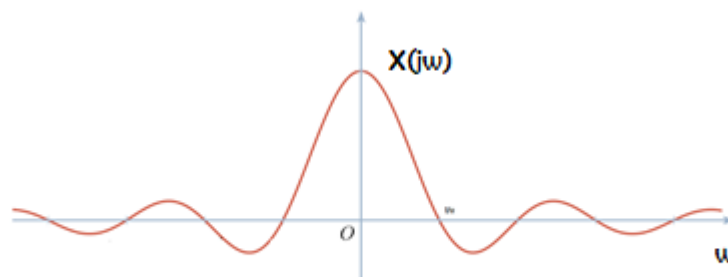


Figura 21: Sinal no domínio da frequência - sinc.

Da mesma forma que transformamos o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência também podemos reverter o processo utilizando a seguinte equação (6) de análise:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (6)$$

Assim, podemos concluir que a transformada de Fourier é uma função de $j\omega$ que generaliza a análise de Fourier.

Com a compreensão destes conceitos podemos então apresentar o método de análise de espectral simples que compreende os seguintes passos:

1. Gerar um sinal de entrada;
2. Calcular a FFT (*Fast Fourier Transform*) correspondente;
3. Calcular o módulo do espectro;
4. Determinar o máximo da forma de onda centrada na frequência definida inicialmente através do comando 'max' do MATLAB. É com o índice que

determinamos a frequência do sinal emitido sendo apenas necessário converter o índice para Hz.

Os índices contemplam o eixo das abcissas que corresponde à frequência, no entanto depende do tamanho do sinal criado por nós, neste caso, $N = 256$ amostras. Assim, o eixo das abcissas compreende valores entre 0 e 255. Estes valores são comumente designados por *bins* e são facilmente convertidos para hertz da seguinte forma:

$$f = idx \times \frac{Fa}{N} \quad (7)$$

Fa – frequência de amostragem
N – números de amostras
idx – índice de frequência
f – frequência em Hertz

A análise efetuada para a interpolação foi a FFT interpolada, ou seja, aplicamos a transformada de Fourier interpolada.

A FFT interpolada significa utilizar um maior número de amostras do que as amostras geradas pelo sinal inicial.

A expressão matemática que descreve a FFT interpolada é a seguinte[23]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, k \in [0 \dots N - 1] \quad (8)$$

$$x'(n) = [x(n) \ 0 \dots 0], M > N \quad (8.1)$$

$$X'(k) = \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) \ 0 \dots 0] e^{-j\frac{2\pi}{M}nk} \quad (8.2)$$

$$X'(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{M}nk}, k \in [0, M - 1] \quad (8.3)$$

Após o cálculo da FFT interpolada é feito o mesmo procedimento: com o comando ‘max’ do MATLAB retiramos o valor máximo e o seu índice correspondente e, posteriormente é feita a conversão para Hz. Neste caso e como mencionado anteriormente a resolução é calculada da seguinte forma:

$$Resolução = \frac{Fa}{Nfft} = \frac{44100}{2^{15}} = 1.3458 \text{ Hz} \quad (9)$$

O sinal de entrada foi um cosseno com as seguintes características:

$$x = \cos(2\pi \times f_0 \times t), \quad f_0 = (F + \Delta f) \times Fa/N$$

O valor atribuído a F foi de 100 e Δf é a frequência fracionária do sinal que varia de 0 até 1 com um passo de 0.1.

A análise foi realizada utilizando a FFT simples e a FFT interpolada como podemos ver pelos seguintes gráficos para podermos avaliar as diferenças e vantagens da utilização da transformada de Fourier interpolada.

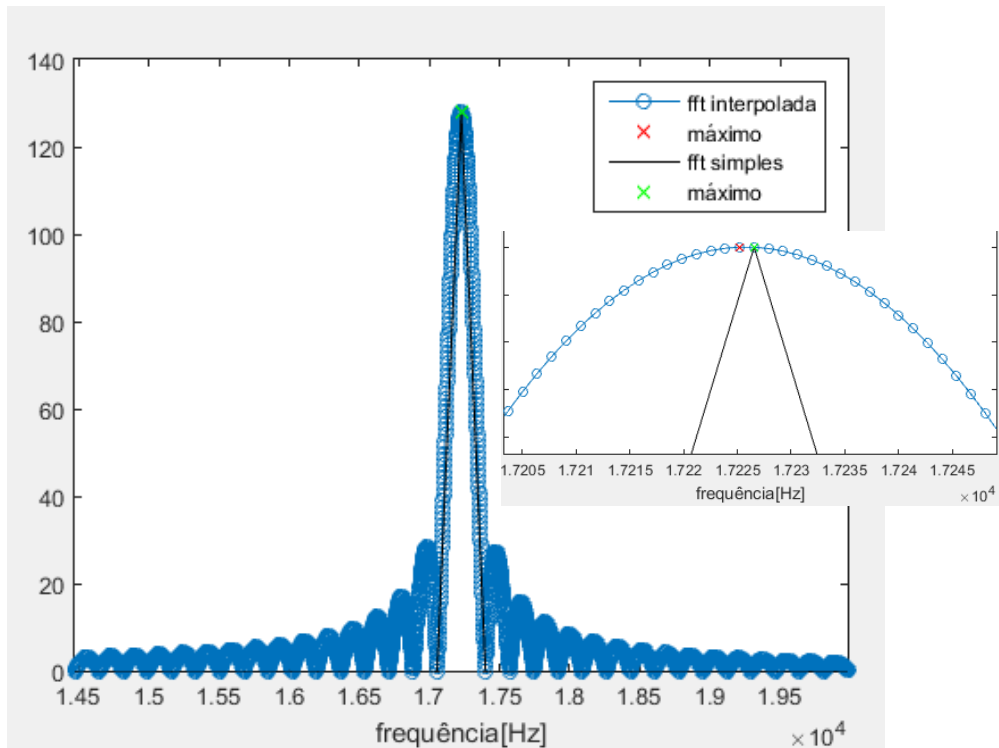


Figura 22: Análise no domínio da frequência para F=100 Hz.

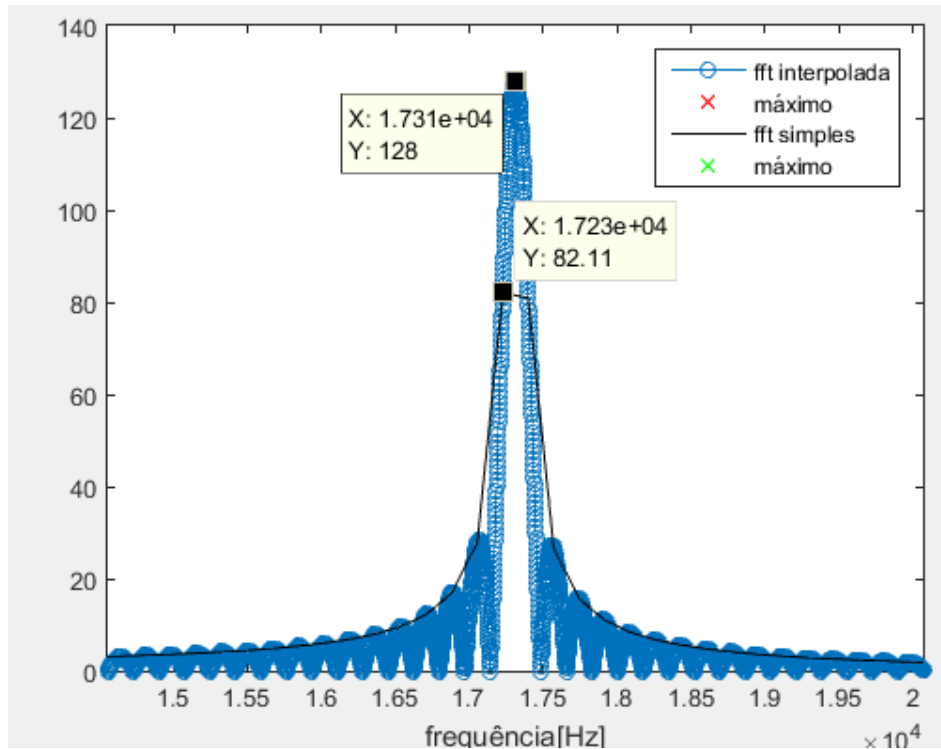


Figura 23: Análise no domínio da frequência para F=100.5 Hz

Pela observação dos gráficos podemos verificar que a FFT simples apresenta uma forma de onda ‘desenhada’ de forma grosseira não tendo tanta precisão aquando a determinação do seu máximo. Pelo contrário, a FFT interpolada mostra a forma de onda ‘desenhada’ com melhor resolução, ou seja, menos espaçamento entre amostras alcançando melhores resultados para a determinação do seu valor máximo.

Este facto é comprovado aquando o cálculo da resolução da FFT. Para a FFT simples e interpolada temos as seguintes resoluções, respetivamente:

$$Resolução = \frac{Fa}{N} = \frac{44100}{256} = 172.2656 \text{ Hz} \quad (10)$$

$$Resolução = \frac{Fa}{Nfft} = \frac{44100}{2^{15}} = 1.3458 \text{ Hz} \quad (11)$$

Desta forma, podemos afirmar que é uma versão melhorada da análise espectral simples.

Através dos seguintes gráficos podemos verificar qual foi o erro relativo para cada uma das FFT consoante a frequência dada, concluindo qual destes métodos é o melhor.

Para o erro relativo foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\text{erro relativo}(\%) = \left| \frac{\text{valor exato} - \text{valor estimado}}{\text{valor exato}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

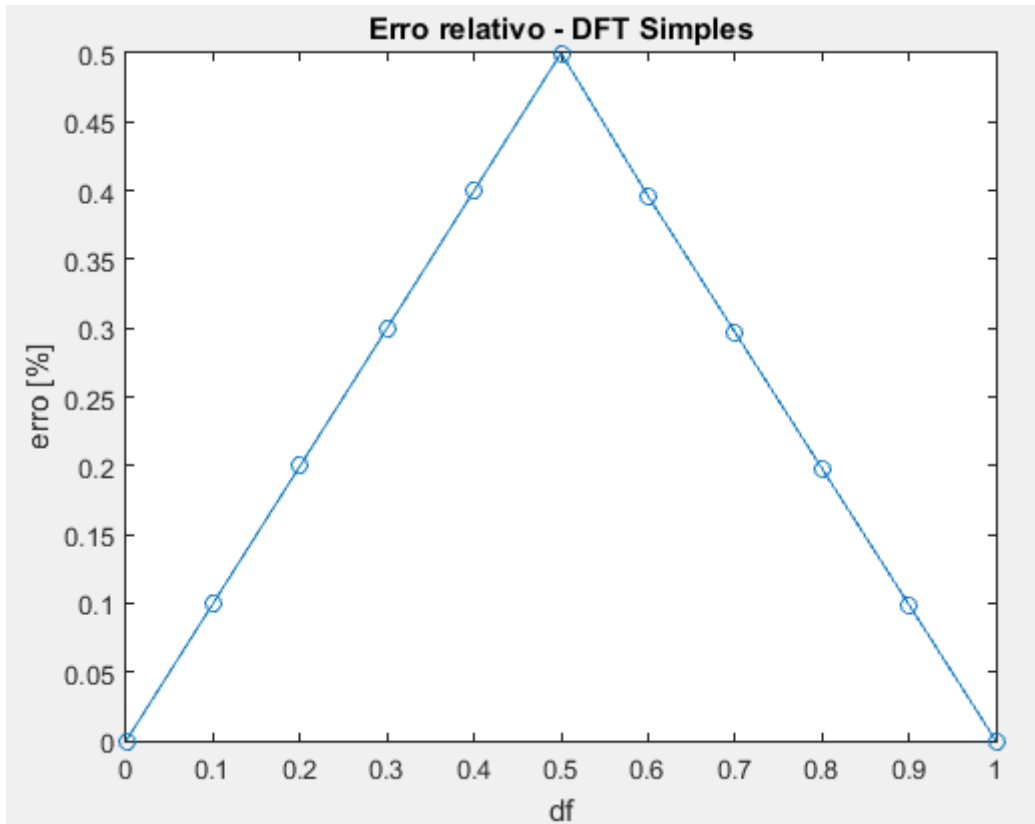


Figura 24: Erro relativo, em porcentagem, para FFT simples.

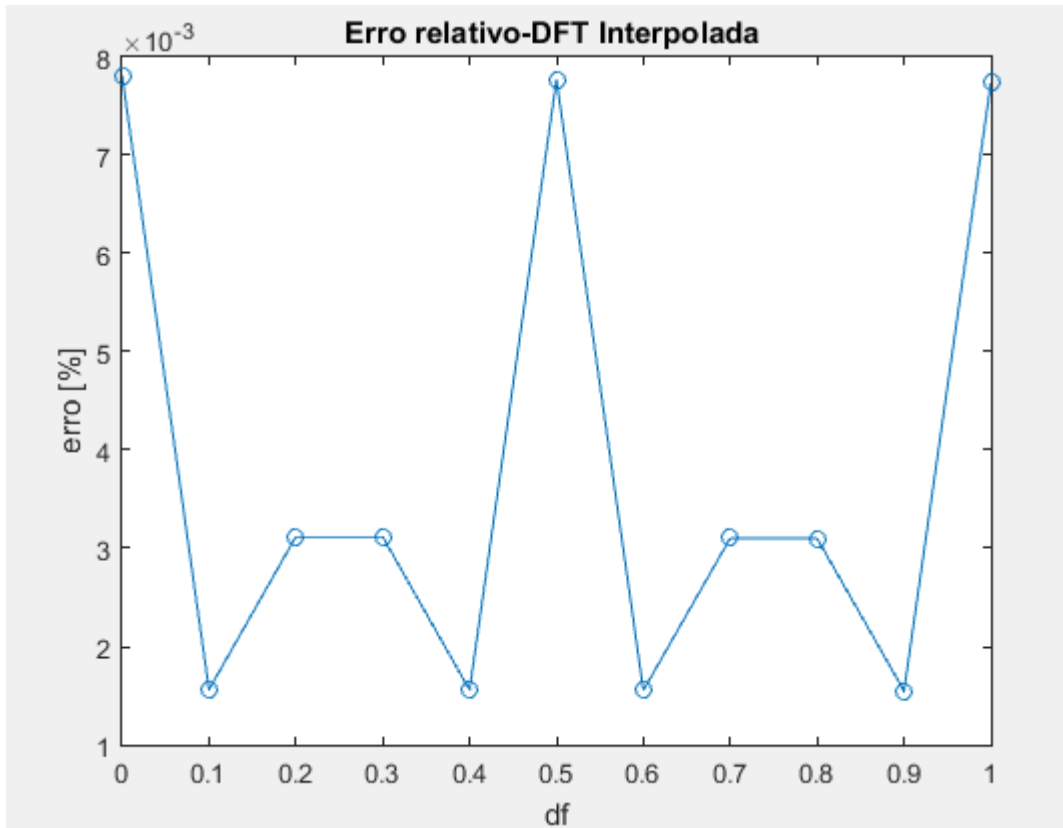


Figura 25: Erro relativo, em percentagem, para FFT interpolada.

Pelos seguintes gráficos podemos verificar que em ambos os gráficos o erro é periódico, no entanto para a FFT interpolada o erro relativo máximo é de 0.0078% enquanto que na FFT simples o erro relativo máximo é de 0.5%.

É possível concluir que para a FFT simples o erro é máximo quando parte fracionária da frequência é igual a 0.5 diminuindo, progressivamente, quando se aproxima dos extremos. Já para a FFT interpolada o valor máximo do erro é exibido para os extremos e para frequência fracionária de 0.5. apresentando melhores resultados para as restantes frequências.

Contudo, podemos afirmar que a FFT interpolada é capaz de estimar frequências com parte fracionária mais fielmente, ou seja, com um erro relativo muito inferior ao da FFT simples.

As principais diferenças entre estes dois métodos é multiplicação do sinal de entrada por uma janela *hamming* - gerada pelo MATLAB e o número de amostras utilizadas para o cálculo da FFT.

A aplicação de uma janela ao sinal de entrada diminui as discontinuidades que podem surgir se o sinal de entrada não apresentar um número inteiro de períodos. O facto de

não existir um número inteiro de períodos origina descontinuidades que são vistas como componentes de alta frequência no espectro de frequências. O espectro da FFT obtido, não vai ser o espectro correspondente ao sinal original, mas uma versão distorcida devido às descontinuidades.

Quando multiplicamos uma janela de comprimento finito pelo sinal vamos suavizar essas descontinuidades pois a janela tem um comportamento uniforme e gradual contrariando assim, transições abruptas no sinal.

Existem diversos tipos de janelas temporais consoante o sinal que pretendemos trabalhar, no entanto para este projeto utilizamos uma janela *hamming* que apresenta um formato senoidal com um lóbulo principal (pico) amplo e lóbulos laterais pequenos aproximando-se gradualmente do valor zero, mas sem nunca o atingir verdadeiramente.

É importante lembrar que se pretendermos uma boa resolução na frequência a janela temporal deve ser ‘curta’ no tempo, contrariamente, uma baixa resolução na frequência apela a uma janela alargada no tempo[24].

4.2 Método de Super-Resolução

4.2.1 Algoritmo de regra única

Para determinar com alguma precisão a frequência emitida por determinado sinal de áudio foi necessário recorrer a um método, reconhecido geralmente por método de super-resolução.

Neste artigo podemos perceber que estimar parâmetros de sinais sinusoidais é intensamente importante e tem sido muito estudado nas últimas décadas devido à sua importância em situações práticas. Exemplos de aplicações são a estimativa de direção de chegada em radar e sonar, processamento de áudio, fala e imagem[25].

Assim, dado um sinal discreto, descrito por:

$$x(n) = A \times \sin \left[\frac{2\pi}{N} (l + \Delta l)n + \theta \right] + r(n) \quad (13)$$

<p><i>A</i> – Magnitude da sinusóide ; <i>l</i> – parte inteira da frequência da sinusóide; <i>Δl</i> – parte fracionária da sinusóide ; <i>N</i> – periodicidade ; <i>θ</i> – fase da sinusóide; <i>r(n)</i> – ruído aditivo;</p>
--

Podemos estimar os parâmetros, l e Δl . Para isso é necessário multiplicar o sinal, $x(n)$, com a janela de *hanning* – $h(n)$ dada pela seguinte expressão:

$$h(n) = \sin\left(\left(\frac{\pi}{N}\right) \times \left(n + \frac{1}{2}\right)\right), 0 \leq n \leq N - 1 \quad (14)$$

Seguidamente, multiplicamos o sinal com a janela, no domínio da frequência através da ODFT (Odd Discrete Fourier Transform). A odd-DFT é a transformada de Fourier Discreta Ímpar e apenas difere da DFT (Discrete Fourier Transform) devido à sequência de frequências se encontrarem deslocadas de $\frac{\pi}{N}$.

A Odd-DFT é vulgarmente utilizada para aplicações de áudio, onde a complexidade do estimador são fatores importantes a ter em conta[26].

Similarmente à transformada de Fourier, também é possível definir este tipo de DFT que nos oferece a mesma informação, diferenciando-se apenas em alguns pontos.

Seguidamente é apresentada a sua definição matemática:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x e^{-j\frac{2\pi}{N}(K+b)(n+a)}, \text{ considerando } b = \frac{1}{2} \text{ e } a = 0. \quad (15)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x e^{-j\frac{2\pi}{N}(K+\frac{1}{2})n} \quad (15.1)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}kn + \frac{2\pi}{N} \times \frac{1}{2}n\right)} \quad (15.2)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x'(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \mathbf{DFT} \mathbf{x}'(n) \quad (15.3)$$

$$x'(n) = x(n) e^{-j\frac{\pi}{N}n} \quad (15.4)$$

Perante esta expressão, apresentada abaixo é possível estimar a frequência (inteira e fracionária), recorrendo as sub-bandas:

$$X_0(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) \times x(n) e^{-j \times \frac{2\pi}{N} \times (k+\frac{1}{2})n} \quad (16)$$

Extraímos o valor do inteiro l , através da função *max* do MATLAB, visto que, a magnitude do sinal na sub-banda $k = l$ é um máximo local. A parte fracionária, Δl , é

estimada a partir dos coeficientes da ODFT, ou seja, através das amplitudes do sinal nas sub-bandas em torno do máximo local $k = l + 1$ e $k = l - 1$.

As seguintes fórmulas mostram a relação da magnitude dos coeficientes espectrais ODFT em sub-bandas $k = l + 1$ e $k = l - 1$.

$$R = \frac{|X_0(l-1)|}{|X_0(l+1)|} \quad (17)$$

$$\Delta l = \frac{3}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{1 + 2 \times (R^{\frac{1}{G}})} \right), 0.0 < \Delta l < 1.0 \quad (18)$$

O valor de G é uma constante de valor igual a 27.4/20.0 de forma a otimizar o erro de estimação no sentido do minmax, quando $0.0 < \Delta l < 1.0$.

4.2.2 Algoritmo 2 e 3 – “Método de três regras”

A segunda e terceira regra é implementada aquando a adição de ruído Gaussiano aditivo pois a primeira técnica apresentou alguma fragilidade na presença de ruído. Assim, e para contrariar a influência do ruído é necessário utilizar as três sub-bandas espectrais $k = l - 1$, $k = l$ e $k = l + 1$, que estão inseridas no lóbulo principal.

Para utilizar este algoritmo é necessário implementar, primeiramente, o algoritmo de regra única e extrair o valor de Δl . Posteriormente, é utilizado esse resultado para introduzir duas novas fórmulas, consoante o valor de Δl .

Portanto, se $\Delta l \geq 0.5$, é necessário relacionar os três coeficientes da ODFT, $|X_0(l+1)|$, $|X_0(l)|$ e $|X_0(l-1)|$ e podemos concluir que a relação das magnitudes para $0.0 \leq \Delta l \leq 0.5$ é a seguinte:

$$Q = \frac{|X_0(l-1)|}{|X_0(l)|} \quad (19)$$

$$\Delta l = \frac{3}{\pi} \times \tan^{-1} \left(\sqrt{3} \times \frac{1 - Q^{1/F}}{1 + Q^{1/F}} \right) \quad (20)$$

Já para $0.5 \leq \Delta l \leq 1.0$ a fórmula de estimativa da frequência e a sua relação das magnitudes é obtida de seguinte forma:

$$S = \frac{|X_0(l+1)|}{|X_0(l)|} \quad (21)$$

$$\Delta l = \frac{3}{\pi} \times \tan^{-1} \left(\sqrt{3} \times \frac{S^{1/H}}{1 + Q^{1/H}} \right) \quad (22)$$

Os valores das constantes F e H são determinados de forma a minimizar o erro de estimação, nomeadamente $F=H=32.75/20.0$.

Para avaliar o método de regra única e o método de três regras foi efetuada uma análise semelhante à realizada para a análise espectral simples e interpolada.

Assim, foi gerado um sinal x da seguinte forma:

$$x = \cos \left(2\pi \times \frac{fk}{N} * n \right) \quad (23)$$

N – número de amostras;

n – vetor contém amostras (0: $N - 1$);

f_k – vetor de frequências que varia de 0 até $\frac{N}{2}$ com um passo de 0.1;

Seguidamente para cada valor de frequência real (f_k) foram estimados os valores de frequência, concluindo que os algoritmos funcionavam como o esperado, isto é, com um erro associado não superior a 6×10^{-4} , os gráficos da Figura 26 e da Figura 27 mostram o erro absoluto, de cada método para as diferentes frequências.

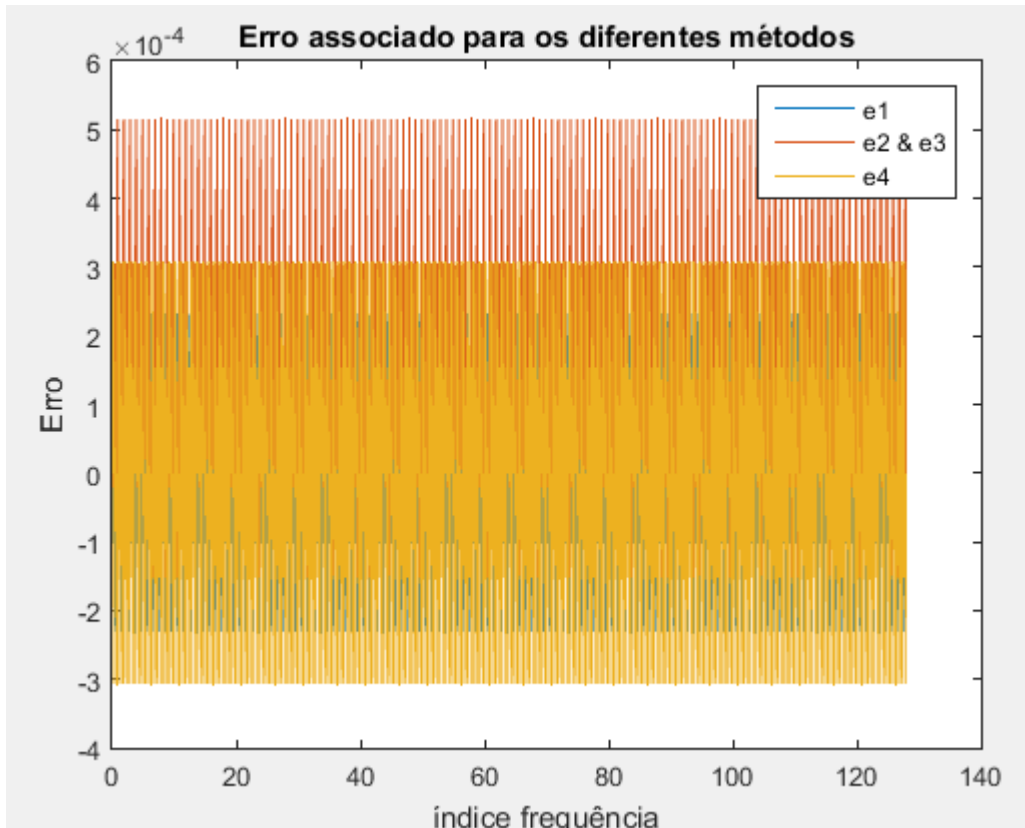


Figura 26: Erro associado a cada método.

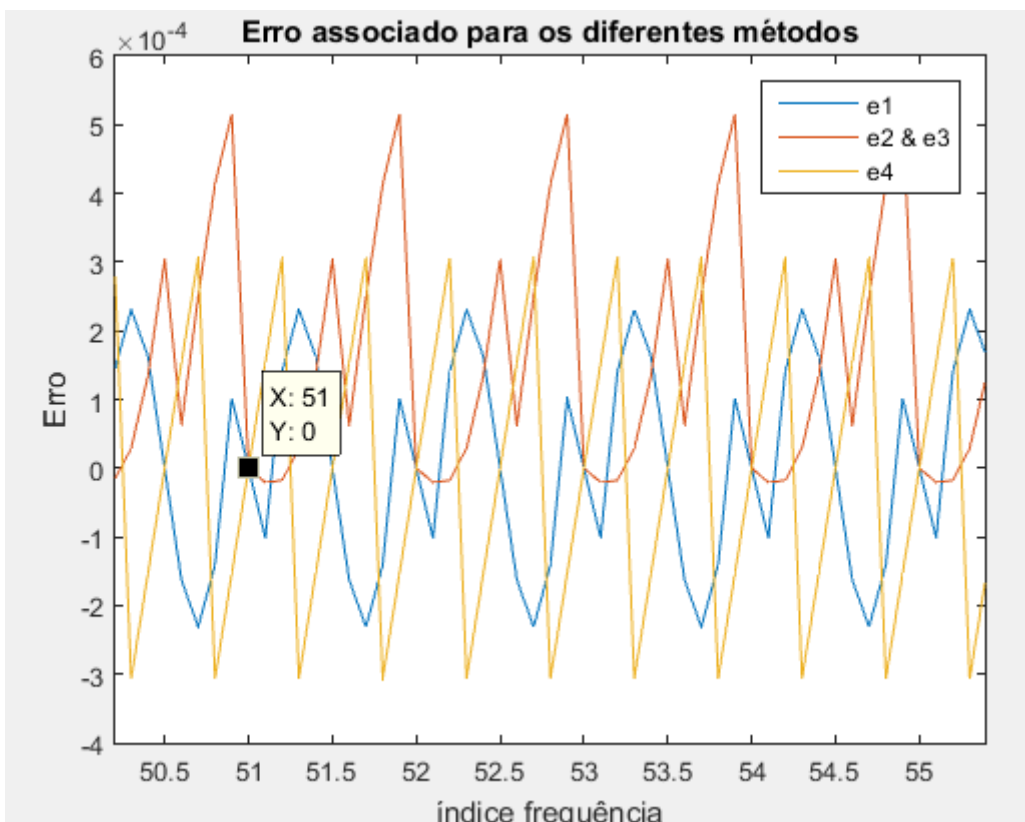


Figura 27: Erro associado a cada método ampliado.

O erro representando por e1 e e2&e3 são baseados no método de super-resolução descritos em [25], já o erro legendado por e4 é baseado na transformada de Fourier interpolada.

Para cada método podemos averiguar a sua complexidade, ou seja, na presença de FFT podemos determinar quantas multiplicações complexas estão envolvidas de modo a concluir qual o método mais vantajoso e com menor processamento.

Assim, para a FFT o número de multiplicações complexas para um determinado número de amostras da forma 2^N é dado pela seguinte expressão:

$$N \log_2(N)$$

Através das seguintes expressões é possível obter a quantidade de multiplicações utilizada para os diferentes métodos para o mesmo N .

$$\begin{aligned} \textit{Super - resolução} &= N \log_2(N) + m \\ &256 \times \log_2 256 + m \end{aligned} \quad (24)$$

$$\textit{DFT - interpolada} = N \log_2(N) + m, m \textit{ é o número de operações básicas}$$

$$32 \times 256 \times (\log_2 256 + \log_2 32) + m \quad (25)$$

$$32 \times 256 \times \log_2 256 + 32 \times 256 \times \log_2 32 + m \quad (26)$$

Através da equação (24) podemos compreender que o número de multiplicações do método de super-resolução apresenta apenas o fator $256 \times \log_2 256$ adicionado a um reduzido número de operações básicas (m), como por exemplo detetar o máximo e as suas restantes sub-bandas. Por outro lado, a DFT interpolada apresenta o mesmo fator $256 \times \log_2 256$ com a diferença de ser multiplicado por 32, este fator de interpolação foi utilizado para obter uma resolução mais próxima da obtida pelos métodos de super-resolução.

Assim, comparando as duas equações (24)e (26) é possível analisar que a DFT interpolada apresenta uma maior complexidade, nomeadamente cerca de 32 vezes maior que

a utilizada nos métodos de super-resolução. O fator $256 \times 32 \times \log_2 32$ é pouco relevante pois é muito menor do que o $256 \times \log_2 256$.

Importa salientar que é possível determinar com precisão as 1281 frequências geradas pelo vetor f_k , para um N igual a 256 devido aos métodos de super-resolução, já para o método “superfreqDFT” é necessário adicionar um fator de interpolação $L=32$ para obter as mesmas frequências.

Através do comando *var* do MATLAB foi ainda possível retirar a variância da variável erro para os métodos propostos.

Tabela 1: Valores da variância da variável erro de cada método.

	Erro 1	Erro 2&3	Erro 4
var	2.2021×10^{-8}	3.5463×10^{-8}	4.7062×10^{-8}

Com a análise da Figura 26 e Figura 27 podemos apenas concluir que os métodos calculam corretamente as frequências geradas pelo vetor f_kList com valores de erro muito pequenos.

Como mencionado anteriormente, o método “superfreq1” apenas difere do método “superfreq2&3” quando existe ruído, no entanto, nesta simulação apenas pretendemos verificar se os métodos funcionam corretamente efetuando a análise à robustez no capítulo seguinte.

5 Análise da robustez dos vários métodos – Simulação em MATLAB

Diariamente, os sinais apresentam a presença de ruído, que prejudicam a análise realista. Então, realizou-se uma análise da robustez com sinais produzidos em ambiente MATLAB. Um ambiente controlado onde é possível antecipar os resultados, pois partimos de dados conhecidos

Foram então realizados testes, com a adição de ruído Gaussiano branco, para testar as funções criadas com os respectivos métodos.

Este tipo análise é bastante importante, pois todos os sinais reais, ou seja, os sinais presentes no nosso dia-a-dia, apresentam sempre interferências vindas do ambiente envolvente.

Logo, introduzimos ruído para perceber qual dos métodos apresentava melhor desempenho, ou seja, o algoritmo que estimava os valores de frequência mais próximos do seu valor real.

Desta forma, utilizamos a função *randn* do MATLAB para adicionar ruído Gaussiano à senoide. Esta função gera um vetor ou matriz, consoante o tamanho (N) que pretendemos, e gera N números aleatórios que somamos ao sinal inicial.

A função *randn* é caracterizada por possuir uma potência igual a um, assim para obtermos diferentes potências é necessário alternar os valores da amplitude da função e, conseqüentemente, diferente relação sinal ruído (SNR). A SNR é uma medida que relaciona a potência do sinal com a do ruído de forma a exprimir o erro introduzido e é definida pela seguinte expressão:

$$SNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_x}{P_r} \right) dB, \quad (27)$$

P_x – Potência do Sinal

P_r – Potência do Ruído

Somente em sinais periódicos se aplica a potência para exprimir esta medida pois estes sinais apresentam energia infinita, ou seja, são sinais de Potência.

A potência de um sinal, no tempo discreto, é calculada da seguinte forma:

$$P_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |x(n)| \quad (28)$$

Esta análise foi efetuada utilizando apenas um valor de frequência para minimizar a complexidade do gráfico gerado, ou seja em vez da parte fracionária variar entre 1:0.1:N/2, foi estabelecido uma frequência inteira e fracionária fixa.

A relação sinal ruído foi forçada a variar entre duas situações extremas:

- Influência do ruído é forte: **-15dB**
- Influência do ruído é considerada desprezável: **20 dB**

O gráfico foi gerado considerando um cosseno com uma frequência igual a 64.2 Hz e valores de SNR, especificados em um vetor:

$$SNR = [-15 \ -10 \ -5 \ 0 \ 5 \ 10 \ 15 \ 20], \text{ em dB}$$

Para gerar a SNR dos valores pretendidos é necessário manipular a fórmula da SNR para podermos calcular a potência do ruído e conseqüentemente a amplitude do mesmo.

Com os seguintes cálculos podemos concluir que a potência do sinal e a potência do ruído se relacionam da seguinte forma:

$$SNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_x}{P_r} \right), \text{ como } P_x \text{ é uma constante} \quad (29)$$

$$\frac{SNR}{10} = \log_{10} \left(\frac{P_x}{P_r} \right) \quad (29.1)$$

$$10^{\frac{SNR}{10}} = 10^{\log_{10} \left(\frac{P_x}{P_r} \right)} \quad (29.2)$$

$$10^{\frac{SNR}{10}} = \frac{P_x}{P_r} \quad (29.3)$$

$$P_r = \frac{P_x}{10^{\frac{SNR}{10}}} \quad (29.4)$$

$$r = \sqrt{P_r} * \text{randn}(1, N) \quad (29.5)$$

Como a função *randn* gera, em cada iteração, novos números aleatórios é necessário realizar esta análise para um número elevado de tentativas, para que, de forma inequívoca, seja determinado o melhor método para os vários valores de SNR.

Após armazenamento dos valores pretendidos em uma matriz de três dimensões, estes foram rearranjados, ou seja, foi criada uma matriz para cada método onde as colunas

representam os vários SNR apresentados e as linhas o número de tentativas que o algoritmo foi “corrido” em ambiente MATLAB.

Posteriormente, foi calculado o desvio padrão e a média, para cada matriz de cada método, de forma a contruir um gráfico que exponha a robustez de cada método ao ruído.

Os seguintes gráficos mostram o descrito anteriormente.

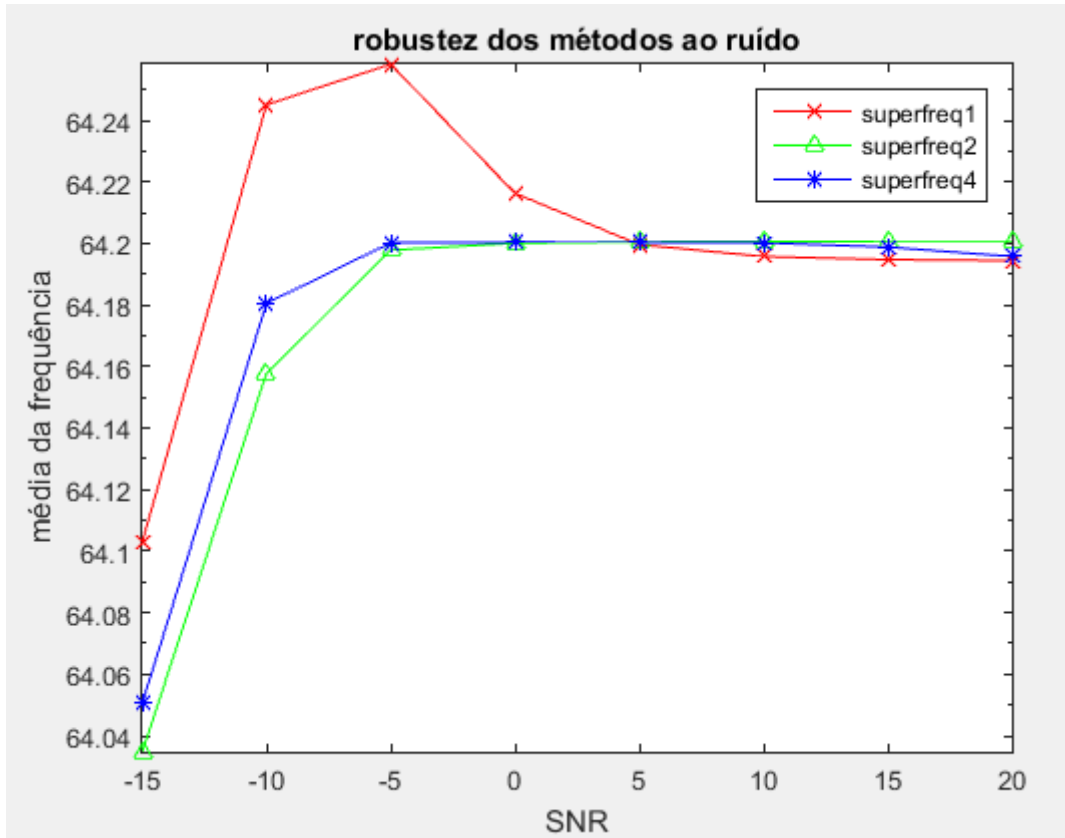


Figura 28: Robustez dos métodos ao ruído – média para 10^6 tentativas

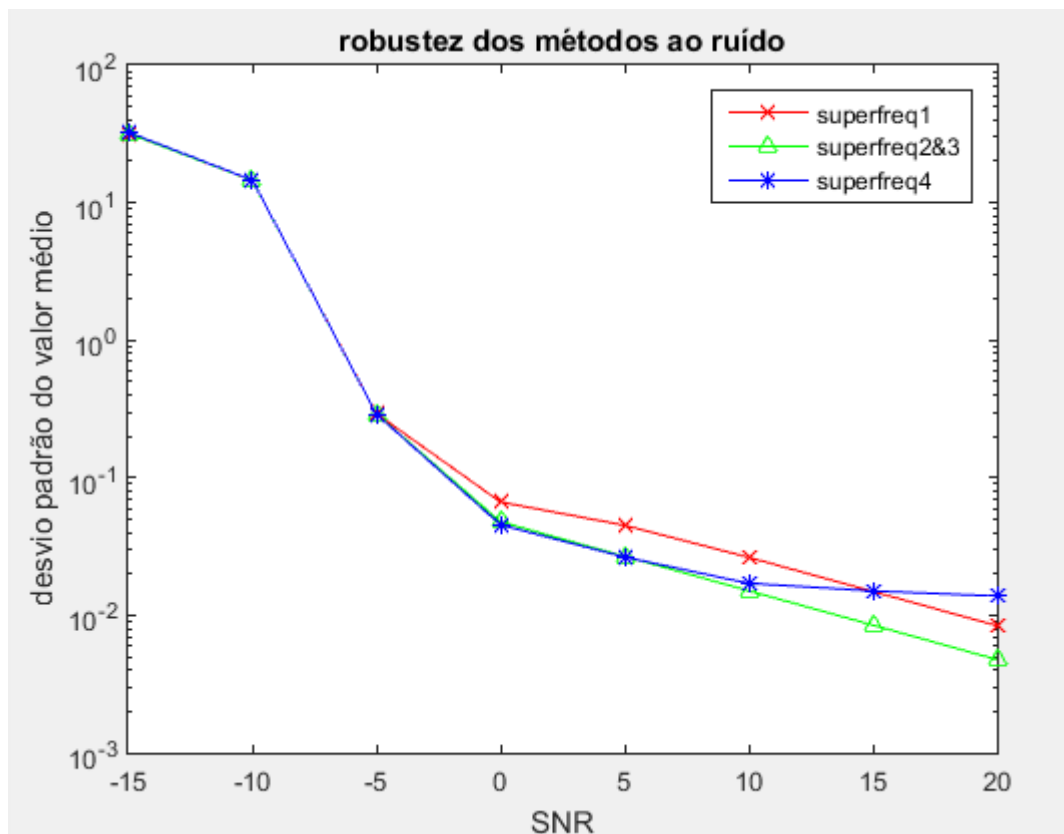


Figura 29: Robustez dos métodos ao ruído - desvio padrão para 10^6 tentativas

Após análise do gráfico da Figura 28 conclui-se que todos os algoritmos têm tendência a alcançar o valor médio de 64.2 Hz. Este resultado é bastante positivo pois foi o valor escolhido para a frequência da senoide, pelo que podemos concluir que os métodos calculam corretamente o valor da frequência. No gráfico da Figura 29 podemos observar o desvio padrão para os vários SNR e para cada método. O desvio padrão dá-nos informação acerca da variabilidade de valores encontrados em concordância com a média. O valor do desvio padrão foi semelhante para todos os métodos tendo apresentado uma vantagem, para método 2, nos últimos valores de SNR.

O método de regra única, intitulado por “superfreq1” na função do MATLAB, é o que apresenta piores resultados, pois é aquele que estima valores mais distantes do valor estipulado, não apresentado um comportamento constante para os primeiros valores de SNR.

O método de três regras e da DFT interpolada intitulado de “superfreq2&3” e “superfreqDFT”, respetivamente, são os que apresentam um comportamento semelhante, ainda que o método “superfreq2&3”, exiba uma performance um pouco melhor.

É importante salientar que os métodos “superfreq 2&3” e “superfreqDFT” são robustos ao ruído pois para uma SNR igual a -5 dB os valores para a frequência são bem

estimados. Uma relação de -5 dB gera ruído com grande influência, ou seja, o sinal resultante apresenta bastantes interferências.

Assim, o método “superfreq2&3” é o que alcança melhores resultados quando observamos os gráficos da média, do desvio padrão e os histogramas correspondentes.

Nas figuras seguintes são exibidos os histogramas, para cada método, com $\text{SNR}= 15\text{ dB}$, onde é possível observar que a Figura 31, apresenta um histograma que se aproxima cordialmente da curva gaussiana, tendo o valor estipulado no centro e uma gama de valores, próximos de 64.2 ao seu redor.

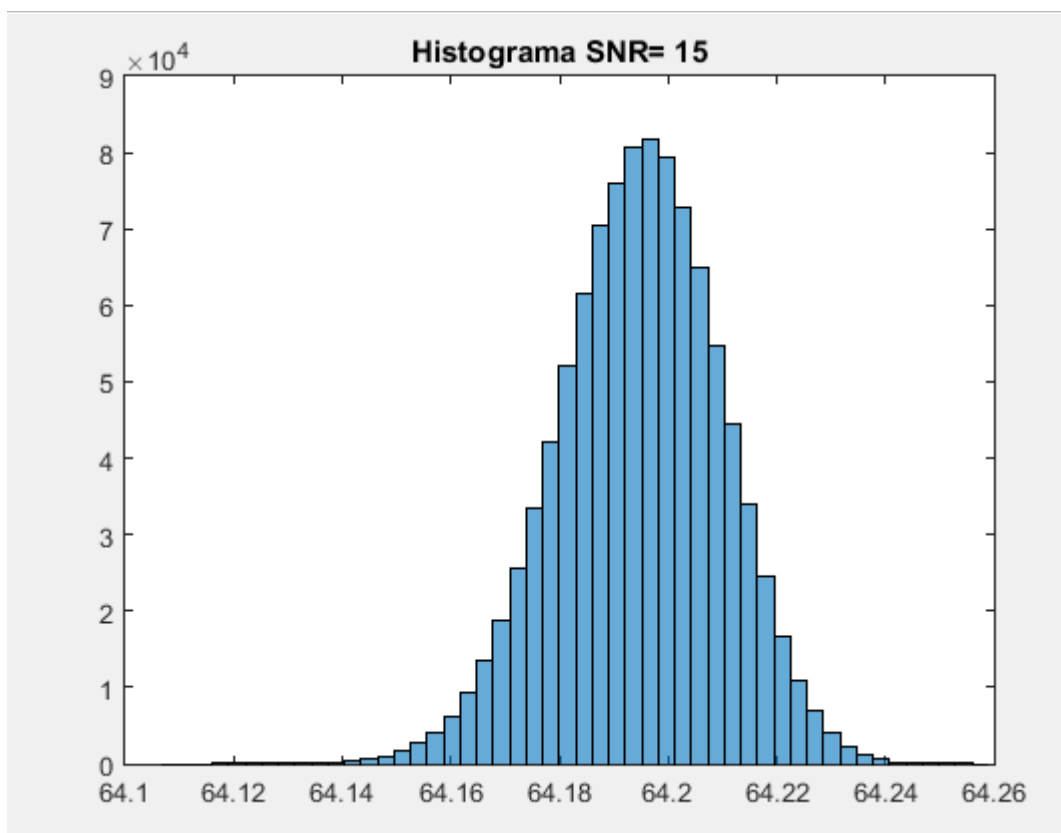


Figura 30: Histograma do método “superfreq1”

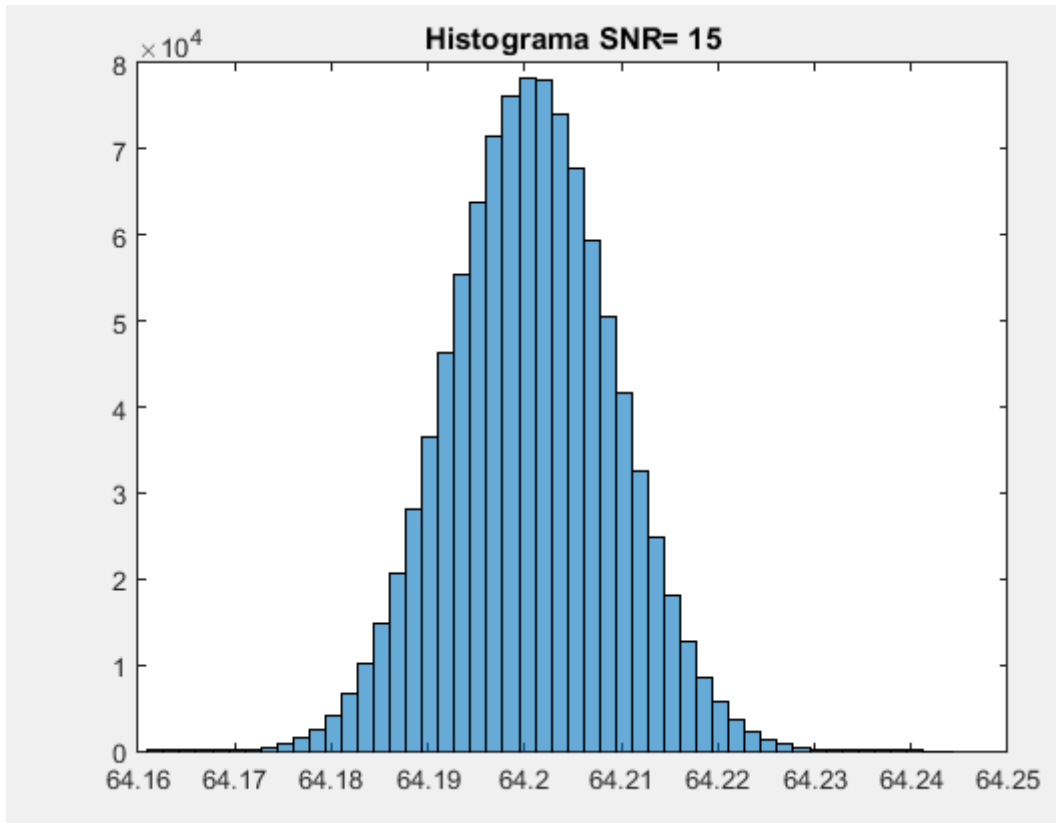


Figura 31: Histograma método “superfreq2&3”

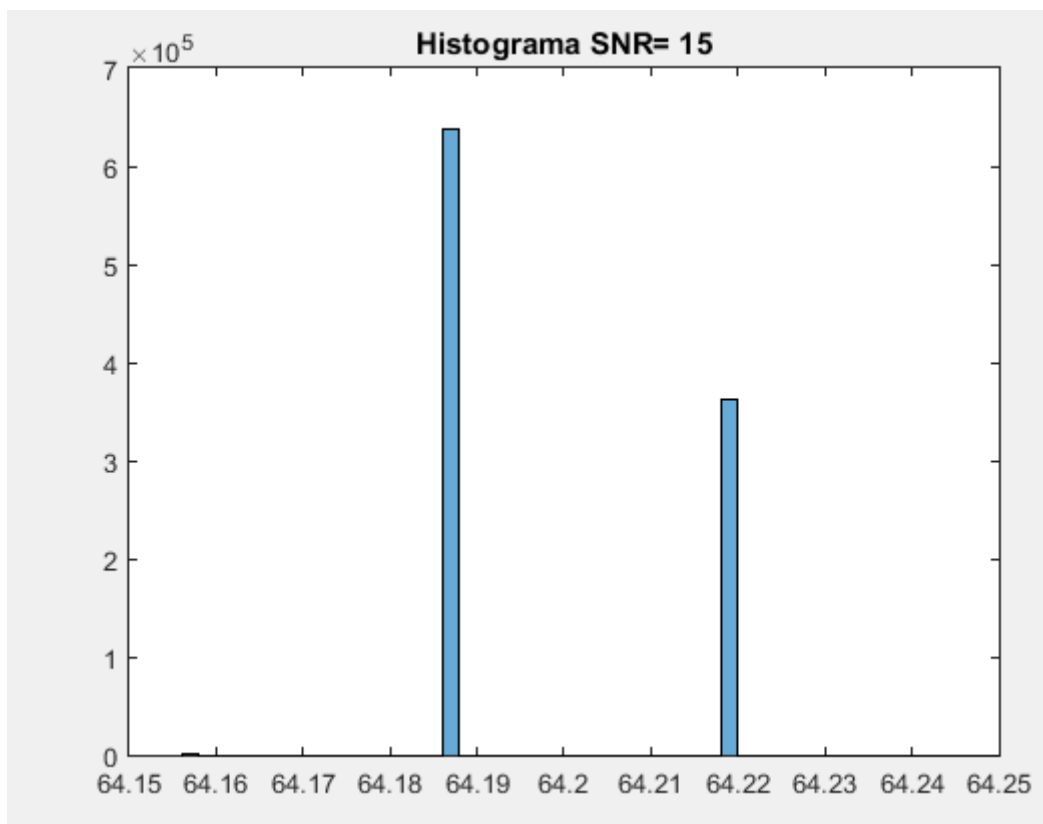


Figura 32: Histograma método “superfreDFT” para L=32.

O histograma da Figura 32 correspondente ao método “superfreqDFT” não apresenta uma curva gaussiana. Isto deve-se à forma como este calcula os valores para a frequência, é um método que utiliza transformada de Fourier interpolada, ou seja, são acrescentados zeros ao N da FFT. Esta forma de cálculo não altera o resultado gerado pela FFT nem a informação transportada pelo sinal, apenas exibe um maior número de pontos desenhados ao longo da forma de onda revelando uma melhor resolução.

Pela Figura 33 podemos compreender que a interpolação pela variável L leva a que a resolução seja mais fina produzindo mais pontos e, conseqüentemente mais valores de frequência muito próximos. Com isto, os valores encontrados para uma frequência estimada são todos muito próximos não existindo assim, uma grande variabilidade de valores.

Se recorrermos ao comando “*unique*” do MATLAB podemos concluir que existe uma pequena variabilidade de valores comparando com os outros métodos.

Contundo, o método “superfreqDFT” estima corretamente o valor de frequência fixado inicialmente.

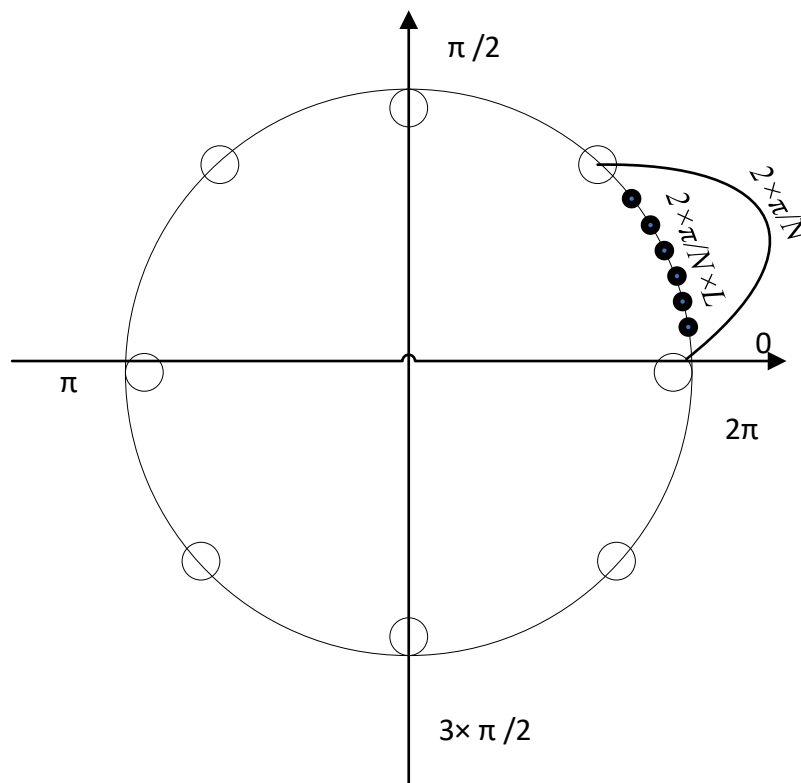


Figura 33: Esquema do ciclo trigonométrico

Uma forma de obter um histograma similar ao da Figura 30 e Figura 31 passa por aumentar a variável de interpolação (L).

Para o histograma da Figura 34 utilizei um L 8 vezes maior do que o experimentado para a Figura 32

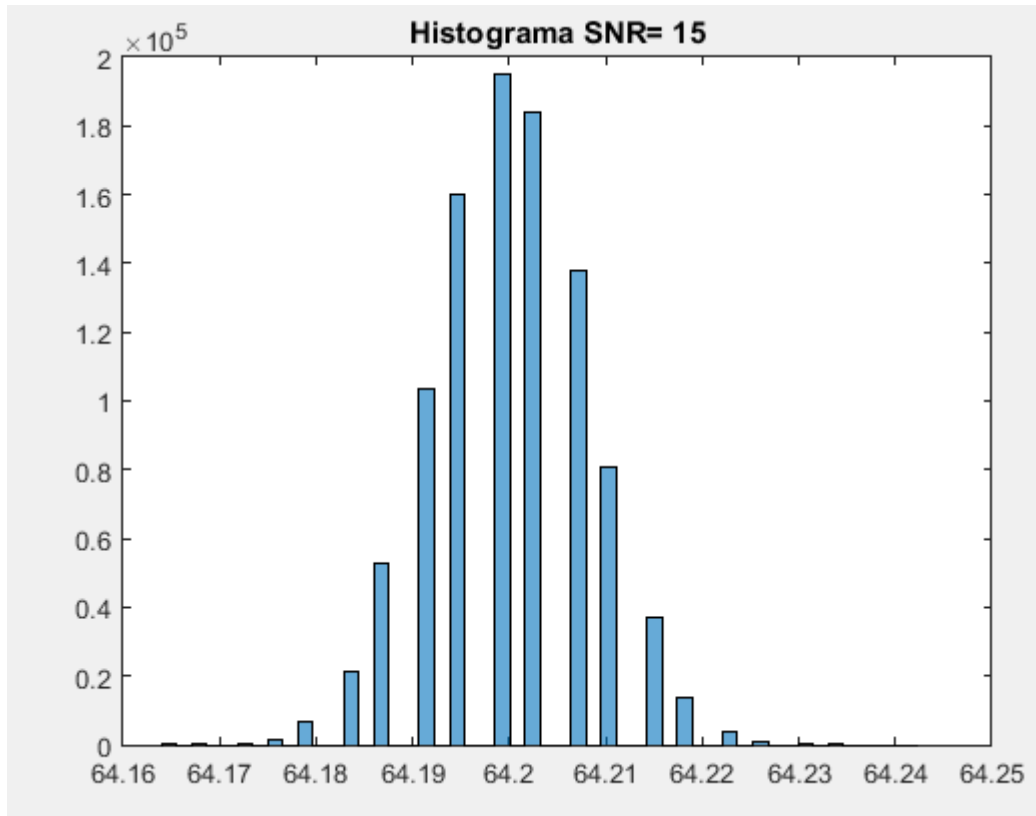


Figura 34: Histograma do método "superfreqDFT" para $L=256$.

Observando a Figura 34 podemos concluir que para um L superior o histograma apresentado está mais próximo de uma curva gaussiana, podendo então aferir que é necessária uma grande interpolação para atingir a mesma resolução, bastante fina, dos métodos de super-resolução: "superfreq1" e "superfreq2&3".

Contudo, podemos afirmar que o método "superfreq2&3" e o método "superfreqDFT" determinaram com precisão os valores definidos para a frequência com um erro associado muito baixo mesmo na presença de ruído. No entanto, o método "superfreq2&3" é o método que apresenta menos complexidade e uma boa estimativa sendo uma vantagem para a construção dos óculos com efeito de Doppler.

6 Testes ao algoritmo com sinais reais

6.1 Experiência com o microfone e placa de som

Como dito no capítulo 4 a análise de Fourier decompõe o sinal numa soma de cossenos e senos, já a transformada de Fourier apresenta todas as componentes em frequência do sinal, no entanto, uma das desvantagens desta análise é o facto do espectro conter apenas informação da frequência e não do tempo, isto é não existe possibilidade de saber em que intervalo de tempo ocorrem as mudanças de frequência.

Assim, uma das alternativas a esta limitação é a Transformada de Fourier de Tempo Curto ou, do inglês, Short Time Fourier Transform (STFT). Através desta transformada é possível ter uma análise dupla, ou seja, no tempo e na frequência para sinais não estacionários. Por outras palavras, fornece informações sobre quando e a que frequências um determinado evento ocorre no sinal. A ideia da STFT prende-se com análise do sinal, através de uma janela, onde o sinal permanece aproximadamente estacionário. A precisão com que os resultados são apresentados depende, apenas do tamanho da janela. É importante compreender que a dimensão da janela é configurada, inicialmente e é esta que é utilizada até ao fim da análise.

Uma das grandes diferenças entre a TF e a STFT é que no primeiro caso a análise é feita a todo o sinal, enquanto que na STFT a análise é feita em segmentos, limitados por uma janela, não se perdendo informação temporal como acontece com a TF.

A Figura 35 apresenta a forma como é analisado o sinal através da STFT.

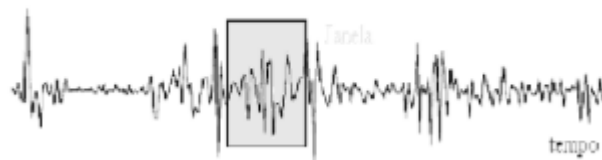


Figura 35: Análise do sinal utilizando a janela.

Podemos resumir a STFT à seguinte fórmula, que apresenta o sinal $x[n]$ através de uma janela $w[n]$.

$$STFT(m, w) := \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n]w[n - m]e^{-jwn} \quad (30)$$

A equação (30) representa a Transformada de Fourier de uma versão adiantada ou atrasada do sinal $x[n - m]$, quando aplicada a uma janela $w[n]$. Desta forma, através dos atrasos de tempo é possível observar o espectro em diferentes trechos do sinal.

Abordar o sinal desta forma torna-se bastante útil pois obtemos num só gráfico, de duas dimensões, a informação de duas variáveis: tempo e frequência. É importante referir que ao configurar a janela é esta que vai ser utilizada em toda a análise do sinal trazendo vantagens se o sinal a analisar for constituído por componentes quase estacionárias, ou seja, onde existem pequenas variações de frequência. Portanto, podemos concluir que para sinais com as características anteriores o uso de janelas amplas (fraca resolução no tempo e boa localização na frequência) são as mais apropriadas. Já nos sinais em que seja necessário analisar convenientemente as variações bruscas, este tipo de transformada (STFT) não é aconselhada pois é necessário utilizar uma janela estreita (boa localização no tempo para fraca resolução na frequência).

Contudo para alcançar este tipo de estudo é imperativo definir algumas variáveis tais como: a dimensão da janela (w), o número de pontos da transformada de Fourier ($Nfft$), o número de amostras da sobreposição das janelas ($noverlap$) e ainda a frequência de amostragem do sinal (F_a).

Normalmente, estas variáveis são definidas consoante o sinal que queremos analisar, no entanto existem, algumas considerações que auxiliam na definição das mesmas.

$$W = N \quad (31)$$

$$Noverlap = N/2; \quad (32)$$

$$Nfft = 2 * N; \quad (33)$$

O parâmetro “Windows” representa a largura dos segmentos que dividem o sinal. Para o definir não existe nenhuma regra a seguir, no entanto utilizar números de potência dois é uma boa prática, já que o MATLAB executa o código bastante mais rápido.

A variável $noverlap$ corresponde ao número de amostras que estão sobrepostas em cada segmento do sinal de forma a manter uma boa localização de frequência. Existe um padrão definido 50% da largura de cada segmento.

A Nfft é o número de pontos que são utilizados para calcular a FFT de cada segmento. Este parâmetro também dá informação sobre a resolução em frequência, um grande número de pontos da FFT proporciona uma melhor resolução na frequência.

Para avaliar o desempenho dos métodos descritos foram realizados dois tipos de testes: uma simulação em MATLAB onde gerámos uma senoide com frequência fixa, de 1kHz e uma experiência efetuada com o auxílio de um microfone e uma coluna de som.

A simulação em MATLAB consistiu em gerar uma senoide com uma frequência fixa de 1kHz e, posteriormente aplicar o algoritmo para comprovar que este acompanhava, de forma muito próxima a forma de onda da senoide.

Na Figura 36 é apresentado o espectrograma da simulação.

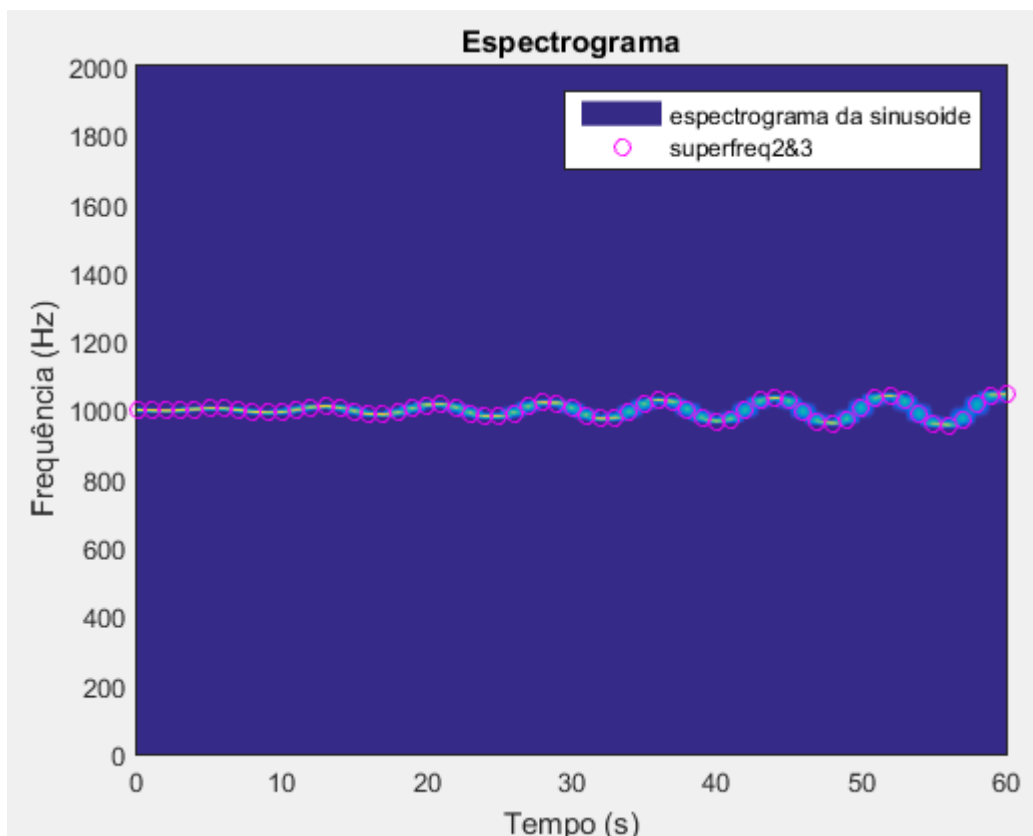


Figura 36: Espectrograma da simulação com senoide de 1kHz.

Com a análise da Figura 36 conclui-se que o algoritmo se sobrepõe, na perfeição, por cima da onda sinusoidal gerada no MATLAB. Desta forma, é possível afirmar que o método utilizado, superfreq2&3, consegue de forma eficaz detetar a frequência ao qual se transmite a senoide.

Para a experiência realizada em laboratório foi necessário um microfone com cabo extensível, uma placa de som, um amplificador, uma coluna e um computador com o software adequado, o *audacity*, na Figura 37, é apresentado um esquema do descrito anteriormente para melhor compreensão.

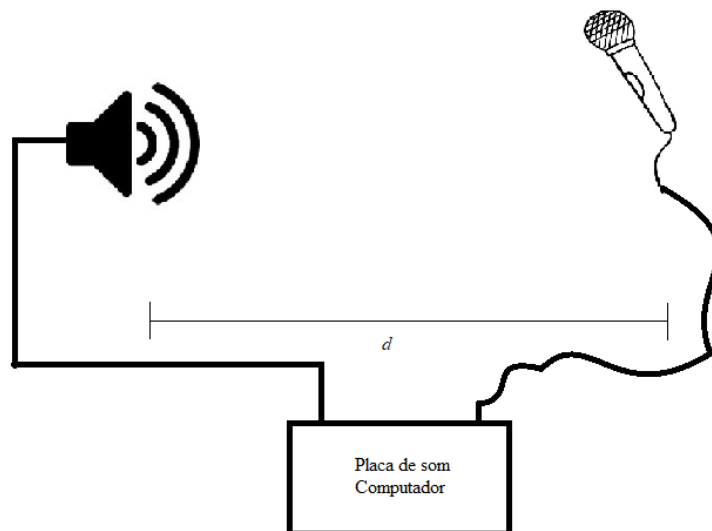


Figura 37: Esquema da experiência em laboratório.

A experiência baseou-se em ligar os componentes entre si e, posteriormente colocar a coluna a uma certa distância para que, quem estivesse com o microfone na mão se pudesse aproximar ou afastar da fonte de modo a introduzir o efeito de Doppler no sinal captado.

O sinal reproduzido foi gerado no software *audacity* onde existe a possibilidade de reproduzir vários tipos de sinais, neste caso, utilizámos a geração de uma senoide onde configuramos a sua amplitude, frequência e duração. A taxa de amostragem utilizada foi de 44.1 kHz.

Iniciámos a experiência onde o microfone, na mão, percorreu uma distância (d), medida, de 4 metros com diferentes velocidades de caminhada, com afastamento e/ou aproximação da fonte que emitia uma senoide.

Foram realizadas diversas experiências, no entanto são apresentados os dados apenas para duas das experiências.

Tabela 2: Dados retirados das Experiências.

Designação	Frequência [Hz]	Distância [m]	Tempo – ida e volta [s]
Exp1	10000	4	5.7
Exp2	15000	4	4.98

Com os dados da Tabela 2 é possível determinar a velocidade a que se viajava enquanto se deslocava com o microfone para, posteriormente calcular o desvio de frequência.

A equação (2) e a equação (4) permite retirar a velocidade e o desvio de frequência, respetivamente como podemos verificar a seguir:

Experiência 1

$$v = \frac{2 \times d}{t} = \frac{2 \times 4}{5.7} = 1,4 \text{ m/s} \quad (34)$$

$$F_R = \frac{343 + 1.4}{343} \times 10000 = 1.0041 \times 10^4 \quad (34.1)$$

$$\Delta f = 10041 - 10000 = \mathbf{40.8163 \text{ Hz}} \quad (34.2)$$

Experiência 2

$$v = \frac{2 \times d}{t} = \frac{2 \times 4}{4.98} = 1.6064 \text{ m/s} \quad (35)$$

$$F_R = \frac{343 + 1.6064}{343} \times 15000 = 1.5070 \times 10^4 \quad (35.1)$$

$$\Delta f = 15070 - 15000 = \mathbf{70.2507 \text{ Hz}} \quad (35.2)$$

Seguidamente é apresentado o espectrograma da experiência 1 e 2 para podermos demonstrar que o método é eficaz na determinação dos desvios de frequência mesmo em sinais reais.

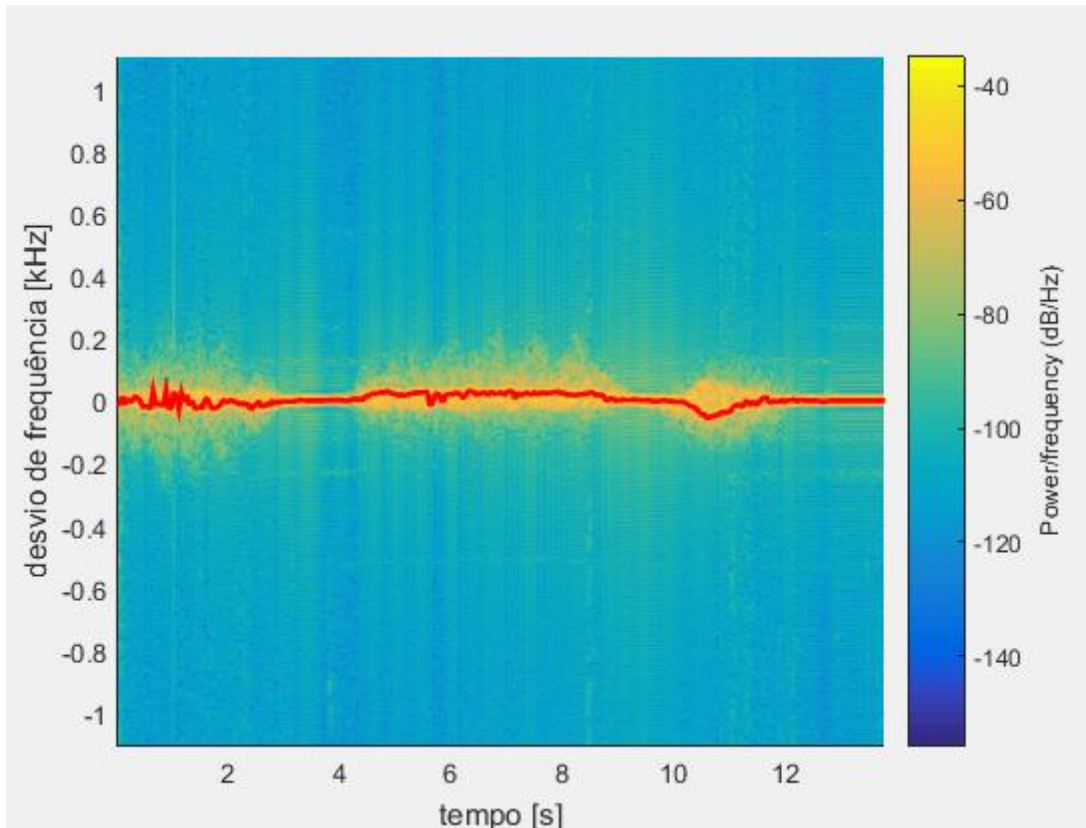


Figura 38: Espectrograma do sinal da “Exp1” com o método superfreq2&3.

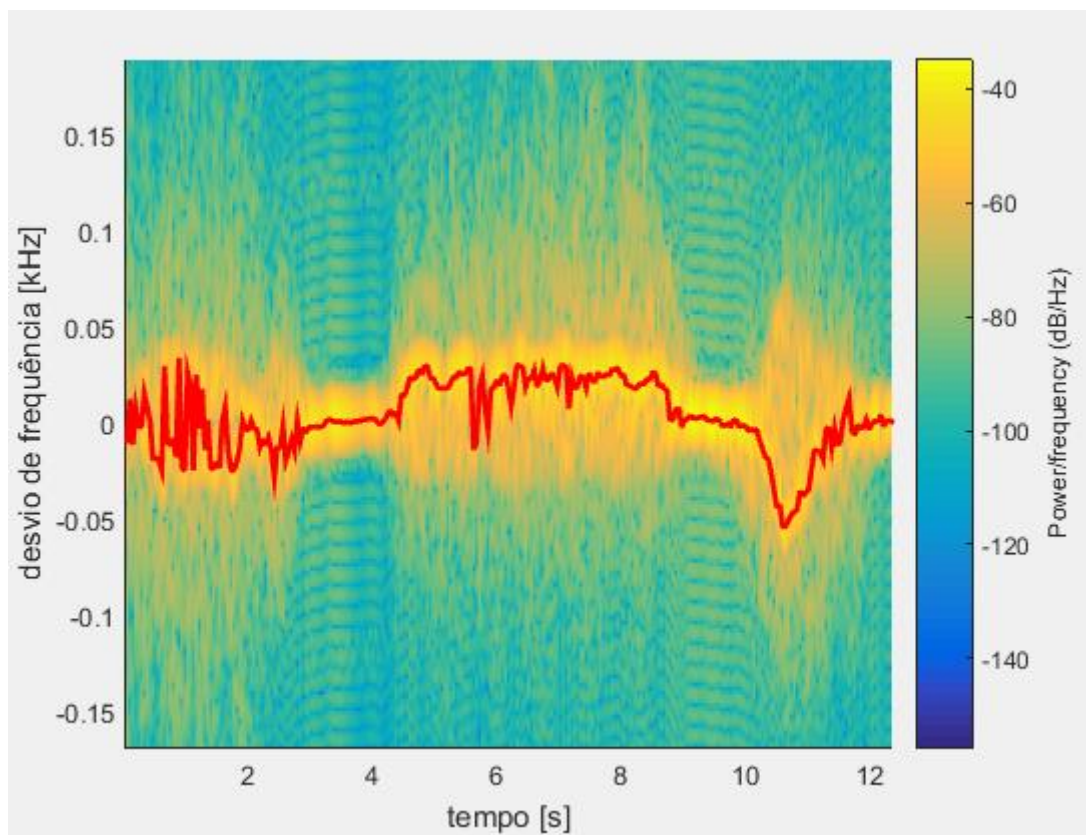


Figura 39: Espectrograma da "Exp1" com o método “superfreq2&3” ampliado.

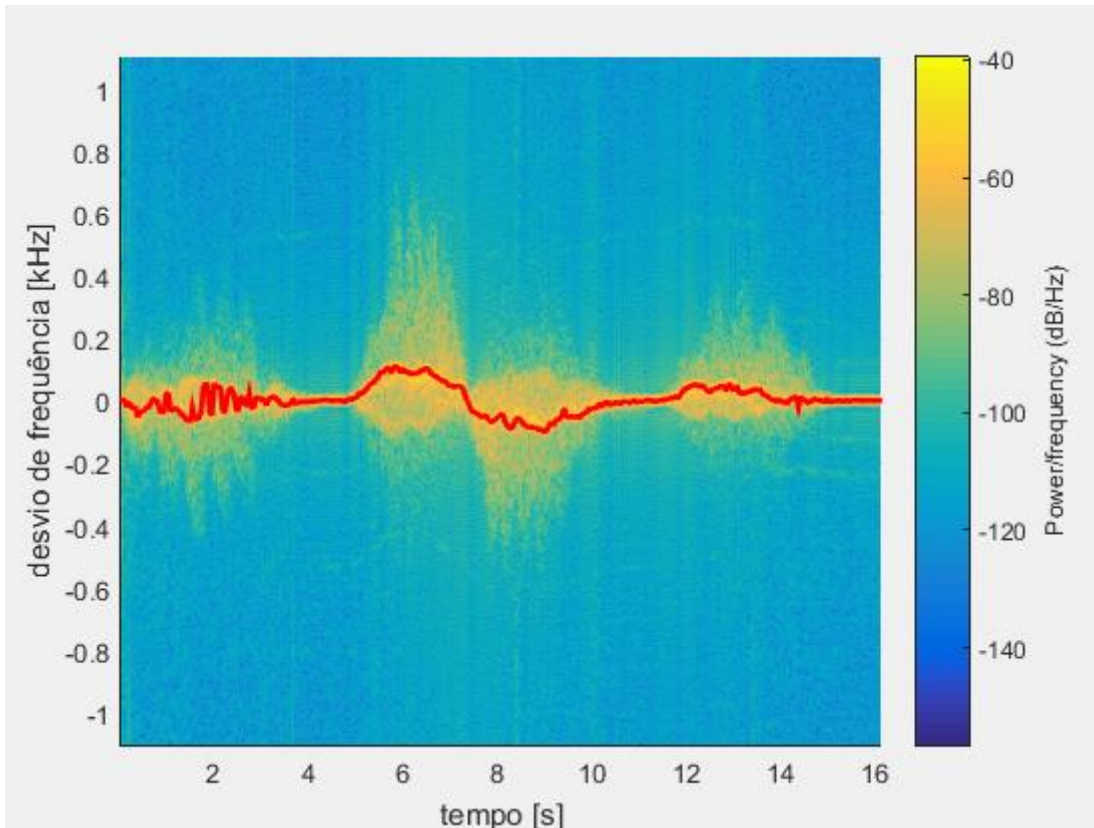


Figura 40: Espectrograma da "Exp2" para o método superfreq2&3.

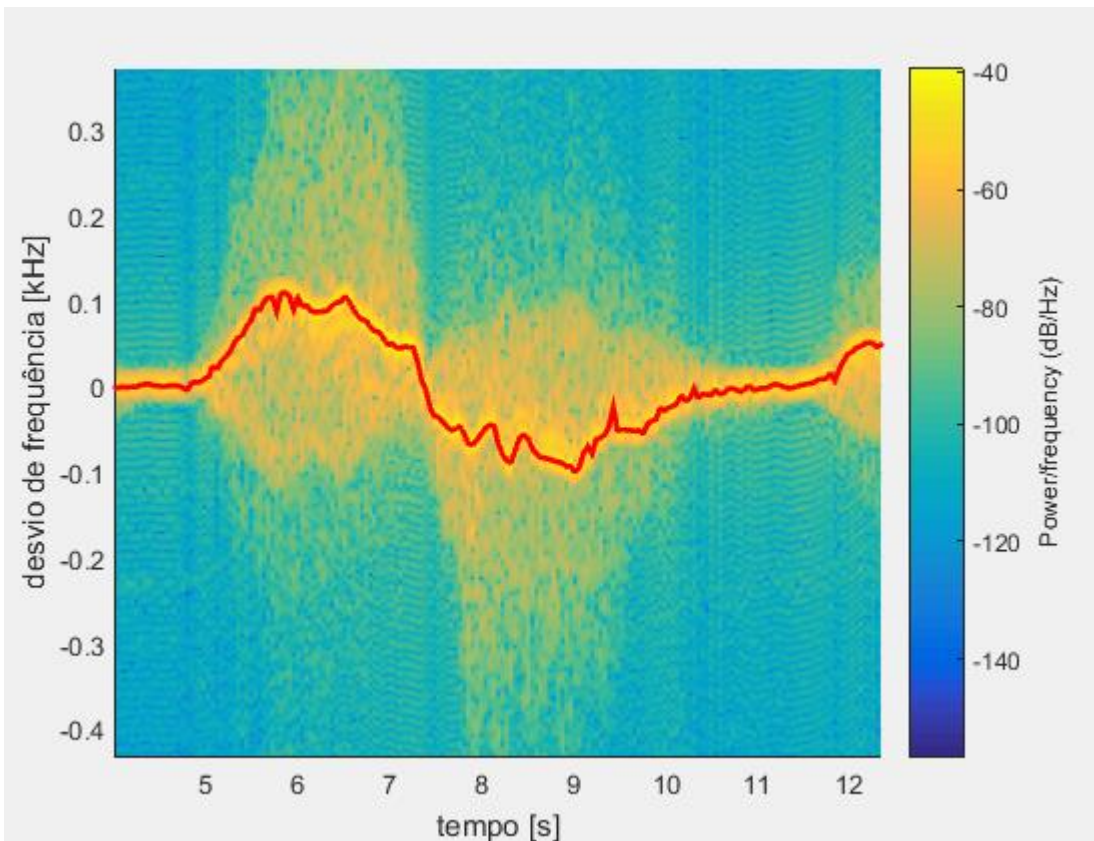


Figura 41: Espectrograma da " Exp2" para o método "superfreq2&3" ampliado.

Aos sinais da “Exp1” e “Exp2” foi efetuado um pós-processamento de sinal para podermos obter gráficos “mais limpos” e mais fáceis de interpretar. Para determinar se a “Exp1” apresentava um desvio de frequência próximo dos 41 Hz, como o calculado na equação (34.2) colocámos o sinal inicial na banda base e, seguidamente fizemos a sua decimação para que depois o seu desvio de frequência fosse claro, pois se apresentasse um desvio de frequência o sinal estava posicionado acima de zero. Pela Figura 38 e Figura 39 podemos concluir que o algoritmo acompanha maioritariamente a forma de onda, apresentando um desvio de frequência próximo dos 41 Hz como o esperado.

Para o caso da “Exp2” efetuámos o mesmo procedimento de pós-processamento de sinal e obtivemos a Figura 40 e a Figura 41, onde é possível observar um desvio de frequência próximo de 100 Hz. O método “superfreq2&3” acompanha de forma muito próxima a forma de onda, ainda que apresente algumas irregularidades. Estas irregularidades podem ter origem no ruído captado do exterior ou mesmo à fala humana aquando a realização da experiência. Durante a experiência a velocidade experimentada pelo indivíduo não é constante obtendo desvios de frequência entre os 50 e os 100Hz.

Através das figuras anteriores ainda podemos visualizar um aumento seguido de uma diminuição no desvio de frequência que se justificam pelo aproximar e, consecutivo afastamento da fonte sonora.

Assim, podemos concluir que o método superfreq2&3 é capaz de determinar os desvios de frequência em sinais reais com alguma precisão.

6.2 Testes práticos – “Chapa Voadora” e os transdutores de 40 kHz

O último teste efetuado para avaliar a performance do algoritmo foi através de transdutores existentes no protótipo dos óculos. O objetivo deste teste é perceber se o algoritmo consegue medir o desvio de frequência dos pulsos recebidos quando estes encontram um obstáculo.

Na Figura 42 é possível observar um esboço de como foi efetuada a experiência.

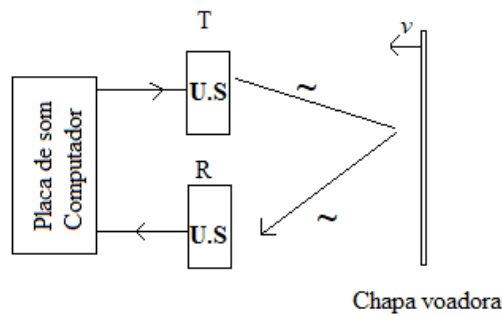


Figura 42: Esquema da experiência: “Chapa Voadora”.

A experiência da “Chapa Voadora” consistiu em aproximar e afastar aleatoriamente uma placa em acrílico, com dimensões $40\text{cm} \times 40\text{cm}$, em frente aos transdutores. As distâncias praticadas foram as seguintes: 0.5 m, 1m, 1.5m e 2m.

Para esta experiência consideramos velocidades entre 0.5 m/s e os 6.0 m/s. Os valores escolhidos para a velocidade espelham um indivíduo numa marcha lenta até um indivíduo a correr.

Os ultrassons devem ser enviados em forma de pulsos para que estejam continuamente a ser enviados e, quando forem recebidos não sejam confundidos com ruído ou com repetidas reflexões, pois o tempo entre pulsos garante que os fenómenos de reflexão difusa e especular se deem antes de se observarem os ecos, garantindo assim a análise de cada eco aquando a emissão de um pulso.

Para simplificar a análise dos resultados pretendidos é importante deslocar o sinal para a banda base de forma a poder reduzir a frequência de amostragem, assim foi necessário compreender diversos conceitos relacionados com a representação de sinais complexos e a transformada de Hilbert.

As vantagens de transportar o sinal para a banda base são imensas, uma delas é na medição do desvio de frequência que se torna mais evidente se o sinal estiver em torno de zero do que em torno dos 40kHz, ou seja se estivermos perante um sinal passa-banda teremos que medir o desvio entre 39 e os 41 kHz, por exemplo, no entanto se o sinal a transmitir é deslocado para a banda-base o desvio é medido em torno de zero e, podemos concluir que os desvios positivos são originados por aproximação de um obstáculo e os negativos pelo seu afastamento. Se não existir qualquer desvio, significa que o emissor não se moveu não havendo assim, efeito de Doppler.

Se a largura de banda do sinal a processar for pequena é possível reduzir a frequência de amostragem (F_a) do sinal, evidenciando claramente outro benefício, pois segundo o Teorema de Amostragem é imperativo que a frequência de amostragem seja maior que o dobro da largura de banda do sinal, para que se possa reconstruir o sinal original através do sinal de tempo discreto sem *aliasing*.

Portanto, era necessário pelo menos 82 kHz para amostrar o sinal tornando todo o processamento seguinte demasiado lento e complexo. Contudo e sabendo que frequência da portadora (F_c) é muito maior que a sua largura de banda ($F_c \gg w$), podemos eliminar algumas amostras que não vai retirar qualquer informação ao sinal.

O fator de decimação (M) escolhido foi de 24, que significa que no final deste processo temos um sinal com frequência de amostragem igual a 8 kHz resultando numa grande redução do processamento a realizar.

$$M = \frac{F_a}{F_{a1}} = \frac{192000}{8000} = 24 \quad (36)$$

F_a – frequência amostragem do sinal original
 F_{a1} – frequência amostragem do sinal já decimado.

Os pulsos de ultrassons a enviar são modulados através de uma onda com a seguinte forma:

$$x = [\text{zeros}(1, N1) \text{ ones}(1, N2)]$$

$N1, N2$ - corresponde ao número de amostras a zero e a um respetivamente.

$$p(t) = x .* \cos(2 \times \pi \times f_c \times t), \text{ onde } f_c = 40\text{kHz}$$

6.2.1 Deslocar o sinal para a banda-base

O espectro característico do sinal $p(t)$, escrito anteriormente, é ilustrado na seguinte Figura 43: Espectro sinal passa-banda.

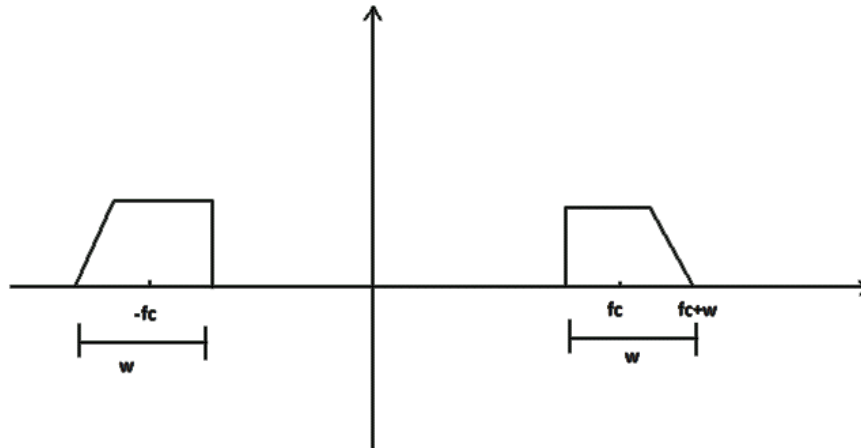


Figura 43: Espectro sinal passa-banda

A figura seguinte mostra o objetivo final, alcançar um espectro em torno de zero.

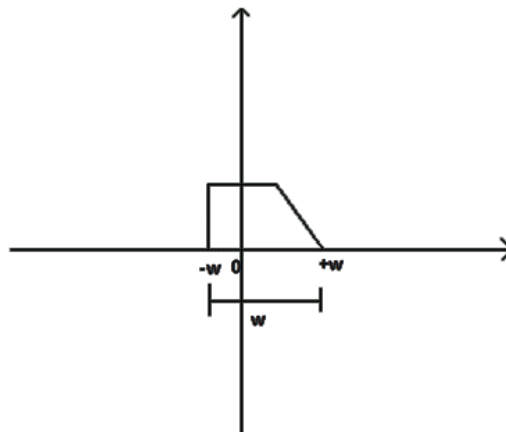


Figura 44: Espectro sinal banda-base

Para obtermos este espectro da Figura 44 é necessário abordar a transformada de Hilbert para compreender de que forma o primeiro espectro é transformado no segundo.

Considerando um sinal $g(t)$, com um espectro característico igual a Figura 43: Espectro sinal passa-banda, dizemos que a sua pré-envolvente é definida da seguinte forma:

$$g_+(t) = g(t) + j\hat{g}(t) \quad (37)$$

Onde $\hat{g}(t)$ é a transformada de Hilbert de $g(t)$. Podemos aferir que a pré-envolvente é um sinal complexo com parte real igual ao sinal $g(t)$ dado inicialmente e parte imaginária a transformada de Hilbert.

Se analisarmos a pré-envolvente no domínio da frequência, através da transformada de Fourier podemos observar o seguinte:

$$G_+(f) = G(f) + \text{sgn}(f)G(f) \quad (38)$$

Com esta expressão facilmente alcançamos os espectros mencionados anteriormente analisando a expressão em relação aos valores apresentados pela função sgn (função sinal) consoante a frequência f .

$$G_+(f) = \begin{cases} 2G(f), & f > 0 \\ G(0), & f = 0 \\ 0, & f < 0 \end{cases}$$

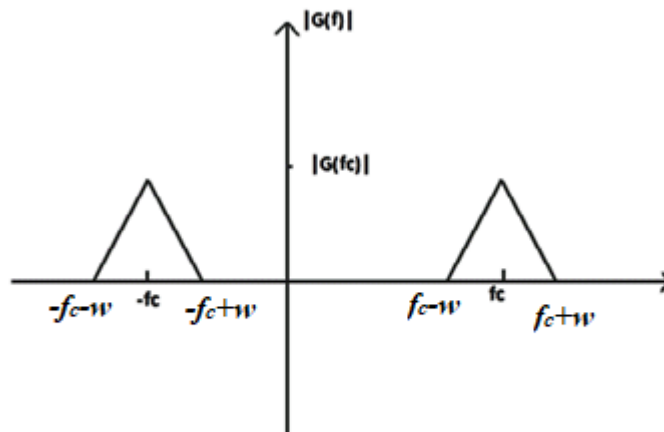


Figura 45: Espectro de $|G(f)|$.

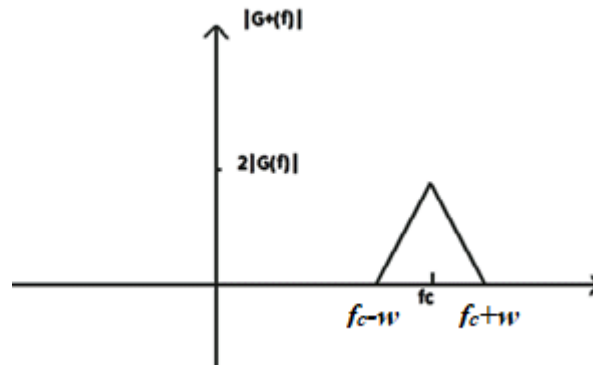


Figura 46: Espectro de $|G_+(f)|$.

Nota: É importante salientar que a transformada de Hilbert é apenas válida para manipular sinais reais passa-banda e no domínio do tempo. Designamos sinais de passa-banda a sinais cuja frequência não se encontre em torno de zero. Apresentam um espectro equivalente ao da Figura 45 e pode ser definido da seguinte forma:

$$G(f) = 0 \text{ para } \begin{cases} |f| < f_c - W \\ |f| > f_c + W \end{cases} \quad (39)$$

Perante este gráfico, apenas é necessário multiplicar o sinal $g_+(t)$ pela exponencial $e^{j2\pi f_c t}$ resultando na deslocação do sinal na frequência como podemos comprovar pela propriedade do deslocamento da frequência da transformada de Fourier.

$$e^{j2\pi f_c t} g(t) \stackrel{F}{\Leftrightarrow} G(f - f_c) \quad (40)$$

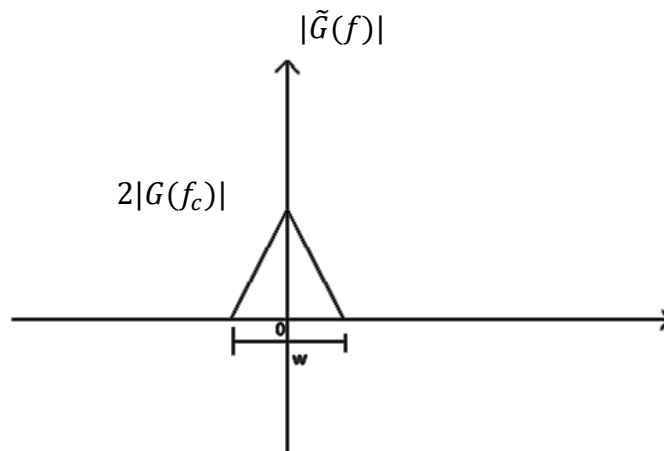


Figura 47: Espectro de $|\tilde{G}(f)|$.

A envolvente complexa, $\tilde{g}(t)$ é o sinal que pretendemos, em banda base, e pode ser definido através das seguintes expressões:

$$\tilde{g}(t) = g_I + jg_Q \quad (41)$$

Forma cartesiana

$$\tilde{g}(t) = a(t)e^{j\phi t} \quad (42)$$

Forma Polar

$$\tilde{g}(t) = g_+(t) \times e^{-j2\pi f_c t} \quad (43)$$

Com a análise da envolvente $\tilde{g}(t)$ concluímos que estamos perante um sinal complexo, que não é mais do que a soma de dois sinais: um real e outro imaginário. Por outras palavras é uma versão de $g_+(t)$ mas deslocada na frequência.

Como o sinal $g(t)$ é a parte real da pré-envolvente $g_+(t)$ é possível expressar o sinal passa-banda inicial $g(t)$ em termos da envolvente complexa $\tilde{g}(t)$.

$$g(t) = \text{Re}\{\tilde{g}(t)e^{j\omega_c t}\} \quad (44)$$

$$g(t) = g_I \cos(\omega_c t) - g_Q \sin(\omega_c t) \quad (44.1)$$

$$g(t) = a(t) \times \cos(\omega_c t + \phi(t)) \quad (44.2)$$

Com a última expressão estamos perante um sinal $g(t)$ facilmente manipulado para variar a amplitude, a fase ou a frequência consoante a modulação que se pretende utilizar.

Após a compreensão destes conceitos, estamos em condições de gerar a partir de dois sinais g_I e g_Q o sinal passa-banda $g(t)$ e a partir deste gerar o sinal em banda-base $\tilde{g}(t)$ [27].

São apresentados dois esquemas, a) e b), que descrevem o mencionado anteriormente.

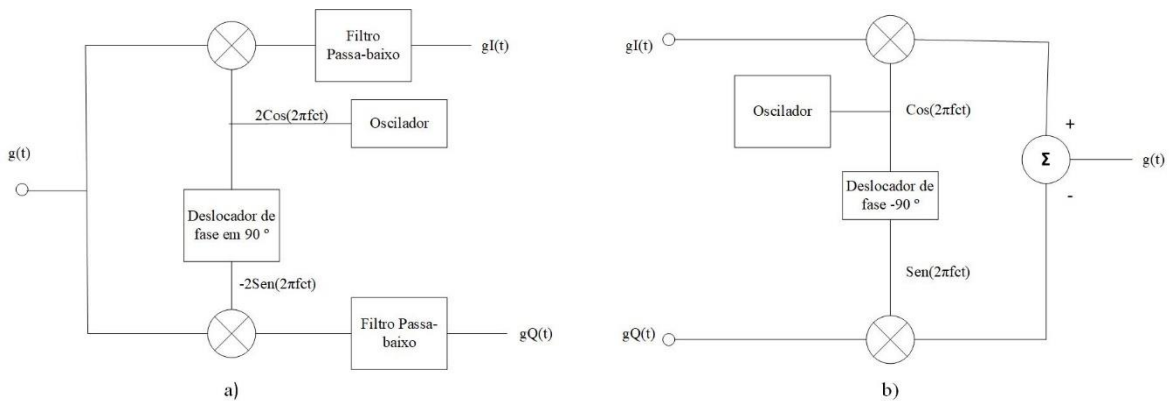


Figura 48: a) Esquema para obter as componentes em fase e em quadratura de um sistema passa-banda.

b) Esquema para reconstruir o sinal passa-banda a partir das suas componentes em fase e me quadratura[27].

6.2.2 Avaliar a resposta a um sistema passa-banda

Se ao sinal $g(t)$ aplicarmos um sistema passa-banda linear e invariante no tempo com resposta a impulso $h(t)$ e resposta em frequência $H(f)$ é possível efetuar a mesma análise realizada anteriormente a sistemas passa-banda, ou seja, pretendemos que o sistema se desloque para a banda-base com a premissa de simplificar a sua análise e compreensão. Seguidamente é apresentando o esquema que retrata a situação descrita.

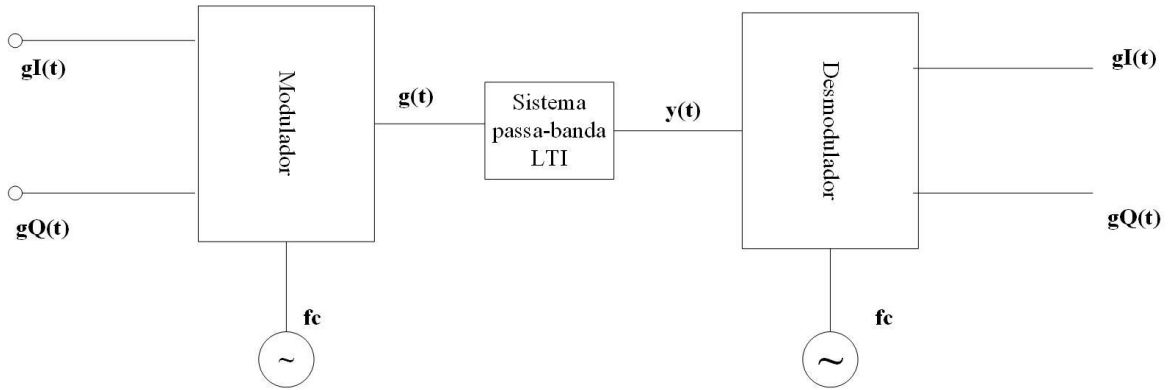


Figura 49: Esquema para obter as componentes em fase e quadratura do sinal $g(t)$ passa-banda.

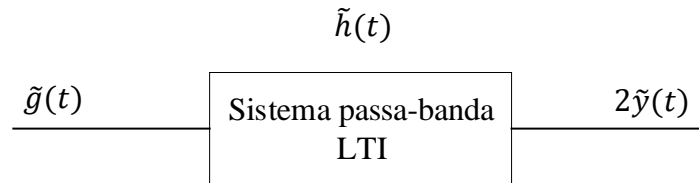


Figura 50: Esquema sistema em banda-base.

Utilizando a mesma análise podemos definir a resposta a impulso complexa da seguinte forma:

$$\tilde{h}(t) = h_I(t) + jh_Q(t) \quad (45)$$

$$h(t) = \text{Re}\{\tilde{h}(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (45.1)$$

A sua resposta em frequência, já em banda-base é definida por:

$$2h(t) = \tilde{h}(t)e^{j2\pi f_c t} + \tilde{h}^*(t)e^{-j2\pi f_c t} \quad (45.2)$$

onde $\tilde{h}^*(t)$ é o complexo conjugado de $\tilde{h}(t)$. Aplicando propriedade da conjugação complexa da transformada de Fourier obtemos a seguinte expressão:

$$2H(f) = \tilde{H}(f - f_c) + \tilde{H}^*(-f - f_c) \quad (45.3)$$

$$\tilde{H}(f - f_c) = 2H(f), f > 0$$

Determinamos $\tilde{H}(f)$ considerando apenas a parte positiva do espectro de $H(f)$, deslocando-a para a origem e multiplicando pelo fator 2, pois são dois sinais.[27]

$$2\tilde{y}(t) = \tilde{h}(t) * \tilde{g}(t) = \quad (45.4)$$

$$2\tilde{y}(t) = h_I(t) + jh_Q(t) * g_I(t) + jg_Q(t) = \quad (45.5)$$

$$= h_I(t) \times x_I(t) - h_Q(t) \times x_Q(t) + j[h_Q(t) \times x_I(t) + h_I(t) \times x_Q(t)] \quad (45.6)$$

6.2.3 Redução da frequência de amostragem por um fator inteiro ($\downarrow M$)

Após a deslocação do sinal para a banda-base podemos então realizar a decimação que consiste em reduzir a frequência de amostragem do sinal de entrada e, conseqüentemente o número de amostras do sinal. De uma forma simples, consiste em eliminar amostras do sinal através de um fator inteiro, no nosso caso 24.

A função “*decimate*” do MATLAB realiza esta operação. É importante ter em conta que este comando já contempla a filtragem passa-baixo do sinal para evitar o "aliasing".

6.2.4 Configuração da duração dos pulsos e detecção dos pulsos

Definir a duração dos pulsos é outro fator a ter em conta pois reduzindo a frequência de amostragem (F_a) para 8 kHz temos que ter em atenção a duração do pulso.

A duração (T) do pulso relaciona-se com o número de amostras (N) e com a frequência de amostragem (F_a) da seguinte forma:

$$N = T \times F_a \quad (46)$$

Assim, se a duração do pulso for demasiado pequena leva a que o sinal, já na banda base, apresente um reduzido número de amostras e seja impossível detetar qualquer tipo de desvio na frequência, como demonstrado seguidamente para um pulso de 300 μ s.

$$N = 0.3 \times 10^{-3} \times 8000 = 2.4 \text{ amostras} \quad (46.1)$$

Para contornar este problema geramos pulsos de ultrassons com duração aproximada de 10ms e distância entre pulsos de 120ms aproximadamente.

Se calcularmos o número de amostras do pulso, na banda base, concluímos que o obtemos $N=80$ amostras, como é corroborado pelo seguinte cálculo.

$$N = 10 \times 10^{-3} \times 8000 = 80 \text{ amostras} \quad (46.2)$$

Com este número de amostras parece possível detetar os desvios de frequência para as velocidades mencionadas inicialmente. Os desvios de frequência estão relacionados com a velocidade com que a fonte/obstáculo se movem e ainda com a velocidade do som no ar.

Pelas seguintes fórmulas podemos analisar os desvios em Hertz, provocados para as velocidades de 0.5 m/s e 6 m/s.

$$fr = \frac{343}{342.5} \times 40000 \quad (47)$$

$$fr = 40.058 \text{ kHz} - \text{Aproximação} \quad (47.1)$$

$$\Delta f = 40058 - 40000 = \mathbf{58 \text{ Hz}} \quad (47.2)$$

Para uma velocidade de marcha igual a 6 m/s o desvio medido é de:

$$fr = \frac{343}{337} \times 40000 \quad (47.3)$$

$$fr = 40.712 \text{ kHz} - \text{Aproximação} \quad (47.4)$$

$$\Delta f = 40712 - 40000 = \mathbf{712 \text{ Hz}} \quad (47.5)$$

Na seguinte tabela é apresentada a gama de valores, considerando diversos tipos de marcha para o utilizador.

Tabela 3: Desvios teóricos.

Velocidade [m/s]	Frequência emissor[Hz]	Frequência recetor [Hz]	Desvio de frequência [Hz]
0.5	40000	40058	58
1		40117	117
2		40235	234.60
3		40353	352.94
4		40472	471.98
5		40592	591.72
6		40712	712.17

A deteção dos pulsos é importante, porque perante o sinal capturado pela experiência é necessário isolar os ecos para determinar qual o desvio em frequência provocado. Portanto, detetá-los com precisão torna-se imprescindível, devido ao ruído e/ou interferências que possam surgir no sinal real.

Assim, utilizei um filtro passa-baixo, mais concretamente um filtro de média simples, para detetar os pulsos, seguidamente foi preciso determinar o início e o fim de cada pulso utilizando um *threshold* e algumas funções do MATLAB como “*find*” e “*diff*”.

Após isolar cada eco, o sinal complexo foi introduzido no algoritmo e detetado o desvio correspondente.

Pelos resultados obtidos no MATLAB, concluímos que o algoritmo consegue detetar os desvios mencionados anteriormente, mesmo com a introdução de ruído complexo.

Nos gráficos seguintes é apresentada a estimativa do desvio para uma frequência de amostragem de 8000Hz com um *N* igual a 800 amostras exibe uma resolução da DFT para 100Hz, que pelos cálculos efetuados anteriormente, para a velocidade de 0.5m/s, não se conseguia medir sem métodos de super-resolução.

Para os vários métodos, apenas são exibidos dois valores de velocidade: velocidade lenta: 0.5m/s e marcha rápida: 6 m/s.

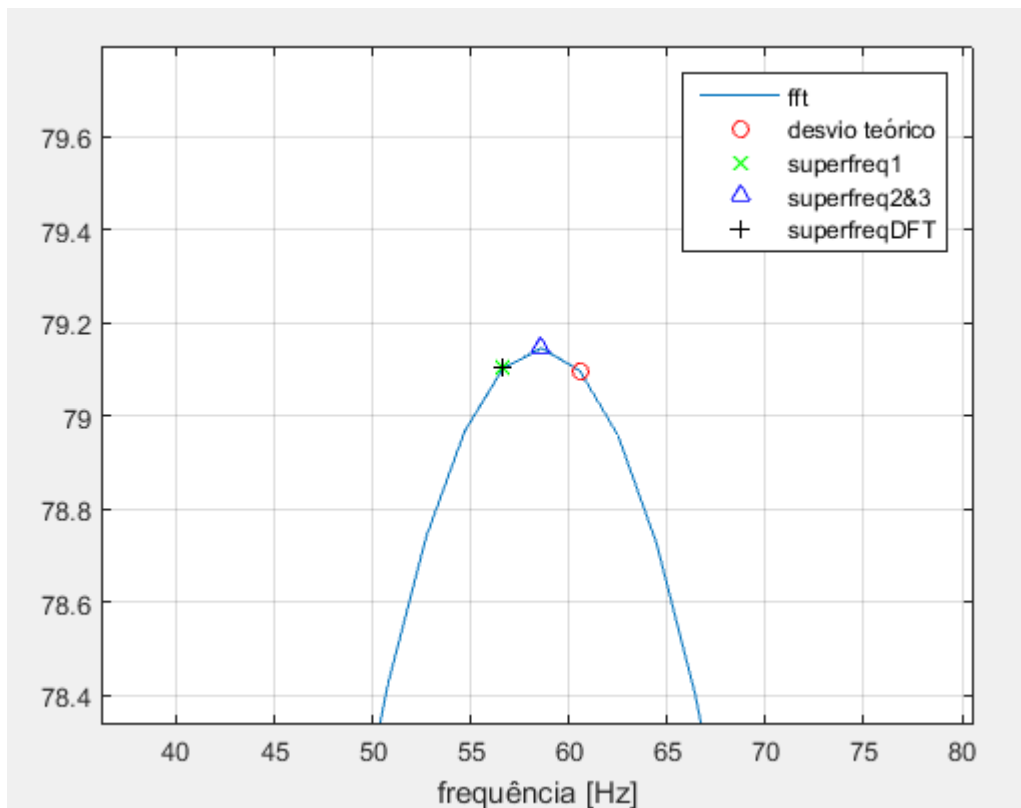


Figura 51: Desvio de frequência de 58 Hz

Tabela 4: Desvios estimados para os ecos detetados

Ecos detetados	Superfreq1[Hz]	Superfreq2&3[Hz]	SuperfreqDFT [Hz]
Eco 1	59.68	60.90	58.64
Eco 2	53.42	54.16	52.47
Eco 3	61.78	62.10	61.73
Eco 4	54.42	57.08	55.56

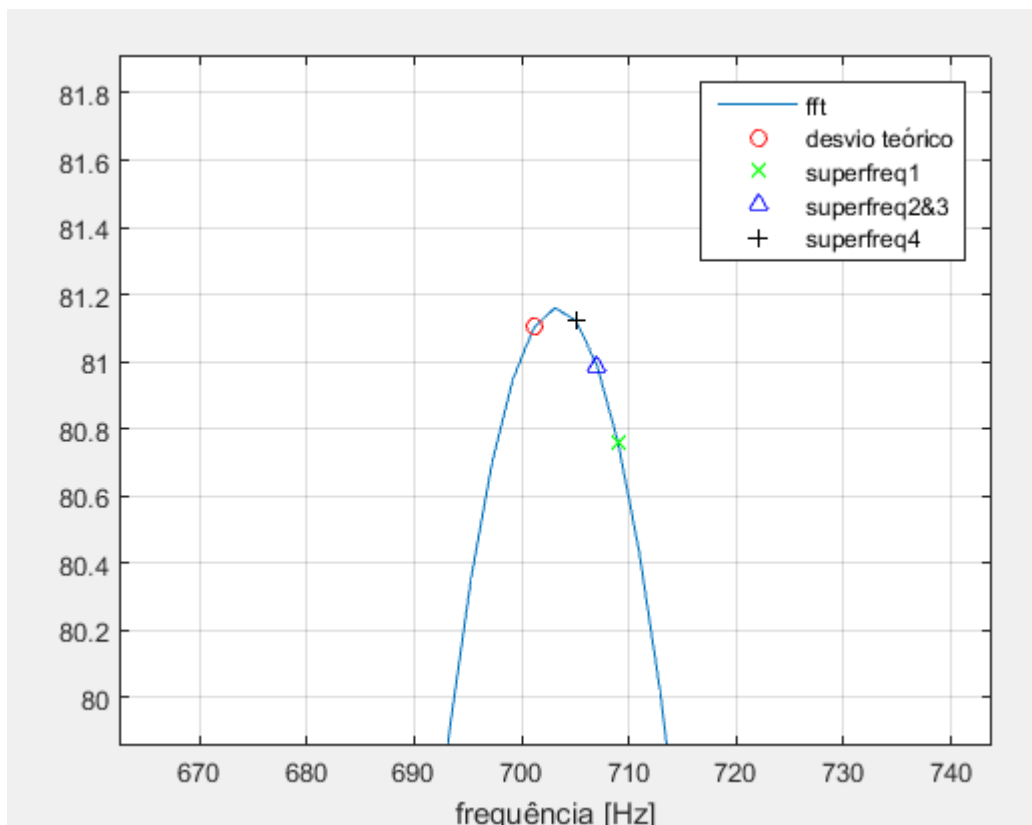


Figura 52: Desvio de frequência de 700 Hz

Tabela 5: Desvios estimados para os ecos detetados.

Ecos detetados	Superfreq1[Hz]	Superfreq2&3[Hz]	SuperfreqDFT [Hz]
Eco 1	697.25	696.40	694.4
Eco 2	694.18	699.43	697.53
Eco 3	702.34	695.38	694.4
Eco 4	706.93	704.51	703.70

Pelos gráficos podemos observar que o algoritmo calcula, ainda que com algum erro, os desvios corretamente, pelo que estão reunidas as condições ideais para os testes com a “Chapa Voadora” e os transdutores fosse realizada.

Inicialmente gerei, no MATLAB, o sinal com os pulsos usando uma portadora igual a 40kHz e duração de 1 minuto. Com a função *audiowrite* guardei o ficheiro em formato *wav* para que, posteriormente fosse lido no software *audacity*.

Foi então necessário utilizar a placa de som, transdutores de ultrassons (recetor e transmissor) e software *audacity*.

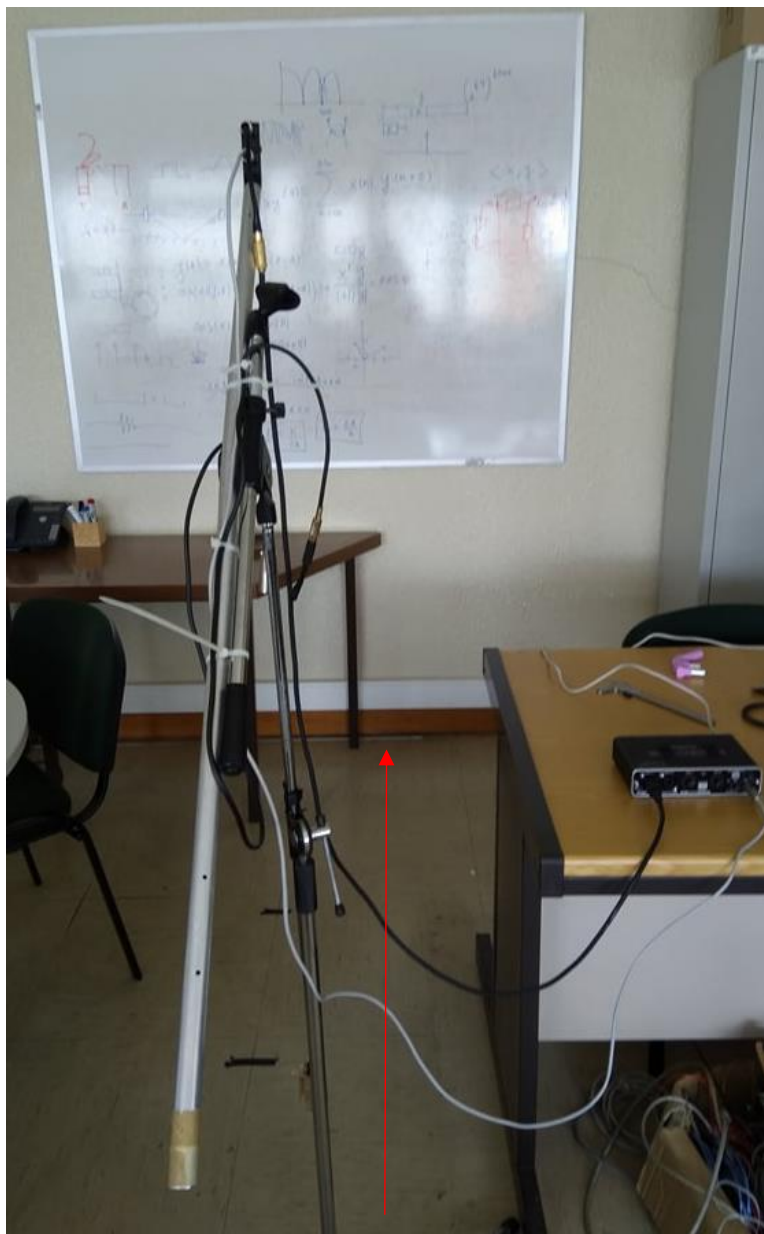


Figura 53: Esquema de montagem para a experiência da "Chapa Voadora".

Após a montagem da experiência, reproduzida na Figura 53, e da aquisição de sinal percebemos que a duração estipulada para cada pulso era demasiado grande para contemplar uma gama de distância mínima de 0.5 metros, pois consoante a distância a que se encontra o obstáculo o eco demora mais ou menos tempo a chegar, assim, para uma distância de 0.5m o eco demora 3ms e com pulsos de duração de 10ms o eco ficaria “sobrepосто” no sinal agravando a análise do sinal com o fenómeno *cross-talk* referido mais à frente.

Uma solução evidente para contornar este problema é a diminuição da duração do pulso para 3ms, mantendo o período de 100ms.

Contundo, após as primeiras experiências foi verificado acoplamento direto entre o transmissor e o recetor.

Portanto, antes de proceder aos testes com a “Chapa Voadora” foi necessário reduzir este tipo de interferência entre canais de transmissão que pode ser analisado no anexo 2.

Como dito anteriormente, consoante a distância a que se encontra o obstáculo os ecos apresentam diferentes intervalos de tempo para se propagarem, dependendo também da velocidade do som no ar. A seguinte tabela mostra os diferentes intervalos de tempo calculadas através da fórmula 4.

Tabela 6: Intervalo de tempo que os ecos demoram a chegar.

Distância placa transdutores d [m]	Distância do eco $2 \times d$ [m]	Velocidade som ar- v [m/s]	Intervalo de tempo Δt [s]
0.5	1	343	0.003
1	2	343	0.006
1.5	3	343	0.009
2	4	343	0.012

Para isolar o eco dos sinais adquiridos foi realizado todo o processamento descrito anteriormente. No anexo 1 é possível analisar todo este processamento num diagrama de blocos.

Para a experiência da “Chapa Voadora” não utilizamos o detetor de pulso ilustrado no diagrama de blocos do anexo 1, pois neste teste existia sempre presença de sinal, ou seja, era certo que havia sempre eco vindo das reflexões da “Chapa Voadora” não tendo sido necessário implementar um detetor de pulso.

Para determinar o início e fim de cada pulso foi necessário visualizar o gráfico da Figura 54 para que pudéssemos retirar a amostra onde se recebia o primeiro pulso. Como o intervalo de tempo até ao pulso seguinte é periódica, nomeadamente 0.1s, ou seja, após 8000 amostras, foi apenas necessário criar um vetor que representa o número de pulsos encontrados para o sinal da experiência.

Pela seguinte fórmula podemos verificar o descrito anteriormente.

$$N = T * Fa = 0.1 * 8000 = 800 \text{ amostras} \quad (48)$$

Admitimos que o número de amostras máximo para visualizar o eco correspondente à “Chapa Voadora” era igual à distância (ida e volta) ao qual se encontravam os transdutores

da parede, nomeadamente 4 metros (2 metros ida +2 metros de volta). Perante estes dados foi apenas necessário construir uma matriz onde as colunas representavam o número de amostras correspondentes aos 4 metros, gama possível para os ecos, e as linhas o número de pulsos detetados. Seguidamente, foi apenas necessário visualizar o sinal e perceber onde estava o eco da “Chapa Voadora”.

Aquando da visualização de cada pulso, no gráfico, verificou-se que até uma distância igual a 0.45 metros, aproximadamente, o sinal era, na maior parte das vezes, constante o que permitiu concluir que era a fração do sinal correspondente ao *cross-talk*, assim, retirámos essa fração de sinal e foi apenas considerado o sinal a partir dessa distância até ao segmento de sinal que se ia alterando.

Por fim colocámos o sinal no algoritmo e fomos medindo o desvio em frequência para todos os pulsos detetados no sinal correspondente e fomos observando em que local os diferentes métodos assinalava o desvio.

Através dos seguintes gráficos podemos observar e analisar o mencionado anteriormente.

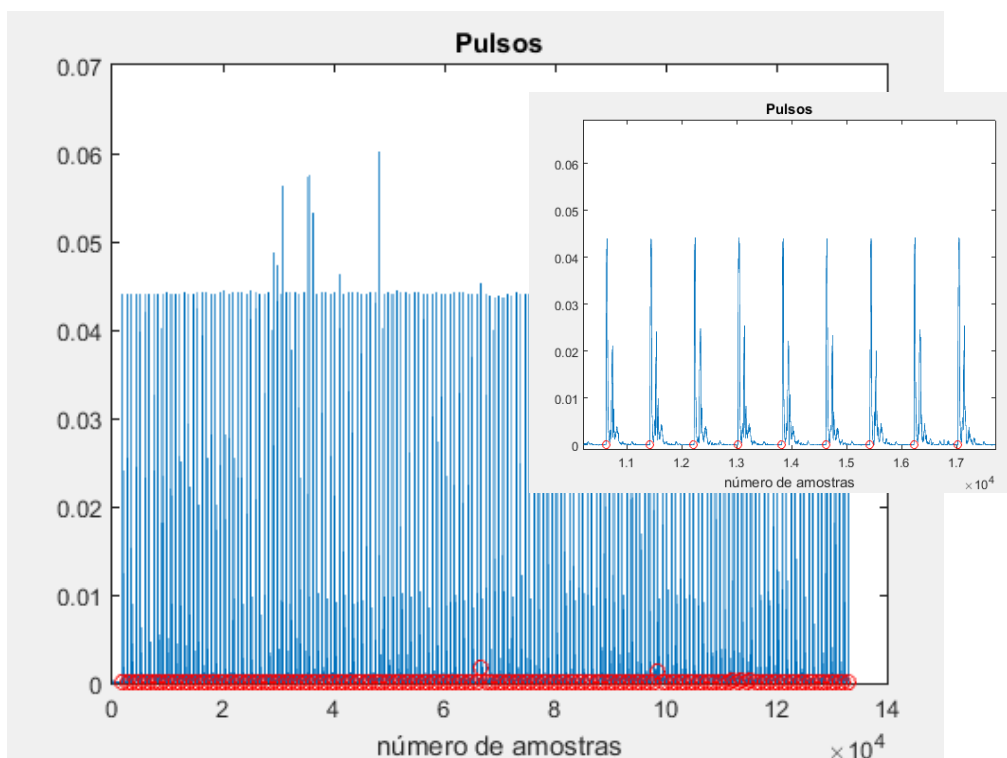


Figura 54: Pulsos produzidos pela experiência da "Chapa Voadora".

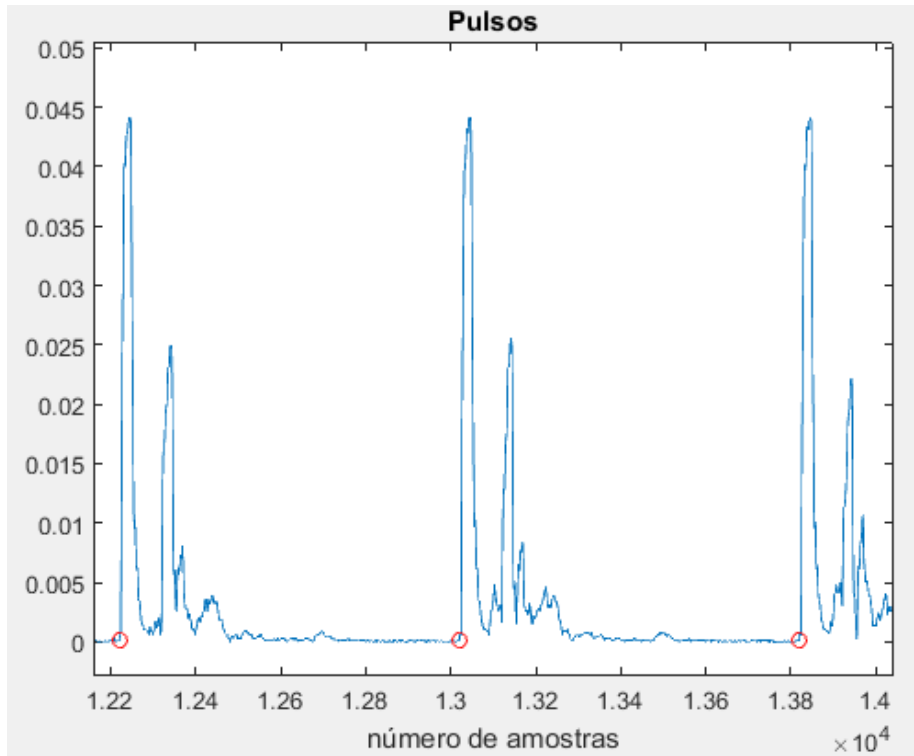


Figura 55: Pulsos gerados pela experiência da “Chapa Voadora” - ampliado.

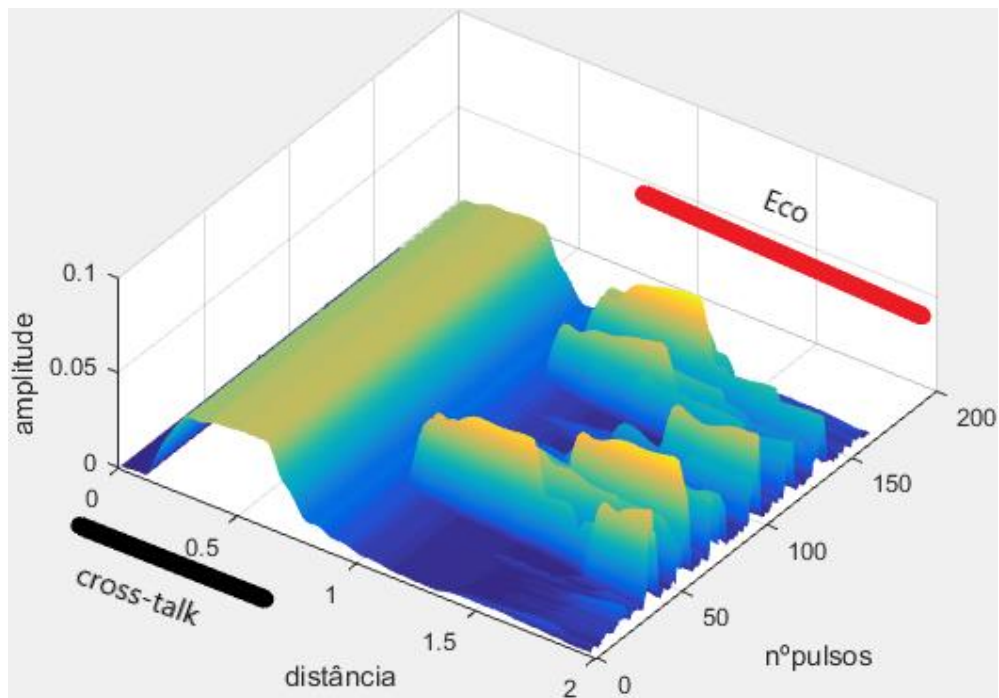
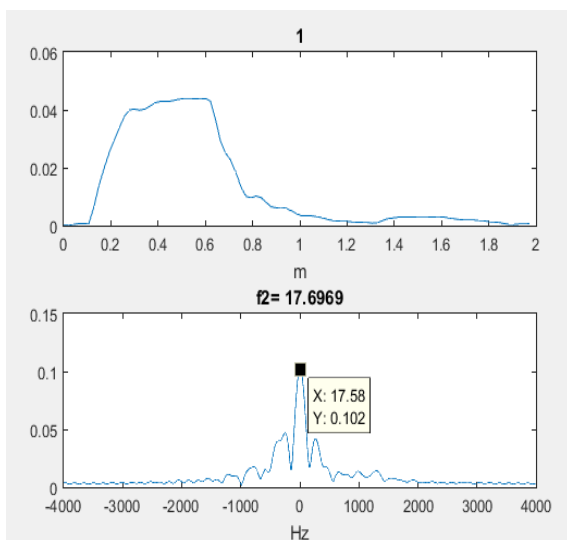


Figura 56: Gráfico três dimensões para analisar os ecos referentes à experiência da “Chapa Voadora”.

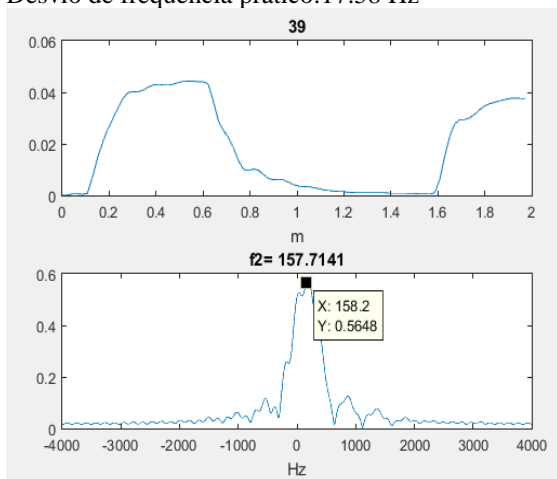
Pela observação da Figura 56 podemos observar que existe cross-talk ao longo do sinal adquirido na experiência e o eco apresenta-se, claramente entre 0.85 a 2 metros.

É com esta pequena análise que conseguimos introduzir, no algoritmo a fração do sinal possível para o eco de forma a não falsear os resultados retirados posteriormente.



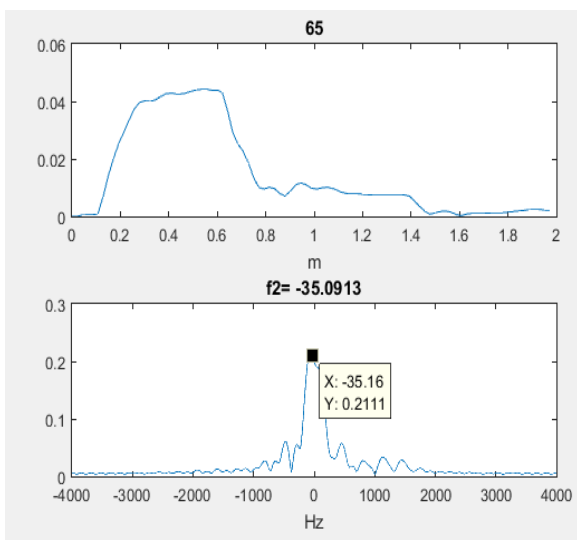
a) Desvio de frequência prático: 17.6969 Hz

Desvio de frequência prático: 17.58 Hz



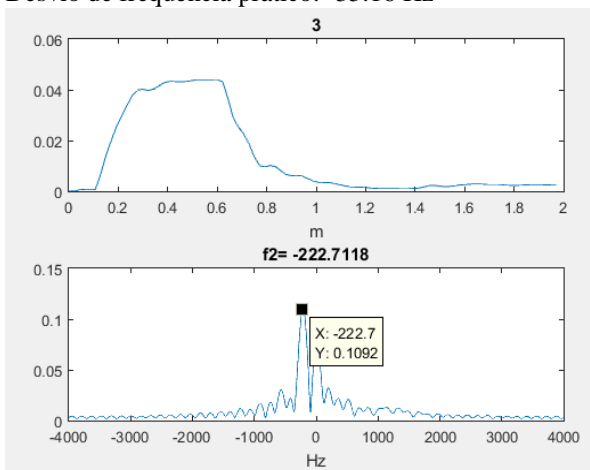
c) Desvio de frequência prático: 157.7141 Hz

Desvio de frequência prático: 158.2 Hz



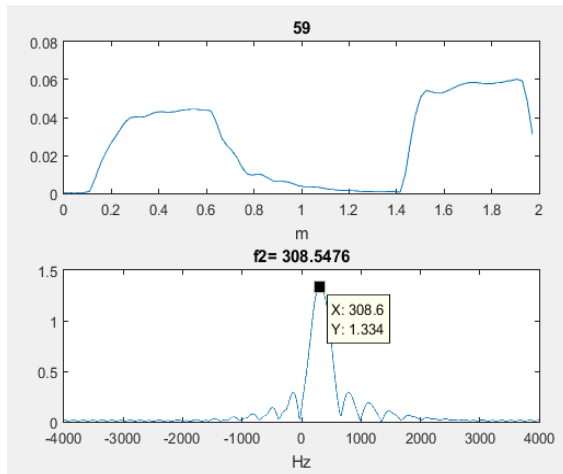
b) Desvio de frequência prático: -35.0913 Hz

Desvio de frequência prático: -35.16 Hz

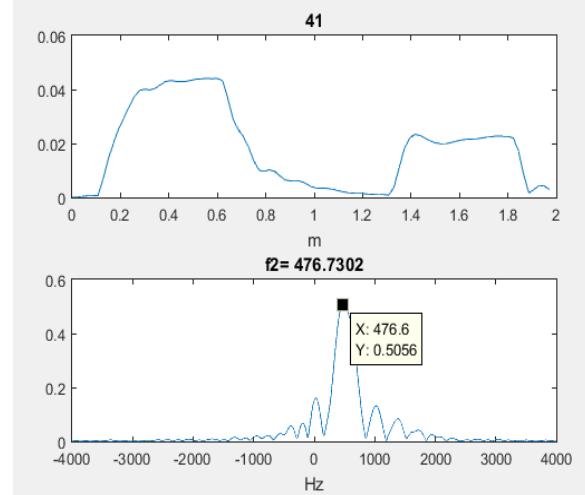


d) Desvio de frequência prático: -222.7118 Hz

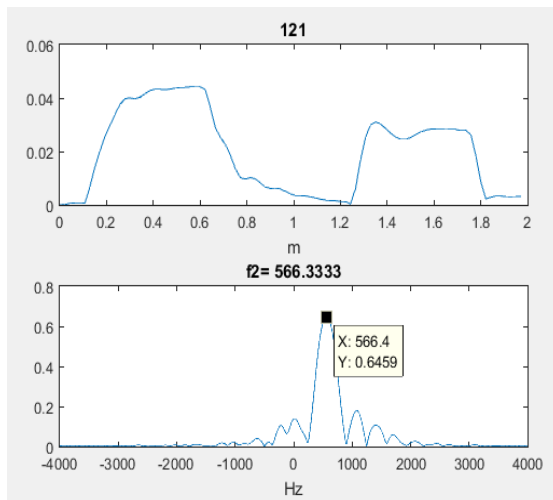
Desvio de frequência prático: -222.7 Hz



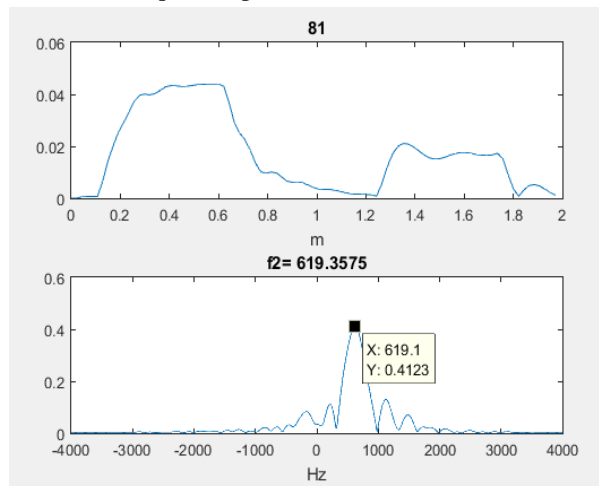
e) Desvio de frequência prático: 308.5476 Hz
Desvio de frequência prático: 308.6 Hz



f) Desvio de frequência prático: 476.7302 Hz
Desvio de frequência prático: 476.6 Hz



g) Desvio de frequência prático: 566.3333 Hz
Desvio de frequência prático: 566.4 Hz



h) Desvio de frequência prático: 619.3575 Hz
Desvio de frequência prático: 619.1 Hz

Figura 57: Valores dos desvios de frequência práticos encontrados através do método "superfreq2&3".

Na Figura 57 são apresentados oito pulsos onde foi realizada a análise do módulo do sinal, na parte superior de cada figura e na parte inferior, a sua análise espectral. Aqui são recolhidos os valores estimados dos desvios de frequência provocados na experiência.

Pela observação dos gráficos da Figura 57 é possível observar que o algoritmo deteta com precisão os desvios de frequência provocados aquando a aproximação e afastamento da “Chapa Voadora” aos transdutores.

É possível observar desvios de frequência positivos e negativos que correspondem à aproximação e afastamento da chapa, respetivamente.

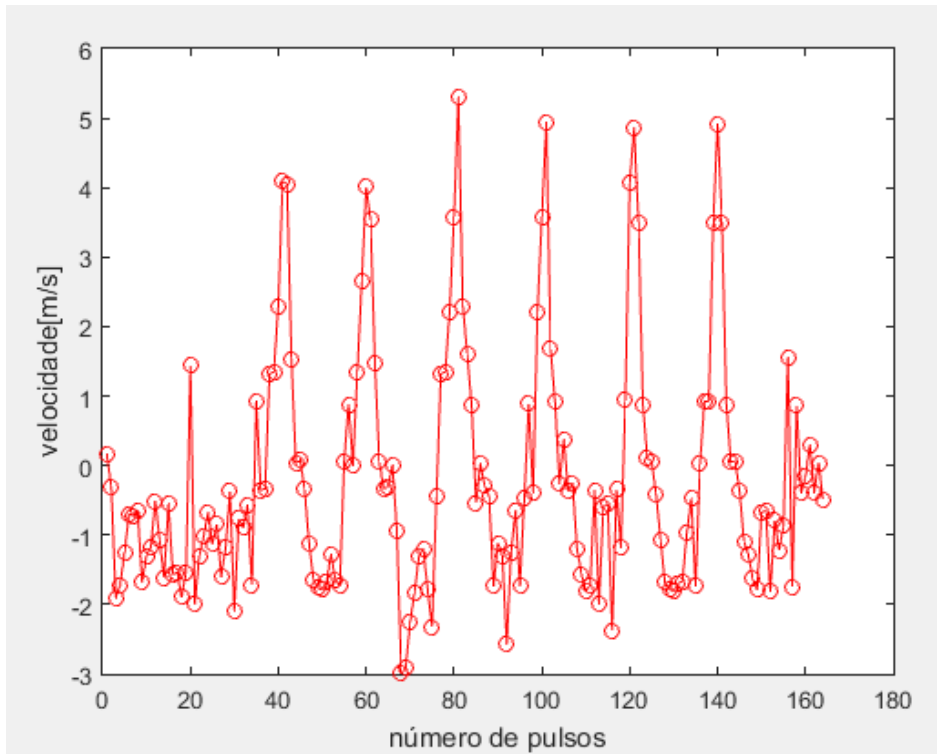


Figura 58: Velocidade estimada pelo método “superfreq2&3” para a experiência da “Chapa Voadora” em função do tempo.

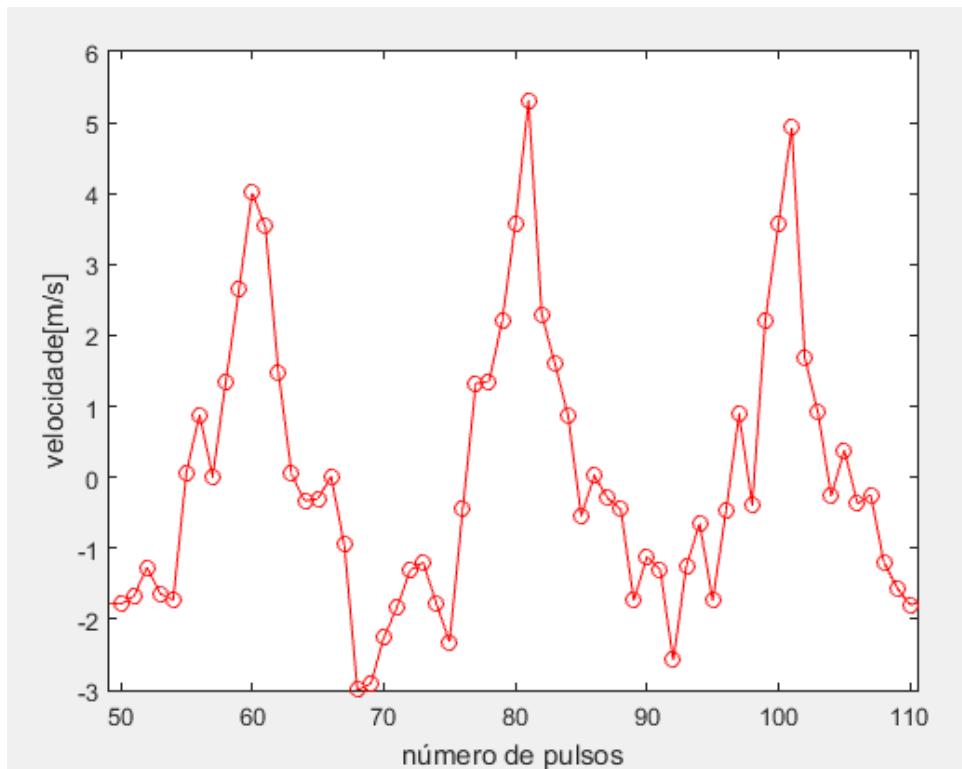


Figura 59: Velocidade estimada pelo método “superfreq2&3” para a experiência da “Chapa Voadora” em função do tempo (ampliado).

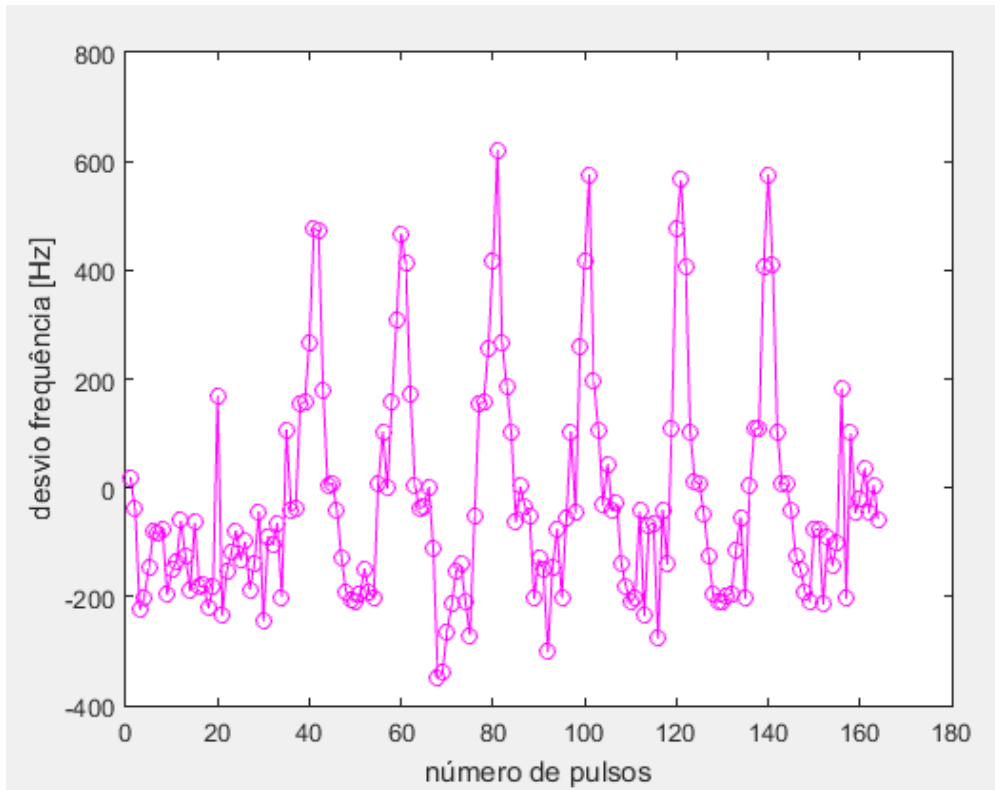


Figura 60: Desvios de frequência estimados pelo método "superfreq2&3" para a experiência da "Chapa Voadora" em função do tempo.

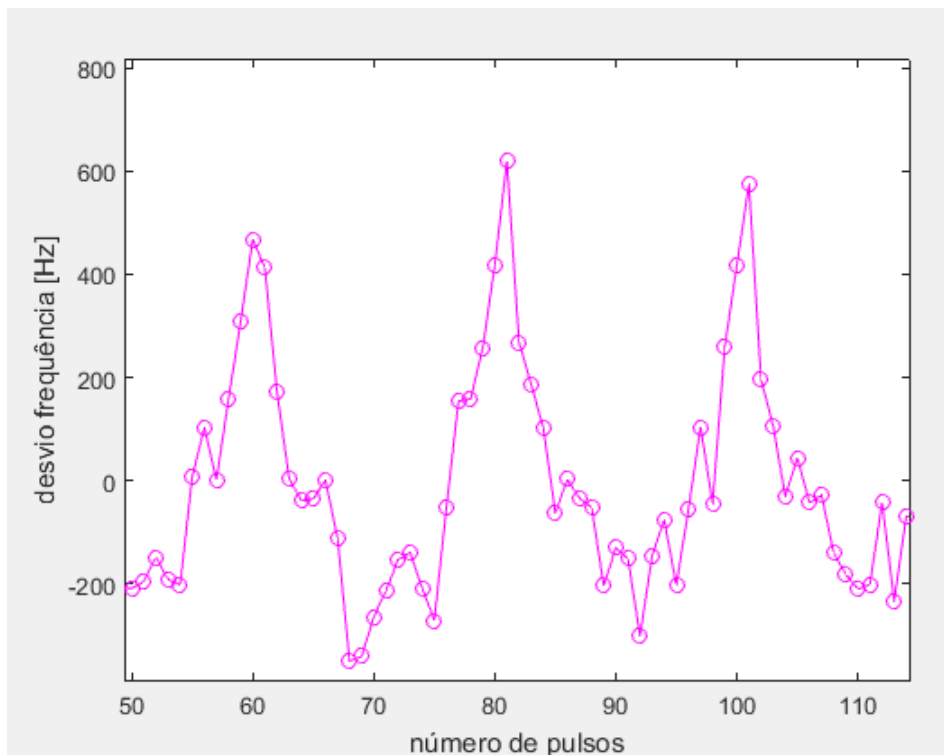


Figura 61: Desvios de frequência estimados pelo método "superfreq2&3" para a experiência da "Chapa Voadora" em função do tempo (ampliado).

A Figura 58 e a Figura 60 representam a velocidade com que foi movimentada a “Chapa Voadora” em função do número de pulsos e os desvios de frequência em função do número de pulsos, respetivamente. Estes dois tipos de gráficos são duas formas de apresentar os resultados pois a velocidade é relacionada com o desvio de frequência como mencionado anteriormente, na equação (2). Esta fórmula, pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta f = \frac{\Delta v}{c} \times f_0 \quad (49)$$

Onde,

$\Delta f = f - f_0;$ $\Delta v = v_r - v_s;$ <i>c – velocidade do som no ar: 343 m/s</i> $f_0 = 40000 \text{ Hz}$

Através da Figura 60 e Figura 61 podemos observar os desvios positivos e negativos correspondentes à aproximação e afastamento da “Chapa Voadora” aos transdutores, respetivamente. O Δf é positivo quando a fonte se move em relação ao observador sendo a velocidade da fonte negativa e a velocidade do observador nula. Os desvios de frequência positivos são próximos de 600Hz e o seu valor negativo, próximo, de -400Hz, que corresponde na Figura 58 a velocidades, compreendidas entre 5 e -3 m/s, aproximadamente.

Os valores encontrados para esta experiência vão ao encontro dos valores calculados na Tabela 3, concluindo assim que este método de super-resolução – “superfreq2&3” consegue estimar, com precisão, os desvios de frequência provocados para a experiência.

7 Conclusões e Trabalho Futuro

No decorrer desta dissertação foi possível compreender a importância de métodos de super-resolução. Esta técnica é poderosa pois é capaz, neste caso, de estimar desvios de frequência com precisão, ou seja, a estimativa das frequências é mais fina do que as frequências discretas correspondentes as linhas espectrais – *bins* da DFT. No capítulo 6 é possível comprovar esta afirmação pois para um número de amostras igual a 80 e frequência de amostragem igual a 8000 Hz é admitida uma resolução em frequência de 100 Hz, no entanto se o utilizador dos óculos viajar a uma velocidade igual a 0.5m/s, existe um desvio de frequência de apenas 58 Hz, que através de análise espectral simples era impossível de determinar pois o espaçamento entre bandas espectrais ocorre de 100 em 100Hz, não conseguindo determinar esse valor para o desvio. Já com os métodos de super-resolução estes valores são calculados corretamente.

Em relação à gama de distâncias que balizam a deteção de obstáculos foram também alcançados os objetivos propostos. Através dos testes efetuados foi comprovado que o algoritmo deteta sem problemas os desvios para as diferentes velocidades de marcha, nomeadamente 0.5m/s e para distâncias entre 0.5m a 2m.

Um dos pontos pouco estudados no algoritmo foi a deteção errada de desvios em frequência, ou seja, perante o sinal adquirido no laboratório, partimos do princípio que existia sempre eco, no entanto aquando testes *outdoor* este tipo de considerações é pouco viável pois pode não existir eco e o algoritmo calcula um valor estimado para o desvio de frequência, que na realidade não existiu, enganando o utilizador que se está a aproximar um obstáculo e na realidade não existe nenhum obstáculo. Por outras palavras, é conveniente construir um detetor de pico, para que, de forma inequívoca sejam detetados os ecos. Num detetor de pico o sinal adquirido é filtrado por um filtro passa-baixo e posteriormente, por uma condição. Esta condição é designada de *threshold* e auxilia na deteção dos ecos, ou seja, são apenas considerados ecos quando se encontram acima de um determinado valor de amplitude, eliminando, assim o ruído ambiente ou quaisquer artefactos que possam existir sem ser o eco.

Portanto, uma das primeiras tarefas futuras seria melhorar o algoritmo nesse ponto, para que a tecnologia fique a funcionar corretamente e o cego não tenha motivos para

abandonar este dispositivo eletrônico como parece acontecer com a maior parte das tecnologias já presentes no mercado.

Durante a realização deste projeto não foi possível passar o algoritmo construído em software MATLAB para um hardware, no entanto o algoritmo foi preparado para ser implementado num hardware compacto e fácil de adicionar aos óculos.

Assim, uma outra tarefa futura passa por colocar o algoritmo em hardware, adicioná-lo aos óculos e, posteriormente elaborar testes no exterior, nomeadamente ruas, lugares onde existam árvores, sinais de sinalização, escadas, varandas de forma a testar a tecnologia nas lacunas descritas inicialmente, isto é, em obstáculos acima da cintura, onde o cão-guia ou a bengala branca são pouco eficazes.

Contudo podemos considerar que os óculos são um dispositivo eletrônico com potencial para os cegos utilizarem durante as suas deslocações diárias pois pode torna-se um equipamento leve, fácil de manusear, e com diversas funcionalidades nomeadamente, a proteção dos olhos através dos óculos de sol, a deteção de obstáculos que está oculta, possivelmente junto as hastes dos mesmos e ainda a facilidade com que o utilizador se vai adaptar a este equipamento, visto que os óculos de sol, normalmente, são um dos acessórios característicos das pessoas portadoras de deficiência visual.

Referências Bibliográficas

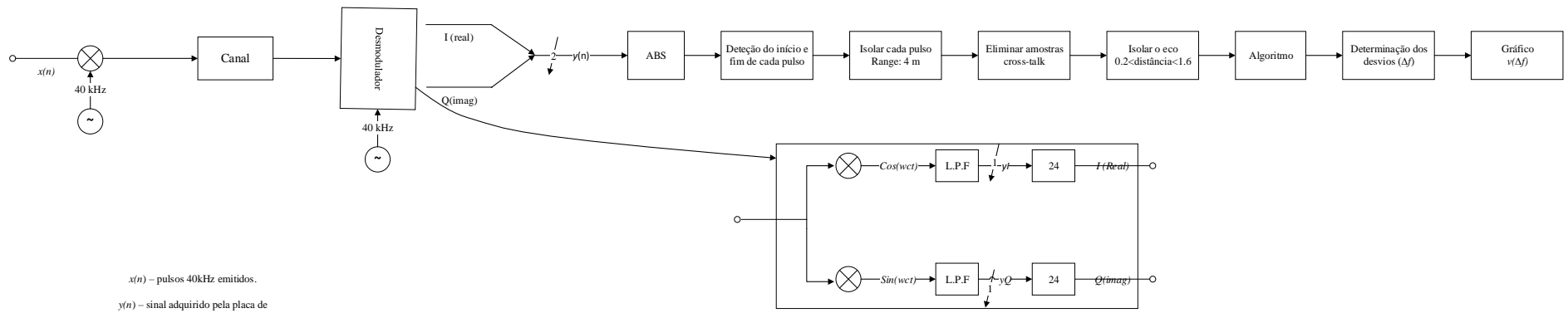
- [1] I. N. de Estatística, *Censos 2011*. .
- [2] W. M. Centre, “WHO | Vision impairment and blindness,” *WHO*, 2017.
- [3] ACAPO(Asociação dos Cegos e Amblíopes de Portugal), “Produtos de Apoio | Associação dos Cegos e Amblíopes de Portugal,” *Deficiência Visual*, 2017. [Online]. Available: <http://www.acapo.pt/deficiencia-visual/perguntas-e-respostas/produtos-de-apoio>. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [4] V. Impairment, “Full-Text,” vol. 96, no. 5, pp. 5–9, 2012.
- [5] P. Encarnação, L. Azevedo, and A. R. Londral, *Tecnologias de apoio para pessoas com deficiência*. 2015.
- [6] ACAPO, “Glossário | Deficiência Visual.” [Online]. Available: <http://www.acapo.pt/deficiencia-visual/glossario>. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [7] Ó. F. F. Lopes, “MOBIFREE – Equipamentos Eletrónicos de Apoio à Mobilidade do Cego Óscar Filipe Fernandes Lopes MOBIFREE – Equipamentos Eletrónicos de Apoio à Mobilidade do Cego,” Universidade de Aveiro, 2012.
- [8] M. R. S. GARCIA, “CEGUEIRA CONGÉNITA E ADQUIRIDA : IMPLICAÇÕES NA SAÚDE MENTAL E RESILIÊNCIA,” Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, 2014.
- [9] M. T. Leal, M. C. Durão, and M. L. B. Abecasis, *Anatomia e Fisiologia.pdf*, 6ª edição. 2003.
- [10] Sonia B. Hoffmann, “História do Uso e das Técnicas de Manejo da Bengala. | Bengala Legal,” 2009. [Online]. Available: <http://www.bengalalegal.com/uso-de-bengala>. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [11] S. I. F. Lopes, “Localização de obstáculos para invisuais utilizando ultra-sons e técnicas de espacialização,” Universidade de Aveiro, 2009.
- [12] P. R. M. Rosa, “Bengala de apoio a cegos com deteção de buracos,” Universidade de Aveiro, 2009.
- [13] Wicab, “BrainPort V100 Vision Aid.” [Online]. Available: <https://www.wicab.com/>. [Accessed: 14-Dec-2017].

- [14] “Blinput - smartphone concept for the visually impaired,” 2010. [Online]. Available: <http://www.core77.com/posts/18048/blinput-smartphone-concept-for-the-visually-impaired-18048>. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [15] “Meet The Tacit Project. It’s Sonar For The Blind.,” 2011. [Online]. Available: <http://grathio.com/2011/08/meet-the-tacit-project-its-sonar-for-the-blind/>. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [16] A. Pereira, N. Nunes, D. Vieira, N. Costa, H. Fernandes, and J. Barroso, “Blind Guide: An Ultrasound Sensor-based Body Area Network for Guiding Blind People,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 67, no. Dsai, pp. 403–408, 2015.
- [17] “About the UltraCane.” [Online]. Available: https://www.ultracane.com/about_the_ultracane. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [18] “Ray® - the handy mobility aid!” [Online]. Available: <http://www.caretec.at/Mobility.148.0.html?&L=wvrzbfpylpgdetail%3D763&cHash=d940c4ef4aa7a5842d4e58c7225fede3&detail=3131>. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [19] J. M. H. du Buf, J. Barroso, J. M. F. Rodrigues, H. Paredes, M. Farrajota, H. Fernandes, J. José, V. Teixeira, and M. Saleiro, “The SmartVision Navigation Prototype for Blind Users,” *Int. J. Digit. Content Technol. its Appl.*, vol. 5, no. 5, pp. 351–361, 2011.
- [20] J. Barroso, H. Paredes, and V. Filipe, “Projeto CE4Blind dá mais qualidade de vida aos invisuais — INESCTEC,” 2016. [Online]. Available: <https://www.inesctec.pt/csig/noticias-eventos/noticias/projeto-ce4blind-da-mais-qualidade-de-vida-aos-invisuais/>. [Accessed: 14-Dec-2017].
- [21] J. H. C. Jorge, “Detecção Activa de Obstáculos Móveis para Apoio à Condução,” Universidade de Aveiro, 2008.
- [22] P. M. Taylor, “The physics of ultrasound,” *Imaging Technol. Urol. Princ. Clin. Appl.*, vol. 9781447124, no. 6, pp. 23–26, 2012.
- [23] T. O. e Silva, “Apontamentos de Processamento Digital de Sinal.”
- [24] National Instruments, “FFTs e janelamento (windowing) - National Instruments,” 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4844/pt/>. [Accessed: 03-Apr-2018].
- [25] A. J. S. Ferreira, “ACCURATE AND ROBUST FREQUENCY ESTIMATION IN THE ODFT DOMAIN,” *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to*

- Audio and Acoustics*, IEEE, New Paltz, NY, USA, p. 4, 2005.
- [26] Y. Dun and G. Liu, “A Fine-Resolution Frequency Estimator in the Odd-DFT Domain,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 2489–2493, 2015.
- [27] S. Haykin, *Communication Systems.pdf*, 4^o edição. USA, 2001.

ANEXO 1 – Diagrama de bloco do processamento no sinal da experiência: “Chapa Voadora”

Neste anexo é apresentado o diagrama de blocos que contém de forma sintetizada os passos realizados para obter o eco da “Chapa Voadora” isolado, para posteriormente aplicar o melhor método e apresentar os gráficos.



ANEXO 2 – Testes para a diminuição do acoplamento direto

O acoplamento direto ou do inglês, cross-talk, é a interferência direta entre o emissor e o recetor.

Este efeito é prejudicial no sinal pois apesar de ainda não se ter recebido qualquer sinal por parte do recetor é capturado um pulso que corresponde ao acoplamento direto, mas que se pode confundir, facilmente com o eco.

Este tipo de interferência pode ser de origem mecânica ou acústica, assim a forma encontrada para solucionar este problema foi a elaboração de diferentes peças, onde se localizavam os transdutores, atuando na redução do acoplamento originado por interferência acústica ou mecânica.

As peças desenhadas foram caracterizadas da seguinte forma:

- Versão 1: Peça sem tubos de alumínio embutidos;
- Versão 2: Peça com os tubos de alumínio embutidos sem saliência entre os transdutores;



Figura 62: Versão 2 - rebordo de 0.5 cm



Figura 63: Versão 2 tubos de alumínio à face

- Versão 3: Peça com os tubos de alumínio embutidos com saliência feita com esponja;



Figura 64: Versão 3 - rebordo 0.5 cm.



Figura 65: Versão 3 - tubos à face.

- Versão 4: Peça com os tubos de alumínio embutidos com saliência feita em 3D- imitação de pirâmides com diferentes alturas;



Figura 66: Versão 4 - tubos à face.

Todos os testes foram realizados nas mesmas condições variando apenas o tipo de peça.

As condições instaladas para a execução foram as seguintes:

Colocação na haste a peça com os transdutores distanciados do obstáculo em 2 metros – nesta experiência o obstáculo era o quadro.

Geração em MATLAB, de um sinal com os pulsos ultrassônicos de 40kHz com duração de pulso de 10ms e período de 100ms durante 11s.

Para perceber qual a peça ideal e de como devem estar posicionados os transdutores, no interior da peça, provocamos várias situações, nomeadamente:

- Tubos de alumínio à face da peça;
- Tubos de alumínio com rebordo de 0.5,1e 2 cm.
- Transdutores posicionados no interior do tubo de alumínio com diferentes distâncias: 1,2 e 3cm.
- Com a peça v4 apenas efetuamos testes para tubos de alumínio à face e com “rebordo” de 0.5 cm.

Nas seguintes figuras podemos ver como são posicionados os transdutores no interior da peça V3.



Figura 68: Posicionamento dos transdutores no interior do tubo com a peça V3.



Figura 67: Vista lateral da peça V3.

Para concluir qual das peças apresentavam melhores resultados recorreremos à amplitude do sinal e à sua variância, pois o objetivo era determinar qual o sinal com menor amplitude e menor variabilidade de valores. Utilizámos estes dois tipos de medidas para podermos excluir possíveis fenómenos que, num instante de sinal, distorçam-no, “iludindo” a função *max*.

As faixas de áudio gravadas no software *audacity* foram exportadas para o MATLAB com o formato *wav* para serem lidas e posteriormente calcular os seus valores máximos e variância. Através da seguinte tabela podemos concluir que ao colocar os transdutores no interior dos tubos de alumínio a uma distância igual a 3 cm obtemos os melhores resultados. Foram realizados testes para distâncias maiores do que 3cm não tendo qualquer redução da energia e do módulo do valor máximo do sinal.

Adicionar um “rebordo” também se mostrou benéfico na diminuição do *cross-talk*, no entanto, pela análise realizada, o “rebordo” ótimo é encontrado para uma distância igual a 0.5 cm.

Portanto, o melhor resultado foi para a peça v3 com rebordo de 0.5 cm e distância no interior dos tubos de 3 cm. É de salientar que a peça v3 contém uma saliência entre os tubos, o que indicia que esta é bastante vantajosa para a diminuição do acoplamento direto.

Tabela 7: Tabela com os valores de energia e módulo do valor máximos dos sinais adquiridos.

Designação	Energia (VAR)	Módulo valor máximo (max x)	Observações
V2_tubosface_TRface	5.1×10^{-3}	0.3370	
V2_tubosface_TR1cm	4.4×10^{-3}	0.3071	
V2_tubosface_TR2cm	3.6714×10^{-4}	0.1641	
V2_tubosface_TR3cm	8.2824×10^{-4}	0.1419	Posicionar os transdutores a 3cm é vantajoso.
V2_tubos05cm_TRface	8.8605×10^{-4}	0.1381	
V2_tubos05cm_TR1cm	5.0766×10^{-4}	0.1120	
V2_tubos05cm_TR2cm	3.2151×10^{-4}	0.0917	
V2_tubos05cm_TR3cm	1.7866×10^{-4}	0.0656	
V2_tubos1cm_TRface	1.8×10^{-3}	0.1963	
V2_tubos1cm_TR1cm	1.5428×10^{-4}	0.0870	
V2_tubos1cm_TR2cm	2.2516×10^{-4}	0.1612	
V2_tubos1cm_TR3cm	2.5828×10^{-4}	0.1169	
V2_tubos2cm_TRface	1.1×10^{-3}	0.1511	
V2_tubos2cm_TR1cm	8.1438×10^{-4}	0.1450	
V2_tubos2cm_TR2cm	3.8186×10^{-4}	0.1096	
V2_tubos2cm_TR3cm	2.6789×10^{-4}	0.0740	Colocar os tubos com 0.5cm traz vantagem com as outras distâncias não tem vantagem.
V3_tubosface_TRface	4.2141×10^{-4}	0.0934	
V3_tubosface_TR1cm	2.7071×10^{-4}	0.0817	
V3_tubosface_TR2cm	2.9904×10^{-4}	0.0871	
V3_tubosface_TR3cm	2.3112×10^{-4}	0.0702	
V3_tubos05cm_TRface	5.2251×10^{-4}	0.1150	
V3_tubos05cm_TR1cm	1.1×10^{-3}	0.1563	
V3_tubos05cm_TR2cm	3.2573×10^{-4}	0.1134	
V3_tubos05cm_TR3cm	4.2326×10^{-5}	0.0382	Melhor valor encontrado

V3_tubos1cm_TRface	9.5195×10^{-4}	0.1454	
V3_tubos1cm_TR1cm	5.4929×10^{-4}	0.1174	
V3_tubos1cm_TR2cm	1.2×10^{-3}	0.1674	
V3_tubos1cm_TR3cm	1.0551×10^{-4}	0.0583	
V3_tubos2cm_TRface	2.0×10^{-3}	0.2061	
V3_tubos2cm_TR1cm	1.0×10^{-3}	0.1532	
V3_tubos2cm_TR2cm	9.7250×10^{-4}	0.1436	
V3_tubos2cm_TR3cm	9.4221×10^{-5}	0.0667	
V4_tubosface_TRface	4.6×10^{-3}	0.3196	
V4_tubosface_TR1cm	1.6×10^{-3}	0.1841	
V4_tubosface_TR2cm	1.0×10^{-3}	0.2437	
V4_tubosface_TR3cm	1.0×10^{-3}	0.1586	
V4_tubos05cm_TRface	1.1×10^{-3}	0.0666	
V4_tubos05cm_TR1cm	7.9965×10^{-5}	0.0934	
V4_tubos05cm_TR2cm	1.3452×10^{-4}	0.0518	
V4_tubos05cm_TR3cm	1.991×10^{-4}	0.0884	