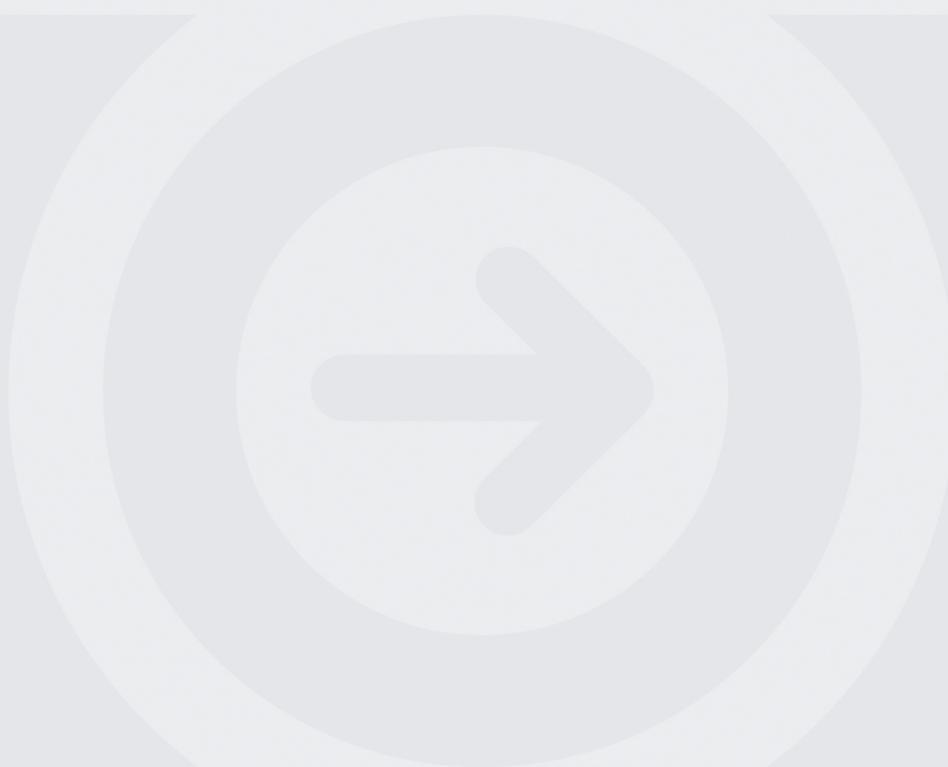




## **Desenvolvimento de um Sistema de Apoio a Pacientes com Zumbido**

**ANA RITA NUNES RAMOS**  
novembro de 2019





## Desenvolvimento de um Sistema de Apoio a Pacientes com Zumbido

**ANA RITA NUNES RAMOS**  
Outubro de 2019



# **Desenvolvimento de um Sistema de Apoio a Pacientes com Zumbido**

Ana Rita Nunes Ramos

Dissertação apresentada no Instituto Superior de Engenharia do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação e Instrumentação Médica

Orientadores:

Prof. Doutora Gina Vilão Ramos

Prof. Doutora Maria Fernanda Gentil Costa

2019



“Durante milhões de anos, a humanidade viveu exatamente como os animais. Então aconteceu alguma coisa que desencadeou o poder da nossa imaginação. Nós aprendemos a falar e aprendemos a ouvir.”

Stephen Hawking, 1942 - 2018



## **Agradecimentos**

Concluída a elaboração deste trabalho repleto de aprendizagens académicas e pessoais, torna-se imprescindível o agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para tal e me ajudaram na concretização deste percurso. A todas elas gostaria de agradecer.

À minha família que sempre me encorajou e apoiou desde o início a prosseguir os estudos, principalmente ao saberem da dificuldade de conciliar o trabalho com o mestrado. Foram sem dúvida uma ajuda que sempre me incentivou e me deu forças para continuar. O meu muito Obrigada por tudo!

Ao meu namorado pelo companheirismo, pela paciência e por todos aqueles dias que preferiu passar ao meu lado à espera que eu terminasse de estudar ou de terminar aquele trabalho em falta e mais aquele de grupo e o outro em que alteraram a data de entrega à última da hora...! Obrigada por estares sempre presente e me incentivares a crescer!

À minha orientadora do ISEP, Prof<sup>ª</sup>. Doutora Gina Vilão Ramos, pelo total empenho, dedicação e disponibilidade para a criação e desenvolvimento do dispositivo, desde o início. Obrigada pelos conhecimentos e pela experiência que me transmitiu, foi seguramente um marco essencial para o meu projeto, principalmente na parte prática. Sem a professora não seria possível. Obrigada por ter orientado o meu projeto, acho que formamos uma boa dupla!

À minha orientadora da ESS, Prof<sup>ª</sup>. Doutora Fernanda Gentil, pelo acompanhamento bem como o incentivo que sempre me deu e por continuar a fazer parte, gentilmente, do meu processo académico. Obrigada por todos os conhecimentos que me transmitiu, pelas sugestões assertivas, pela atenção e disponibilidade. Não posso deixar de agradecer também pelo apoio excecional, ao qual sempre me habituou. Obrigada pela excelente pessoa e profissional que é!

Ao Prof. Doutor Carlos Ramos, pelos conselhos úteis em todas as etapas deste projeto, pelo interesse pormenorizado e acompanhamento desde do início. Obrigada por estar sempre pronto a ajudar, pela paciência e pelo gosto de ensinar.

À Área Técnico- Científica de Física pelo cuidado e disponibilidade no fornecimento de material técnico necessário para a criação prática do meu projeto.

A todos os docentes que me acompanharam ao longo da minha vida académica, inclusive aos da Escola Superior de Engenharia do Porto e aos da Escola Superior de Saúde do Porto, em especial ao Prof. Doutor David Tomé. Obrigada a todos pelo contributo direto ou indireto no meu processo académico.

À Daniela Gonçalves e ao Jailson Gonçalves, como Engenheiros, sempre prestáveis e atenciosos sempre que surgia alguma dúvida. Muito obrigada pela amizade demonstrada, ajuda e companheirismo ao longo de todo o Mestrado!

Gostava também de agradecer aos restantes amigos e colegas que conheci neste Mestrado, pelas amizades que fomos criando e construindo, pelos momentos de alegria, tensão e companheirismo que partilhamos. Aos companheiros de aulas pouco frequentadas que ajudavam a transformar a aula mais divertida e esquecer o cansaço do trabalho!

Ao serviço de otorrinolaringologia do Hospital Lusíadas Porto e da Clínica Lusíadas Gaia, em especial aos Audiologistas Fernanda Mota, Liliana Loureiro e Mário Alves, à Marlene Nunes, à Fisioterapeuta Armanda Cabral, entre outros elementos da equipa. Obrigada por me terem apoiado e encorajado a continuar o meu processo académico.

Aos meus amigos, pelo incentivo neste novo ciclo de estudos e pelas nossas saídas sempre úteis para recarregar baterias.

## Resumo

Atualmente, a fisiopatologia do zumbido ainda não é muito clara, no sentido em que existem várias teorias que tentam justificar o seu aparecimento, mas não muito concordantes. Apesar deste desconhecimento, há estudos que demonstraram que existem evidências entre o aparecimento de zumbido com alguns fatores de risco, nomeadamente com a perda auditiva, exposição ao ruído, *stress* e depressão. Contudo, a influência do sexo, o consumo de álcool, o tabagismo, o nível educacional bem como o nível financeiro do indivíduo não revelam uma ligação direta – os estudos não são concordantes. Fatores de risco para doenças cardiovasculares, como alto índice de massa corporal (IMC), hipertensão, diabetes *mellitus*, acidente vascular cerebral, angina ou infarto do miocárdio, foram alvo de análise como possíveis fatores de risco para zumbido em alguns estudos, todavia a relação com o zumbido ainda é controverso. Embora nunca tenha sido feita uma análise a nível mundial na população com problemas de tiroide, existem relatos de pacientes com este tipo de patologia associado a queixas de zumbido. Infelizmente, poucos estudos avaliaram a relação entre a ocupação profissional/ *hobbies* e as queixas de zumbido.

Ao estudar doentes com zumbido, percebeu-se que as maiores queixas são no silêncio da noite, o que conseqüente perturba o ciclo circadiano. De forma a colmatar este problema, surgiu a ideia de desenvolver um equipamento médico que permita eliminar/ minimizar as queixas deste tipo de pacientes. Foi elaborado um equipamento inserido numa almofada e passível de ser utilizado durante o sono. Foi também desenvolvido um protocolo específico que auxilia, quer na referenciação (identificar quais os pacientes que devem utilizar), quer na monitorização do tratamento. Neste último caso, tem como objetivo avaliar a eficácia do uso da almofada nos doentes que foram selecionados previamente. Para além de todas estas vantagens, trata-se de um equipamento passível de ser adaptado aos gostos sonoros de cada paciente, o que o incentiva a recorrer ao tratamento e possivelmente ter um melhor prognóstico.

**Palavras- chaves:** Zumbido, TRT, Audiologia, Eletrónica, Engenharia.



## Abstract

Currently, a pathophysiology of tinnitus is not yet very clear, in the sense in which there are several theories that try to justify its appearance, but not very concordant. Despite this lack of knowledge, there are studies that show that there are tinnitus cases with some risk factors, particularly hearing loss, noise exposure, stress and depression. However, the influence of gender, alcohol consumption, smoking, educational level and financial level of the individual do not reveal a direct link - the studies are not in agreement. Risk factors for cardiovascular disease, such as high body mass index (BMI), hypertension, diabetes mellitus, stroke, angina or myocardial infarction, were analyzed as possible risk factors for tinnitus in some studies, according to a relationship. with tinnitus is still controversial. Although there has never been a worldwide analysis of the population with thyroid problems, there are reports of patients with this type of pathology associated with tinnitus complaints. Unfortunately, few studies assess a relationship between occupational occupation / hobbies and tinnitus complaints.

When studying patients with tinnitus, it was noticed that the biggest complaints in the silence during the night, consequently disturbing circadian cycle. In order to overcome the problem, the idea of developing medical equipment to eliminate / reduce the complaints of this type of patient arose. A cushion-mounted device was designed for use during sleep. A specific protocol was also developed to assist, referral consultation (identify patients to use), treatment monitoring consultation. In the latter case, the objective is to evaluate the effectiveness of cushion use in the patients who were selected. In addition to all these advantages, this equipment can be adapted to the sound tastes of each patient, or that encourages treatment and possibly has a better prognosis.

**Keywords:** Tinnitus, TRT, Audiology, Electronics, Engineering.



# Índice

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract.....	ix
Índice de figuras .....	xiii
Índice de tabelas .....	xvii
Lista de Abreviaturas.....	xviii
<b>Capítulo 1: Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do tema.....	3
1.2. Objetivo do trabalho.....	3
1.3. Organização do trabalho.....	4
<b>Capítulo 2: Enquadramento em Audiologia .....</b>	<b>5</b>
2.1. Introdução à Audiologia.....	7
2.2. Definição de Zumbido.....	11
2.3. Investigação acerca da etiologia e fisiopatologia do zumbido .....	11
2.4. Fatores de risco.....	13
2.5. Depressão: Causa vs. Consequência do zumbido .....	15
2.6. Influência dos tratamentos oncológicos .....	19
2.7. Avaliação do zumbido.....	22
2.7.1. Acufenometria.....	22
2.7.2. OEAPD .....	22
2.7.3. Tinnitus Handicap Inventory (THI) .....	22
2.8. Técnicas de tratamento.....	23
2.8.1. Fármacos .....	23
2.8.2. Mindfulness Based Tinnitus Stress Reduction (MBTSR).....	24
2.8.3. Tinnitus Habituation Therapy (THT), Aconselhamento e Terapia Sonora .....	25
<b>Capítulo 3: Enquadramento em Engenharia.....</b>	<b>35</b>
3.1. Som .....	37
3.1.1. Velocidade do som.....	39
3.1.2. Reflexões da onda sonora.....	41

3.1.3.	Capacidade de localização sonora - estereofonia .....	42
3.1.4.	Frequência de um som.....	43
3.1.5.	Equação de onda sonora .....	47
3.1.6.	Componente tridimensional da onda sonora .....	48
3.1.7.	Intensidade sonora.....	50
3.1.8.	Pressão sonora.....	52
3.1.9.	Som aplicado à audição do ser humano .....	53
3.2.	Sinal elétrico em sinal sonoro .....	56
3.2.1.	Transdutores .....	56
3.3.	Outros elementos eletrônicos .....	61
3.3.1.	Sensores.....	61
3.3.2.	Amplificador operacional.....	65
<b>Capítulo 4: Metodologia.....</b>		<b>67</b>
4.1.	Arquitetura do projeto.....	69
4.2.	Arquitetura do <i>Hardware</i> .....	71
4.3.	Arquitetura do <i>Software</i> .....	79
<b>Capítulo 5: Resultados .....</b>		<b>81</b>
5.1.	Circuitos elétricos elaborados .....	83
5.1.1.	CIRCUITO 1 .....	83
5.1.2.	CIRCUITO 2.....	86
5.1.3.	CIRCUITO 3 - Protótipo do equipamento desenvolvido .....	89
<b>Capítulo 6: Discussão e Conclusão.....</b>		<b>95</b>
6.1.	Discussão .....	97
6.2.	Conclusão.....	99
Referências Bibliográficas .....		101
Glossário .....		105
Anexos.....		109

# Índice de figuras

Figura 1- Anatomia do sistema auditivo periférico.....	7
Figura 2 - Tonotopia da cóclea.....	10
Figura 3 – Representação das frequências $f_1$ e $f_2$ bem como da respectiva combinação algébrica $2f_1 - f_2$ utilizada nas OEAPD.....	10
Figura 4 - Etiologia provável do zumbido, segundo Azevedo e Figueiredo (Azevedo, 2005). ..	12
Figura 5 – Alterações das queixas e intensidade do zumbido, na Escala Visual Analógica, antes bem como após o consumo de álcool (* representa $p<0.05$ ) (Vanneste & De Ridder, 2012).....	14
Figura 6 - Espiral do Zumbido.....	17
Figura 7 - Influência da presença da serotonina no processamento sensorial, neste caso auditivo (Tang et al., 2017). .....	18
Figura 8 - Relação entre a eficácia da habituação do zumbido e a intensidade do som apresentado (Jastreboff & Jastreboff, 2000).....	27
Figura 9 - Neuroanatomia do sistema límbico - imagem produzida pelos autores (Esperidião-António et al., 2008).....	28
Figura 10 - Mudanças que ocorrem nos sistemas envolvidos no zumbido como resultado do processo de habituação da TRT. A espessura das setas da figura indica o significado de cada conexão. O diagrama A é o principal, B representa o loop superior e o C o loop inferior (Jastreboff & Jastreboff, 2000).....	30
Figura 11 - UCL num paciente com hiperacusia pura (Jastreboff & Jastreboff, 2000). .....	32
Figura 12 - UCL numa phonofobia pura (Jastreboff & Jastreboff, 2000).....	33
Figura 13 - UCL num paciente com hiperacusia e phonofobia em simultâneo (Jastreboff & Jastreboff, 2000).....	33
Figura 14- Propagação da onda sonora produzida pela vibração de um diapasão. ....	38

Figura 15 - Propagação de uma onda longitudinal ao longo de uma mola (Nussenzveig, 2018). .....	38
Figura 16 - Fenómeno do eco. Imagem adaptada do link: <a href="http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema4/index.htm">http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema4/index.htm</a> .....	41
Figura 17 - Estereofonia do sistema auditivo humano. Imagem acedida em: <a href="https://www.academia.edu/4393057/Edição_Digital_de_Som">https://www.academia.edu/4393057/Edição_Digital_de_Som</a> .....	43
Figura 18 - Constituição de um som complexo.....	44
Figura 19 - Espectro de um ruído branco numa faixa de frequências entre $f_1$ e $f_2$ (Braga, 2016). .....	45
Figura 20 - Espectro de um ruído rosa numa faixa de frequências entre $f_1$ e $f_2$ (Braga, 2016)....	45
Figura 21- Espectro sonoro .....	46
Figura 22 - Espectro sonoro audível característico dos diferentes seres vivos .....	46
Figura 23 - Propagação da onda sonora estacionária num tubo de kundt através do cerrim muito fino .....	48
Figura 24 - Analogia da gota que cai na água com a componente tridimensional da onda sonora (Freedman, Sandin & Ford, 2008). .....	49
Figura 25 - Diagrama de fones ou de Fletcher .....	54
Figura 26 - Relação entre dB SPL e dB HL nas diferentes frequências.....	55
Figura 27 - Audiograma: gráfico que depende da frequência e intensidade. Diferentes tipos de perda auditiva bem como categorização de diferentes sons do dia-a-dia.....	55
Figura 28 - Estrutura interna de um altifalante de bobina móvel (Braga, 2016).....	58
Figura 29 - Zonas de emissão sonora num altifalante (Braga, 2016).....	59
Figura 30- Efeito dos ultrassons (Mazzaroppi, 2007). .....	62
Figura 31 - Alterações que ocorrem num cristal piezoelétrico antes (a), no qual o cristal se encontra em equilíbrio, logo momento do dipolo electrico total é nulo e após (b) a aplicação de uma força, a qual provoca uma deformação, e o dipolo eletrico não é nulo ( Correia & Carmo, 2013). .....	64

Figura 32 - “Amp op” com cinco terminais (Bishop, 2011). .....	65
Figura 33 - Esquema do modelo de ação utilizado. ....	69
Figura 34 - Elementos do circuito elétrico, resistência, buzzer e fios elétricos com a sua placa de ensaio.....	71
Figura 35 - Placa de Arduino UNO ligada ao computador. ....	72
Figura 36 - Exemplo de um código no Arduino IDE. ....	72
Figura 37 – Leitor de cartões SD para Arduino UNO.....	74
Figura 38 - Buzzer passivo utilizado.....	75
Figura 39 - Altifalante utilizado. ....	75
Figura 40 - Caixa acústica desenvolvida.....	76
Figura 41 - Botões de pressão que foram usados. ....	76
Figura 42 - Resistências utilizadas. ....	77
Figura 43 - Tipo de condensador utilizado.....	77
Figura 44 - Biblioteca do Arduino para leitor de cartões SD.....	79
Figura 45 - Outras bibliotecas instaladas no Arduino. ....	79
Figura 46 - Circuito 1 composto por placa de ensaio, placa de Arduino Uno, buzzer, resistência e fios condutores. ....	83
Figura 47 – Excerto do código utilizado para emitir um som complexo (sirene). ....	84
Figura 48 - Excerto do código utilizado para emitir uma melodia ("Hino da Alegria"). ....	84
Figura 49 - Esquema do circuito elétrico 1. ....	85
Figura 50 - Circuito 2 constituído por placa de ensaio, placa de Arduino Uno, buzzer, leitor de cartões SD, resistência e fios condutores. ....	86
Figura 51 - Comando que permite verificar se o leitor SD consegue ler o cartão.....	87
Figura 52 - Esquema do circuito elétrico 2. ....	88

Figura 53 - Circuito 3 é o protótipo final, integrando a placa de ensaio, placa de Arduino Uno, buzzer, leitor de cartões SD, amplificador, potenciômetro, fios condutores, resistências e fonte de alimentação (pilha).....	89
Figura 54 - Excerto do código para executar a função dos 2 botões de pressão. ....	90
Figura 55 - Esquema do circuito elétrico 3. ....	91
Figura 56 - Materiais utilizados na elaboração da almofada.....	93
Figura 57 - Protótipo final do equipamento desenvolvido.....	93

# Índice de tabelas

Tabela I - Velocidade do som para diferentes meios (Braga, 2016). .....	40
Tabela II - Diferentes tipos de som (Martins, 1988). .....	44
Tabela III - Características essenciais de um microfone (Braga, 2016). .....	57
Tabela IV - Características essenciais de um altifalante (Braga, 2016). .....	60
Tabela V - Ligação entre o leitor de cartões SD e o Arduino. ....	74
Tabela VI - Funções dos botões incorporados no circuito eletrónico. ....	90

## Lista de Abreviaturas

<b>AC</b>	Corrente elétrica alternada
<b>CC</b>	Corrente elétrica contínua
<b>CCE</b>	Células ciliadas externas
<b>dB</b>	Decibéis
<b>EEG</b>	Eletroencefalograma
<b>EGb</b>	Extrato de ginkgo biloba
<b>GABA</b>	<i>Gama-Amino-Butiric Acid</i>
<b>Gy</b>	<i>Gray</i>
<b>HL</b>	<i>Hearing Level</i>
<b>IMC</b>	Índice de Massa Corporal
<b>ISRS</b>	Inibidores seletivos da recaptação da serotonina
<b>MBSR</b>	<i>Mindfulness Based Stress Reduction</i>
<b>MBTSR</b>	<i>Mindfulness Based Tinnitus Stress Reduction</i>
<b>NMDA</b>	N-Metil D-Aspartato
<b>OEAE</b>	Otoemissões acústicas espontâneas
<b>OEAPD</b>	Otoemissões acústicas por produtos de distorção
<b>OEAT</b>	Otoemissões acústicas transitórias

<b>OMS</b>	Organização Mundial de Saúde
<b>PAIR</b>	Perda auditiva induzida pelo ruído
<b>PTN</b>	Pressão e temperatura normais
<b>QT</b>	Quimioterapia
<b>QUANTEC</b>	<i>Quantitative Analysis of Normal Tissue Effects in the Clinic</i>
<b>RT</b>	Radioterapia
<b>SI</b>	Sistema International
<b>SNA</b>	Sistema Nervoso Autônomo
<b>SPL</b>	<i>Sound Pressure Level</i>
<b>THI</b>	<i>Tinnitus Handicap Inventory</i>
<b>THT</b>	<i>Tinnitus Habituation Therapy</i>
<b>TRT</b>	<i>Tinnitus Retraining Therapy</i>
<b>UCL</b>	Limiar de desconforto



# **Capítulo 1: Introdução**



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento do tema

Zumbido, acufeno ou *tinnitus* são conceitos sinónimos e podem definir-se como a percepção de som na ausência de uma fonte sonora externa (Gentil et al., 2015). O zumbido é uma das queixas mais frequentes em adultos, sendo que a sua prevalência situa-se entre 6,6% e 18,9%. Esta prevalência aumenta para 30% em indivíduos com idade superior a 55 anos. Independentemente da elevada prevalência, apenas cerca de um quarto dos adultos com zumbido procura ajuda médica especializada (Kim et al., 2015).

## 1.2. Objetivo do trabalho

Hoje em dia, o tratamento do zumbido é ainda um grande desafio para audiologistas bem como otorrinolaringologistas. As lacunas existentes no conhecimento da sua fisiopatologia fazem com que os vários tipos de tratamentos tenham resultados muito irregulares.

Deste modo, surge o interesse neste âmbito da Audiologia com a tentativa de melhorar a qualidade de vida destes indivíduos, através da criação de um plano de intervenção adequado e adaptado a cada paciente. O objetivo deste projeto passa também por criar algo novo, que possa auxiliar estes pacientes em ambientes de descanso, nos quais a dificuldade em se abstrair do zumbido aumenta substancialmente.

Além disso, pretende-se que o equipamento desenvolvido seja adaptado aos gostos sonoros de cada paciente, de forma a incentivá-lo a aderir ao tratamento e possibilitar um melhor prognóstico.

### **1.3. Organização do trabalho**

Este projeto é constituído por seis capítulos principais, Introdução, Enquadramento em Audiologia, Enquadramento em Engenharia, Metodologia, Resultados e, por último, Discussão e Conclusão.

Na Introdução é abordado o enquadramento do tema, os objetivos e a organização do trabalho. A Fundamentação Teórica é composta por dois capítulos, Enquadramento em Audiologia e Enquadramento em Engenharia, nos quais são tratados alguns conceitos básicos que permitem uma melhor compreensão do tema para todo o tipo de leitores. No quarto capítulo, Metodologia, são descritos os elementos eletrónicos utilizados bem como o protocolo proposto para utilização em contexto clínico. No capítulo cinco, Resultados, são abordados os circuitos que compõe o projeto, inclusive o protótipo final. Finalmente, a Discussão e Conclusão resumem todos os pontos do trabalho; o que foi possível realizar, mas também o que se sugere para melhoria em projetos futuros.

Foi ainda acrescentado um Glossário com alguns conceitos de Engenharia com o objetivo de nivelar conhecimentos e permitir abranger todo o tipo de leitores.

## **Capítulo 2: Enquadramento em Audiologia**



## 2. Enquadramento em Audiologia

### 2.1. Introdução à Audiologia

Anatomicamente, o sistema auditivo é constituído por cinco estruturas distintas: ouvido externo, ouvido médio, ouvido interno (Figura 1), vias auditivas centrais e processamento auditivo central (Gomez et al., 2006). É de ressaltar que o ouvido interno é constituído por duas partes; uma anterior, responsável pela audição e uma posterior ou vestibular, que tem um papel fundamental no equilíbrio (Katz, 1999). A nível auditivo, em termos práticos, há a preocupação em conhecer não só os problemas da audição, mas também em adquirir noções acerca do mundo das vibrações acústicas (domínio da Física) bem como dos mecanismos da função auditiva (fisiologia neurosensorial) (Portmann & Portmann, 1988).

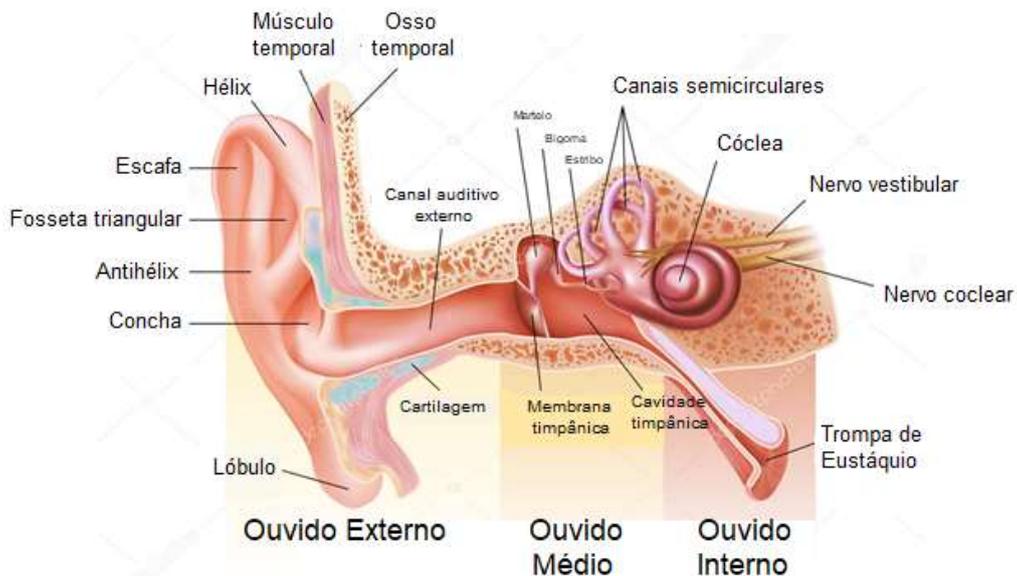


Figura 1- Anatomia do sistema auditivo periférico. Imagem acedida em: <https://ru.depositphotos.com/11171791/stock-illustration-anatomy-of-the-ear.html>

Em termos funcionais, existem três tipos de perda auditiva - de transmissão (ou de condução), neurosensorial e mista. Na perda auditiva de condução existe um comprometimento do ouvido externo e/ou médio, que provoca uma maior resistência à passagem das vibrações acústicas até à janela oval (impedância). Os problemas da hipoacusia neurosensorial são mais complexos, atendendo ao facto do ouvido interno

e/ou as vias auditivas centrais estarem danificadas. Na surdez mista ocorre um comprometimento, quer na transmissão, quer na recepção do estímulo auditivo (Portmann & Portmann, 1988).

Existem alguns fenómenos que muitas vezes acompanham uma perda auditiva e que importam ressaltar, nomeadamente o recobro, a fadiga auditiva, a hiperacusia assim como a misofonia. É muito comum uma perda neurosensorial ser acompanhada de distorções sonoras, tais como o recobro (lesão coclear) ou mesmo até a fadiga auditiva (lesão retrococlear).

O recobro é um tipo de distorção segundo o eixo da intensidade, no qual ocorre uma compressão da escala da sensação de intensidade. Na prática, há uma redução do campo dinâmico auditivo, sendo que a sensação de intensidade do indivíduo com recobro aumenta mais rapidamente do que num indivíduo sem esta perturbação sonora. A partir de determinada intensidade, a discriminação do paciente deteriora-se (Portmann & Portmann, 1988).

A hiperacusia é a intolerância a sons, mesmo que estes sejam de intensidade moderada (Jastreboff & Jastreboff, 2000), independente da situação ou ambiente. Neste caso, ocorre uma amplificação anormal da atividade neural evocada por um som na via auditiva, que sofre uma ativação secundária do sistema límbico (Gonçalves, Tochetto, & Gambini, 2007). É importante destacar que este conceito é diferente de misofonia/ *phonofobia*. Misofonia é o sentimento de desagrado em relação a determinados sons. *Phonofobia*, tal como o próprio nome indica, é o medo de certos sons e que, normalmente, está associado a experiências negativas. Nestas últimas situações, a atividade neural da via auditiva é normal; no entanto, há uma reação intensa anormal do sistema límbico e do sistema nervoso autónomo (SNA) (Gonçalves et al., 2007).

Já a fadiga auditiva é um tipo de distorção segundo o eixo tempo, que consiste numa espécie de “habituação” em que o som no limiar auditivo ou ligeiramente acima deixa de ser perceptível após algum tempo de estimulação e é necessário aumentar a sua intensidade para que volte a ser audível; no entanto, normalmente, esta situação pode vir a repetir-se (Portmann & Portmann, 1988).

É importante destacar que o som se propaga desde o exterior até ao sistema auditivo central, passando sequencialmente:

- Pelo ouvido externo, através de ondas de pressão, no ar (energia acústica), que se propagam em direção à membrana timpânica;
- Pela membrana timpânica, que transforma a energia acústica em energia mecânica;
- Pelo ouvido médio, no qual a propagação é feita através dos ossículos;
- Pelo ouvido interno, pela vibração da membrana basilar da cóclea que irá estimular o órgão de Corti (que é responsável por fazer a transdução da energia mecânica em energia elétrica bem como enviar essa mesma energia para o cérebro). A cóclea, por sua vez, é sensível e mais recetiva a determinadas frequências dependendo da localização desde a base até ao helicotrema/ ápice – tonotopia da cóclea. O facto da membrana basilar ser cada vez mais larga e mais flácida à medida que se aproxima do ápice e se afasta da base, faz com que esta tenha uma resposta diferente em cada zona. A base da membrana reage melhor às frequências agudas; enquanto que o ápice apresenta uma melhor performance nos graves (Figura 2);
- Vias auditivas que reencaminham o som para o sistema auditivo central, no qual ocorre o processamento auditivo (Howard & Angus, 2017).

Voltando ao ouvido interno, quando a onda sonora chega a esta estrutura, a cóclea é estimulada e, por sua vez, ocorre a vibração das células ciliadas externas (CCE) que se encontram no interior do órgão de Corti. Esta oscilação produz um som quase inaudível que se repercute no sentido inverso, em direção ao ouvido externo. Em 1977, David Kemp verificou pela primeira vez a presença de otoemissões acústicas (OEA) em indivíduos com audição normal. Este fenómeno ocorre sempre que haja um correto funcionamento da cóclea e em audição normal; no entanto, pode surgir em indivíduos com uma perda auditiva ligeira, inclusive. É um exame bastante rápido, objetivo, consistente e não invasivo, cujo objetivo é avaliar a integridade fisiológica das CCE (Kemp, 1978).

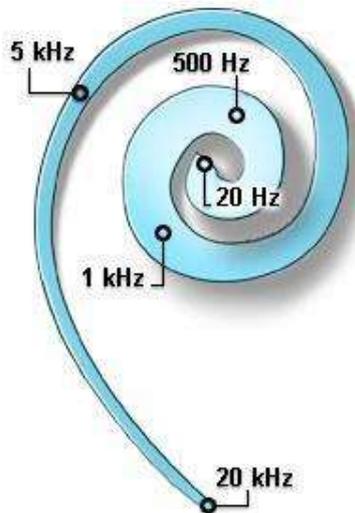


Figura 2 - Tonotopia da cóclea. Imagem acedida através do link: <http://www.cochlea.eu/po/coclea/funcionamiento-da-coclea>

Existem vários tipos de OEA, designadamente:

- Otoemissões acústicas espontâneas (OEAE);
- Otoemissões acústicas transitórias (OEAT) – surge em resposta a um estímulo auditivo complexo (composto por várias frequências);
- Otoemissões acústicas por produtos de distorção (OEAPD) – ocorrem na presença de dois estímulos auditivos de tom puro com frequências primárias distintas ( $f_1$  e  $f_2$ ). As frequências das DPOAE surgem através de combinações algébricas de tais frequências  $f_1$  e  $f_2$ , nomeadamente  $2f_1 - f_2$  (ver Figura 3),  $3f_1 - 2f_2$  e  $2f_2 - f_1$  (Moulin & Kemp, 1996).

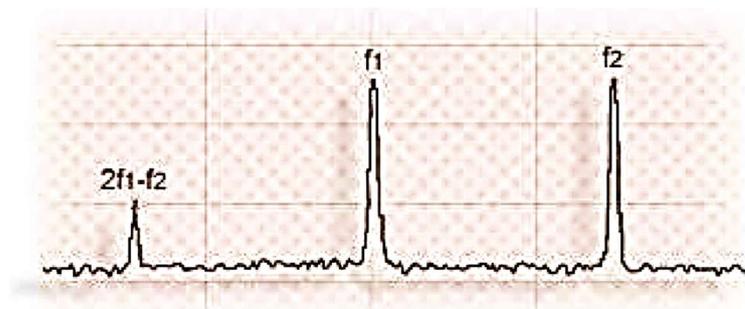


Figura 3 – Representação das frequências  $f_1$  e  $f_2$  bem como da respetiva combinação algébrica  $2f_1 - f_2$  utilizada nas OEAPD. Imagem acedida em: <http://www.cochlea.eu/po/exploracao-funcional/metodos-objetivos/otoemissoes>

## **2.2. Definição de Zumbido**

Segundo Katz, o zumbido é um fenómeno no qual o indivíduo tem a percepção de um som na ausência de estimulação acústica (Katz, 1999). Jastreboff & Jastreboff descrevem que o zumbido é um ruído diversificado que pode ser sentido quer nos ouvidos, quer na cabeça. Acrescentam ainda que se trata da percepção de um som que resulta exclusivamente da atividade do sistema nervoso; no entanto, não é descartada completamente a hipótese de existir uma relação com a vibração mecânica ou mesmo com a atividade coclear (Jastreboff & Jastreboff, 2000). Na mesma linha de raciocínio, comparam o zumbido com uma “*auditory phantom perception*” (percepção auditiva fantasma) que ocorre maioritariamente em frequências altas (Jastreboff, 1990).

Normalmente, está associado a hipoacusia neurosensorial (Katz, 1999); no entanto, Jastreboff e Jastreboff acreditam que também pode estar relacionado com outro tipo de perda auditiva, otosclerose, otites (infecções no ouvido), neurinoma acústico, síndrome de Ménière e o próprio envelhecimento. Defendem também que pode estar associado à toma de determinadas “drogas”, uma vez que existem mais de 200 medicamentos, nos quais um dos efeitos colaterais é o aparecimento de zumbido (Jastreboff & Jastreboff, 2000). É um fenómeno acústico espontâneo que aparece com maior frequência entre os 45 e os 65 anos. Pode surgir apenas num ouvido isoladamente ou em ambos os ouvidos. Existem também pacientes que referem que são espalhados pela cabeça (Claussen, Bergmann, & Bertora, 2009).

## **2.3. Investigação acerca da etiologia e fisiopatologia do zumbido**

Num estudo publicado em 2005, realizado em 50 pacientes com zumbido, foi relacionado, entre outros fatores, o tempo de sintomatologia do zumbido. A idade dos pacientes variou entre 35 e 82 anos, com uma média de 60 anos e a mediana de 60,5 anos, o que comprova uma relação diretamente proporcional das queixas de zumbido com o aumento da idade. A amostra era constituída por 42% de indivíduos do sexo feminino e 58% de indivíduos do sexo masculino. Observou-se que 9,76% apresentavam zumbidos recentes (há menos de um ano); 53,65%, zumbidos intermédios (entre 1 e 7 anos) e 36,59%, zumbidos antigos (superior a 7 anos). Foram encontradas ainda outras características audiológicas, nomeadamente hipoacusia (59,4%); tonturas (46,9%); plenitude auricular (15%) bem

como hiperacusia (9,3%). Além disso, 52% da amostra tinha recorrido previamente a algum tipo de medicamento para tratamento do zumbido. Neste estudo concluíram que a etiologia do zumbido poderia estar relacionada com a perda auditiva induzida pelo ruído (PAIR), com a presbiacusia (perda auditiva adquirida com o avançar da idade), com a presença de doenças metabólicas – quer sejam de forma isolada, quer sejam associadas entre si (Figura 4). Em 60% dos casos, os indivíduos estavam expostos a níveis de ruído prejudiciais, o que desencadeou PAIR e permitiu concluir que poderia ser uma das causas de zumbido. 40% foi atribuído à presbiacusia e 20% a alterações metabólicas, quer sejam estas independentes, quer sejam associadas entre si ou associadas à exposição ao ruído. Cerca de 20% dos pacientes apresentavam uma provável etiologia multifatorial para o zumbido, ou seja, a etiologia não estaria relacionada apenas com uma das situações referidas anteriormente (Azevedo & Figueiredo, 2005).

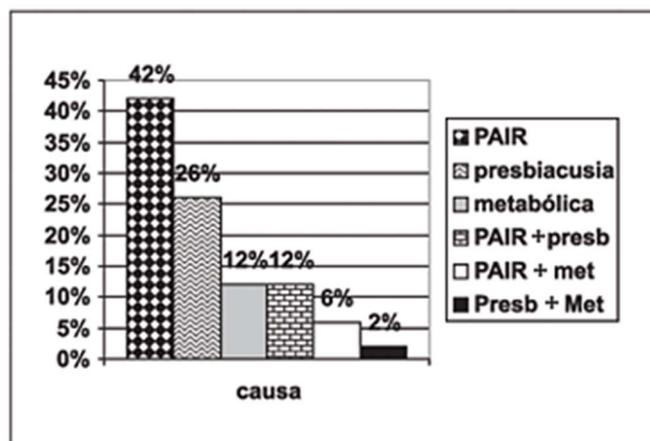


Figura 4 - Etiologia provável do zumbido, segundo Azevedo e Figueiredo (Azevedo, 2005).

Diversas provas neurofisiológicas, em pacientes com zumbido, permitiram concluir que esta sintomatologia pode ter origem no órgão periférico, no tronco cerebral ou mesmo até na região cortical (Claussen et al., 2009). No entanto, segundo Jastreboff, o zumbido é uma consequência de uma atividade neural modificada no sistema auditivo central, mas que resulta de uma lesão das estruturas auditivas periféricas (Gentil et al., 2015). De acordo com o modelo neurofisiológico, tanto o sistema auditivo, como o sistema límbico (envolvido na emoção), o córtex pré-frontal bem como outras áreas corticais têm implicações na maioria dos casos de zumbido (Jastreboff & Hazell, 1993). Jastreboff defende que o zumbido pode ser um sintoma de muitas patologias. Defende também que alterações nos canais de cálcio e na homeostasia do cálcio estão associados à degradação

e envelhecimento do sistema auditivo e vestibular e por consequência ao aparecimento de zumbido. Cerca de um terço da população acima dos 65 anos de idade apresenta lesões no sistema auditivo e presença de zumbido (Jastreboff, 1990).

Uma das teorias elaboradas para a fisiopatologia do zumbido mais aceites hoje em dia é a da "excito-ototoxicidade". Baseia-se na libertação em excesso do neurotransmissor excitatório glutamato nas vias auditivas periféricas e centrais, o que resulta numa sobre-expressão dos recetores sinápticos do tipo NMDA (N-Metil D-Aspartato). Por consequência, provocam edema e rutura dos neurónios auditivos primários, por entrada excessiva de cálcio nas células. Como os neurónios com excesso de recetores NMDA são ainda mais sensíveis à excito-ototoxicidade do glutamato, tornar-se-ia um "círculo vicioso", propagando-se ao longo das vias auditivas ("epilepsia" das vias auditivas). O glutamato é o principal aminoácido neurotransmissor excitatório no sistema auditivo, periférico e central e é formado a partir do alfa-oxo-glutamato (intermediário do Ciclo de Krebs) pela ação da *Gama-Amino-Butiric Acid* (GABA) – aminotransferase (Azevedo & Figueiredo, 2005).

## **2.4.Fatores de risco**

Relativamente ao consumo de álcool, um estudo de Vanneste & Ridder (2012) pretendeu explorar a influência da sua ingestão no mecanismo neurobiológico do zumbido. Foram observadas diferenças nas bandas de frequência alfa, beta e gama quando comparadas com o estado de repouso no eletroencefalograma antes e depois do consumo de álcool (Figura 5). Verificou-se um aumento da atividade alfa sincronizada no córtex cingulado posterior e uma diminuição da atividade alfa sincronizada no córtex orbito-frontal, no córtex pré-frontal ventro-lateral e no córtex cingulado anterior sub-caloso, após a ingestão de álcool (Vanneste & De Ridder, 2012).

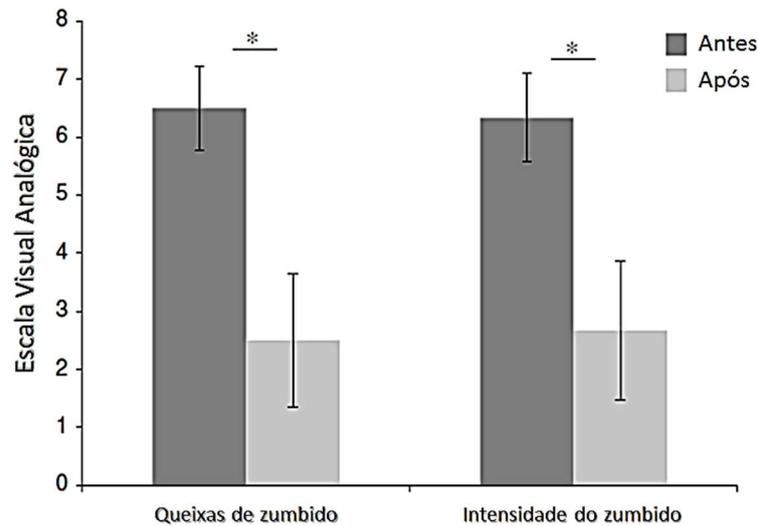


Figura 5 – Alterações das queixas e intensidade do zumbido, na Escala Visual Analógica, antes bem como após o consumo de álcool (\* representa  $p < 0.05$ ) (Vanneste & De Ridder, 2012).

Em relação à frequência beta, foi encontrado um aumento da atividade sincronizada numa região entre o córtex pré-lingual e dorsal anterior do cíngulo e a ínsula esquerda e diminuição da atividade no *precuneus* após a ingestão de álcool. Comparativamente, na banda de frequência gama, após a ingestão de álcool, há uma diminuição da atividade sincronizada no *precuneus* e no córtex cingulado posterior. Foram analisadas as regiões de interesse nos córtices auditivos e na área para-hipocampal; no entanto, não revelaram diferenças nas diferentes bandas de frequência antes e após o consumo de álcool (Vanneste & De Ridder, 2012).

De acordo com um estudo de 2015, de Kim et al., os fatores de risco do zumbido em adultos foram agrupados, de uma forma geral, em quatro tipos: fatores pessoais, socioeconômicos, relacionados com patologias e fatores otológicos – sendo avaliada a associação de cada fator com o zumbido. Verificou-se que o sexo feminino é o mais afetado pelo zumbido e com o envelhecimento, a cada 10 anos, a taxa de prevalência aumenta 1,17 vezes, em ambos os sexos. Foram comparadas as horas de descanso e verificaram que indivíduos que durmam menos do que 6 horas apresentavam maior taxa de zumbido quando comparado com indivíduos que dormem entre 7 e 8 horas. Observou-se também que o nível de *stress* de cada pessoa é diretamente proporcional às queixas de zumbido. Verificaram que mesmo a exposição ao ruído está também associada ao sintoma

em questão. A perda auditiva unilateral (superior a 25 dB<sup>1</sup>) aumentou o zumbido 1,97 vezes, enquanto que a perda auditiva bilateral aumentou o zumbido 3,01 vezes; (ver Anexo 1). Além disso, também patologias como a depressão, artrite reumatoide, osteoartrite, angina ou infarto do miocárdio, asma, acidente vascular cerebral, problemas relacionados com a tiroide, diabetes *mellitus*, hipertensão, hiperlipidemia, tuberculose pulmonar foram associadas ao zumbido (Kim et al., 2015).

Segundo outros autores, o zumbido está relacionado com doenças metabólicas, endocrinológicas, cardiovasculares, neurológicas, farmacológicas, odontológicas ou mesmo psiquiátricas (Rosa et al., 2012). No caso específico da depressão foi concluído que a depressão pode ser considerada não só um fator de risco para o aparecimento, mas também uma consequência do próprio zumbido. Foi avaliada a relação com a situação profissional dos indivíduos e quando comparado com os desempregados, estes são os que apresentam mais zumbido; no entanto, algumas ocupações foram também correlacionadas com o aumento da prevalência de zumbido, nomeadamente vendedores, mecânicos, trabalhadores de produção ou engenheiros, soldados, entre outras profissões. Perante os resultados, concluíram que fatores como o IMC e consumo de tabaco não se relacionam com o aparecimento de zumbido. Relativamente ao consumo de álcool, verificou-se uma maior incidência de zumbido em indivíduos que bebiam menos do que uma vez por mês e em indivíduos que bebiam 4 ou mais vezes por semana. A taxa de prevalência de zumbido mais baixa foi encontrada em indivíduos que consumiam álcool 2 a 4 vezes por mês (Kim et al., 2015).

## **2.5. Depressão: Causa vs. Consequência do zumbido**

Em 2013, foi publicada uma revisão bibliográfica cujo objetivo era avaliar de forma científica a relação entre os sintomas de depressão, a própria depressão e o zumbido. Verificaram que muitas vezes, os pacientes com zumbido têm dificuldade na habituação e tendem a apresentar quadros depressivos (Geocze, Mucci, Abranches, de Marco, & de Oliveira Penido, 2013). Além disso, sabe-se que a depressão está frequentemente associada a quase todas as doenças crónicas. Segundo Geocze et al. (2013), quando há

---

<sup>1</sup> dB é a abreviatura de decibéis – unidade SI (Sistema Internacional) de intensidade, que irá ser abordada no capítulo de Enquadramento em Engenharia.

esta associação, inevitavelmente ocorre uma diminuição da qualidade de vida, o agravamento da doença crónica, mas também uma fraca adesão ao tratamento em indivíduos com depressão. Voltando à questão do zumbido, o incómodo causado ao indivíduo é subjetivo pois depende da sua intensidade e frequência, além de poder comprometer, de forma global, a sua vida, a nível pessoal, profissional, social e mesmo familiar. Numa das investigações, na qual participaram 19 pacientes com zumbido “severo” (a partir do momento que se torna insuportável), deparam que também lhes foi diagnosticado depressão grave. Este estudo permitiu concluir que o tratamento com antidepressivos reduzia a gravidade do zumbido, aliviando assim o seu incómodo (Geocze et al., 2013).

Há autores que defendem que além dos placebos, existem medicamentos que ajudam a diminuir o incómodo causado pelo zumbido, tais como: a lidocaína (administração intravenosa); benzodiazepínicos (tais como, alprazolam, diazepam, clonazepam); antidepressivos (tricíclicos, como por exemplo, nortriptilina, amitriptilina e trimipramina); anticonvulsivantes (exemplo: carbamazepina); antiglutamatérgicos (memantina e acamprosato); dopaminérgicos (dopamina) (da Rosa et al., 2012).

Num outro ensaio clínico, realizado em 92 pacientes com zumbido crónico, entre os quais 38 apresentavam diagnóstico de depressão grave e 54 pacientes apresentavam sintomas de depressão bem como desconforto com o zumbido. Estes últimos relataram uma melhoria dos sintomas de depressão e do desconforto referido, apesar disso consideraram que os efeitos colaterais da medicação prejudicavam a sua qualidade de vida. Deste modo, os autores sugerem que haja uma forte correlação entre o zumbido “severo” e os sintomas de depressão - numa associação bidirecional (Figura 6). Relativamente aos outros artigos e estudos científicos referenciados na revisão sistemática juntamente com os ensaios abordados anteriormente, Geocze et al. verificaram também que existem pelo menos três possibilidades de associação entre a depressão e o zumbido, nomeadamente:

- A depressão como um dos fatores que piora o zumbido;
- O zumbido como fator de predisposição à depressão;
- O zumbido que surge em pacientes com depressão (neste caso, a depressão aumenta a sua intensidade, o seu desconforto, a intolerância ao zumbido e consequentemente o quadro depressivo) (Geocze et al., 2013).



Figura 6 - Espiral do Zumbido. Informação acedida em: <https://www.thetinnituslife.com/tinnitus-spiral/>

Apesar de todas estas relações, os mecanismos de interação entre depressão e zumbido não são totalmente compreendidos. São necessários estudos futuros para continuar a investigar a associação de causa e efeito entre a depressão e o zumbido (Geocze et al., 2013).

Uma das classes de antidepressivos mais comuns são os inibidores seletivos da recaptção da serotonina (ISRS). Tem como objetivo aliviar os sintomas da depressão (de grau moderado a grave) e ansiedade, provocando um aumento do nível de serotonina no cérebro. A serotonina é um composto químico que atua como um neurotransmissor e é responsável pela regularização do humor.

Em 2017, os cientistas da Oregon Health & Science University (OHSU) chegaram à conclusão que a toma de ISRS agrava os sintomas do zumbido dos pacientes. Em termos fisiológicos, descobriram que os neurónios, conhecidos como células fusiformes, que estão presentes no núcleo coclear dorsal (região onde “ocorre” a interação sensorial e o zumbido), tornam-se hiperativos e hipersensíveis a estímulos quando expostos à serotonina (Figura 7). Tendo em conta que os ISRS inibem a recaptção da serotonina, o zumbido por tornar-se mais incomodativo. Estas conclusões levaram os investigadores a

alertar a comunidade médica para terem mais cuidado na prescrição deste tipo de antidepressivos (Tang & Trussell, 2017).

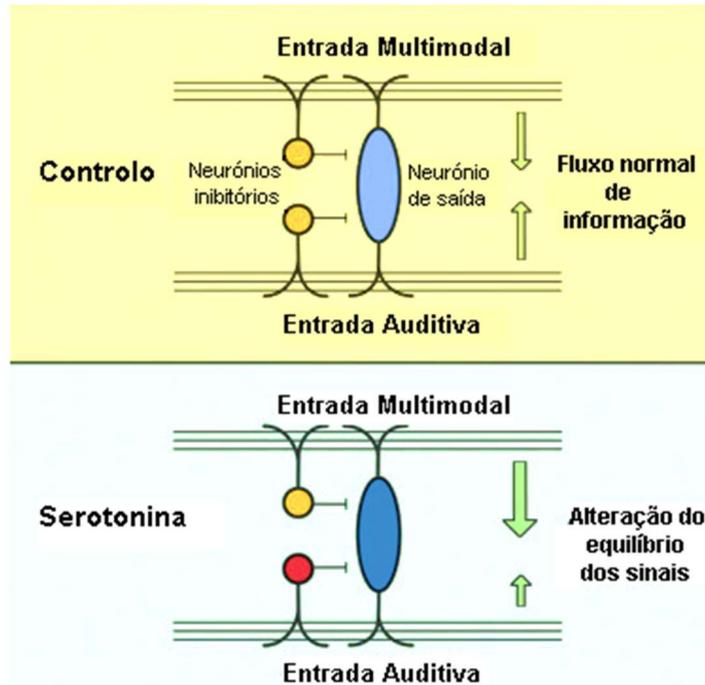


Figura 7 - Influência da presença da serotonina no processamento sensorial, neste caso auditivo (Tang et al., 2017).

Num estudo realizado na Universidade da Califórnia, foi possível comparar diversos estados psicológicos em dois grupos, um com zumbido e outro de controlo (sem queixas de zumbido). Verificaram que no grupo de indivíduos com zumbido cerca de 26,1% mencionaram problemas de ansiedade nos últimos 12 meses, enquanto que apenas 9,2% dos indivíduos sem zumbido relataram problemas de ansiedade. No que diz respeito ao fator depressão, 25,6% dos participantes com zumbido referiram ter problemas nessa área; por outro lado, apenas 9,1% do grupo sem zumbido referiram tais queixas. Relativamente à amostra de indivíduos que referenciou o zumbido como um problema de grandes dimensões, tiveram maior tendência a referir simultaneamente sintomas de ansiedade. Além disso, a amostra de participantes com zumbido referiram uma diminuição significativa do número de horas médias de sono por noite e um aumento do número de dias de trabalho perdidos em comparação com o grupo de controlo (Bhatt, Bhattacharyya & Lin, 2017).

## 2.6. Influência dos tratamentos oncológicos

Em 2011, foi feito um estudo com pacientes sujeitos a tratamentos oncológicos em que se verificou que o zumbido era uma queixa comum em alguns pacientes com perda auditiva, mas também em alguns com audição normal (Lieberman, Goffi-Gomez, Schultz & Lopes, 2012).

Segundo um estudo realizado em pacientes sujeitos apenas a quimioterapia (QT) com cisplatina, verificou-se que existem alterações no funcionamento das CCE, comprovadas pela diminuição das respostas das OEAPD (Zocoli, Reichow & Zocoli, 2003). Apesar de ainda não existirem evidências concretas entre as OEAPD e o zumbido, sabe-se que as OEAPD fornecem informações úteis acerca da integridade estrutural da cóclea, principalmente a nível do funcionamento das CCE. Até porque as OEAPD permitem uma análise de frequências mais ampla em relação às OEAT, o que proporciona uma avaliação mais completa da cóclea (Gentil et al., 2015). Relativamente ao estudo de Zocoli et al., concluíram que as drogas ototóxicas têm um forte potencial em alterar a biomecânica coclear e assim afetar a audição. Deste modo, o estudo destaca a importância da monitorização efetiva com OEAPD na deteção precoce da ototoxicidade, mas também nas possíveis readaptações das doses, de forma a minimizar os efeitos negativos para o ouvido (Zocoli et al., 2003).

A cisplatina é um dos ototóxicos mais utilizado na QT, afetando sobretudo a cóclea, o vestíbulo e inclusive a parte neurológica. As lesões cocleares provocadas pela cisplatina surgem quando a dose excede os  $360\text{mg/m}^2$ . Começa por afetar a estria vascular e as CCE da parte basal da cóclea, traduzindo numa perda auditiva mais acentuada nos sons agudos com tendência a progredir também para as frequências mais graves com o uso continuado (Schultz, Goffi-Gomez, Lieberman, & Carvalho, 2009). No entanto, num estudo feito em crianças com Retinoblastoma sujeitas a QT com carboplatina, não se observaram alterações nas OEAT, nas bandas de frequências de 1, 1,5, 2, 3 e 4 kHz (Amorim, Azevedo, Carvalho, & Macedo, 2007). Este facto leva a concluir, que os fármacos utilizados na QT não têm todos o mesmo efeito na audição. Algumas substâncias ototóxicas podem ter um impacto temporário ou definitivo na audição, mas também no equilíbrio. Além do comprometimento no ouvido, o uso de drogas antineoplásicas têm também um efeito tóxico a nível do fígado e dos rins (Jacob, Aguiar, Tomiasi, Tschoeke, & Bitencourt, 2006).

Num estudo feito em pacientes sujeitos apenas a radioterapia (RT) e pacientes sujeitos a RT e QT com cisplatina associada, concluíram que resultam normalmente numa perda auditiva bilateral, descendente e simétrica, o que leva a problemas na perceção correta de fonemas agudos da fala. Este facto implica inevitavelmente dificuldades na comunicação, sobretudo em ambientes ruidosos (Lieberman et al., 2012). De acordo com um estudo recente, foi possível concluir que os participantes sujeitos a terapia combinada apresentavam uma perda auditiva superior comparando com os pacientes sujeitos apenas a RT. Este facto deveu-se à maior quantidade de ototoxicidade que os pacientes de terapia combinada estavam expostos (Malgonde, Nagpure, & Kumar, 2015). Na mesma linha de investigação, um estudo português de 2012, de Magalhães et al., chegou à mesma conclusão e acrescentou ainda que existe uma relação diretamente proporcional entre a dose de radiação na cóclea e a perda auditiva, em 94,4% dos indivíduos que fizeram parte do grupo que realizou terapia combinada (RT e QT com cisplatina, em simultâneo). No grupo que realizou apenas RT, essa relação de proporcionalidade só se verificou em 31% dos indivíduos. Após os tratamentos, verificou-se através do preenchimento de questionários, o aparecimento/ agravamento de alguns sintomas, tais como mucosite, radiodermite, otite média, perfuração timpânica, otalgia e zumbido. Foi também observado um agravamento dos sintomas, quer dos pacientes sujeitos a terapia combinada (com um aumento de 45%), quer dos pacientes intervencionados por RT (com um acréscimo de 41%) (Magalhães et al., 2012).

Relativamente a tratamentos exclusivamente de RT, de acordo com um estudo de 2013, verificou-se que a dose mínima de radiação coclear a partir da qual constitui um fator de risco para a lesão auditiva ronda os 47 Gy<sup>2</sup>. O aparecimento de perda auditiva em pacientes sujeitos a RT resulta de vários fatores de risco que a podem retardar ou potenciar, nomeadamente a dose de radiação que afeta a cóclea, o acompanhamento que é feito, a idade, o nível de audição que apresentava antes dos tratamentos, entre os fatores intrínsecos e extrínsecos ao paciente (Theunissen et al., 2015). Os efeitos podem não ser

---

<sup>2</sup> No Sistema Internacional (SI), a unidade mais utilizada em RT é J/kg, mais conhecida por gray (Gy). Trata-se da energia depositada por unidade de massa do meio e exprime a quantidade de energia que uma radiação ionizante comunica a uma determinada quantidade de matéria. Um gray é a absorção de 1 J de radiação por 1 kg de matéria: 1 Gy = 1 J/kg (Ficel, S.D.).

imediatos e a perda de audição pode manifestar-se mais tarde. Estudos pré-clínicos e do osso temporal humanos demonstraram que os tratamentos provocam danos significativos na cóclea, dependendo da dose administrada ao ouvido interno (Mujica-Mota, 2014).

Estudos recentes demonstraram também que logo no primeiro mês após o fim dos tratamentos radioterapêuticos já pode ser observada uma pequena deterioração da audição nos 8kHz; no entanto, essa perda tende a ser progressiva e a expandir em direção às frequências mais graves (Theunissen et al., 2015). Num outro estudo, verificou-se que essa deterioração auditiva pode estar evidente já a nível das frequências médias (1, 2 e 4kHz – essenciais para a fala) com tendência a piorar à medida que se aproxima das altas frequências. A nível dos graves (250 e 500 Hz não se verificaram diferenças significativas (Loureiro, 2007).

Segundo um estudo de 2011, em pacientes portadores de meduloblastoma, obteve-se um número substancial de indivíduos que desenvolveu, durante ou após a RT, alterações do ouvido médio por disfunção da trompa de Eustáquio, nomeadamente a otite média crónica (Vieira, 2011). Também num estudo acerca dos efeitos da ototoxicidade na audição de pacientes com neoplasia da cabeça e pescoço, após RT e terapia combinada (RT e QT em simultâneo), verificaram-se perdas auditivas mistas. No entanto, conclui-se que essa situação é reversível, desde que haja uma intervenção precoce e adequada. Os resultados permitiram concluir também que a hipoacusia mista tem uma menor taxa de incidência comparativamente aos casos de hipoacusia neurosensorial observados. Por outro lado, a perda neurosensorial é irreversível e tem tendência a piorar com o tempo, especialmente a nível das frequências agudas. Desta forma, chegaram à conclusão que as lesões auditivas são predominantemente no ouvido interno (Malgonde et al., 2015).

De forma a minimizar as lesões no organismo, a *Quantitative Analysis of Normal Tissue Effects in the Clinic* (Bentzen et al., 2010) resolveu restringir as doses de radiação. Isto porque muitos pacientes são sujeitos a RT e existem situações em que o paciente é sujeito ainda a QT com cisplatina, em simultâneo. No caso das lesões cocleares, decidiram restringir a dose média para valores inferiores a 45Gy, inclusive – o que resulta numa taxa de perdas neurosensoriais inferior a 15%. Apesar disso, a tolerância do tecido normal à radiação terapêutica, depende da sensibilidade de cada indivíduo. A dose e o volume estipulado deve ser usado apenas como um guia (Emami, 2013).

Os planos de tratamento tentam distribuir a dose letal de modo uniforme na região do tumor. Se por um lado, uma dose inferior impede que as células cancerígenas sejam destruídas, por outro lado, uma dose superior pode ter efeitos altamente devastadores em tecidos vizinhos (Barboza & Oliveira, 2006).

## **2.7. Avaliação do zumbido**

### **2.7.1. Acufenometria**

A acufenometria é o método mais básico de avaliação do zumbido; no entanto, por vezes, torna-se bastante complexo para o paciente. Este método consiste em identificar o som mais parecido com o zumbido – o que requer alguma abstração e memória auditiva por parte do doente. Pretende-se com este exame descodificar o tipo de som (apito, ruído, sirene, assobio, entre outros); o(s) ouvido(s) afetado(s); a frequência bem como a intensidade<sup>3</sup> a que corresponde o zumbido (Portmann & Portmann, 1988).

### **2.7.2. OEAPD**

Segundo um estudo publicado em 2015, verificou-se que as OEAPD têm bastante importância na avaliação do zumbido. Isto, porque normalmente o funcionamento das CCE está comprometido em pacientes com zumbido (Gentil et al., 2015).

### **2.7.3. Tinnitus Handicap Inventory (THI)**

O questionário THI original foi desenvolvido por Craig Newman et al. em 1996 e era composto por 27 perguntas, com um *score* que varia entre 0 e 100. Quanto maior o *score*, maior é o impacto do zumbido na qualidade de vida do paciente. Deste modo, trata-se de uma medida rápida, de fácil aplicação e interpretação. Em 2006, este questionário foi traduzido para a língua portuguesa por Leticia Schmidt, Vanessa Teixeira, Celso Dall’Igna, Daniel Dallagnol e Mariana Smith (Anexo 2) (Schmidt, Teixeira, Dall’Igna, Dallagnol, & Smith, 2006). De acordo com um estudo feito em 2007, esta é uma queixa

---

<sup>3</sup> Os conceitos de frequência e intensidade serão abordados no capítulo seguinte – Enquadramento em Engenharia.

frequente que tem implicações na qualidade de vida, principalmente a nível emocional. Com recurso ao THI conclui-se que estes pacientes apresentam um nível de frustração, irritabilidade e insegurança elevado. Podem também apresentar aspetos psicopatológicos, tais como ansiedade e depressão. De acordo com o mesmo estudo, verificou-se que em grande parte a componente social é igualmente afetada. Uma pequena percentagem refere também consequências na vida profissional ou doméstica (Oliveira, 2007).

## **2.8. Técnicas de tratamento**

### **2.8.1. Fármacos**

Vários estudos recorreram ao uso de diferentes drogas/plantas para o tratamento de zumbido (Azevedo, 2005):

- Extrato de ginkgo biloba (EGb) 761, na dosagem de 120mg duas vezes ao dia, mostraram melhorias do zumbido em 57,5% dos casos (taxa superior quando comparada com o uso da dosagem de 80 mg duas vezes ao dia - 42,5%);
- Carbamazepina, em dosagens progressivamente maiores, de 50 a 600 mg por dia pode melhorar em 50% dos casos de zumbido;
- Outras drogas: baclofen melhora em torno dos 9,7%; caroverine 63,3%; piribedil 92,6%; nimodipina 16,13%, clonazepam 32% e trimetazidina 89%. No caso da trimetazidina (medicação anti isquémica) que é utilizada na Europa para tratamento de zumbidos e vertigens, verificou-se mais eficaz em zumbidos recentes (menos de 1 ano de duração);
- Clonazepam e flunarizina apresentaram índices de melhoria sintomatológica entre os 33 e os 56%, de acordo com um estudo de 1992;
- Acamprosato foi investigado num estudo de 2005, no qual se obteve uma excelente tolerabilidade, o que possibilita e facilita uma possível utilização futura no tratamento de zumbido. Esta droga é utilizada no tratamento do alcoolismo e possui um duplo mecanismo de ação:
  - Diminui a transmissão glutamatérgica (excitatória)
  - Aumenta a atividade GABAérgica (inibitória)

Embora a avaliação seja subjetiva, tendo em conta que o mesmo zumbido pode ter um impacto distinto em diferentes pessoas, a melhoria do valor inicial é o fator mais significativo. Observou-se uma melhoria significativa do zumbido (Lindblad, Rosenhall, Olofsson, & Hagerman, 2014), em que cerca de 47,8% dos casos obteve melhorias superiores a 50%. Observa-se uma queda na nota atribuída pelo paciente ao zumbido no grupo do acamprosato, ao longo de 90 dias. O índice de melhoria foi superior ao de outras drogas, como a trimetazidina e piribedil (Azevedo, 2005).

### **2.8.2. Mindfulness Based Tinnitus Stress Reduction (MBTSR)**

#### *Conceito Mindfulness*

O *Mindfulness Based Stress Reduction* (MBSR) é um programa que foi criado por Jon Kabat-Zinn, no final dos anos 70. Segundo Jon Kabat-Zinn, este programa tem como objetivo ensinar princípios de controlo da atenção que promovam novas capacidades bem como a autonomia, de forma a que o paciente os consiga integrar na sua vida diária. O conceito “*Mindfulness*” significa prestar atenção de uma maneira particular com um propósito, no momento presente e sem julgar” (Kabat-Zinn 1994, p.4). Aplicar este conceito pode não ser um processo simples, principalmente para indivíduos com zumbido associados ao medo de que sua condição possa piorar; que o seu zumbido possa ser uma consequência de um tumor cerebral ou possa significar o início/agravamento da perda auditiva. Jon Kabat utilizou também a noção *mindfulness* em estudos com amostras de pacientes que apresentavam dor crónica e no final da investigação verificou melhorias significativas. Foi através dessas conclusões que foi conhecido por introduzir a analogia entre indivíduos com zumbido e indivíduos com dor crónica, razão pela qual o processo de tratamento é baseado nas mesmas condições (Gans, O’Sullivan, & Bircheff, 2014).

#### *Aplicação em pacientes com zumbido*

Num estudo piloto de 2014, pretenderam ir mais além, aplicando uma nova intervenção mente-corpo, *Mindfulness Based Tinnitus Stress Reduction* (MBTSR) (Gans et al.), a cerca de oito pacientes com zumbido. Esta investigação apresentava alguns dos critérios de exclusão, nomeadamente perda auditiva superior a 40 dB; duração do zumbido ser

inferior a 6 meses; estados de depressão e ansiedade severos; consumo abusivo de álcool, drogas ou cafeína durante os últimos 3 meses; tentativa de tratamento do zumbido, nos últimos 3 meses; problemas de demência ou desordem psicológica assim como pontuação no THI inferior a 20. O objetivo deste estudo visa também modificar a percepção que o paciente têm em relação ao seu próprio zumbido. Inicialmente, foram orientados acerca do seu zumbido e foi-lhes sugerido participar no programa MBTSR. Esta terapia incluía oito semanas de instrução em grupo sobre a prática do programa, um retiro com duração de 7 horas, sugestões de leituras complementares e a utilização de CD's de meditação. Foi realizada uma avaliação quantitativa e qualitativa, antes e depois da participação do paciente no programa estabelecido e verificaram-se resultados bastante positivos na melhoria da qualidade de vida, tanto a nível psicológico como físico. Concluíram que a implementação do MBTSR pode ser uma intervenção eficaz para tratar não só o zumbido crónico, mas também os sintomas associados. Pode ainda ter efeitos na redução da depressão, da fadiga, da ansiedade fóbica e da dificuldade em dormir assim como na melhoria do relacionamento interpessoal na resolução de problemas - melhorando assim a saúde mental, em geral (Gans et al., 2014).

### **2.8.3. Tinnitus Habituation Therapy (THT), Aconselhamento e Terapia Sonora**

Segundo Jastreboff & Jastreboff (2000), o tratamento mais fácil envolve a utilização do THT em paralelo com o aconselhamento e terapia sonora – à qual se dá o nome de *Tinnitus Retraining Therapy* (TRT). A TRT é umas das terapias mais conhecidas para o tratamento do zumbido e foi proposta com base no modelo neurofisiológico de zumbido. Quando a TRT é implementada de forma adequada é bastante eficaz. Além disso, não interfere com a audição, não apresenta efeitos colaterais e pode ser aplicada em todos os pacientes com queixas de zumbido e/ou hiperacusia.

Para um paciente com queixas de zumbido, o mesmo som à mesma intensidade, pode ter efeitos diferentes consoante o ambiente envolvente. Ou seja, um indivíduo quando ouve um determinado som tem a sensação de maior intensidade sempre que se encontra no silêncio quando comparado com a apresentação do mesmo som juntamente com outros sinais sonoros. Quando existe outra estimulação auditiva, para além do estímulo apresentado, a sensação é de que o som apresentado é mais suave e por consequência,

torna-se mais difícil de detetar a atividade neuronal evocada (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

Em relação à TRT, não é considerado uma cura; no entanto, o objetivo é eliminar o zumbido, tendo em conta que visa induzir a habituação e diminuir a percepção do mesmo. Tem como objetivo permitir que os pacientes tenham controlo sobre o seu zumbido, de modo a melhorar a sua qualidade de vida, permitindo a participação normal nas atividades quotidianas. A habituação é uma das técnicas utilizadas no tratamento de zumbido, para tal podem ser usadas uma série de abordagens, incluindo aconselhamento, combinados, por exemplo, com medicamentos, *biofeedback*, hipnose, entre outras.

Podem também ser utilizados diferentes dispositivos para auxiliar na indução da habituação, nomeadamente através de próteses auditivas (nos casos associados também a perda auditiva) ou através do uso de geradores de som especiais. O importante nestas situações é o som e não os meios que o produzem. Para uma maior eficácia do tratamento é muito importante ter em consideração a sensação de intensidade do zumbido para o paciente (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

#### Importância do Aconselhamento e Acompanhamento

A TRT deve ser usada em paralelo com um prévio aconselhamento, no qual devem ser abordados os seguintes assuntos:

- (1) Perceção dos resultados do zumbido de uma compensação que ocorre dentro do sistema auditivo;
- (2) O zumbido é um problema devido à ativação emocional (límbico) e do SNA;
- (3) Recorrendo à plasticidade do sistema nervoso, é possível treinar o cérebro para alcançar a habituação de reações induzidas pelo zumbido bem como a percepção do zumbido.

Além da consulta de aconselhamento são bastante importantes as consultas de acompanhamento que têm como objetivo monitorizar todo o processo (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

### Mascaramento vs. Habituação

De uma forma geral, existem dois métodos para o tratamento do zumbido; a habituação e o mascaramento. Devem ser considerados como opções separadas, uma vez que a habituação e o mascaramento do zumbido são incompatíveis quando usados em simultâneo. Enquanto que na habituação, é importante descobrir o momento a partir do qual o zumbido deixa de ser perceptível quando é apresentado o som gerador (“*mixing point*”) (Figura 8); no mascaramento, o som tem de ser apresentado a uma intensidade superior à do zumbido, impedindo a deteção do zumbido apenas naquele momento. Deste modo, o mascaramento sonoro não é recomendado, porque quando o som externo é removido, o sinal do zumbido volta às suas características iniciais, não ocorrendo habituação tal como era pretendido. Tendo em conta estes factos, Jastreboff recomenda optar pela habituação (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

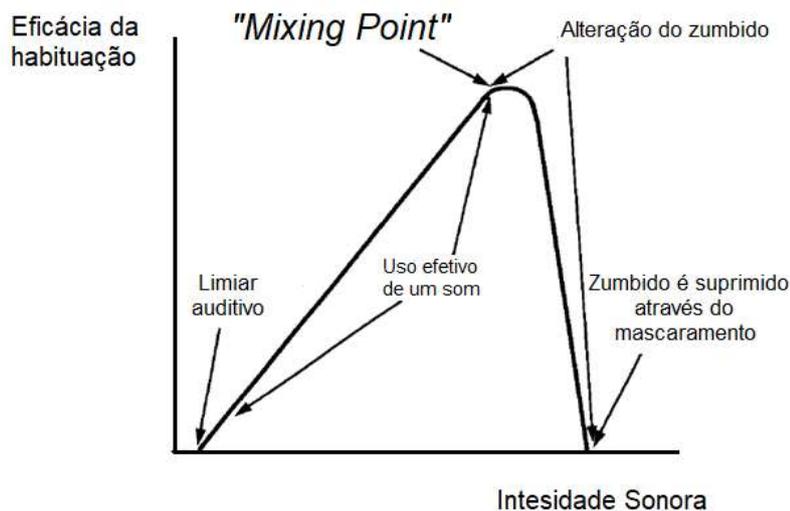


Figura 8 - Relação entre a eficácia da habituação do zumbido e a intensidade do som apresentado (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

### Atividade neuronal relacionada com o zumbido

A terapia do som fornece uma ajuda significativa no processo de habituação, diminuindo a força da atividade neuronal relacionada com o zumbido, quer no sistema auditivo, quer no trajeto do sistema auditivo para o sistema límbico e SNA (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

O sistema límbico é constituído por estruturas corticais situadas na região medial e inferior do cérebro, incluindo o hipotálamo, amígdala, núcleos da base, área pré-frontal, cerebelo e área do septo. O hipocampo, inicialmente foi incluído, todavia não parece ter uma ação decisiva nos mecanismos neurais das emoções, mas sim na consolidação da memória, incluindo aquela que diz respeito ao conteúdo emocional (daí estar relacionado). Segundo Papez (1937), foi também incluído o giro do cíngulo, giro para-hipocampal, tálamo e hipocampo (Figura 9). O sistema límbico é caracterizado por um circuito neuronal relacionado com as respostas emocionais e com os impulsos motivacionais, apesar de ainda existir alguma controvérsia (Esperidião-Antonio et al., 2008).

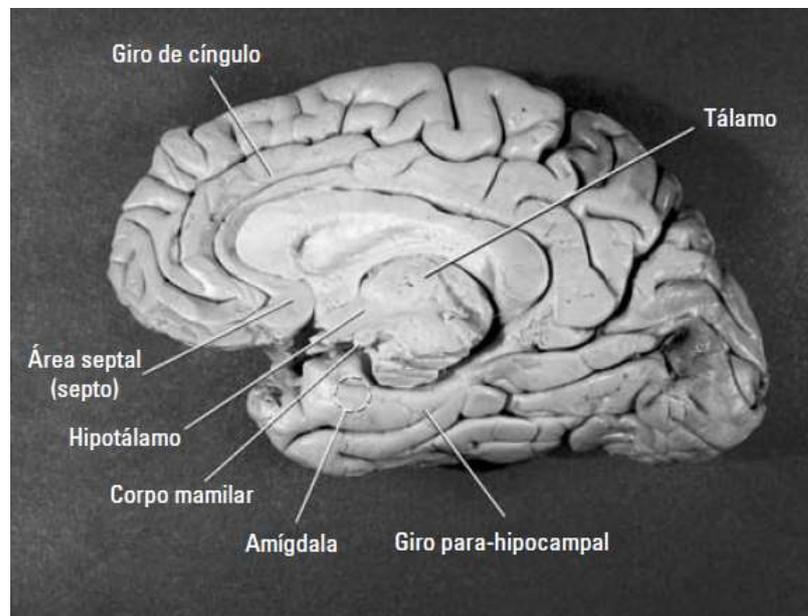


Figura 9 - Neuroanatomia do sistema límbico - imagem produzida pelos autores (Esperidião-António et al., 2008).

A conexão direta entre o hipotálamo e o SNA é feita através de projeções hipotalâmicas para regiões do tronco encefálico, destacando-se o núcleo do trato solitário. Para além destas vias eferentes, o nervo vago (NC X) - um dos principais elementos do SNA (porção parassimpática) - apresenta uma importante componente aferente, responsável pela ativação de áreas cerebrais superiores. As suas projeções aferentes ascendem ao prosencéfalo através do núcleo parabraquial e *locus ceruleus*, ligando-se diretamente com todos os níveis

do prosencéfalo (hipotálamo, amígdala e regiões talâmicas que controlam a ínsula e o córtex orbito-frontal e pré-frontal) (Esperidião-Antonio et al., 2008).

Se ocorrer uma ativação elevada e anormal do sistema límbico e do SNA, vai provocar um aumento do *stress* e da ansiedade, diminuindo assim o bem-estar do paciente. Perante esta situação, o paciente foca-se no zumbido e fica extremamente irritado. A ligação entre o *feedback* e as restantes áreas (sistema auditivo, sistema límbico e SNA) é fortalecida, piorando o estado do paciente. Quando se inicia o processo de habituação, a tendência é induzir as reações do sistema límbico bem como do SNA. Este processo apresenta dois *loops* (passos) distintos:

- Superior, cortical-verbal – envolve a região cortical e exclui a subcortical; pode envolver crenças e pode ser diretamente afetados pelo aconselhamento
- Inferior, subcortical-não verbal – envolve a região subcortical e exclui percepção e avaliação; pode ser controlada apenas indiretamente.

As terapias cognitivas que trabalham em regiões corticais altas afetam o *loop* superior, mas o sucesso não está garantido na maior parte dos pacientes, razão pela qual opta-se pelo *loop* inferior (subconsciente) (Figura 10). Deste modo, é possível que a ativação das várias regiões devido ao zumbido diminua progressivamente, tornando a habituação do zumbido mais simplificada (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

Esta técnica fornece ao sistema auditivo de forma constante, sinais auditivos neutros para:

- (1) Diminuir o contraste entre a atividade neuronal provocada pelo zumbido e a atividade neuronal de *background* (som envolvente);
- (2) Interferir com a deteção do sinal do zumbido;
- (3) Diminuir o *input* que o sistema auditivo envia para o sistema subcortical (Jastreboff & Jastreboff, 2000).



### Tratamento apropriado para cada tipo de zumbido

Segundo Jastreboff, o tratamento mais apropriado para cada paciente com zumbido depende de alguns fatores, nomeadamente da presença de hiperacusia, da existência de exacerbação prolongada induzida pelo ruído (quando a hiperacusia induzida pelo ruído apresenta efeitos que persistem até o dia seguinte), de perda auditiva subjetiva bem como do impacto na vida do indivíduo.

Existem cinco categorias diferentes, numeradas entre zero e quatro. Na categoria zero, o paciente tem “apenas” zumbido; no entanto, o impacto na sua vida é baixo – pelo que está indicado exclusivamente o aconselhamento, no qual é sugerido evitar o silêncio e enriquecer o seu ambiente sonoro. Incluem-se neste nível ainda os pacientes com zumbido recente, que não exceda os dois meses e que não tenham tido qualquer ajuda. Nas restantes categorias, o impacto do zumbido na vida do indivíduo é cada vez mais alto. O patamar seguinte difere do primeiro apenas neste último item, razão pela qual é aconselhado a utilização de geradores sonoros configurados no *mixing point* (Figura 8).

Por outro lado, se estiver associado a perda auditiva, o ideal é recorrer a próteses auditivas que possuem simultaneamente programas específicos para zumbido, ou seja, que permitem a amplificação sonora assim como a produção de sons de *background*. Enquadram-se nas categorias três e quatro os pacientes que tenham hiperacusia e que não apresentem perda auditiva muito relevante, sendo que na quatro ocorre ainda exacerbação prolongada induzida pelo ruído. Deste modo, Jastreboff recomenda a utilização de geradores sonoros em ambas as situações. Apesar disso, os indivíduos que se enquadrem na categoria três, os geradores devem ser programados acima do limiar auditivo, enquanto na categoria quatro, os geradores sonoros devem ser configurados no limiar e com um aumento muito lento do nível de som (Anexo 3).

Para além dos fatores enumerados acima, é importante ter em consideração o limiar de desconforto (UCL) e a sua relação com a hiperacusia, uma vez que também influenciam a escolha do tratamento mais adequado. No caso de hiperacusia pura, o ganho está limitado, o sistema auditivo e os sons moderados induzem uma atividade elevada nas vias auditivas, e apenas o sistema límbico e autónomo estão envolvidos na diminuição do nível sonoro desagradável. Nesta situação, a amplitude real das vibrações da membrana basilar e a intensidade física do som são fatores fundamentais. Os parâmetros físicos do som são determinantes para o grau de desconforto (hiperacusia pura sem queixas de *phonofobia*).

O ambiente no qual o som ocorre é irrelevante, pois a reação a um dado som é a mesma independentemente das diferentes condições. Os parâmetros físicos da transdução na cóclea e a relação de dB SPL (*sound pressure level*) e HL (*hearing level*) pode traduzir-se num UCL com uma configuração plana (Figura 11) (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

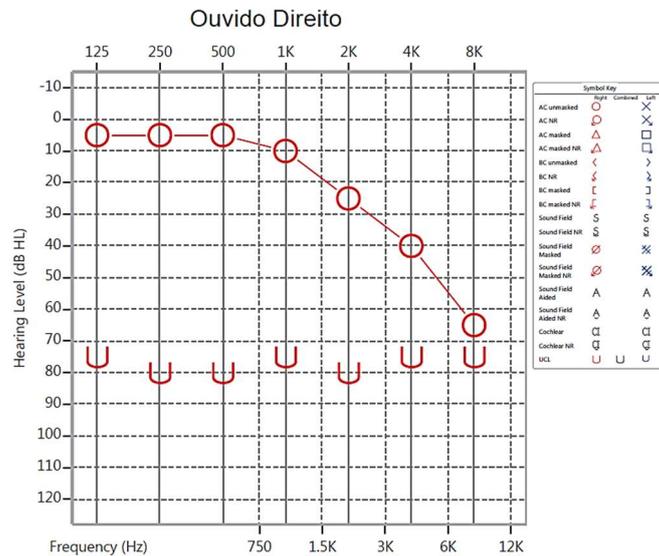


Figura 11 - UCL num paciente com hiperacusia pura (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

Caso haja uma exposição prolongada a sons de elevada intensidade, pode ocorrer uma ativação dos sistemas, desencadeando a *phonofobia* (o medo do som). Na *phonofobia* pura, o sistema auditivo funciona normalmente. Apesar disso, ocorre uma superativação do sistema nervoso límbico e do SNA mesmo que a ativação do sistema auditivo seja num nível relativamente baixo. Neste caso, a reação a um determinado som depende do contexto em que o som ocorre. Alguns pacientes apresentam queixas prolongadas com agravamento do zumbido e/ou aparecimento de hiperacusia – estas queixas resultam da exposição sonora. Os pacientes podem reagir de maneira exagerada a certos sons, desde que as reações dependam do volume percebido do som (relativo ao dB SL – *sound level*) e não à sua intensidade física (relacionado com o dB SPL)<sup>4</sup>. Nestes casos, o UCL manter-se-á com uma distância relativamente constante do audiograma (Figura 12). Quando os pacientes apresentam *phonofobia* pura ou intensa, os UCLs têm tendência a apresentar valores extremamente baixos. (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

<sup>4</sup> A definição de intensidade irá ser abordada, mais pormenorizadamente, no próximo capítulo – Enquadramento em Engenharia

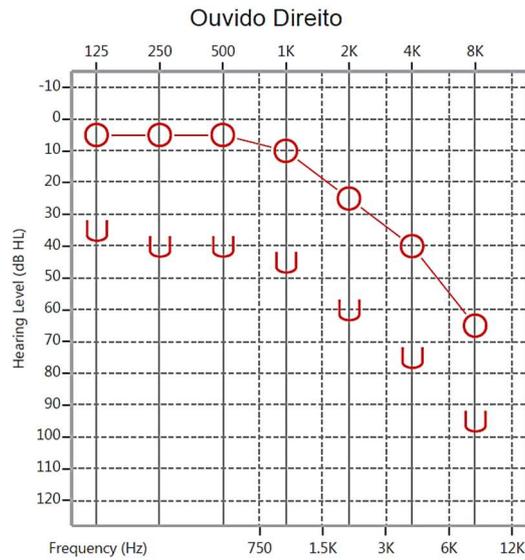


Figura 12 - UCL numa phonofobia pura (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

Sempre que os pacientes apresentem em simultâneo hiperacusia e *phonofobia*, os gráficos tem uma confirmação típica (Figura 13) (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

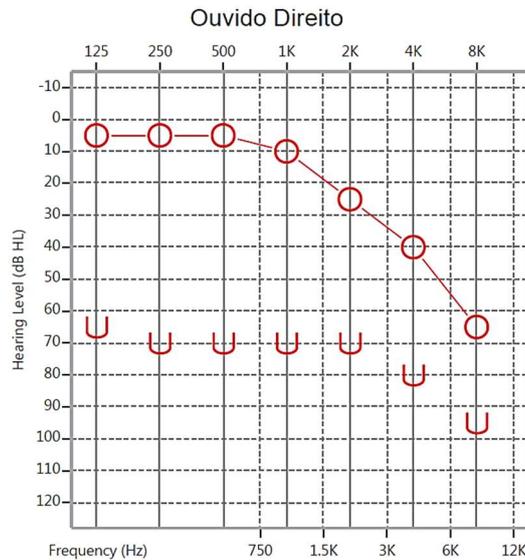


Figura 13 - UCL num paciente com hiperacusia e phonofobia em simultâneo (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

Cerca de 75% dos casos de zumbido, os pacientes sentem o zumbido, mas não sofrem por causa disso. Isto acontece, porque a atividade está restrita ao sistema auditivo e é frequentemente bloqueada antes de atingir o nível de consciência. Contudo, existem situações que resultam de associações iniciais negativas, nas quais a atividade neuronal relacionada com o zumbido provoca a ativação inadequada do sistema nervoso límbico e

do SNA. Este processo desencadeia ansiedade, distúrbios do sono bem como uma série de problemas somáticos. As conexões entre o sistema auditivo e outros sistemas são baseadas no princípio dos reflexos condicionados – o que não é fácil reverter. Além disso, o sistema nervoso límbico e o SNA podem ser completamente normais e o problema pode surgir da ativação devido a um estímulo inadequado (isto é, atividade neuronal relacionado com o zumbido). Em casos de hiperacusia e *phonofobia*, ocorre uma ativação do sistema nervoso límbico e autónomo; no entanto o zumbido apresenta mecanismos diferentes. Sempre que são estabelecidas ligações, as reações desses sistemas são controlados pelo princípio do reflexo condicionado. Apesar disso, este é desencadeado por sons externos, em vez de atividade neuronal relacionada ao zumbido.

O TRT é adequado para tratamento de todos os tipos de zumbido, uma vez que a habituação do sistema nervoso ocorre acima da origem do zumbido. Este tipo de tratamento necessita de ser implementado num intervalo de tempo finito; no entanto, não requer um acompanhamento muito frequente pelo audiologista. Muitos doentes após completarem a terapia não têm necessidade de continuar a utilizar dispositivos (referidos anteriormente), uma vez que o zumbido deixa de ser um problema na sua vida. Apesar de existirem outras técnicas de tratamentos, se a TRT for devidamente implementada torna-se eficaz no auxílio em pacientes com zumbido e hiperacusia. Apesar disso, segundo este estudo, não há garantias de 100% de sucesso (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

## **Capítulo 3: Enquadramento em Engenharia**



### 3. Enquadramento em Engenharia

#### 3.1.Som

Em acústica, o som é a palavra de ordem e define-se como uma deslocação de ar que atinge o ouvido. É produzido por uma fonte vibratória, quer seja através da vibração das cordas vocais (no caso da fala) como pela vibração da membrana de um altifalante. Em ambos os casos, as vibrações necessitam de um meio para se propagarem (gasoso, sólido ou líquido), o que faz com que o som seja considerado uma onda mecânica. Quando uma onda sonora se propaga no meio gasoso provoca estados de compressão e rarefação nas partículas de ar, desde a sua emissão na fonte vibratória (Martins, 1988). As zonas de compressão apresentam grande densidade e pressão, enquanto que as zonas de rarefação têm uma baixa densidade e reduzida pressão (Edelman, 2003).

Trata-se de uma onda longitudinal, uma vez que o sentido do movimento das partículas do ar e o sentido da propagação da onda sonora são o mesmo. Além disso, é considerado uma onda progressiva, tendo em conta que as compressões e rarefações vão se afastando da fonte emissora.

#### Exemplo prático do diapasão

O simples movimento de uma das pontas do diapasão provoca a sua vibração e consequentemente, a produção de um som. Isto acontece, porque o movimento de uma das pontas do diapasão faz com que as partículas de ar que se encontram junto ao “braço” do diapasão sofram vibrações sucessivas (Figura 14).

- Sempre que as partículas são atingidas pelo “braço”, estas deslocam-se até às partículas vizinhas, provocando zonas de **compressão**.
- Por sua vez, sempre que as partículas vão se propagando e afastam-se das outras partículas vizinhas, formam zonas de **rarefação**.

O mesmo acontece no sentido oposto, quando a ponta do diapasão volta para a posição oposta à do movimento inicial – formando zonas de rarefação e compressão, sucessivamente (Martins, 1988).

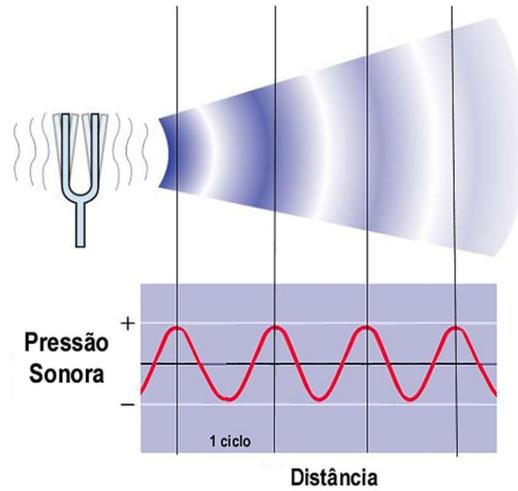


Figura 14- Propagação da onda sonora produzida pela vibração de um diapasão. Imagem retirada da web em setembro 2019: <https://www2.ibb.unesp.br/>

Desta forma, é mais fácil perceber que a propagação da onda sonora é análoga ao comportamento de uma mola quando esta é comprimida (Figura 15). Por outras palavras, quando é aplicada uma força de compressão a uma mola em equilíbrio, irá formar-se uma zona de compressão que irá percutir-se ao longo de toda a mola. Logo após a compressão, há espiras que apresentam um maior espaçamento comparativamente com a posição de equilíbrio – espiras “rarefeitas”. Além disso, a onda de compressão produzida inicialmente é seguida de uma onda de rarefação – tal como acontece com a propagação da onda sonora. No caso da mola, a onda também é longitudinal, atendendo ao facto de que a perturbação da onda (compressão e rarefação) é transmitida na mesma direção da propagação ( $x$ ) da onda (Nussenzveig, 2018).

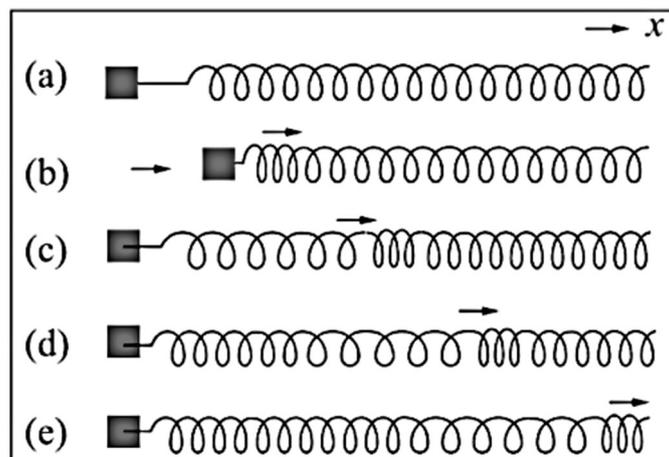


Figura 15 - Propagação de uma onda longitudinal ao longo de uma mola (Nussenzveig, 2018).

### 3.1.1. Velocidade do som

Em física, a velocidade do som é representada pela letra “ $v$ ” (Nussenzveig, 2018). A velocidade sonora é a taxa de propagação de um som num determinado meio. Este valor varia consoante o meio (Tabela I); no entanto é independente da frequência sonora. Todos os sons viajam à mesma velocidade, desde que o meio no qual se propagam seja o mesmo (Edelman, 2003).

Além do meio, a temperatura e a pressão também influenciam a velocidade do som. Quanto maior for a temperatura, maior é a velocidade de propagação da onda sonora (Braga, 2016).

$$v = v_0 \sqrt{\frac{T_{ar}}{T_0}} = v_0 \sqrt{\frac{T_{ar}}{273,15}}$$

Em que:

- $v_0$  representa a velocidade do som quando a temperatura é igual a 0 °C;
- $T_{ar}$  representa a temperatura do ar;
- $T_0$  representa a temperatura absoluta ou de referência, 0°C que equivale a 273,15K<sup>5</sup> (Nussenzveig, 2018).

No ar, por exemplo, a velocidade do som ronda os 340 m/s e isto significa que num segundo, a onda sonora percorre 340 metros no meio gasoso (Nussenzveig, 2018) – este valor é válido à temperatura ambiente.

Na tabela I são apresentados os valores característicos da velocidade do som para diferentes meios (Braga, 2016).

---

<sup>5</sup> K – representa a unidade de temperatura, em Kelvin.

Tabela I - Velocidade do som para diferentes meios (Braga, 2016).

MEIO	Velocidade de propagação do som (m/s)
Ar	340
Álcool etílico	1 180
Gasolina a 34°C	1 250
Água a 25°C	1 497
Água do mar a 17°C	1510 a 1550 (consoante a densidade)
Glicerina a 20°C	1 923
Aço	5 000

Por outro lado, para sons audíveis e atendendo à velocidade do som no ar, o comprimento de onda ( $\lambda$ ) varia entre 1,7 cm e 17m, aproximadamente (Nussenzveig, 2018).

$$\lambda = v \tau = \frac{v}{f}$$

Em que:

- $\lambda$  representa o comprimento de onda;
- $v$ , a velocidade;
- $\tau$ , o período temporal;
- $f$ , a frequência.

Para:

$$f = 20\text{Hz} \rightarrow \lambda = 17\text{m}$$

$$f = 20\text{kHz} \rightarrow \lambda = 1,7\text{m}$$

### 3.1.2. Reflexões da onda sonora

Ao longo da propagação de uma onda sonora podem existir obstáculos que irão modificar a forma como a onda é audível. As ondas sonoras conseguem contornar objetos pequenos; no entanto, se encontrarem obstáculos de grandes dimensões, tais como paredes, tendem a refletir a onda sonora. A reflexão de um som pode originar dois fenómenos distintos:

- **Eco**, ocorre quando o som refletido retorna à fonte depois da extinção total do som original
- **Reverberação**, acontece quando o som refletido retorna à fonte antes que o som original tenha se extinguido, ou seja, ocorre o reforço do som emitido.

Se o objeto estiver a mais de 17m da fonte sonora, a pessoa que se encontra junto da fonte consegue perceber o som da fonte separadamente do som refletido (Figura 16). O ser humano é capaz de distinguir dois sons, desde que estes estejam separados no mínimo por 0,1s. Este fenómeno é designado por **eco** (Braga, 2016).

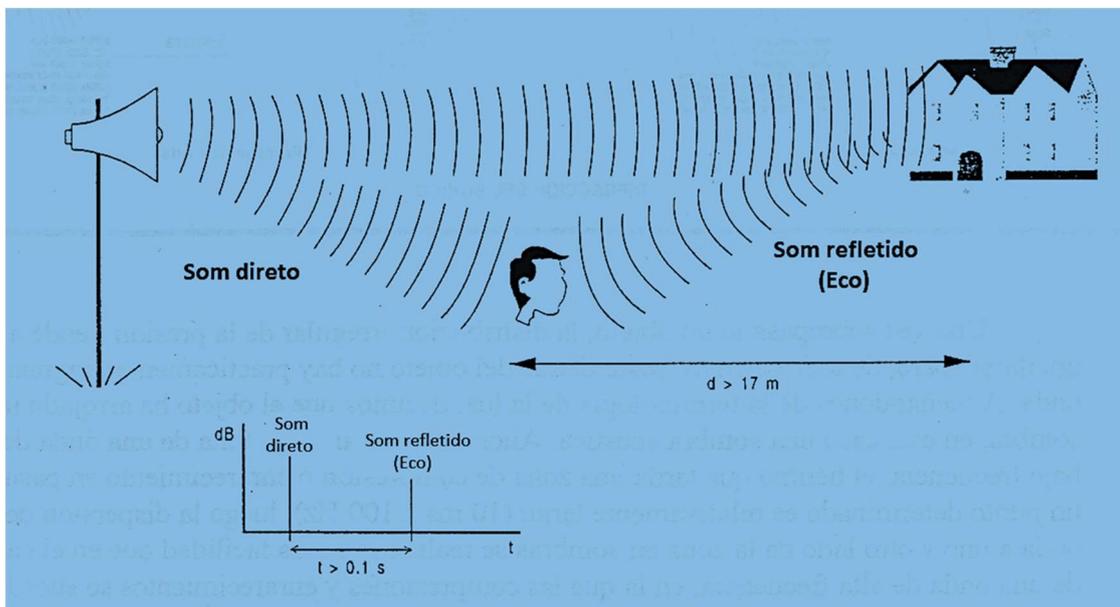


Figura 16 - Fenómeno do eco. Imagem adaptada do link:  
[http://www.quimicaweb.net/grupo\\_trabajo\\_ccnn\\_2/tema4/index.htm](http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_ccnn_2/tema4/index.htm)

Se por outro lado, o obstáculo estiver a uma distância inferior a 17m, o mesmo não acontece. Isto, porque o tempo de propagação é menor que 0,1s e não é possível o ser humano discriminar como sons diferentes. Nestes casos, pode ocorrer é o fenómeno de **reverberação**, no qual há um prolongamento do som. Esta situação é mais evidente quanto mais reflexões houverem (Braga, 2016).

Tendo em conta que a reflexão sonora diminui a qualidade do som e de modo a evitar as situações referenciadas anteriormente, existem alguns aspetos acústicos que devem ser tidos em conta principalmente quando o som é fator de interesse.

- As salas de teatros, de cinema bem como de música devem ser construídas com uma acústica/ arquitetura específica que permita a absorção sonora em todas as direções – evitando deste modo as reflexões sonoras.

- Quando se pretende testar equipamentos de som (altifalantes, microfones, p.e.) ou mesmo efetuar exames auditivos, a importância da acústica torna-se ainda mais imprescindível. Este tipo de testes é feito em câmaras anecoicas que impedem o eco assim como a reverberação, em que as paredes permitem uma absorção total do som (Braga, 2016).

### 3.1.3. Capacidade de localização sonora - estereofonia

O facto do ser humano ter dois ouvidos permite localizar a fonte sonora bem como avaliar a distância a que se encontra da mesma, desde que a audição do ouvinte seja simétrica<sup>6</sup>. Isto é possível através da diferença de tempos em que o som vindo da oblíqua atinge os dois ouvidos (Figura 17). Obviamente, o ouvido que está mais próximo da fonte sonora A, neste caso o ouvido direito, irá receber o som primeiro (numa distância,  $d_2$ ) do que o ouvido contralateral (à distância  $d_1$ ). Além disso, a intensidade sonora que chega a cada ouvido é diferente: o som que demora a distância  $d_2$  apresenta maior intensidade relativamente ao som que chega ao ouvido esquerdo, uma vez que percorre uma distância menor até chegar ao ouvido. Esta capacidade de estereofonia permite ao ser humano a capacidade de profundidade (Braga, 2016).

---

<sup>6</sup> Audição simétrica significa que o nível de audição é semelhante em ambos os ouvidos.

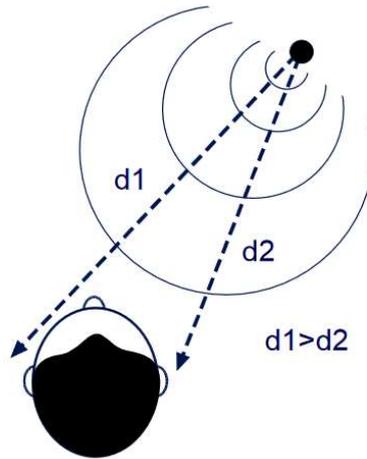


Figura 17 - Estereofonia do sistema auditivo humano. Imagem acedida em: [https://www.academia.edu/4393057/Ediçao\\_Digital\\_de\\_Som](https://www.academia.edu/4393057/Ediçao_Digital_de_Som)

O princípio de estereofonia está na base do amplificador estéreo. Além de possuir mais um altifalante, em relação ao amplificador mono<sup>7</sup>, apresenta ainda circuitos internos ou canais separados. Além disso, é necessário ter em atenção que as características do sinal sonoro também fazem diferença – quando se utiliza um amplificador estéreo, o sinal sonoro deve ser estéreo igualmente (Braga, 2016).

#### 3.1.4. Frequência de um som

Antes de definir o conceito de frequência de um som é necessário ter em atenção a definição de ciclo bem como de período, uma vez que se relacionam mutuamente.

O **ciclo** de uma onda sonora é representado por uma função sinusoidal que descreve a variação de pressão de uma partícula desde o ponto estacionário e sempre que ocorre uma perturbação. O número de ciclos por segundo existentes define a **frequência** da onda. Ao longo da vibração destacam-se 3 fases principais da partícula: o ponto máximo de pressão, ao qual corresponde a compressão máxima; o estado normal e o ponto mínimo de pressão, responsável pela rarefação (Figura 14).

Existem alguns tipos de som que importam ressaltar (Tabela II).

---

<sup>7</sup> O amplificador mono é constituído apenas um altifalante e por um único circuito.

Tabela II - Diferentes tipos de som (Martins, 1988).

Tipo de som	Definição
<b>Tom puro ou simples</b>	Apenas um só comprimento de onda, portanto é uma onda harmónica com uma frequência bem definida, denominada frequência fundamental. É representado por uma única senoide periódica.
<b>Som complexo</b>	Na maioria dos casos os sons não são puros, apresentando mais do que um comprimento de onda. Neste caso, temos o som complexo, resultam da combinação de sons puros, tendo assim mais do que um comprimento de onda. A frequência menor do som complexo será a sua frequência fundamental, as restantes frequências múltiplas da fundamental serão os harmónicos. É representado pela combinação de várias sinusoides (Figura 18).
<b>Ruído</b>	O som complexo pode ainda ser constituído por parciais harmónicos e não harmónicos, quando o som é sem interesse ou desagradável para o auditor define-se como ruído. É caracterizado como um som constituído por várias frequências combinadas.

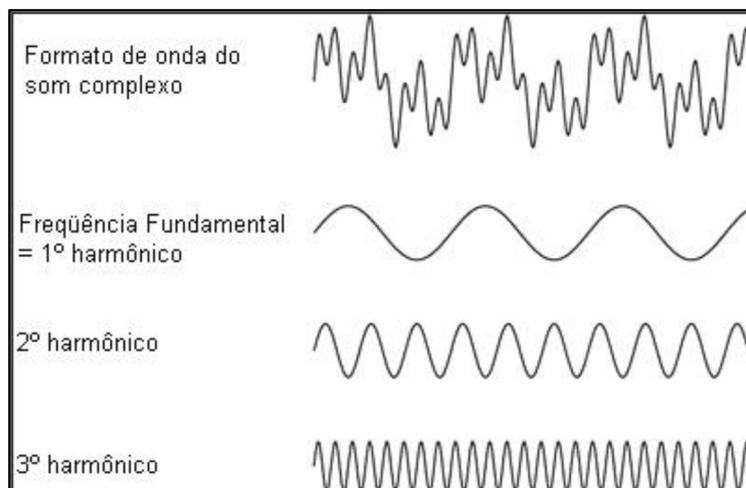


Figura 18 - Constituição de um som complexo. Imagem acedida em: [https://www.ib.usp.br/~fvrodrigues/files/FVR\\_Rev\\_Bio.pdf](https://www.ib.usp.br/~fvrodrigues/files/FVR_Rev_Bio.pdf)

Existem diferentes tipos de ruído; no entanto, importa ressaltar os mais importantes:

- **Ruído branco:** Também conhecido por ruído de Johnson. Apresenta um espectro de frequências contínuo e uniforme numa determinada faixa de frequências, ou seja, tem a mesma potência em qualquer ponto dessa faixa (Figura 19). Em termos físicos, um ruído branco tem uma função de autocorrelação igual a zero em qualquer ponto do seu espectro, exceto em zero. Este tipo de ruído pode ser gerado por equipamentos eletrônicos ou induzido por fenómenos naturais. Por exemplo, a agitação térmica num material condutor ou semiconductor liberta portadores de carga de forma aleatória, emitindo ruído branco (Braga, 2016).

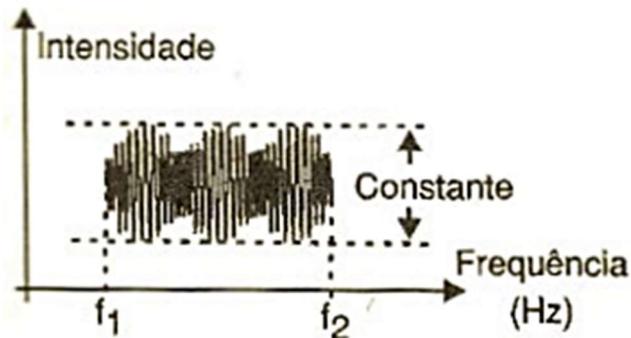


Figura 19 - Espectro de um ruído branco numa faixa de frequências entre  $f_1$  e  $f_2$  (Braga, 2016).

- **Ruído rosa:** O espectro de frequência é ligeiramente diferente do anterior. A intensidade média vai diminuindo à medida que a frequência aumenta (Figura 20) (Braga, 2016).

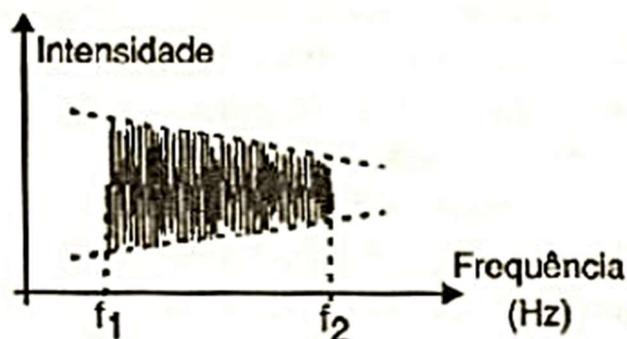


Figura 20 - Espectro de um ruído rosa numa faixa de frequências entre  $f_1$  e  $f_2$  (Braga, 2016).

No entanto, nem todas estas perturbações ou vibrações pertencem ao espectro audível do ser humano (Martins, 1988). O ouvido humano apenas consegue ouvir uma faixa de frequências específicas: aproximadamente entre os 20 Hz e os 20 kHz (Nussenzweig, 2018). Todos os sons abaixo dos 20 Hz são denominados de infrassons e todos os sons acima do 20 kHz, por ultrassons (Figura 21 e 22). O comprimento de onda é inversamente proporcional ao aumento da frequência (Edelman, 2003).

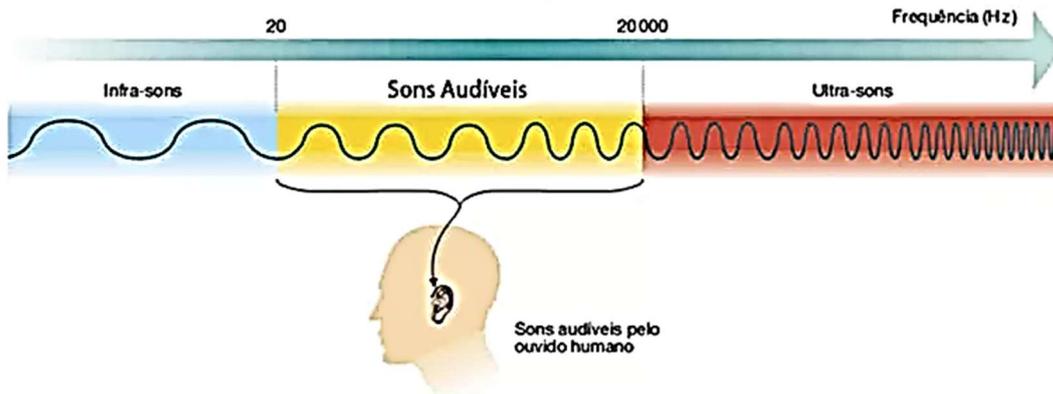


Figura 21- Espectro sonoro. Imagem acedida em: <https://www.coresafety.com.br/single-post/2016/09/08/FUNDAMENTOS-B%C3%81SICOS-DE-RU%C3%8DDO-%E2%80%93-Defini%C3%A7%C3%A3o-de-Som>

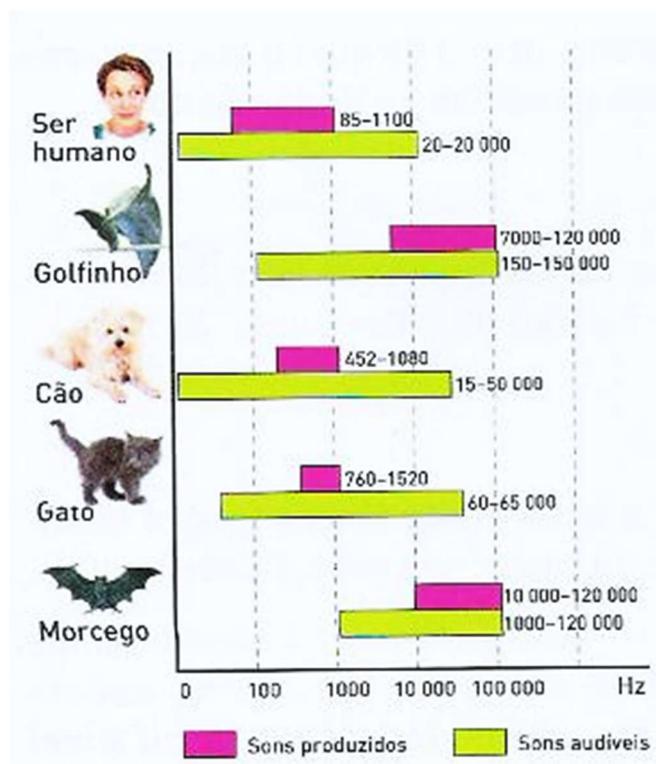


Figura 22 - Espectro sonoro audível característico dos diferentes seres vivos. Imagem acedida em: <http://carlamcoelho.blogspot.com/2016/08/o-que-e-o-som.html>

### 3.1.5. Equação de onda sonora

A função de uma onda harmónica unidirecional que se propaga para a direita é definida como:

$$y = A \sin \left[ \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) (x - vt) \right] = A \sin (kx - \omega t)$$

Em que:

- $A$  representa a amplitude;
- $\lambda$ , o comprimento de onda;
- $x$ , o ponto de deslocamento da onda;
- $v$ , a velocidade da onda harmónica;
- $t$ , o tempo;
- $k$ , o número de onda, sendo  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;
- $\omega$ , a frequência angular, sendo  $\omega = k v = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \lambda f = 2\pi f = \frac{2\pi}{\tau}$

A onda sonora é uma função que pode ser traduzida por uma equação de onda linear, que depende do espaço, mas também do tempo. Todas as funções de onda  $(x, t)$  são soluções da equação de onda linear. Este tipo de equação descreve de forma completa o movimento ondulatório e é expresso pela seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Em que:

- $y$  e  $x$  representam grandezas espaciais;
- $v$ , a velocidade do movimento ondulatório;
- $t$ , o tempo.

Esta expressão matemática é fácil de visualizar numa corda, cuja extremidade está presa à parede e a extremidade contrária está em movimento oscilatório. Neste caso,  $y$  representa o deslocamento vertical. Transpondo esta analogia para a onda sonora,  $y$  representa as variações de pressão ou de densidade do gás (Serway & Jewett, 2011).

Pode-se visualizar o comportamento de uma onda sonora usando um tubo cilíndrico (Figura 23), a onda sonora harmónica progressiva apresenta zonas de maior ou menor pressão e é descrita pela seguinte equação:

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \alpha),$$

Em que:

- $y(x, t)$ , representa o deslocamento das partículas na secção transversal de coordenada  $x$  no instante  $t$ ;
- $\alpha$ , a fase inicial.



Figura 23 - Propagação da onda sonora estacionária num tubo de *kundt* através do cerrim muito fino. Imagem acedida em: <http://www2.oberlin.edu/physics/catalog/demonstrations/waves/kundtstube.html>

### 3.1.6. Componente tridimensional da onda sonora

Além da componente longitudinal, a propagação do som produz ondas esféricas com centro na fonte sonora, pois a velocidade de propagação da fase é igual em todas as direções, desde que o meio seja o ar (meio isotrópico) e não haja qualquer tipo de obstáculos à volta (Nussenzveig, 2018).

A gota que cai na água produz uma onda periódica que se espalha radialmente para fora. Este fenómeno é semelhante ao comportamento da onda sonora que se propaga em três dimensões; no entanto, torna-se mais fácil de visualizar o caso da gota comparativamente à propagação da onda sonora que não é visível ao olho humano. A crista<sup>8</sup> da onda e as cavidades formam círculos concêntricos, em que o comprimento de onda ( $\lambda$ ) é a distância radial entre as cristas adjacentes ou vales<sup>9</sup> adjacentes (Figura 24) (Freedman, Sandim & Ford, 2008).

Além da propagação longitudinal, ocorre também a propagação transversal. Neste caso, a amplitude da onda é maior quanto mais próxima estiver da fonte, ou seja, onde a gota cai ou no caso do som, junto da fonte sonora. A amplitude vai diminuindo à medida que se afasta da fonte emissora da perturbação (Freedman, Sandim & Ford, 2008).



Figura 24 - Analogia da gota que cai na água com a componente tridimensional da onda sonora (Freedman, Sandin & Ford, 2008).

Para uma onda harmónica progressiva, o fator de propagação da fase com origem na fonte sonora tem a seguinte forma (Nussenzveig, 2018):

$$\psi (r, t) = \frac{s_0}{r} \cos (kr - \omega t + \alpha) ,$$

<sup>8</sup> As cristas representam os pontos de máxima amplitude da onda (acima do ponto de equilíbrio).

<sup>9</sup> Os vales representam os pontos de amplitude mínima (abaixo do ponto de equilíbrio).

Em que:

- $S_0$  corresponde à amplitude inicial;
- $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , representa a distância à fonte sonora;

Deste modo, pode-se concluir que a amplitude e o raio são inversamente proporcionais (Serway & Jewett, 2011).

A área total de uma frente de onda de raio  $r$  é igual à área da esfera <sup>10</sup>. Deste modo, a área aumenta com o quadrado do raio. Tendo em consideração a definição da intensidade (fluxo médio por unidade de tempo e área):

$$I = \frac{\text{Potência (Watts)}}{\text{Área (m}^2\text{)}}$$

Por outras palavras, pode-se dizer que a intensidade diminui como  $\frac{1}{r^2}$  (Nussenzveig, 2018).

### 3.1.7. Intensidade sonora

A unidade SI de intensidade é o Bel, em homenagem a Alexander Graham Bell; no entanto, a mais utilizada é o decibel – que corresponde a 0,1Bel. Na prática, o termo intensidade é substituído por nível de intensidade sonora que é medido numa escala logarítmica, uma vez que se trata de uma medida bastante extensa. O nível de intensidade,  $\alpha$ , é definido por (Nussenzveig, 2018):

$$\alpha = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ dB (= decibéis)}$$

---

<sup>10</sup> Área da esfera =  $4\pi r^2$

Em que:

- $I$  representa a intensidade real;
- $I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$ , corresponde à intensidade de referência (Howard & Angus, 2017).

Segundo Weber e Fechner, a categorização logarítmica deve-se também ao facto de que a sensação produzida pelo estímulo auditivo é proporcional ao logaritmo de “excitação” das células. Por outras palavras, a escala logarítmica significa que quando 2 sons diferem em 1 bel, a intensidade de um é 10 vezes maior que a do outro. A intensidade é quantidade de energia média transferida numa secção, por unidade de tempo e área (Nussenzveig, 2018). Por outras palavras, pode-se dizer que depende da potência e da área transversal (Edelman, 2003).

Além disso, é proporcional ao quadrado da amplitude de pressão da onda sonora ( $\wp$ ).

$$I = \frac{1}{2} \frac{\wp^2}{\rho v}$$

Em que:

- $\wp$  representa a amplitude de pressão sonora;
- $\rho$ , a massa específica do meio.

O ouvido humano é bastante sensível e é capaz de detetar deslocamentos do tímpano na ordem dos  $0,1 \text{ \AA}^{11}$ . Por um lado, o limiar de audibilidade é a intensidade do som mais fraco que é audível, e, neste caso, depende da frequência (Nussenzveig, 2018).

Quando  $f = 1000\text{Hz}$   $\rightarrow I_0 \approx 10^{-12} \text{ W/m}^2$ , o que equivale a 0 dB  
(Serway & Jewett, 2011)

---

<sup>11</sup>  $\text{\AA}$  – Angstroms é uma unidade de comprimento, em que  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ .

Por outro lado, o limiar de sensação dolorosa é a intensidade do som máxima que o ouvido tolera. Qualquer intensidade que ultrapasse este limiar é considerado sensação de dor (Nussenzveig, 2018).

Quando  $f = 1000 \text{ Hz}$   $\rightarrow I_m \sim 1 \text{ W/m}^2$ , o que equivale a 120 dB

(Serway & Jewett, 2011)

### 3.1.8. Pressão sonora

Na onda sonora, a variação de pressão e de densidade são extremamente reduzidas comparativamente aos valores de equilíbrio destas grandezas. Este facto faz com que a onda produza uma perturbação pequena, traduzindo-se nas seguintes fórmulas:

$$P = p_0 + p \text{ (equação de pressão)}$$

$$\rho = \rho_0 + \alpha \text{ (equação de densidade)}$$

Em que:

- $P$  representa a pressão do meio, resultante da perturbação;
- $p_0$ , a pressão de referência, em condições de pressão e temperatura normais (PTN);
- $p$ , a pressão inicial;
- $\rho$ , a massa específica do meio, resultante da perturbação;
- $\rho_0$ , a massa específica de referência, em condições PTN;
- $\alpha$ , a fase inicial.

Na prática verifica-se que:  $|p| \ll p_0$  e  $|\delta| \ll \rho_0$

Isto significa que para não provocar sensação dolorosa, a pressão máxima que o ouvido tolera é inferior a um milésimo da pressão atmosférica:  $\left| \frac{p}{p_0} \right| < 10^{-3}$  (Nussenzveig, 2018).

O nível de pressão sonora, mais conhecido por SPL, corresponde à pressão exercida pela vibração sonora, num determinado ponto. A escala em decibéis determina os diferentes níveis sonoros e compara-os com a pressão de referência,  $p_0$ , que corresponde ao limiar de audibilidade.

$$SPL = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2$$

Em que:

- $p$ , a pressão do meio, resultante da perturbação;
- $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Nm}^{-2} = 20 \mu\text{Pa}$ .

A pressão sonora varia entre  $20 \mu\text{Pa}$  (limiar mínimo audível – 0dB SPL) e  $20 \text{ Pa}$  (limiar de dor – 120dB SPL) para a frequência de 1kHz (Howard & Angus, 2017).

### 3.1.9. Som aplicado à audição do ser humano

O ouvido humano não é sensível de forma igual a sons com o mesmo nível de pressão sonora, em todas frequências de igual forma. Esta sensação auditiva subjetiva de um som por um indivíduo é chamado de sonoridade (*loudness*) – Isto deve-se ao facto do pavilhão auricular e do canal auditivo externo proporcionar uma resposta no sistema auditivo consoante a frequência. De modo a representar a resposta típica do sistema auditivo humano em cada frequência, foi criada a escala de fones, mais tarde designada por Diagrama de Fletcher (Figura 25). Este é constituído por curvas isofónicas que pretendem relacionar um determinado som expresso em dB SPL com a sua respetiva sonoridade. Isofónicas, no sentido em que todos os pontos da mesma curva induzem a mesma sensação de intensidade.

Na faixa de frequências audíveis, 20Hz a 20 000Hz, as frequências mais sensíveis para os seres humanos situam-se entre os 1 e 4kHz. Na gama de frequências acima e abaixo deste intervalo, o ouvido torna-se menos sensível. A frequência de 1kHz é a única em que a escala de fones corresponde à escala em dB (Howard & Angus, 2017).

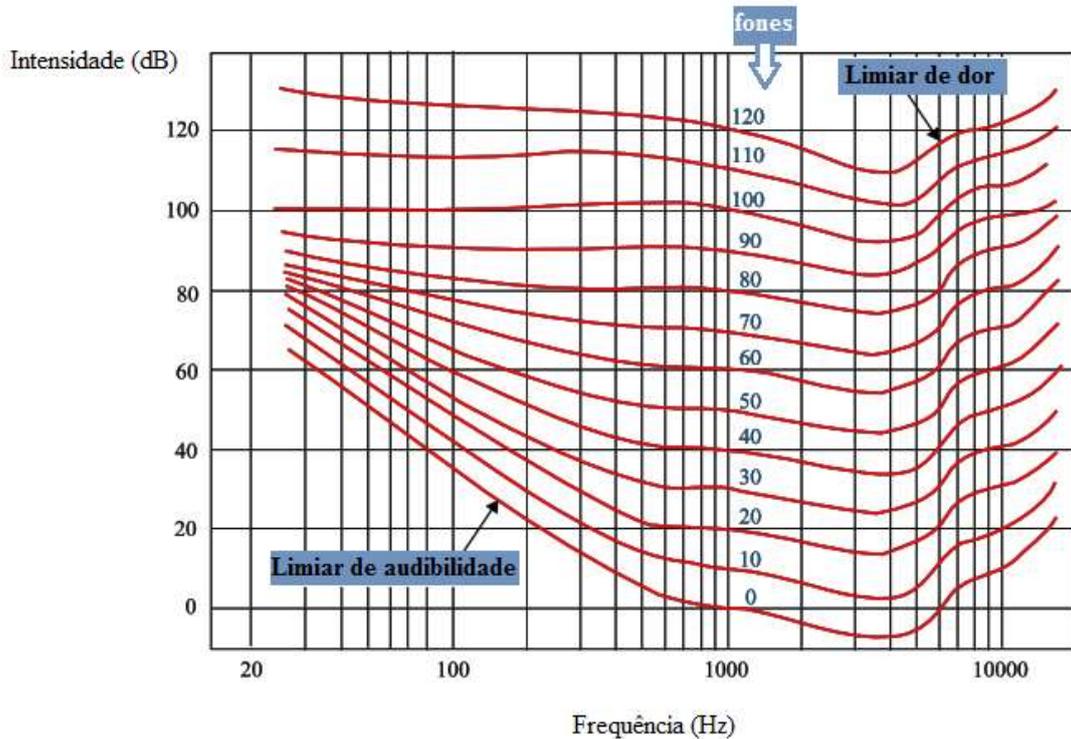


Figura 25 - Diagrama de fones ou de Fletcher. Imagem acedida em: [http://www.img.lx.it.pt/~fp/cav/ano2011\\_2012/Trabalhos\\_MERC\\_2012/Artigo10/MP3vsAAC\\_G10\\_JLucas\\_70685/modelo.html](http://www.img.lx.it.pt/~fp/cav/ano2011_2012/Trabalhos_MERC_2012/Artigo10/MP3vsAAC_G10_JLucas_70685/modelo.html)

Fazendo uma analogia com o capítulo anterior, a figura seguinte permite resumir os conceitos abordados anteriormente e relacioná-los com noções de Audiologia. A audiometria de tons puros é utilizada para testar o limiar auditivo nas diferentes frequências. É testado um leque de frequências que abrangem a audição humana e que são espaçadas em oitavas: 128Hz, 256Hz, 512Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz e 8kHz. A intensidade geralmente começa 10 dB abaixo do limiar médio da audição e pode ir até 120 dB acima dele. Atendendo ao facto de que o ser humano não tem a mesma a sensação de intensidade sonora para todas as frequências, tal como se verificou anteriormente, o audiómetro clínico é configurado para facilitar o diagnóstico. Este recorre a um ajuste na escala de dB, utilizando uma escala dB HL (*hearing level*), que define o nível de audição acima do limiar de referência, 0 dB HL (Figura 26) (Howard & Angus, 2017).

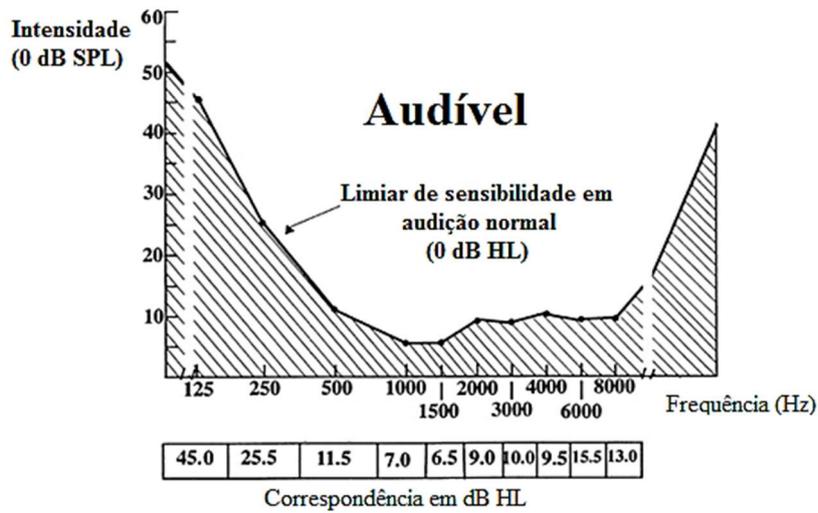


Figura 26 - Relação entre dB SPL e dB HL nas diferentes frequências. Imagem acedida em: <https://entokey.com/psychoacoustics/>

Na figura seguinte pode-se observar um audiograma com as várias classificações de perda de audição, consoante o nível mínimo de intensidade para o qual o paciente consegue ouvir, em dB HL (Figura 27). Estão também representados alguns exemplos de sons do dia-a-dia com a respetiva frequência e intensidade característica.

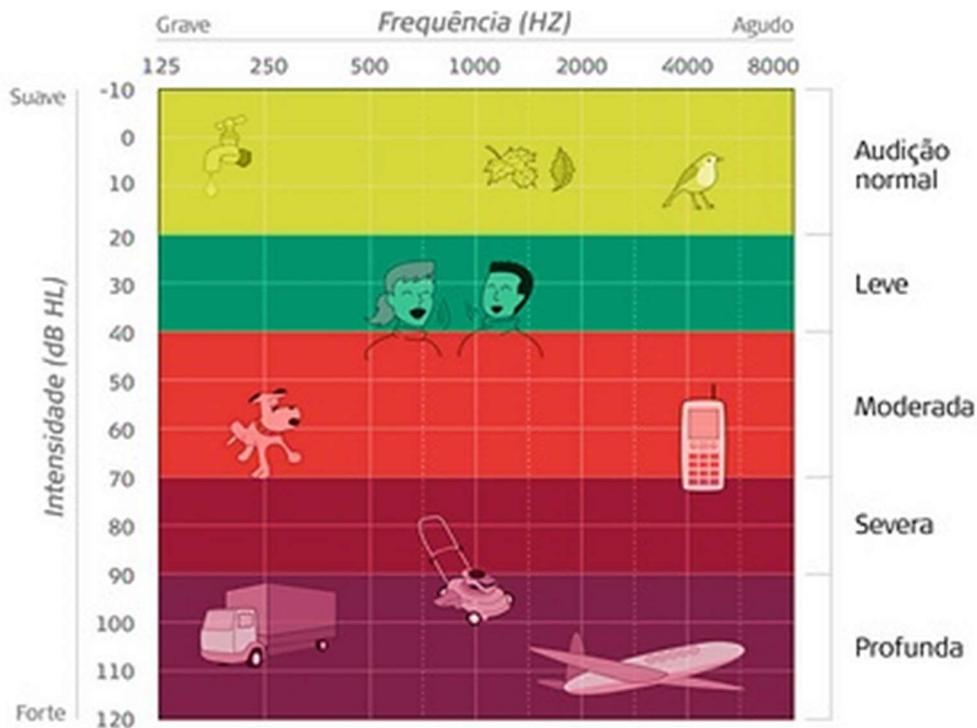


Figura 27 - Audiograma: gráfico que depende da frequência e intensidade. Diferentes tipos de perda auditiva bem como categorização de diferentes sons do dia-a-dia. Imagem acedida em: <https://www.medel.com/br/audiogram/>

### **3.2.Sinal elétrico em sinal sonoro**

Sendo o sinal acústico representado por uma onda sinusoidal com uma determinada frequência de oscilação pode-se utilizar um dispositivo eletrônico para reproduzir tal sinal. Portanto, para gerar a onda sonora é necessário um transdutor. Ele converte o sinal elétrico em som fazendo-o atravessar uma bobina enrolada em torno de um íman. A variação da intensidade de corrente elétrica do sinal que percorre a bobina gera um campo magnético cuja intensidade varia proporcionalmente à do sinal. Este campo magnético de intensidade variável faz o íman vibrar em consonância com essa variação, que por sua vez é análoga à da variação do sinal. O íman está preso ao vértice de um cone de material flexível que vibra com ele, transmitindo essa vibração ao ar e assim produzido um som.

#### **3.2.1. Transdutores**

Trata-se de um dispositivo que converte um tipo de energia num outro tipo distinto, não necessariamente energia elétrica (Correia & Carmo, 2013). O motor, por exemplo, converte energia elétrica em energia mecânica (Braga, 2016). Neste projeto irão ser abordados apenas os transdutores cuja forma de energia seja a energia acústica.

#### **Conversão de energia acústica em energia elétrica**

O **microfone** é um dos exemplos que permite a conversão de energia acústica (som) em energia elétrica. Posteriormente, os sinais elétricos produzidos, normalmente, são utilizados nos circuitos eletrônicos como amplificadores, gravadores, transmissores, entre outros elementos. Um microfone eficiente deve englobar algumas características, tais como se pode verificar na Tabela III (Braga, 2016).

Tabela III - Características essenciais de um microfone (Braga, 2016).

Característica	Definição
<b>Fidelidade</b>	Deve produzir um sinal elétrico com as mesmas características (forma da onda, frequência e intensidade) do som original.
<b>Sensibilidade</b>	Capacidade de captar sons muito fracos.
<b>Direccionalidade</b>	Capacidade de captar os sons vindos de determinadas direções. Os microfones unidireccionais captam o som apenas de uma direção (útil para apresentadores que pretendem que a sua voz seja audível). Já os microfones omnidireccionais captam o som proveniente de todas as direções (todo o ambiente sonoro envolvente é captado).

O princípio de funcionamento de microfone depende do tipo de microfone (Braga, 2016).

### **Conversão de energia elétrica em energia acústica**

Por outro lado, o **altifalante** e os **auscultadores**, são transdutores que permitem a conversão inversa relativamente ao microfone, ou seja, convertem energia elétrica em acústica. O altifalante mais utilizado é o de bobina móvel que é bastante eficiente (Figura 28) (Braga, 2016).

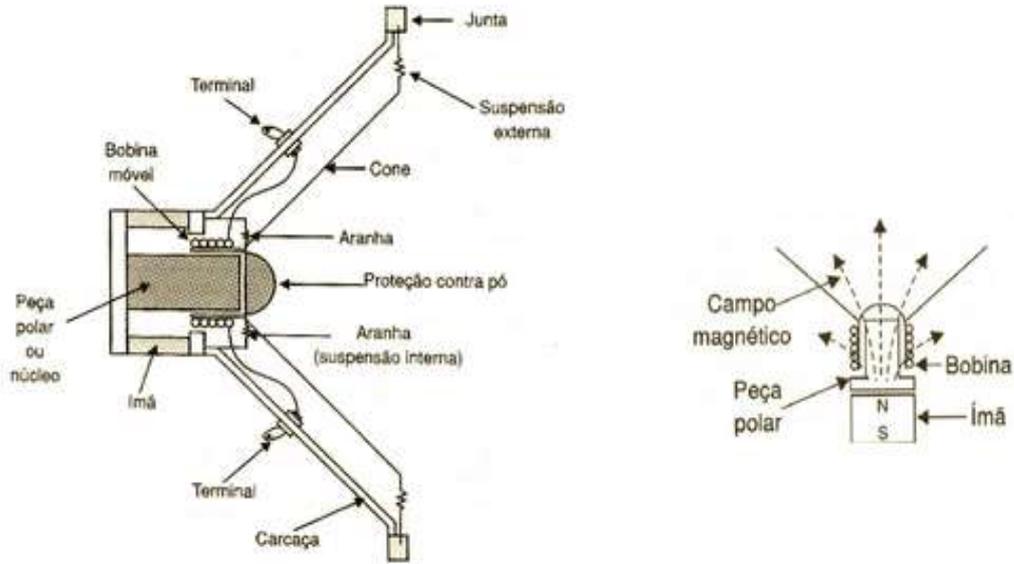


Figura 28 - Estrutura interna de um altifalante de bobina móvel (Braga, 2016).

Este tipo de equipamento possui uma bobina em fio de cobre que é enrolada num tubo unido ao cone do altifalante. O cone, por sua vez, possui um sistema de suspensão de forma a possibilitar o movimento para a frente e para trás. Além disso, o tipo de material do cone varia consoante a potência e a qualidade do altifalante. Em relação à bobina, esta encontra-se em torno de uma peça de metal (peça polar). Apesar da bobina se poder mover para a frente e para trás, não entra em contacto com a peça polar. Esta última está em contacto com um ímã forte permanentemente, o que produz um campo magnético. Sempre que a corrente que percorre a bobina tiver uma frequência e forma de onda igual ao som que supostamente devia ser reproduzido, é gerado um campo magnético com as mesmas características do som. Consequentemente, o campo magnético interage com o campo do ímã que se encontra acoplado à peça polar e formam forças proporcionais que induzem o movimento da bobina e, de seguida do cone. A vibração do cone pode ser mais intensa em determinadas zonas, consoante a elasticidade do próprio material, mas também dependendo da frequência do som (Figura 29). Os sons mais agudos são reproduzidos de forma mais acentuada na região central, já as frequências graves são emitidas de modo mais intenso na zona periférica do altifalante (Braga, 2016).

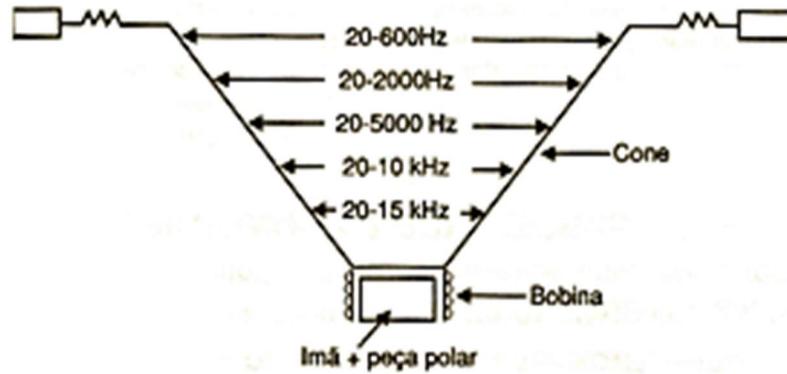


Figura 29 - Zonas de emissão sonora num altifalante (Braga, 2016).

O objetivo final do altifalante é provocar a vibração do cone (para a frente e para trás), reproduzindo um som com as mesmas particularidades do sinal inicial (com a mesma forma de onda). A vibração do cone provoca ondas de compressão (quando empurra o ar) e rarefação (quando puxa o ar), as quais constituem a onda sonora. Além da emissão de onda sonora pela parte do cone, também ocorre emissão sonora na retaguarda, razão pela qual existem orifícios nessa região.

Tal como para o microfone, o altifalante também deve englobar algumas características que o diferem, tais como as que se podem verificar na Tabela IV (Braga, 2016).

Tabela IV - Características essenciais de um altifalante (Braga, 2016).

Característica	Definição
<b>Impedância</b>	<p>O seu valor nominal corresponde ao ponto para qual a impedância é menor. Além disso, esse valor vai condicionar o número de altifalantes que deve ser utilizado no sistema de som.</p> <p>A impedância de saída do amplificador deve ser igual à do altifalante, de modo a que o amplificador “envie” o máximo de potência para o altifalante.</p> <p>É um conceito distinto de resistência e depende da frequência.</p>
<b>Potência</b>	<p>Quantidade de energia que o amplificador envia para o altifalante por segundo. A unidade é expressa em RMS (valor médio quadrático). Na prática, corresponde à potência média ao longo de um semiciclo do sinal.</p>
<b>Curva de resposta</b>	<p>Cada altifalante tem uma impedância específica, o que faz com que tenha respostas diferentes para determinada frequência e consequentemente rendimentos diferentes.</p>
<b>Dimensões e Peso</b>	<p>As dimensões e o peso do altifalante dependem da faixa de frequências que eles emitem. Os mais pequenos são conhecidos como <i>tweeters</i>, emitem frequências agudas; enquanto que os altifalantes de graves são grandes, pesados e são designados por <i>Woofers</i>. Já os que reproduzem frequências médias tem um tamanho intermédio e são chamados de <i>mid-ranges</i>. Existem ainda os altifalantes que emitem em toda a faixa de frequências conhecidos como <i>full range</i>.</p>

As caixas acústicas não são apenas caixas de proteção ou armazenamento do altifalante, mas sim dispositivos auxiliares, em que as suas características influenciam a reprodução sonora, nomeadamente as suas dimensões, o formato bem como o material utilizado. A caixa possui uma abertura que auxilia na emissão do som produzido aquando o cone do altifalante empurra o ar para o interior da caixa. A curva de resposta do altifalante representa as frequências que o altifalante emite e essa informação é fundamental na escolha da caixa acústica mais adequada.

Em suma, o nível de pressão sonora de um altifalante é calculado em função da intensidade do campo magnético do íman, do fator Q (fator de qualidade), da energia magnética produzida pela bobina móvel, do peso e ainda é influenciado pela massa do sistema (Braga, 2016).

### **3.3.Outros elementos eletrónicos**

Um circuito elétrico é um conjunto de elementos elétricos tais como, resistências, condensadores, bobinas, díodos, etc, que se encontram ligados entre si de forma a formarem um percurso fechado, no qual há uma intensidade de corrente elétrica em movimento, ou seja, há um fluxo de partículas eletricamente carregadas que se movimentam entre os componentes elétricos. Se o circuito apresenta uma corrente contínua (CC), a corrente flui numa única direção; de um potencial mais alto para um mais baixo, se a corrente for alternada (AC), existe fluxo de corrente nos dois sentidos alternadamente (Bishop, 2011).

#### **3.3.1. Sensores**

Um sensor tem a capacidade de converter grandezas não elétricas em grandezas elétricas. Grande parte dos sensores é composto por um transdutor e uma componente responsável por converter a energia resultante numa grandeza elétrica. A classificação de sensores mais comum é distingui-los em ativos e passivos.

Os **ativos** têm a capacidade de gerar a energia, como é o caso do sensor piezoelétrico, uma vez que gera uma tensão elétrica quando é deformado.

Em oposição, os **passivos** não têm a capacidade de produzir energia, ou seja, é necessária uma fonte de energia externa que possibilite a produção de sinal elétrico (Correia & Carmo, 2013).

### 3.3.1.1. Sensor Piezoelétrico

*Piezo* deriva do grego *piezen* que representa pressão. Quando é aplicada uma pressão a um cristal polarizado, a deformação elétrica que ocorre resulta numa carga elétrica. Um material piezoelétrico produz carga elétrica quando lhe é aplicada uma pressão mecânica e vice-versa, ou seja, quando é aplicado um campo elétrico a este tipo de material, há uma deformação mecânica (Mazzaroppi, 2007). As propriedades piezoelétricas estão interligadas com a estrutura cristalina, mas também química do material (Correia & Carmo, 2013)

Trata-se de um sensor de ultrassons, o que significa que as ondas acústicas apresentam frequências acima dos 20kHz (inaudível pelo ser humano). Este tipo de sensores gera ondas sonoras, em forma de cone, que ao intercepar o objeto são refletidas em direção ao sensor (Figura 30). Este efeito permite calcular a distância do sensor ao objeto bem como a velocidade de deslocamento. O formato do objeto influencia a quantidade de energia sonora refletida assim como existem outras variáveis que afetam a propagação e reflexão, nomeadamente o ângulo de superfície do alvo, a rugosidade da superfície reflexiva, as mudanças de temperatura ou mesmo da humidade (Mazzaroppi, 2007).

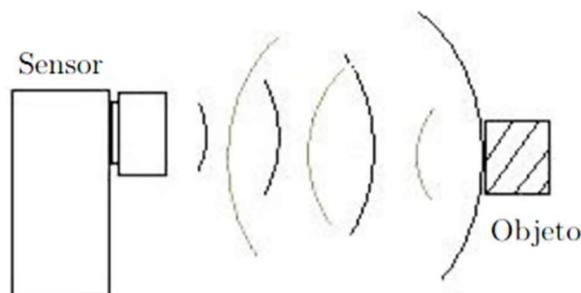


Figura 30- Efeito dos ultrassons (Mazzaroppi, 2007).

Sempre que é aplicada uma pressão a um material piezoelétrico, ocorrem alterações características e reversíveis. O funcionamento físico deste tipo de sensor implica mudanças na sua estrutura cristalina, consoante a fase de aplicação da força sobre o material (Figura 31):

#### **Antes da aplicação de uma força no material piezoelétrico**

O material está em repouso, isto porque os centros de gravidade das cargas positivas e negativas em cada molécula estão coincidentes. Esta situação traduz-se numa eliminação mútua do efeito das cargas positivas e negativas, ou seja, a molécula está eletricamente neutra.

#### **Durante a compressão - a força exercida provoca uma deformação mecânica**

Neste caso, a aplicação da força sobre o material provoca uma separação dos centros de gravidade das cargas positivas bem como negativas, que consequentemente despoleta o aparecimento de dipolos moleculares. Relativamente aos pólos internos das moléculas adjacentes, estes anulam-se mutuamente e as cargas distribuem-se ao longo da superfície do cristal. Por outras palavras, o material encontra-se polarizado e além disso é gerado um campo elétrico que produz corrente elétrica sempre que as extremidades do material se liguem a uma carga.

#### **Após a aplicação da força – ocorre recuperação do material**

Após terminar a aplicação da força, as cargas moleculares retornam às posições iniciais. Durante este intervalo de tempo há uma corrente com igual valor a fluir na carga, mas no sentido inverso. O par de elétrodos metálicos depositados nas polos externos do material servem de interface com o circuito elétrico externo (Correia & Carmo, 2013).

Por outras palavras, a quantidade de carga ( $Q$ ) que se acumula efetivamente na superfície depende da força aplicada ( $F$ ) bem como da constante piezoelétrica ( $K_p$ ) do material:

$$Q = F \cdot K_p$$

Além disso, os elétrodos e o material piezoelétrico formam um condensador de placas paralelas com uma determinada capacidade ( $C_p$ ) que depende da permissividade do material ( $\epsilon$ ), da área dos elétrodos ( $A$ ) assim como da distância entre as faces dos elétrodos ( $d$ ) (Correia & Carmo, 2013):

$$C_p = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

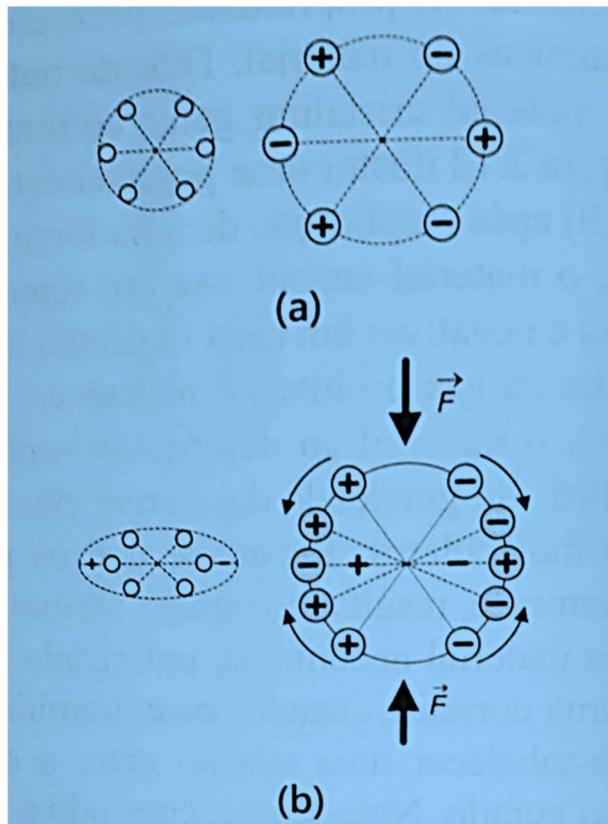


Figura 31 - Alterações que ocorrem num cristal piezoelétrico antes (a), no qual o cristal se encontra em equilíbrio, logo momento do dipolo eléctrico total é nulo e após (b) a aplicação de uma força, a qual provoca uma deformação, e o dipolo eléctrico não é nulo ( Correia & Carmo, 2013).

### 3.3.1.2. Sensor Capacitivo Passivo

Apresenta uma estrutura em forma de *sandwich*, graças à camada dielétrica juntamente com duas placas metálicas e ainda duas camadas exteriores isolantes. Neste tipo de sensores é comum fazer variar a distância entre as duas placas paralelas (Correia & Carmo, 2013).

### 3.3.2. Amplificador operacional

Os amplificadores operacionais, mais conhecidos como “amp op”, são precisos, apresentam alto ganho bem como *output* diferencial. Inicialmente, foram projetados para realizar operações matemáticas em computadores, apesar de atualmente esta função ser feita por microprocessadores digitais, este tipo de amplificadores ainda é bastante utilizado em muitas outras aplicações.

Um amplificador operacional pode ser construído a partir de transístores individuais e resistências; no entanto, a maior parte são fabricados como circuitos integrados. Existem vários tipos com diversas combinações de características, sendo que o mínimo de terminais é cinco (Figura 32) (Bishop, 2011).

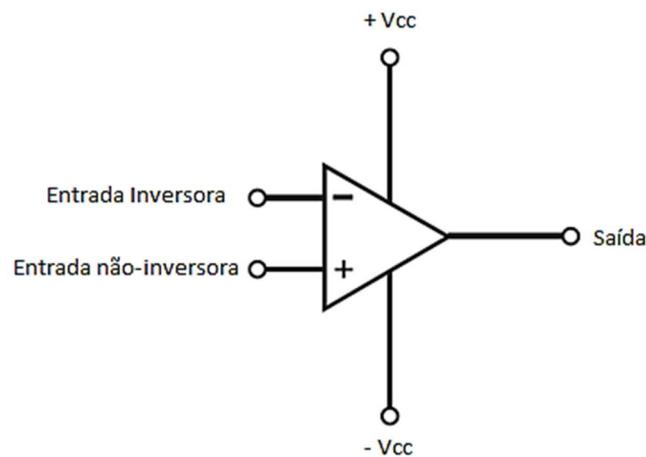


Figura 32 - “Amp op” com cinco terminais (Bishop, 2011).



## **Capítulo 4: Metodología**



## 4. Metodologia

O objetivo principal deste estudo, conforme mencionado no capítulo 1, é criar um dispositivo que permita reproduzir sons que auxiliem o paciente a abstrair-se do seu zumbido nos períodos de descanso. Este capítulo irá apresentar as várias metodologias para atingir o objetivo, incluindo o *hardware* e *software* usados.

### 4.1. Arquitetura do projeto

Para desenvolver o projeto foi necessário construir um modelo de ação (Figura 33).

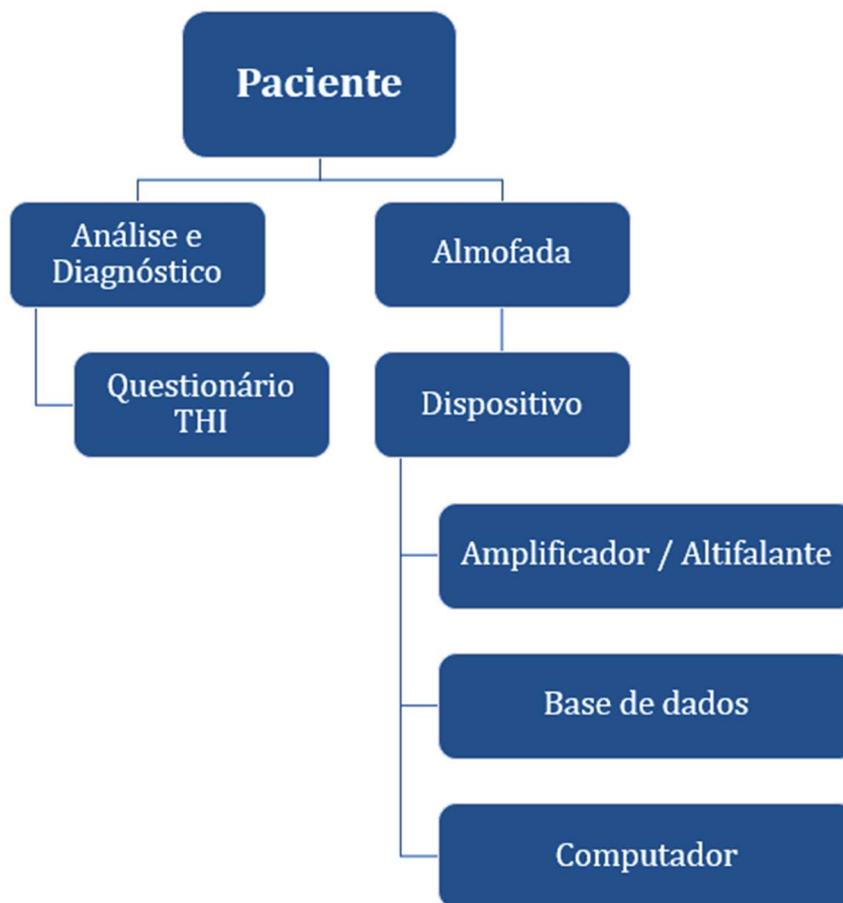


Figura 33 - Esquema do modelo de ação utilizado.

No protocolo desenvolvido neste projeto, sugere-se a aplicação do questionário THI (Anexo 2). Este questionário, tal como já foi abordado em capítulos anteriores, é destinado a pacientes com zumbido persistente associado ou não a perda auditiva.

O tratamento proposto ao paciente é baseado na análise das respostas ao questionário inicial e para isso foram criados alguns critérios:

1. Se apresentar respostas afirmativas ou duvidosas em determinadas atividades específicas, incluindo dificuldade em abstrair-se do zumbido durante os períodos de descanso/ sono;
2. Se apresentar resposta afirmativa ou duvidosa em questões relacionadas com atividades que decorrem durante o dia, sugere-se a utilização de uma das *app* reconhecidas internacionalmente destinadas esse a efeito e que são *open-source*, nomeadamente “ZEN Tinnitus”, criada pela Widex ou a “Relief”, desenvolvida pela ReSound GN.

Em ambas as situações recomenda-se a realização de atividades de relaxamento como o yoga, a acupuntura, a prática de exercício físico, de forma consciente e regular.

No primeiro caso, se o paciente for candidato ao uso da almofada, é recomendado a utilização essencialmente durante o período de sono, mas também em períodos de descanso ou repouso. Pode ser utilizado em qualquer altura do dia; no entanto, torna-se imprescindível em ambientes silenciosos.

É aconselhável que o paciente realize novamente o questionário THI numa fase posterior ao uso da almofada em causa, de modo a avaliar as potenciais alterações no quotidiano do paciente e monitorizar a efetividade do tratamento. Esta supervisão deve ser efetuada após 30 dias do início do uso do equipamento.

## 4.2.Arquitetura do *Hardware*

A arquitetura do *hardware* que foi utilizada neste projeto foi baseada num Arduino UNO. Para a elaboração dos circuitos desenvolvidos no presente projeto foram utilizados diversos componentes físicos e eletrônicos (Figura 34), nomeadamente:

- Arduino UNO
- Cartão SD
- Leitor de cartões SD para Arduino
- *Buzzer* passivo;
- Altifalante;
- Caixa acústica;
- Botões de pressão;
- Amplificador;
- Resistências;
- Condensadores;
- Pilha de 9V;
- Placa de ensaio (*breadboard*);
- Fios de ligação.

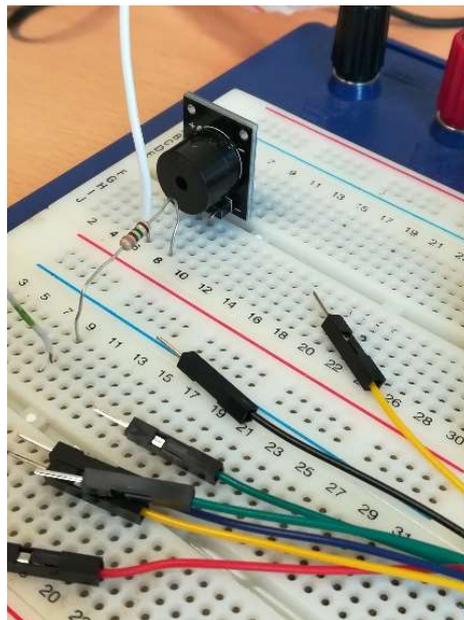


Figura 34 - Elementos do circuito elétrico, resistência, *buzzer* e fios elétricos com a sua placa de ensaio.

## ➤ ARDUINO UNO

O Arduino UNO é uma plataforma de código aberto utilizada para o desenvolvimento de circuitos eletrônicos. É uma placa que permite a criação de projetos de forma fácil e rápida (Figura 35) (McRoberts, 2015). Fisicamente, trata-se de uma placa de circuito (*hardware*) que pode ser programável (*software*) através da ligação ao computador por um cabo USB.

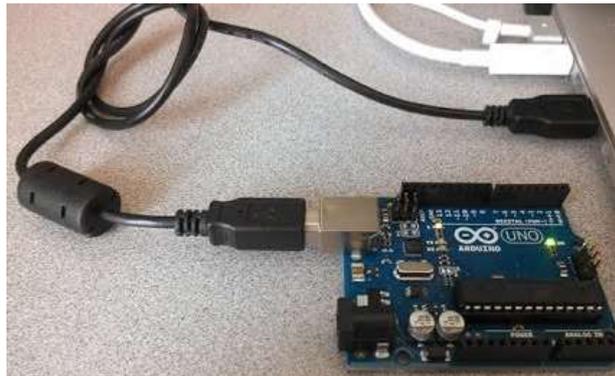


Figura 35 - Placa de Arduino UNO ligada ao computador.

A linguagem de programação mais comum é o Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), que recorre a uma versão simplificada de C++ (Figura 36)(Arduino, 2015).

```
AnalogReadSerial | Arduino 1.8.9
Ficheiro Editar Rascunho Ferramentas Ajuda
AnalogReadSerial $
/*
  AnalogReadSerial

  Este exemplo de código é de domínio público.

  */

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  // read the input on analog pin 0:
  int sensorValue = analogRead(A0);
  // print out the value you read:
  Serial.println(sensorValue);
  delay(1);        // delay in between reads for stability
}
```

Figura 36 - Exemplo de um código no Arduino IDE.

➤ **CARTÃO SD**

O cartão SD funciona como armazenamento da base de dados do projeto, no qual foram adicionadas várias faixas sonoras do tipo *wav*<sup>12</sup>. Procedeu-se ainda à modificação de algumas das suas características, alterando a sua amostragem, de forma a obter uma melhor qualidade sonora, nomeadamente através da:

- Conversão para 8 bits;
- Mudança para 16 kHz;
- Alteração para sistema Mono.

Este processo foi realizado através de um conversor online: <https://audio.online-convert.com>. Posteriormente, utilizou-se o programa *Audacity* para efetuar alguns ajustes no tempo das faixas sonoras, com o objetivo de uniformizar ao máximo as faixas a utilizar.

Houve também a preocupação em tentar abranger diversos tipos de sons que possam se adequar às preferências dos pacientes e, neste sentido, as faixas sonoras foram categorizadas em três grupos:

- Tons puros: 250Hz, 1kHz e 4kHz;
- Tons complexos: ruído rosa, ruído branco;
- Músicas *zen*<sup>13</sup>: pássaros na floresta, chuva na selva, som do mar com música eletrónica de fundo, música eletrónica, água do riacho a passar, grilos a cantar, mar agitado, orla da praia.

---

<sup>12</sup> Um ficheiro do tipo *wav* significa *Waveform Audio File Format*. Trata-se de um formato/padrão de arquivo de ficheiro áudio para armazenamento no computador e foi desenvolvido pela Microsoft e pela IBM.

<sup>13</sup> A música *zen* tem como objetivo promover o relaxamento.

### ➤ LEITOR DE CARTÕES SD PARA ARDUINO

O módulo SD (Figura 37) tem oito pinos, sendo quatro deles destinados à alimentação; dois GND, que permitem a ligação ao GND do Arduino e o VCC (5V e 3V) que geralmente é conectado ao pino 5V ou 3V do Arduino, respetivamente. Os outros quatro pinos são dedicados ao padrão de comunicação chamado SPI (*Serial Peripheral Interface*), nomeadamente: MISO, MOSI, SCK e CS. Para usar o leitor de cartões SD não é necessário entender a finalidade de cada um destes últimos quatro pinos, apenas é preciso saber a que pinos do Arduino devem ser ligados, e isso depende do modelo de Arduino em questão. Para o Arduino UNO utilizado foram estabelecidas as conexões presentes na Tabela V.

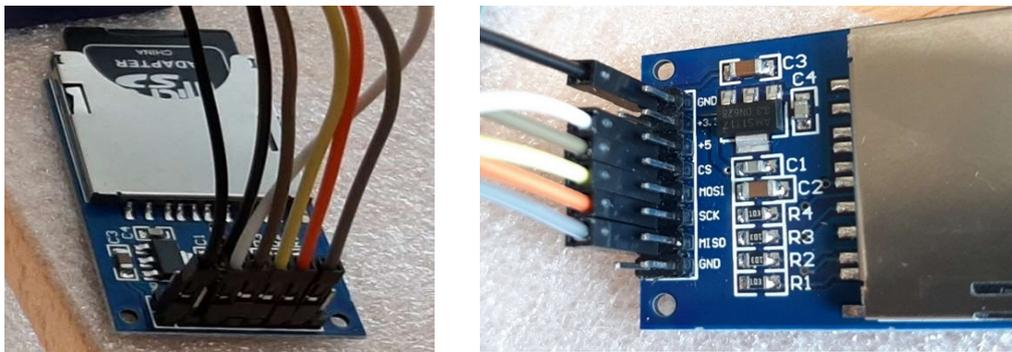


Figura 37 – Leitor de cartões SD para Arduino UNO.

Tabela V - Ligação entre o leitor de cartões SD e o Arduino.

Pinos do leitor de cartões SD	Pinos do Arduino
<b>MOSI</b>	Pino 11
<b>MISO</b>	Pino 12
<b>SCK</b>	Pino 13
<b>CS</b>	Pino 4

➤ **BUZZER PASSIVO**

O *buzzer* passivo é um transdutor que converte energia elétrica em energia mecânica, na qual há produção de ondas sonoras (pequeno altifalante). O *buzzer* utilizado no projeto encontra-se na figura 38. A ativação do *buzzer* dá-se através da placa microcontroladora que deverá estar programada para num determinado acontecimento oferecendo assim diferentes frequências ao *buzzer*. A tensão de trabalho situa-se entre os 3V e os 5V, com uma intensidade de corrente inferior a 25mA. A diferença entre o *buzzer* passivo e o ativo é que este último é um elemento mais complexo, mas de uso mais simples, visto ter um circuito oscilador incorporado que produz o som, necessitando apenas de energia.



Figura 38 - *Buzzer* passivo utilizado.

➤ **ALTIFALANTE**

O princípio de funcionamento do altifalante já foi referido no capítulo 3 e o altifalante utilizado no projeto encontra-se figura 39.



Figura 39 - Altifalante utilizado.

➤ **CAIXA ACÚSTICA**

Foi colocado um pequeno rolo de cartão em torno do altifalante, gerando assim uma caixa acústica, de maneira a criar, por sua vez, uma caixa de ressonância (Figura 40).



Figura 40 - Caixa acústica desenvolvida.

➤ **BOTÕES DE PRESSÃO**

O botão de pressão tem como objetivo ativar ou desativar alguma função previamente programada, após pressionar o interruptor. Foram utilizados os dois botões de pressão presentes na figura 41.



Figura 41 - Botões de pressão que foram usados.

➤ **RESISTÊNCIA**

A resistência é um elemento passivo que se opõe à passagem de corrente elétrica, permitindo assim controlar a intensidade de corrente no circuito (Figura 42). O valor da resistência depende da forma geométrica e da resistividade do material (ver Anexo 4). Este elemento tem um comportamento ohmíco, a curva característica tensão em função

da intensidade de corrente é linear. A constante de proporcionalidade é o valor da resistência, isto é, obedece à lei de Ohm ( $V = R I$ ), onde  $V$  é a tensão aplicada aos seus terminais,  $I$ , o valor da intensidade de corrente e  $R$ , o valor da resistência. A unidade no SI é o Ohm<sup>14</sup> ( $\Omega$ ) (Bishop, 2011).



Figura 42 - Resistências utilizadas.

#### ➤ CONDENSADORES

O condensador é um componente eletrônico que armazena cargas elétricas num campo elétrico. Foram utilizados quatro condensadores neste projeto, encontra-se na figura 43 um dos exemplares.



Figura 43 - Tipo de condensador utilizado.

---

<sup>14</sup> Significa que  $1\Omega$  é a resistência de um condutor que ao ser percorrido por uma corrente de 1 ampere (A), dissipa a potência de 1 watt (W), por efeito de Joule:  $1\Omega = 1W/1A$

➤ **PILHA**

A pilha é um dispositivo que transforma em corrente elétrica a energia desenvolvida numa reação química. Tem dois eletrodos que são constituídos geralmente por metais diferentes, que fornecem à superfície na qual ocorrem as reações de oxidação e redução.

### 4.3.Arquitetura do *Software*

A nível de *software*, foi essencial a instalação no Arduino IDE de uma biblioteca específica que permite a conexão ao Arduino ao computador, conhecida por “SD.h” (Figura 44).

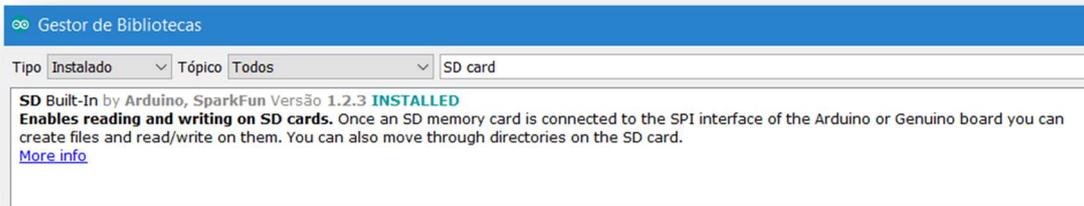


Figura 44 - Biblioteca do Arduino para leitor de cartões SD.

Foram também utilizadas outras bibliotecas de modo a executar corretamente o código, nomeadamente: “SPI.h”, “TRMpcm.h” (que incorpora “pcmRF.h”) (Figura 45).

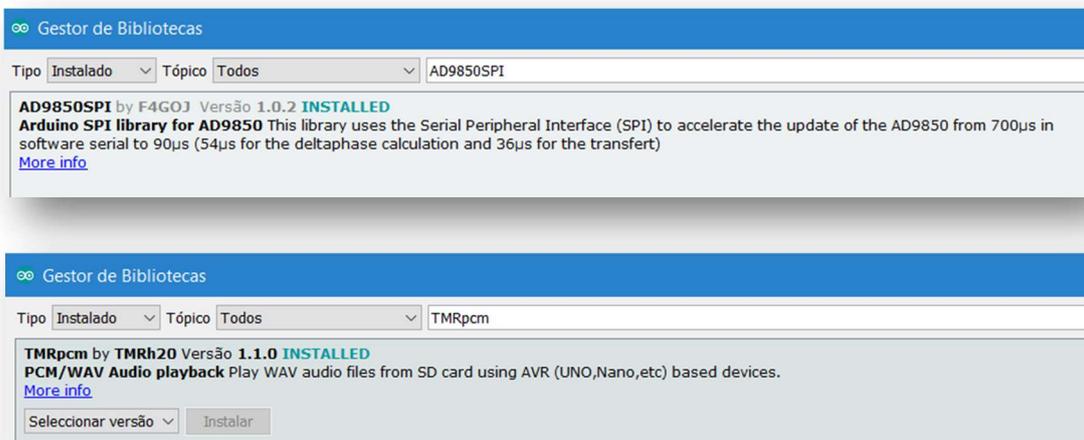


Figura 45 - Outras bibliotecas instaladas no Arduino.



## **Capítulo 5: Resultados**



## 5. Resultados

### 5.1. Circuitos elétricos elaborados

Quando se fala de circuitos elétricos, a Física e a Eletrônica são as principais ciências da Engenharia envolvidas. No entanto, numa fase posterior também envolve a Informática em questões de programação do próprio circuito. Nesta linha de raciocínio, irão ser descritos todos os circuitos elaborados neste projeto até à criação do dispositivo final.

#### 5.1.1. CIRCUITO 1

Numa primeira fase foi construído um circuito eletrônico básico numa placa de ensaio composto por um *buzzer* para arduino, fios condutores e o Arduino UNO (Figura 46). O circuito era alimentado através da ligação do Arduino à USB do computador.

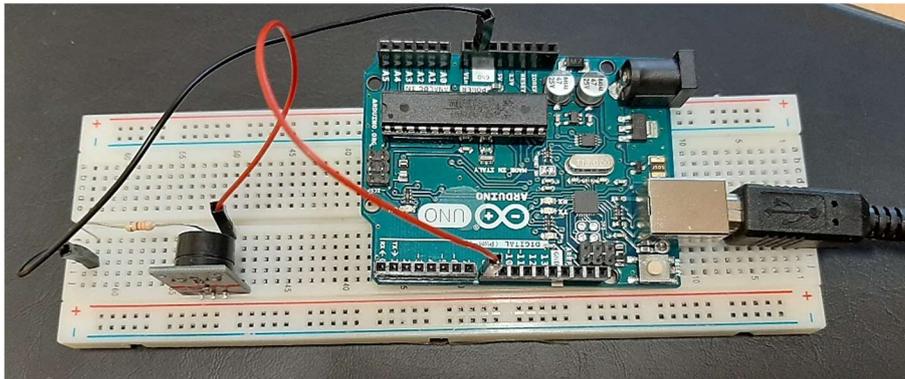
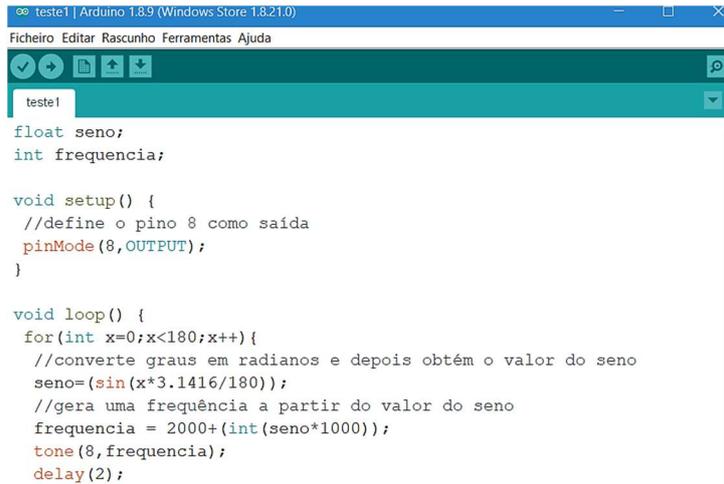


Figura 46 - Circuito 1 composto por placa de ensaio, placa de Arduino Uno, *buzzer*, resistência e fios condutores.

O objetivo era emitir um conjunto de sons previamente programados. A primeira experiência permitiu a produção de um som complexo. Na figura 47 encontra-se um excerto do código utilizado. Posteriormente, produziu-se uma sequência de notas musicais, através da alteração do código no Arduino IDE (figura 48).

## Desenvolvimento de um Sistema de Apoio a Pacientes com Zumbido

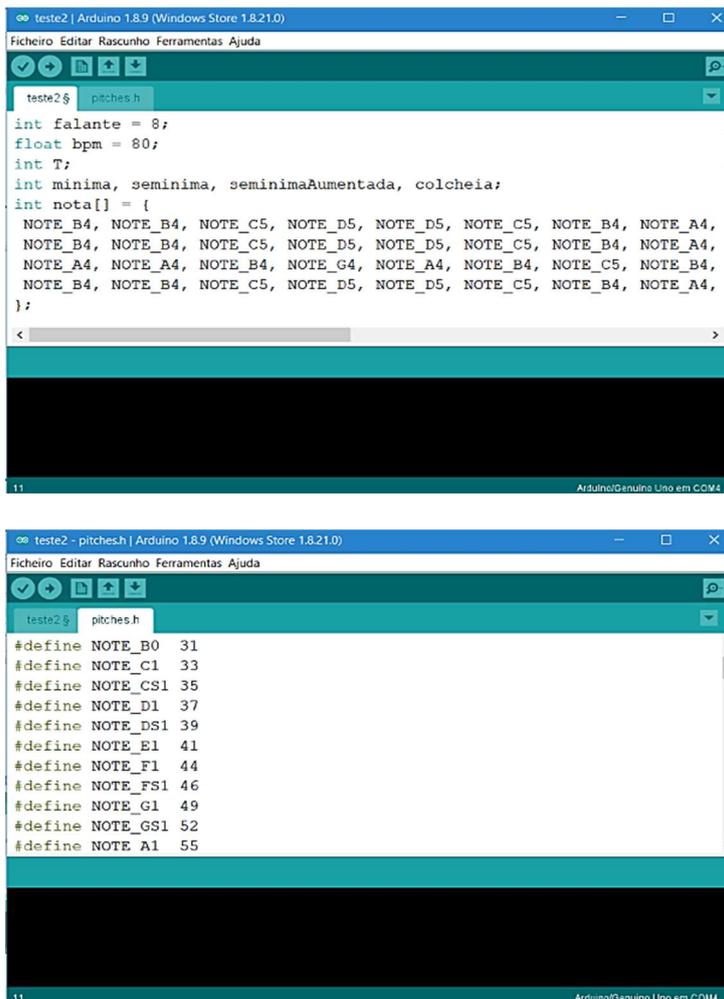


```
teste1 | Arduino 1.8.9 (Windows Store 1.8.21.0)
Ficheiro Editar Rascunho Ferramentas Ajuda
teste1
float seno;
int frequencia;

void setup() {
  //define o pino 8 como saída
  pinMode(8,OUTPUT);
}

void loop() {
  for(int x=0;x<180;x++){
    //converte graus em radianos e depois obtém o valor do seno
    seno=(sin(x*3.1416/180));
    //gera uma frequência a partir do valor do seno
    frequencia = 2000+(int(seno*1000));
    tone(8,frequencia);
    delay(2);
  }
}
```

Figura 47 – Excerto do código utilizado para emitir um som complexo (sirene).



```
teste2 | Arduino 1.8.9 (Windows Store 1.8.21.0)
Ficheiro Editar Rascunho Ferramentas Ajuda
teste2$ pitches.h
int falante = 8;
float bpm = 80;
int T;
int minima, seminima, seminimaAumentada, colcheia;
int nota[] = {
  NOTE_B4, NOTE_B4, NOTE_C5, NOTE_D5, NOTE_D5, NOTE_C5, NOTE_B4, NOTE_A4,
  NOTE_B4, NOTE_B4, NOTE_C5, NOTE_D5, NOTE_D5, NOTE_C5, NOTE_B4, NOTE_A4,
  NOTE_A4, NOTE_A4, NOTE_B4, NOTE_G4, NOTE_A4, NOTE_B4, NOTE_C5, NOTE_B4,
  NOTE_B4, NOTE_B4, NOTE_C5, NOTE_D5, NOTE_D5, NOTE_C5, NOTE_B4, NOTE_A4,
};

teste2 - pitches.h | Arduino 1.8.9 (Windows Store 1.8.21.0)
Ficheiro Editar Rascunho Ferramentas Ajuda
teste2$ pitches.h
#define NOTE_B0 31
#define NOTE_C1 33
#define NOTE_CS1 35
#define NOTE_D1 37
#define NOTE_DS1 39
#define NOTE_E1 41
#define NOTE_F1 44
#define NOTE_FS1 46
#define NOTE_G1 49
#define NOTE_GS1 52
#define NOTE_A1 55
```

Figura 48 - Excerto do código utilizado para emitir uma melodia ("Hino da Alegria").

O circuito 1 encontra-se representado na figura 49.

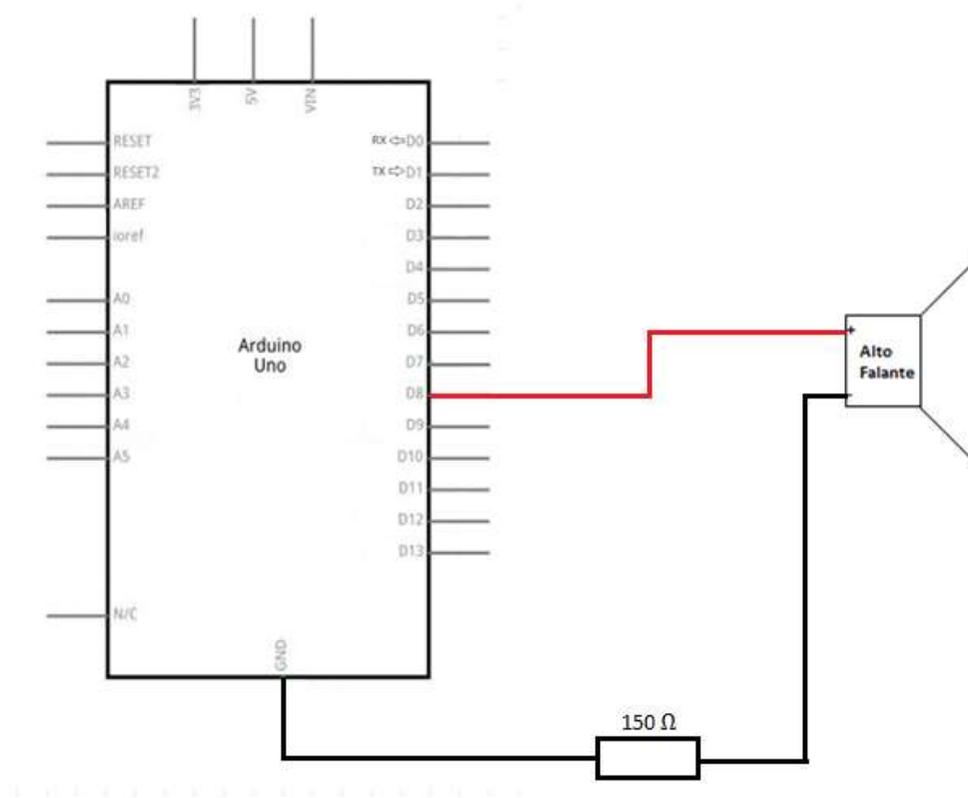


Figura 49 - Esquema do circuito elétrico 1.

### 5.1.2. CIRCUITO 2

Ficando o dispositivo confinado a um som só ou sequência de sons, teve-se a ideia de poder ter uma biblioteca de vários sons que fosse facilmente atualizável, partindo assim para o circuito 2.

Numa segunda etapa e partindo do circuito acima referido, foi melhorado o circuito com introdução de um leitor de cartão SD (Figura 50). O objetivo era possibilitar a leitura de faixas sonoras específicas e emití-las através do *buzzer*. Neste sentido, torna-se possível inserir faixas sonoras adaptadas que podem vir a atender o gosto de cada paciente, possibilitando assim que o cartão SD se torne personalizável.

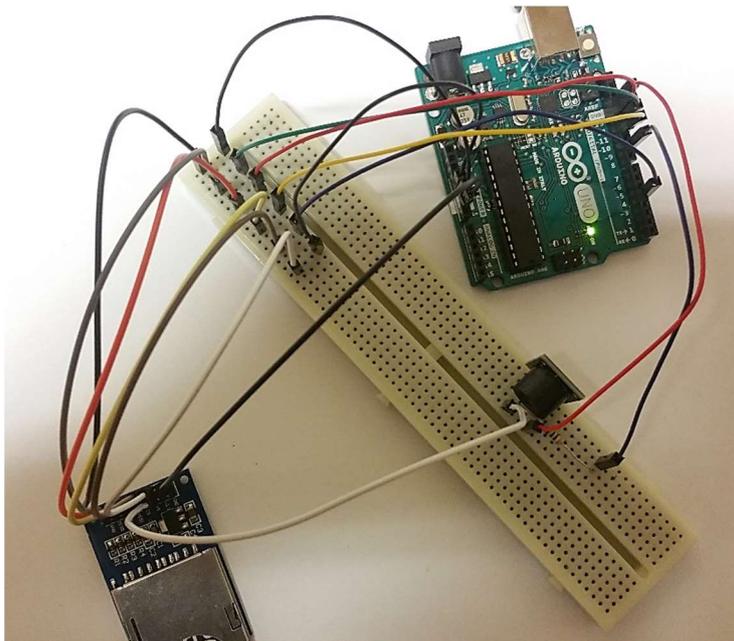


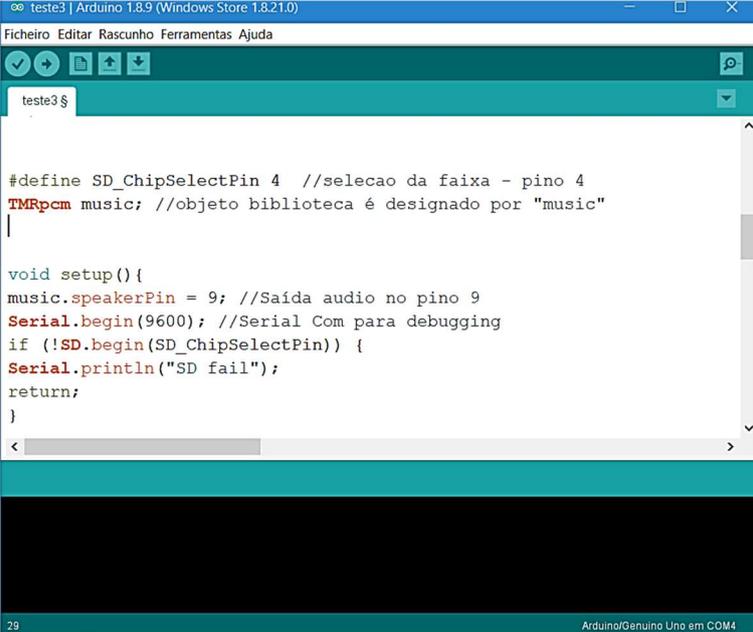
Figura 50 - Circuito 2 constituído por placa de ensaio, placa de Arduino Uno, *buzzer*, leitor de cartões SD, resistência e fios condutores.

As faixas musicais foram introduzidas no cartão SD, após sofrerem alterações na amostragem (referidas no capítulo anterior). Este facto permitiu aperfeiçoar a amostragem, melhorando assim a reprodução dos sons.

A nível de *software*, foi necessária a instalação no Arduino IDE de algumas bibliotecas, nomeadamente:

- “SD.h”;
- “SPI.h”;
- “TRMpcm.h” (que incorpora “pcmRF.h”).

Após a correta passagem do código para o Arduino, foi selecionado o monitor de série do *software* do Arduino e foi alterada a configuração para 9600 *baud*. O próprio monitor de série envia a informação se a ligação do Arduino com o leitor de cartões SD foi efetuada com sucesso (Figura 51). Caso afirmativo, podem ser enviados os comandos com a faixa musical que se pretende emitir e o sistema inicia. Para mudar de faixa, basta efetuar o mesmo procedimento, enviando comandos através do monitor de série.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE's serial monitor window. The window title is "teste3 | Arduino 1.8.9 (Windows Store 1.8.21.0)". The menu bar includes "Ficheiro", "Editar", "Rascunho", "Ferramentas", and "Ajuda". The toolbar has icons for check, back, forward, copy, paste, and search. The serial monitor shows the following code:

```
teste3 $  
#define SD_ChipSelectPin 4 //selecao da faixa - pino 4  
TRMpcm music; //objeto biblioteca é designado por "music"  
|  
  
void setup(){  
  music.speakerPin = 9; //Saída audio no pino 9  
  Serial.begin(9600); //Serial Com para debugging  
  if (!SD.begin(SD_ChipSelectPin)) {  
    Serial.println("SD fail");  
    return;  
  }  
}
```

The status bar at the bottom indicates "29" on the left and "Arduino/Genuino Uno em COM4" on the right.

Figura 51 - Comando que permite verificar se o leitor SD consegue ler o cartão.

O esquema do circuito respetivo encontra-se na figura 52.

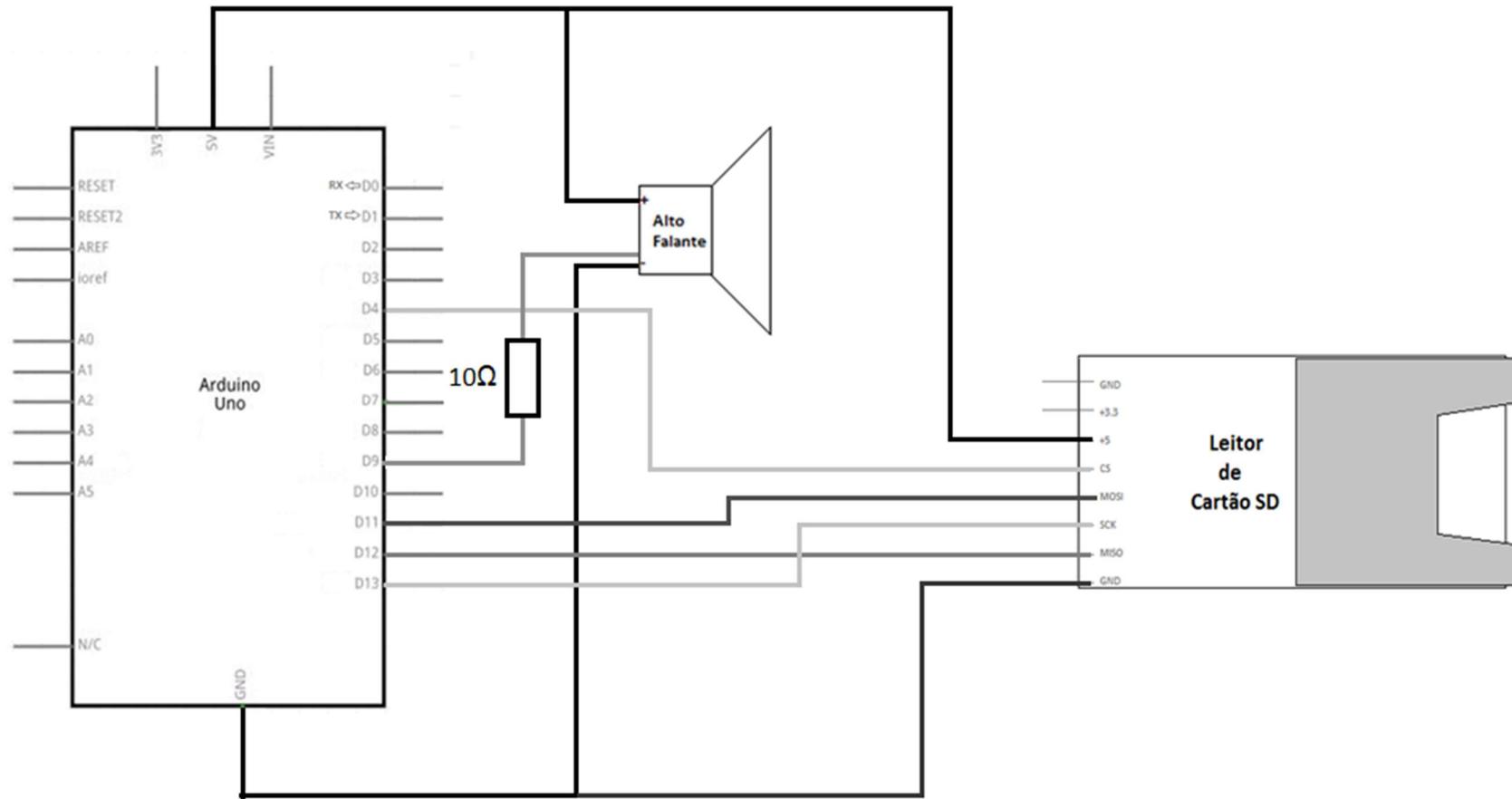


Figura 52 - Esquema do circuito elétrico 2.

### 5.1.3. CIRCUITO 3 - Protótipo do equipamento desenvolvido

O circuito final era composto pelo circuito 2, ao qual foi acrescentado um sistema de regulação do som, composto por um amplificador e um potenciômetro<sup>15</sup>. Foi também enriquecido o circuito, com a introdução de uma fonte de alimentação. Após a passagem do código final para a placa do Arduino Uno, estabeleceu-se uma ligação do circuito elaborado com uma pilha de 9V – de modo a tornar o circuito independente e cada vez mais autônomo (Figura 53).

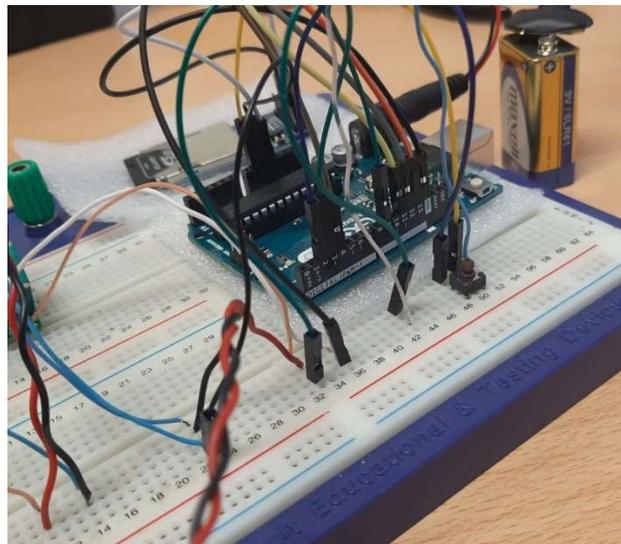


Figura 53 - Circuito 3 é o protótipo final, integrando a placa de ensaio, placa de Arduino Uno, buzzer, leitor de cartões SD, amplificador, potenciômetro, fios condutores, resistências e fonte de alimentação (pilha).

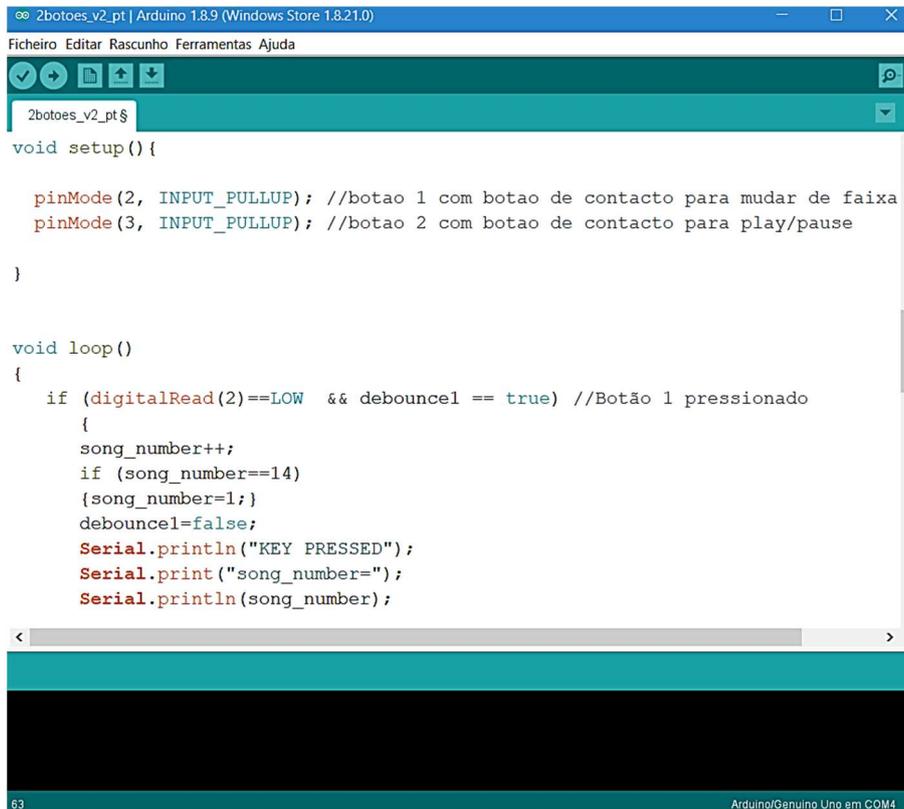
Foram acrescentados ainda 2 botões com funções distintas e com o objetivo de tornar o circuito mais independente (Tabela VI), evitando assim o recurso ao monitor de série do *software* do Arduino, no computador (Figura 54). Os botões de pressão incorporados no circuito tem como objetivo tornar a utilização do equipamento mais prática e acessível.

---

<sup>15</sup> O potenciômetro permite regular a intensidade sonora emitida.

Tabela VI - Funções dos botões incorporados no circuito eletrônico.

Botões	Funções dos botões incorporados
1	Inicializa o sistema e muda a faixa musical
2	<i>Pause/play</i> , após a ativação inicial do botão 1



```
void setup() {  
  
  pinMode(2, INPUT_PULLUP); //botao 1 com botao de contacto para mudar de faixa  
  pinMode(3, INPUT_PULLUP); //botao 2 com botao de contacto para play/pause  
  
}  
  
void loop()  
{  
  if (digitalRead(2)==LOW && debouncel == true) //Botão 1 pressionado  
  {  
    song_number++;  
    if (song_number==14)  
    {song_number=1;}  
    debouncel=false;  
    Serial.println("KEY PRESSED");  
    Serial.print("song_number=");  
    Serial.println(song_number);  
  }  
}
```

Figura 54 - Excerto do código para executar a função dos 2 botões de pressão.

O circuito elétrico 3 encontra-se na figura 55.

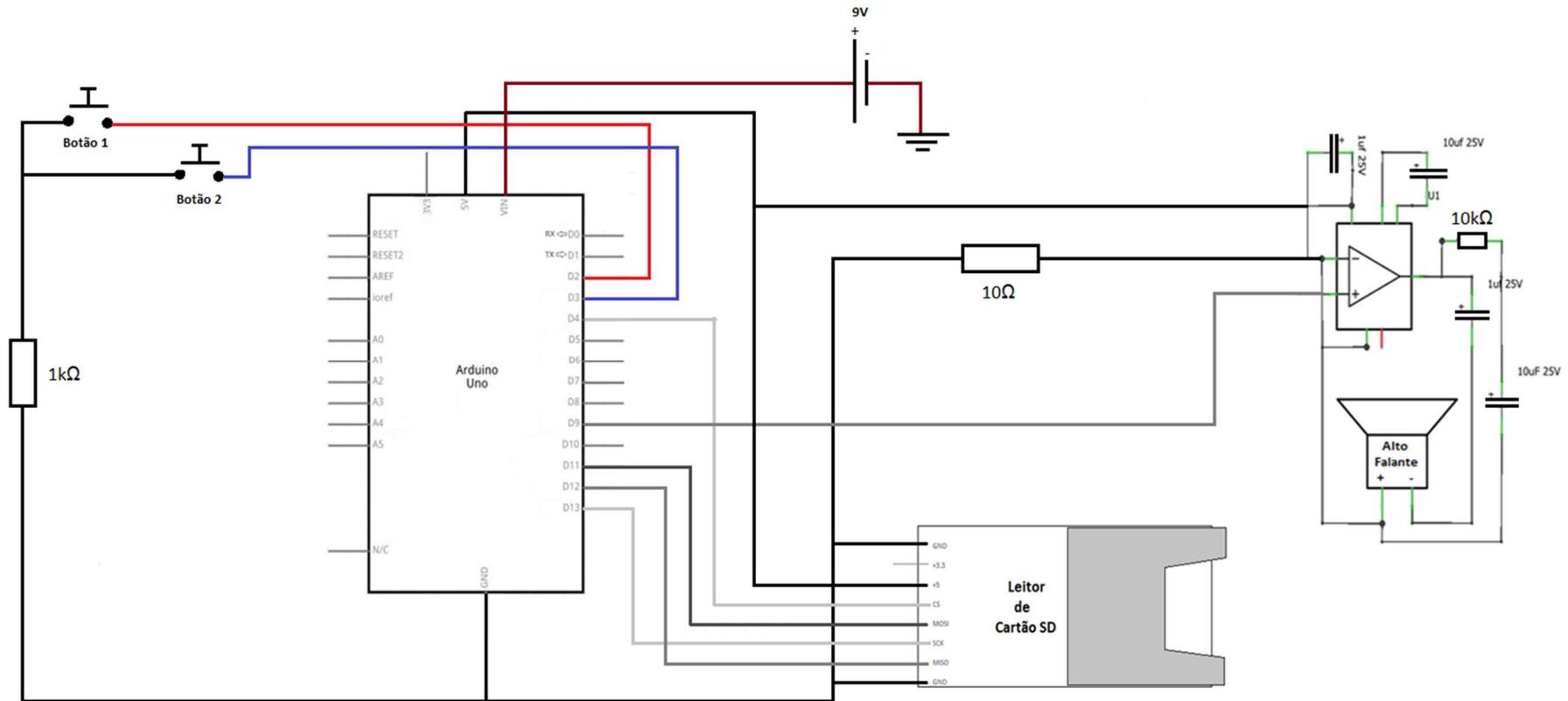


Figura 55 - Esquema do circuito elétrico 3.

No protótipo desenvolvido foi ainda incorporado a caixa acústica referida como capítulo anterior. Esta foi introduzida dentro de uma almofada e foram testados vários materiais no interior dessa mesma almofada para avaliar qual a melhor opção (Figura 56). De forma a evitar a entrada de qualquer tipo de material e, ao mesmo tempo, preservar a capacidade de ressonância do altifalante, foi acrescentada uma pequena rede em renda no topo da caixa de ressonância criada.

- Inicialmente, foi introduzido o altifalante dentro de uma almofada de **espuma** e verificou-se que o som apesar de ser ligeiramente abafado, propagava-se no meio ambiente com facilidade. Deste modo, tornava-se bastante audível para quem se encontrava ao lado.
- Posteriormente, foi utilizada uma almofada de **esponja com alguns orifícios**. O som apesar de não se propagar com tanta facilidade, como no caso anterior, era muito abafado e pouco nítido.
- Numa fase posterior, foi utilizado **esferovite de dimensões muito reduzidas** para encher a almofada, criando assim espaços intersticiais muito reduzidos. Apesar de não abafar tanto o som como na situação anterior, a nitidez do som continuava a não ser a melhor.
- Finalmente, a almofada foi preenchida com material orgânico, neste caso com **caroços de cereja** e verificou-se que o som era mais claro e ligeiramente mais amplificado, uma vez que a propagação do som nos sólidos é mais eficaz. Por outro lado, o facto de existir espaços intersticiais impediu que o som se propagasse para o meio ambiente, e deste modo ficasse mais restrito ao utilizador da própria almofada. Além disso, o uso dos caroços de cereja é amplamente utilizado no relaxamento muscular, o que pode ser uma mais valia atendendo às evidências, já abordadas, de que o zumbido está muitas vezes relacionado com *stress*.



Figura 56 - Materiais utilizados na elaboração da almofada.

Considerando as experiências com os diferentes materiais, conclui-se que os caroços de cereja seriam a melhor solução, tendo em conta a finalidade da almofada.

O circuito eletrónico desenvolvido, a caixa acústica bem como a almofada compõem o protótipo do equipamento que se pretendia desenvolver neste projeto (Figura 57). Na prática, pretende-se que o circuito assim como a caixa acústica sejam transformados num circuito integrado que possa ser incorporado na totalidade no interior de uma almofada. Apenas desta forma, seria plausível testar em contexto real em pacientes com zumbido e com dificuldade em se abstrair dele nos períodos de descanso.



Figura 57 - Protótipo final do equipamento desenvolvido.



## **Capítulo 6: Discussão e Conclusão**



## 6.1. Discussão

Além de ser fundamental a aplicação do tratamento mais correto ao paciente é essencial que o próprio paciente seja capaz de adquirir estratégias de *coping*, de forma a conseguir lidar com a sua situação clínica. Atendendo ao aumento da preocupação com a qualidade de vida dos pacientes, o protocolo deve ser aplicado a todo o tipo de pessoas com queixas de zumbido, independentemente da sua origem (coclear ou central), da faixa etária do indivíduo, do sexo ou classe social.

Além disso, é importante perceber se existe outro tipo de comprometimento, quer seja psicológico ou físico, que possa estar a comprometer ou até mesmo a despoletar tais queixas de zumbido. Deste modo, é importante a constituição de uma equipa interdisciplinar que possa avaliar o zumbido como algo mais complexo. Após descartadas todas as outras complicações que possam advir do zumbido pode-se e deve-se implementar o protocolo desenvolvido neste projeto. Nos restantes casos, também é possível implementar o protocolo, mas nessas situações o uso da almofada é um complemento aos restantes tratamentos que possam ser necessários em caso de patologia associada. Não esquecendo, que tal como para a maioria dos tratamentos, é necessário a colaboração e motivação do paciente.

É de ressaltar também que o material utilizado para o enchimento da almofada é constituído por material orgânico – caroços de cereja. Apresentam uma ótima propagação da onda sonora, além de não permitir que o som que se propague para a vizinhança. Por outro lado, trata-se de um material que é reutilizado, o que o torna ecológico, algo que é extremamente importante, atendendo à crescente preocupação com o ambiente e com o aquecimento global.

O protocolo desenvolvido é uma ideia inovadora que pretende melhorar a qualidade de vida de pacientes com dificuldade em se abstrair do seu zumbido durante o período de descanso. A nível audiológico, o dispositivo criado deve ser utilizado de forma a trabalhar a nível do *loop inferior*, ou seja, a nível do subconsciente. Neste ponto, a habituação do zumbido é mais eficaz.



## 6.2. Conclusão

Espera-se que este trabalho tenha sido claro e útil para tentar desmistificar de certa forma o tema “zumbido”. Além da abordagem audiológica, foi efetuada uma abordagem física, na qual houve a preocupação de conciliar ambas as áreas, nomeadamente com a presença de um glossário com conceitos de Engenharia – permitindo ao leitor acompanhar os assuntos abordados de forma mais clara. Desta forma, foi um trabalho bastante enriquecedor, no qual foram adquiridos conhecimentos de Engenharia e aprimorados alguns conceitos de Audiologia no âmbito do zumbido.

Sugere-se alguns melhoramentos para um possível projeto futuro, nomeadamente a presença de um sensor de toque (sensor piezoelétrico) que permitisse ativar o sistema quando detetasse o toque da cabeça na almofada – sem ser necessário acionar o botão obrigatoriamente. A melhoria da capacidade energética assim como a incorporação de um temporizador de ciclos são fatores a ter em conta, de modo a tornar o equipamento mais duradouro e amigo do ambiente. Além disso, recomenda-se a preocupação em melhorar a qualidade do som emitido, evitando assim a distorção sonora. Seria também conveniente minimizar ao máximo o tamanho físico do circuito e proceder à substituição por material resistente às quedas e ao movimento da cabeça, de forma a evitar algum mau contacto que possa existir e possa comprometer o seu correto funcionamento. Atendendo ao aumento dos recursos tecnológicos e à crescente “dependência” do telemóvel, seria interessante incorporar na almofada uma ligação por Bluetooth que permitisse o controlo remoto da mesma através de um *smartphone*.

A ideia inicial era elaborar um equipamento que permitisse corresponder às necessidades de pessoas com zumbido crónico e numa segunda etapa fosse implementado na prática clínica; no entanto, por motivos logísticos não foi viável. Os prazos estipulados pela Instituição são demasiado reduzidos para permitir a construção de um equipamento de raiz bem como implementá-lo na prática clínica. É um projeto que merece ser implementado em estudos futuros, de modo a comprovar a sua eficácia no tratamento do zumbido crónico no silêncio e, possivelmente, reconhecido e comercializado como dispositivo médico.

Assim, espera-se ter despertado o interesse para a importância, não só deste estudo, mas também para a realização de estudos posteriores.



## Referências Bibliográficas

- Amorim, A. M. d., Azevedo, M. F. d., Carvalho, C. A. & Macedo, C. R. (2007). Emissões otoacústicas evocadas por estímulo transiente em crianças portadoras de retinoblastoma submetidas a tratamento quimioterápico com carboplatina. *Arq Int Otorrinolaringol*, 11(4), 375-379.
- Arduino, S. A. (2015). Arduino. *Arduino LLC*.
- Azevedo, A. A. & Figueiredo, R. R. (2005). Uso do acamprosato no tratamento do zumbido: um estudo duplo-cego. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, 71, 618-623.
- Barboza, C. B. & Oliveira, A. R. L. d. (2006). Planejamento do tratamento por radioterapia através de métodos de pontos interiores. *Pesquisa Operacional*, 26, 1-24.
- Bentzen, S. M., Constine, L. S., Deasy, J. O., Eisbruch, A., Jackson, A., Marks, L. B. & Yorke, E. D. (2010). Quantitative Analyses of Normal Tissue Effects in the Clinic (QUANTEC): an introduction to the scientific issues. *International Journal of Radiation Oncology\* Biology\* Physics*, 76(3), S3-S9.
- Bhatt, J. M., Bhattacharyya, N. & Lin, H. W. (2017). Relationships between tinnitus and the prevalence of anxiety and depression. *The Laryngoscope*, 127(2), 466-469.
- Bishop, O. (2011). *Electronics-Circuits and Systems*: Routledge.
- Braga, N. C. (2016). *Fundamentos de Som e Acústica*: Editora NCB.
- Claussen, C. F., Bergmann, J. M. & Bertora, G. O. (2009). Equilibrimetría y Tinnitología Práctica. In (pp. 206). Alemanha.
- Correia, J. H. & Carmo, J. P. (2013). Introdução à Instrumentação Médica (1a Edição). *Lisboa: LIDEL*, 100.
- da Rosa, M. R. D., de Almeida, A. A. F., Pimenta, F., Silva, C. G., Lima, M. A. R. & Diniz, M. d. F. F. M. (2012). Zumbido e ansiedade: uma revisão da literatura.
- Edelman, S. K. (2003). *Understanding ultrasound physics*: Baker & Taylor.
- Emami, B. (2013). Tolerance of normal tissue to therapeutic radiation. *Reports of radiotherapy and Oncology*, 1(1).
- Esperidião-Antonio, V., Majeski-Colombo, M., Toledo-Monteverde, D., Moraes-Martins, G., Fernandes, J. J., Assis, M. B. d. & Siqueira-Batista, R. (2008). Neurobiologia das emoções. *Archives of Clinical Psychiatry (São Paulo)*, 35, 55-65.
- Ficel, M. O. (S.D.). Tecnologia Radiológica: Unidades e Grandezas das Radiações. Retrieved from [http://www.tecnologiaradiologica.com/materia\\_unidades\\_grandezas.htm](http://www.tecnologiaradiologica.com/materia_unidades_grandezas.htm)

- Gans, J. J., O'Sullivan, P. & Bircheff, V. (2014). Mindfulness Based Tinnitus Stress Reduction Pilot Study. *Mindfulness*, 5(3), 322-333. doi:10.1007/s12671-012-0184-4
- Gentil, F., Meireles, S., Roza, T., Santos, C., Parente, M., Almeida, E. et al. (2015). Comparison of otoacoustic emissions in patients with tinnitus having normal hearing versus mild hearing loss. *International Tinnitus Journal*, 19(2), 39-46. doi:10.5935/0946-5448.20150007
- Geocze, L., Mucci, S., Abranches, D. C., de Marco, M. A. & de Oliveira Penido, N. (2013). Systematic review on the evidences of an association between tinnitus and depression. *Brazilian Journal of otorhinolaryngology*, 79(1), 106-111.
- Gomez, O. G., Obando, F. R. A., Monsegny, A. M. C., Mellado, A. G., Arana, M. T. P., Arias, C. R. & Gomez, J. A. Z. (2006). Audiología básica. In (Vol. 200, pp. 304). Universidad Nacional de Colombia.
- Gonçalves, M. S., Tochetto, T. M. & Gambini, C. (2007). Hiperacusia em músicos de banda militar Hyperacusis in military band musicians. *Revista da Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia*, 12(4), 298-303.
- Howard, D. M. & Angus, J. (2017). *Acoustics and psychoacoustics*: Routledge.
- Jacob, L. C. B., Aguiar, F. P., Tomiasi, A. A., Tschoeke, S. N. & Bitencourt, R. F. d. (2006). Monitoramento auditivo na ototoxicidade. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, 72, 836-844.
- Jastreboff, P. J. (1990). Phantom auditory perception (tinnitus): mechanisms of generation and perception. *Neuroscience research*, 8(4), 221-254.
- Jastreboff, P. J. & Hazell, J. W. P. (1993). A neurophysiological approach to tinnitus: clinical implications. *British Journal of Audiology*, 27(1), 7-17.
- Jastreboff, P. J. & Jastreboff, M. M. (2000). Tinnitus retraining therapy (TRT) as a method for treatment of tinnitus and hyperacusis patients. *Journal of the American Academy of Audiology*, 11(3), 162-177.
- Katz, J. (1999). *Tratado de audiologia clínica*. Brasil: Manole.
- Kemp, D. T. (1978). Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 64(5), 1386-1391.
- Kim, H.-J., Lee, H.-J., An, S.-Y., Sim, S., Park, B., Kim, S. W. & Choi, H. G. (2015). Analysis of the prevalence and associated risk factors of tinnitus in adults. *PLoS One*, 10(5), e0127578.
- Lieberman, P. H. P., Goffi-Gomez, M. V. S., Schultz, C. & Lopes, L. F. (2012). Quais as frequências audiométricas acometidas são responsáveis pela queixa auditiva nas disacusias por ototoxicidade após o tratamento oncológico? *Arquivos Internacionais de Otorrinolaringologia (Impresso)*, 16(1), 26-31.

- Lindblad, A.-C., Rosenhall, U., Olofsson, Å. & Hagerman, B. (2014). Tinnitus and other auditory problems - occupational noise exposure below risk limits may cause inner ear dysfunction. *Plos One*, 9(5), e97377-e97377. doi:10.1371/journal.pone.0097377
- Magalhães, F., Ribeiro, D., Tomé, D., Quelhas, H., Lobão, M. & Pereira, H. (2012). Efeitos Auditivos em Doentes com Tumores de Cabeça e Pescoço e Tumores Cerebrais sujeitos a Radioterapia e Terapia Combinada. *Arquivos de Medicina*, 26, 141-144.
- Malgonde, M. S., Nagpure, P. S. & Kumar, M. (2015). Audiometric Patterns in Ototoxicity After Radiotherapy and Chemotherapy in Patients of Head and Neck Cancers. *Indian Journal of Palliative Care*, 21(2), 164-167 164p. doi:10.4103/0973-1075.156479
- Martins, M. R. D. (1988). *Ouvir falar: introdução à fonética do português*: Ed. Caminho.
- Mazzaroppi, M. (2007). Sensores de movimento e presença. *Monografia para obtenção de grau em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio, Escola Politécnica, Rio de Janeiro.*
- McRoberts, M. (2015). *Arduino básico. Novatec Editora, 2ªed.*
- Meireles, V. C. (2009). *Circuitos eléctricos*. Lisboa; Porto; Coimbra: Lidel.
- Moulin, A. & Kemp, D. T. (1996). Multicomponent acoustic distortion product otoacoustic emission phase in humans. I. General characteristics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(3), 1617-1639.
- Nussenzveig, H. M. (2018). *Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor (Vol. 2)*: Editora Blucher.
- Oliveira, A. V. A. N. d. (2007). *Qualidade de vida em indivíduos com queixas de acúfenos: comparação com a percepção do acompanhante*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Fernando Pessoa, Faculdade de Ciências Humanas e Sociais
- OSHU (2017). Study suggests serotonin may worsen tinnitus (2017, August 22) retrieved April 2019 from <https://medicalxpress.com/news/2017-08-serotonin-worsen-tinnitus.html>
- Portmann, M. & Portmann, C. (1988). *Précis d'audiométrie clinique: avec atlas audiométrique*. Paris: Masson.
- Schmidt, L. P., Teixeira, V. N., Dall'Igna, C., Dallagnol, D. & Smith, M. M. (2006). Adaptação para língua portuguesa do questionário Tinnitus Handicap Inventory: validade e reprodutibilidade. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, 72, 808-810.
- Schultz, C., Goffi-Gomez, M. V. S., Liberman, P. H. P. & Carvalho, A. L. (2009). Classificações das perdas auditivas em Oncologia. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 75(5), 634-641.
- Serway, R. & Jewett, J. W. (2011). *Princípios da Física: Movimento Ondulatório e Termodinâmica, Vol. 2. São Paulo: Cengage Learning.*
- Tang, Z.-Q. & Trussell, L. O. (2017). Serotonergic Modulation of Sensory Representation in a Central Multisensory Circuit Is Pathway Specific. *Cell Reports*, 20(8), 1844-1854. doi:10.1016/j.celrep.2017.07.079

Theunissen, E. A. R., Bosma, S. C. J., Zuur, C. L., Spijker, R., van der Baan, S., Dreschler, W. A. & Rasch, C. R. N. (2015). Sensorineural hearing loss in patients with head and neck cancer after chemoradiotherapy and radiotherapy: A systematic review of the literature. *Head & Neck*, 37(2), 281-292. doi:10.1002/hed.23551

Vanneste, S. & De Ridder, D. (2012). The Use of Alcohol as a Moderator for Tinnitus-Related Distress. *Brain Topography*, 25(1), 97-105. doi:10.1007/s10548-011-0191-0

Vieira, W. A. (2011). Avaliação da ototoxicidade em pacientes portadores de meduloblastoma submetidos à radioterapia com reforço de dose com intensidade modulada do feixe (IMRT).

Zocoli, R., Reichow, S. L. & Zocoli, Â. M. F. (2003). Emissões otoacústicas x Cisplatina: detecção precoce da ototoxicidade em pacientes oncológicos. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, 69(2), 222-225.

## Glossário

- Eco** Ocorre quando o som refletido retorna à fonte depois da extinção total do som original. Exemplo: Se o som é refletido a uma distância de 17 m da fonte, a distância total percorrida pela onda sonora será de:  $17 \times 2 = 34$  m. Sabendo que a  $v_{\text{som no ar}} = 340$  m/s, ou seja, o som percorre 340 m num segundo, portanto será necessário 0,1s para o som percorrer 34 m. Assim, o tempo mínimo para que o som refletido seja percebido separadamente, é de 0,1s.
- Frequência ( $f$ )** Definida como sendo o número de vezes que o ciclo se repete por unidade de tempo. Por norma, a unidade de tempo utilizada é o segundo (s). Deste modo, a unidade frequência é 1/s ou mais conhecida por Hertz (Hz). A frequência é inversamente proporcional ao período, ou seja,  $f = \frac{1}{T}$  (Martins, 1988).
- Frequência de ressonância** Trata-se da frequência em que o máximo de energia é absorvido e irradiado. Na prática, a frequência de vibração natural e a frequência de ressonância são similares.
- Frequência fundamental** Composta sempre por múltiplos inteiros da frequência de repetição da onda complexa inicial, traduzindo-se numa onda sinusoidal. Também é conhecida como a frequência do 1º harmónico.

**Frequência natural** Quando um material emite sempre a mesma frequência independentemente da energia sonora incidente. Por exemplo, sempre que se percute um diapasão, ele emite toda a energia numa só frequência e apenas uma pequena porção nas outras frequências.

**Harmónico** Uma onda harmónica é composta por uma frequência que é múltipla da frequência fundamental,  $f_1$ , nomeadamente por:

$$f_2 = 2 f_1, \text{ constituído o segundo harmónico, } n = 2;$$

$$f_3 = 3 f_1, \text{ terceiro harmónico, } n = 3$$

$$\text{Até } f_n = n f_1, \text{ n-ésimo harmónico.}$$

Deste modo, uma série harmónica é constituída por uma série de frequências naturais que são múltiplas da frequência fundamental que, por sua vez, representa o primeiro harmónico (Serway & Jewett, 2011).

**Massa Específica ou volúmica** É a massa de uma substância a dividir pelo seu volume. No SI, as unidades são  $\text{kg/m}^3$ .

**Período de uma onda sonora ( $T$ )** Também designado por tempo periódico, define-se como a duração de tempo entre dois pontos máximos consecutivos de pressão, que podem ser observados através da esquematização do ciclo.

**Potência** É uma taxa de variação de energia, em que a unidade no SI é o Watt (W).

<b>Potencia elétrica</b>	A potência elétrica de um dispositivo elétrico é definida como sendo o produto da diferença de potencial aos terminais do elemento pela intensidade de corrente que o percorre. A unidade no SI é o Watt (W).
<b>Pressão</b>	É uma força aplicada por unidade de área, sendo que a unidade no SI é o Pascal (Pa).
<b>Resistividade elétrica</b>	Propriedade física da matéria que define a oposição de um material ao fluxo de corrente elétrica. A sua unidade no SI é ohm por metro, ( $\Omega \cdot m$ ).
<b>Reverberação</b>	Acontece quando o som refletido retorna à fonte antes que o som original tenha se extinguido, ou seja, ocorre o reforço do som emitido.
<b>Ruido</b>	Caracterizado como um som constituído por várias frequências combinadas. Normalmente, é um som não repetitivo e não harmónico.
<b>Som</b>	É toda a variação de pressão que pode ser detetada pelo ouvido humano.
<b>Som complexo</b>	É composto por vários sons puros que podem ser harmónicos ou não harmónicos.

**Som puro ou simples** É uma vibração sonora sinusoidal unidimensional que apresenta uma única frequência.

**Transdutor eletrodinâmico** É um dispositivo capaz de converter energia elétrica, proveniente de um amplificador, em energia acústica.

**Anexos**



## Anexo 1 – Percentagem de incidência de diversos fatores em pacientes com zumbido (Kim et al., 2015).

Related Factors	% <sup>a</sup>
<b>Personal Factors</b>	
Age (10 years)	
Sex	
Male	49.7
Female	50.3
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	
Current Smoking	
No smoking	53.4
Quit (> 1year)	15.7
Smoking, not everyday	5.1
Smoking, everyday	25.8
Alcohol consumption	
Never in a year	23.3
< 1 times a month	18.5
1 times a month	10.5
2-4 times a month	24.3
2-3 times a week	15.8
≥ 4 times a week	7.7
Sleep time	
≤ 6 Hour	40.3
7-8 Hour	52.3
≥ 9 Hour	7.5
Stress	
No	13.2
Some	58.6
Moderate	23.5
Severe	4.7
<b>Socioeconomic Factors</b>	
N of household	
Education level	
Uneducated, elementary school, middle school	27.4
High school	30.9
Junior college	14.2
College	23.5
Graduated school	3.9
Monthly income	
Lowest	15.6
Middle, low	26.7
Middle, high	29.4
Highest	28.2
Occupation	
Manager	1.5
Expert, Specialist	12.7
Clerk	9.2
Service worker	6.4
salesperson	7.5
Farmer, Fisher	6.5
Technician	6.2
Mechanics, Production worker, Engineer	5.8
Laborer	8.4
Soldier	0.3
Unemployed	35.4

<b>Disease Factors</b>	
Hypertension	
Yes	17.0
No	83.0
Diabetes mellitus	
Yes	6.4
No	93.6
Hyperlipidemia	
Yes	8.3
No	91.7
Cerebral stroke	
Yes	1.3
No	98.7
Angina or myocardial infarction	
Yes	1.7
No	98.3
Osteoarthritis	
Yes	8.2
No	91.8
Rheumatoid arthritis	
Yes	1.5
No	98.5
Pulmonary tuberculosis	
Yes	4.3
No	95.7
Asthma	
Yes	2.9
No	97.1
Atopic dermatitis	
Yes	2.8
No	97.2
Depression	
Yes	3.6
No	96.4
Thyroid disease	
Yes	3.1
No	96.9
<b>Otological Factors</b>	
Tympanic membrane	
Normal, both	91.2
Abnormal	8.8
Hearing loss (> 25dB)	
No	78.6
Unilateral	9.7
Bilateral	11.7



**Anexo 2 - *Tinnitus Handicap Inventory* adaptado para a língua portuguesa por Schmidt et al.(2006).**

*Tinnitus Handicap Inventory* adaptado para a língua portuguesa

	Sim	Às vezes	Não
01. Tem dificuldade de concentração por causa do zumbido?			
02. A intensidade do zumbido faz com que seja difícil ouvir os outros?			
03. O zumbido deixa-o irritado(a)?			
04. O zumbido deixa-o confuso(a)?			
05. O zumbido deixa-o desesperado(a)?			
06. O zumbido incomoda muito?			
07. Tem dificuldade em dormir à noite por causa do zumbido?			
08. Sente que não se consegue abstrair do zumbido?			
09. O zumbido atrapalha a sua vida social?			
10. Sente-se frustrado(a) por causa do zumbido?			
11. Considera o zumbido uma doença grave?			
12. Tem dificuldade em aproveitar a vida por causa do zumbido?			

13. O zumbido interfere com o seu trabalho ou com as suas responsabilidades?			
14. Sente-se frequentemente irritado(a), devido ao zumbido?			
15. O zumbido atrapalha a leitura?			
16. O zumbido deixa-o indisposto(a)?			
17. O zumbido prejudica o seu relacionamento com familiares/amigos?			
18. Tem dificuldade em abstrair-se do zumbido e focar noutros assuntos?			
19. Sente que não tem controlo sobre o seu zumbido?			
20. Sente-se cansado(a) por causa do zumbido?			
21. Sente-se deprimido(a) por causa do zumbido?			
22. O zumbido deixa-o ansioso(a)?			
23. Sente que não consegue aguentar mais o seu zumbido?			
24. O zumbido piora quando está stressado(a)?			
25. O zumbido deixa-o inseguro(a)?			

**Anexo 3** – Classificação do zumbido, segundo Jastreboff (Jastreboff & Jastreboff, 2000).

**Table 1 Categories of Tinnitus and Hyperacusis Patients**

<i>Category</i>	<i>Hyperacusis</i>	<i>Prolonged Sound-Induced Exacerbation</i>	<i>Subjective Hearing Loss</i>	<i>Impact on Life</i>	<i>Treatment</i>
0	—	—	—	Low	Counseling only
1	—	—	—	High	Sound generators set at mixing point
2	—	—	Present	High	Hearing aid with stress on enrichment of the auditory background
3	Present	—	Not relevant	High	Sound generators set above threshold of hearing
4	Present	Present	Not relevant	High	Sound generators set at the threshold; very slow increase of sound level

Hyperacusis: significant sensitivity to environmental sounds typically associated with LDLs below 100 dB HL; prolonged sound-induced exacerbation of tinnitus/hyperacusis when the effects persist to the following day; subjective hearing loss: perceived subjectively by a patient as having a significant impact on patient's life; impact on life: the extent of impact of tinnitus and/or hyperacusis on patient's life; common treatment for each category involves counseling and the use of enriched auditory background.



## Anexo 4 – Determinar o valor de uma resistência

### Método 1

As resistências utilizadas em laboratório são revestidas, de forma cilíndrica, por um isolante, no qual cada resistência tem associada uma série de faixas coloridas que as distinguem. A figura seguinte representa o código de cores das resistências, que permite calcular o seu valor em  $\Omega$ . Para cada cor da “risca” está associada um valor que varia consoante a sua posição na resistência. O valor associado às duas primeiras “riscas” são algarismos significativos. A primeira faixa representa o valor das centenas; a segunda, o valor das dezenas e a terceira, o valor da unidade (caso a resistência possua cinco faixas) ou o fator multiplicador (caso a resistência tenha quatro faixas). A última “risca” representa sempre a tolerância da resistência, independentemente do número de faixas. Por outras palavras representa o erro máximo do valor, em percentagem (Meireles, 2009).

**Código de Cores**

A extremidade com mais faixas deve apontar para a esquerda

Resistores padrão possuem 4 faixas

Resistores de precisão possuem 5 faixas

**560k  $\Omega$**   
10% de tolerância

**237  $\Omega$**   
1% de tolerância

Cor	1ª Faixa	2ª Faixa	3ª Faixa	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	0	x 1 $\Omega$	
Marrom	1	1	1	x 10 $\Omega$	+/- 1%
Vermelho	2	2	2	x 100 $\Omega$	+/- 2%
Laranja	3	3	3	x 1K $\Omega$	
Amarelo	4	4	4	x 10K $\Omega$	
Verde	5	5	5	x 100K $\Omega$	+/- 5%
Azul	6	6	6	x 1M $\Omega$	+/- 25%
Violeta	7	7	7	x 10M $\Omega$	+/- .1%
Cinza	8	8	8		+/- .05%
Branco	9	9	9		
Dourado				x .1 $\Omega$	+/- 5%
Prateado				x .01 $\Omega$	+/- 10%

### Exemplo para a primeira resistência:

Tabela - Cálculo do valor da resistência.

1º Dígito	2º Dígito	3º Dígito	Incerteza	Valor da Resistência
5	6	$10 \times 10^3 = 10^4$	$\pm 10\%$	$(560 \pm 56) \text{K}\Omega$ = $504 \text{K}\Omega - 616 \text{K}\Omega$
2	3	$10 * 10^6 = 10^7$	$\pm 1\%$	$(230 \pm 2,3) \text{M}\Omega$ = $227,7 \text{M}\Omega - 232,3 \text{M}\Omega$

### Método 2

O valor de uma resistência pode ser calculado através de outros métodos, nomeadamente através do método do voltímetro – amperímetro, baseado na Lei de Ohm (abordada anteriormente). Neste método é ligado a resistência a uma fonte de energia, de modo que permite a passagem de corrente elétrica e haja tensão entre os seus terminais. Posteriormente, procede-se à medição da corrente e da tensão, com um amperímetro e um voltímetro e respetivamente.

Através dos valores obtidos, o valor da resistência é obtido aplicando o conceito referenciado anteriormente (Serway & Jewett, 2011):

$$1 \Omega = 1\text{V} / 1\text{A}$$

### **Método 3**

Existe ainda um outro método, conhecido por Ponte *Wheatstone* que permite obter uma elevada precisão no cálculo das resistências. Para este método é necessário uma fonte de alimentação; três resistências de precisão (sendo que uma delas variável<sup>16</sup> – R3) e ainda um aparelho que indique o zero para a corrente contínua (galvanómetro, p.e., apresenta grande sensibilidade).

Após montado o circuito, o galvanómetro avalia a passagem de corrente e na resistência variável até que a passagem se torne inexistente, isto porque este método baseia-se na medição no ponto de equilíbrio – o que corresponde ao momento em que as grandezas se anulam. Neste ponto, e por norma para simplificar, assume-se que o valor das duas resistências colocadas é igual e o valor de R3 (resistência variável) é igual ao valor da resistência desconhecida (Meireles, 2009).

---

<sup>16</sup> Uma resistência variável apresenta um mostrador que indica o valor atual da resistência entre os seus terminais.

