

TREBALL DE RECERCA

EL SO I L'OÏDA

Joaquim Tarradas Juncà
2n de Batxillerat

Tutora: Fina Graboleda
Institut Pere Alsius i Torrent
Banyoles, 9 d'octubre de 2017

Aquest treball no ha estat possible sense la col·laboració de moltes persones. Especialment de la Fina Graboleda per la seva tutoria, a la meva família i dels departaments de Ciència i Tecnologia per la seva disponibilitat a facilitar-me l'espai, el material imprescindible i les eines necessàries.

Índex

| | |
|--|----|
| 1. Introducció..... | 6 |
| 2. L'oïda humana..... | 7 |
| 2.1 Anatomia..... | 7 |
| 2.1.1 Sistema auditiu perifèric..... | 7 |
| 2.1.1.1 Orella externa..... | 7 |
| 2.1.1.1.1 El pavelló auricular..... | 7 |
| 2.1.1.1.2 Conducte auditiu..... | 8 |
| 2.1.1.2 Orella mitjana..... | 8 |
| 2.1.1.2.1 El timpà..... | 9 |
| 2.1.1.2.2 Els ossicles..... | 9 |
| 2.1.1.3 Orella interna..... | 10 |
| 2.1.1.3.1 El vestíbul..... | 11 |
| 2.1.1.3.2 Conductes semicirculars..... | 11 |
| 2.1.1.3.3 La còclea..... | 12 |
| 2.1.2 Sistema auditiu central..... | 13 |
| 2.1.2.1 Els nervis acústics..... | 13 |
| 2.1.2.2 El cervell..... | 13 |
| 2.2 Funcionament del sistema auditiu: l'Audició..... | 15 |
| 2.3 Disfuncions del sistema auditiu..... | 16 |
| 2.3.1 Patologies auditives (vista general)..... | 16 |
| 2.3.2 La deficiència auditiva..... | 16 |
| 2.3.2.1 Segons la zona afectada..... | 16 |
| 2.3.2.2 Segons el grau de pèrdua auditiva..... | 17 |
| 2.4 L'otorinolaringologia..... | 18 |
| 2.5 Tècniques de diagnòstic..... | 18 |
| 2.5.1 Proves subjectives..... | 18 |
| 2.5.2 Proves objectives..... | 18 |
| 2.6 Els audiòfons..... | 19 |
| 2.6.1 Tipus d'audiòfons..... | 20 |
| 2.6.1.1 Segons l'aspecte..... | 20 |
| 2.6.1.2 Segons el funcionament..... | 21 |
| 3. Les ones..... | 22 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Paràmetres que defineixen una ona..... | 22 |
| 3.2 | Classificació de les ones..... | 23 |
| 3.2.1 | Segons el medi que es propaguen..... | 23 |
| 3.2.2 | Segons les dimensions de propagació..... | 24 |
| 3.2.3 | Segons la direcció de vibració de les partícules..... | 25 |
| 3.2.3 | Segons el seu període..... | 25 |
| 3.3 | Funció matemàtica d'una ona..... | 25 |
| 4. | El so i l'acústica..... | 26 |
| 4.1 | El so..... | 26 |
| 4.1.1 | Les qualitats del so..... | 27 |
| 4.2 | L'acústica..... | 28 |
| 4.2.2 | Branques de l'acústica..... | 29 |
| 4.3 | La física del so..... | 30 |
| 4.3.1 | La propagació del so..... | 30 |
| 4.3.2 | La velocitat del so en l'aire..... | 30 |
| 4.3.3 | La ressonància mecànica..... | 31 |
| 4.3.4 | La interferència..... | 32 |
| 4.4 | La psicoacústica..... | 33 |
| 4.4.1 | Característiques de la sonoritat..... | 33 |
| 4.4.2 | Camps auditius..... | 34 |
| 4.4.3 | Efecte de Haas..... | 34 |
| 4.4.4 | Emmascarament sonor..... | 34 |
| 4.5 | La contaminació acústica..... | 35 |
| 4.5.1 | El sonòmetre..... | 36 |
| 5. | Placa de Chladni..... | 36 |
| 5.1 | Objectius..... | 36 |
| 5.2 | Introducció..... | 36 |
| 5.3 | Fonaments teòrics: la llei de Chladni..... | 37 |
| 5.4 | Material i muntatge..... | 38 |
| 5.5 | Recollida i anàlisi dels resultats..... | 39 |
| 5.6 | Conclusions la placa de Chladni..... | 43 |
| 6. | Tub de Kundt..... | 44 |
| 6.1 | Objectius..... | 44 |
| 6.2 | Introducció..... | 44 |

| | |
|--|----|
| 6.3 Fonaments teòrics: les ones estacionàries..... | 45 |
| 6.4 Material i muntatge..... | 46 |
| 6.5 Recollida de resultats i dades..... | 47 |
| 6.6 Tractament dels resultats..... | 49 |
| 6.7 Conclusions el tub de Kundt..... | 52 |
| 7. Consideracions finals..... | 53 |
| 8. Bibliografia..... | 54 |

1. INTRODUCCIÓ

Fins l'acabament d'ESO la vida acadèmica d'un estudiant no implicava cap tipus de decisió respecte allò que t'agradaria aprendre sinó que simplement es basava en tractar tots els àmbits de l'educació que es consideren més importants. Tot aquest mapa sociològic canvia alhora d'iniciar Batxillerat, on s'han de començar a prendre decisions que segurament marcaran el teu futur. El treball de recerca n'és una; resulta ser una oportunitat d'aprofundir i d'assimilar aquells conceptes o àmbits d'estudi pot ajudar en la concreció de decisions del futur immediat.

Per aquesta raó he intentat escollir un tema que estigui relacionat amb algun grau universitari que m'interessaria cursar els anys següents. Tot i així com que no ho tinc molt clar, he buscat una temàtica que relacioni dos aspectes de la ciència que sempre m'han despertat curiositat: la medicina i la física. Finalment m'he decantat per dedicar el treball de recerca als temes del so i l'oïda que m'han donat l'oportunitat d'aprofundir en aquests dos camps.

L'objectiu principal de l'estudi tracta de familiaritzar-me amb els conceptes treballats tenint en compte que el camp de l'acústica i el so és especialment complex ja que inclouen conceptes abstractes que no es poden visualitzar.

D'aquesta manera he portat a terme un seguit de pràctiques que m'han permès sotmetre ones mecàniques a un estudi i una anàlisi comparatiu: el tub de Kundt i la placa de Chladni. En el tub de Kundt, l'objectiu principal és l'estudi de les ones estacionàries en dos dimensions el qual consistirà en visualitzar i analitzar els modes propis de vibració d'una placa metàl·lica quadrada. Per altre banda, la pràctica de Chladni consisteix en l'estudi de les ones estacionàries formades a l'interior d'un tub de metacrilat. Aquesta investigació vindrà pautada per la determinació de la velocitat del so, la visualització del fenomen de la ressonància i la identificació de les parts d'una ona.

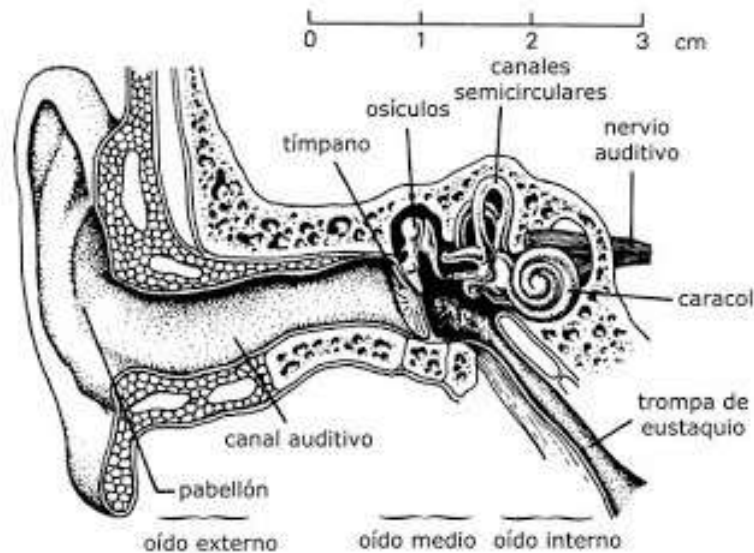
Tot i així és necessari un treball anterior que el basaré en investigar sobre l'audició i les ones sonores: molts dels processos de l'acústica tenen lloc en l'oïda animal i humana.

2. L'OÏDA HUMANA

2.1 ANATOMIA

2.1.1 Sistema auditiu perifèric

El sistema auditiu perifèric reuneix dos importants funcions com el sentit de l'equilibri i la percepció i transformació del so a partir de canvis de pressió, en impulsos electroquímics. Diferenciem tres parts diferents: l'orella externa, mitjana i interna.



Il·lustració 1: Sistema Auditiu Perifèric -Font: Atlas de l'anatomia humana

2.1.1.1 ORELLA EXTERNA

L'orella externa és la part auditiva que recull les ones sonores i les envia a l'orella mitjana, a partir de diferents òrgans: el pavelló auricular, el conducte auditiu i el timpà extern.

2.1.1.1.1 El pavelló auricular

El pavelló auricular és l'única part visible del sistema auditiu. Està format per cartílag elàstic (un teixit conjuntiu blanquinós i sòlid) i es troba recobert per una capa lleugera de pell tova greixosa que presenta glàndules sebàcies on es sintetitza el seù, una substància lipídica sòlida insaturada (no presenta enllaços dobles). Aquesta pell té una funció lubricadora i protectora. A la part mitjana del pavelló s'hi orienten un conjunt de fibres de múscul estriat del cartílag que es comuniquen amb el conducte auditiu extern; aquestes fibres augmenten la capacitat de moviment de l'òrgan. El pavelló auricular presenta una forma helicoïdal i mostra nombroses vellositats que permeten dirigir correctament les ones sonores cap a l'interior del sistema. Si no fos així, el so hi aniria directament i es dispersaria, impossibilitant la seva interpretació posterior.

S'adquireix una freqüència de ressonància d'entre 4500 Hz A 5000 Hz.

Aquesta part és imprescindible degut a la diferència de pressions dels dos medis que comunica: l'aire a l'interior es troba altament comprimit respecte l'exterior (les molècules van més ràpid i col·lisionen repetidament augmentant la pressió). És a dir, permet que es dissipin la menor quantitat d'ones sonores i que penetrin a l'interior amb la major comoditat possible superant la diferència de pressions.

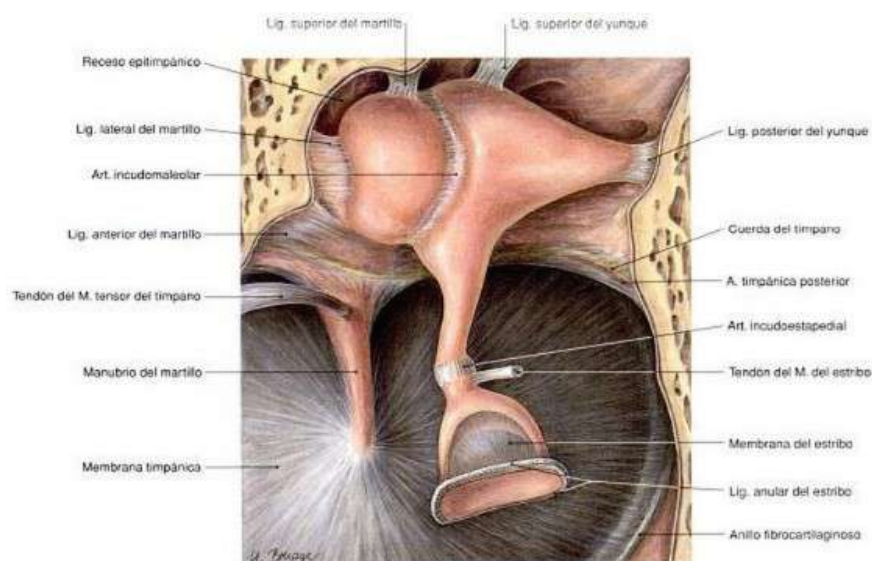
2.1.1.1.2 Conducte auditiu

El conducte auditiu es defineix anatòmicament com un canal de 9 mm de diàmetre i de 3 cm de longitud, que comunica el timpà amb el pavelló auditiu permetent el desplaçament de les ones sonores. El formen teixit ossi recobert per cartílag elàstic i pell tova. Descriu un trajecte en forma d'essa a partir de diferents vellositats per tal de protegir la membrana timpànica. A la dermis d'aquest conducte s'hi localitzen les glàndules ceruminoses les quals són conegudes per secretar el cerumen, una substància amb funció protectora de l'orella interna, de la pols i paràsits. Està formada per l'escalè, el colesterol, i altres substàncies lipídiques. Tot i així, un excés d'aquest compost pot obstruir el canal i desenvolupar deficiències auditives.

A partir de la forma que mostra, presenta una freqüència de ressonància de 3200 Hz.

2.1.1.2 ORELLA MITJANA

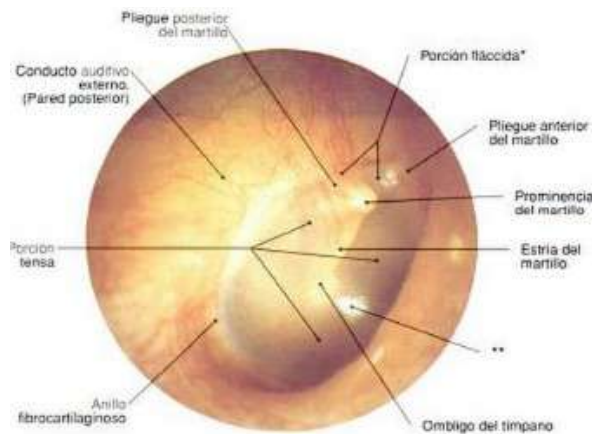
Es determina des del timpà fins a la trompa d'Eustaqi i conté una gran quantitat d'aire. Hi trobem aquests dos òrgans acompanyats de la caixa timpànica i els ossicles. Gràcies a la Trompa d'Eustaqi, un conducte d'origen osteocartilaginós, es comunica l'orella mitjana amb les fosses nasals.



Il·lustració 1: Orella mitjana -Font: Atlas de l'anatomia humana

2.1.1.2.1 El timpà

El timpà és una membrana sensible, ovalada i translúcida, amb un diàmetre d'1 cm als en els adults. Es troba inclinada uns 55° i unida al conducte auditiu extern que indica el seu final i separa l'orella externa de la caixa timpànica. És un òrgan de major importància ja que en rebre les ones sonores vibra i amplifica els sons de baixa intensitat, que serien imperceptibles sense el timpà (actua com un audiòfon natural). Indirectament ens ajuda a la nostra vida perquè permet mantenir un to de veu adequat i corrent. Tot i així només una petita quantitat d'aquests ones és absorbida, ja que la majoria són reflectides. La part central d'aquesta membrana oscil·la com un con invertit a les freqüències inferiors als 2600 Hz. Quan aquestes són superiors, realitza uns moviments més complexos gràcies a la reacció del martell.



Il·lustració 2: Membrana timpànica -Font: Atles de l'anatomia humana

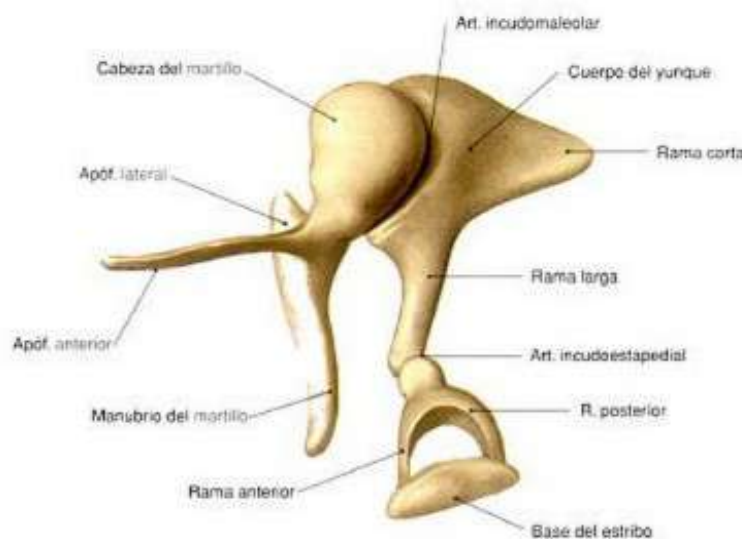
Distingim una part superior, la qual es troba relaxada, mentre que l'inferior es caracteritza per estar tensa. Des del timpà extern s'observa l'os del martell tenint en compte que és translúcida.

2.1.1.2.2 Els ossicles

Aquest òrgan n'inclou tres més petits, que són el martell, l'enclusa i l'estrep, els quals tots tres són essencials. La seva principal funció és transmetre el moviment del timpà, a l'orella interna a partir de la finestra oval (una membrana que es troba en contacte amb l'estrep, augmentant 20 vegades la propagació d'ona). Això és possible perquè hi ha una gran quantitat de material limfàtic a l'orella interna, mentre que a l'orella mitjana només hi ha aire. És a dir, passa d'un medi gasos a un de líquid. Aquesta diferència provoca que només s'absorbeixi un 0,1% de l'energia de l'ona, mentre que el 99,9% restant, és reflectida.

L'orella externa, però, soluciona aquest desajustament disminuint la superfície de contacte del moviment, i el concentra en una zona molt concreta del timpà. Al mateix temps l'estrep empeny la finestra oval, posant en moviment el material limfàtic que augmenta la pressió. Finalment, s'acaba amplificant des de 5-10 dB les freqüències rebudes a partir del pavelló auditiu.

En els ossicles s'hi distingeixen tres ossos. El primer, el martell, presenta un cap, un coll, un manubri, i dos apòfisis una interior i l'altre exterior (són dues subunitats anteriors al manubri que sobresurten discretament). Es troba unit al timpà i transmet les ones a l'enclusa a partir dels *Articulus incudomallearis*, unes articulacions revestides per cartílag hialí, una variant del cartilaginós que trobem a les membranes cel·lulars. El segon òrgan d'aquesta cadena correspon a l'enclusa. Es localitza a la caixa del timpà i es troba entre el martell i l'estrep a partir de les seves respectives articulacions. Està format per un cap i dues branques i adquireix, com el propi nom indica, una forma d'enclusa. Per últim observem l'estrep que transmet les vibracions d'ona de l'enclusa, a la finestra oval que introdueix l'orella interna. Distingim una base on es desenvolupa una nansa ovalada i un cap i es tracta de l'os més petit del cos humà: mostra una longitud de 3 mm .



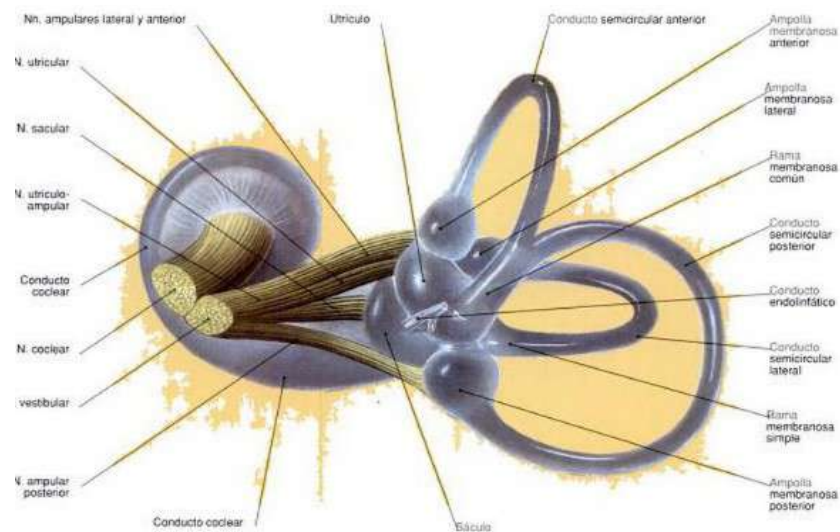
Il·lustració 3: Ossicles -Font: Atlas de l'anatomia humana

2.1.1.3 ORELLA INTERNA

Per últim, trobem l'orella interna situada a l'ós temporal del crani, omplint un buit d'aquesta zona. Principalment compren un laberint ossi i un altre de membranós (el segon es troba encaixat dins el primer). Aquest laberint ossi està format pel vestíbul, el conducte semicircular i la còclea. A partir de l'energia acústica que li arriba transformada per l'orella mitjana en energia mecànica, l'orella interna realitza la definitiva transformació en impulsos elèctrics.

2.1.1.3.1 El vestíbul

És el primer òrgan que trobem a l'orella interna que comunica la finestra oval amb la còclea. El podem dividir en dues subunitats que són el sàcul i l'utricle. Aquesta estructura no participa en l'audició, sinó que és l'òrgan encarregat de mantenir l'equilibri. El conducte es troba en forma d'anella on hi ha una sèrie de fibres piloses i està plena d'un fluid que es mou conforme al moviment corporal. A partir d'aquest moviment, el líquid reacciona amb les fibres piloses que envien impulsos al cervell que els descodifica i l'ajuden a mantenir l'equilibri.



Il·lustració 4: Laberint membranós -Font: Atles de l'anatomia humana

2.1.1.3.2 Conductes semicirculars

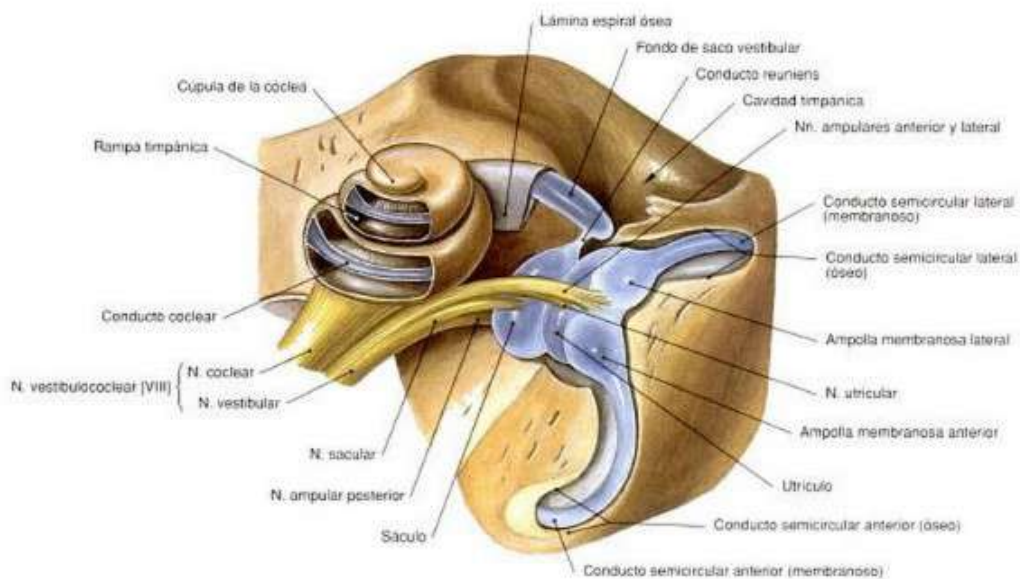
Un segon òrgan que participa en l'equilibri és el conducte semicircular format per tres tubs (anterior, posterior i lateral) creant un semicercle. Es troba al vestíbul situat en tres plans diferents, els mateixos que constitueixen l'espai. D'aquesta manera mantenim la orientació a l'entorn i en el manteniment de l'equilibri.



Il·lustració 5: Laberint ossi -Font: Atles de l'anatomia humana

2.1.1.3.3 La Còclea

La còclea és un conducte enrotllat en si mateix unes 2-3 vegades i té forma d'espiral. Té una longitud de 35mm i un diàmetre de 1,5mm. Aquest òrgan es divideix en tres tubs: la rampa vestibular, el conducte coclear i la rampa timpànica, separats per dos respectives membranes (la basilar, on s'hi troben les cèl·lules ciliades, i la membrana vestibular que no dificulta el pas del so). Cada una d'elles té unes propietats determinants pel sistema auditiu. Les rampes timpànica i vestibular es troben plenes de perilimfa rica en sodi però pobra en proteïnes. En canvi, el conducte coclear reté endolimfa formada per un gran nombre de proteïnes i potassi. Aquest conjunt es comunica amb la finestra oval a partir del vestíbul i limita amb la finestra rodona.



Il·lustració 6: Còclea -Font: Atles de l'anatomia humana

En la membrana basilar, que separa el conducte coclear amb la rampa timpànica, hi ha l'òrgan de Corti. Aquest conté les cèl·lules ciliades que es caracteritzen especialment per la seva sensibilitat ja que en ser estimulades pel moviment, generen impulsos elèctrics que els nervis acústics transmeten ràpidament al cervell. Per tant a partir del moviment del líquid limfàtic de dins de la còclea es produeix la deformació d'aquesta membrana. Cal dir que les freqüències són processades a llocs diferents de la membrana basilar (les més baixes es troben més lluny a l'orella mitjana).

L'espai que es troba després d'aquesta membrana serveix alhora de la intercomunicació de la limfa.

També existeix la transmissió òssia que és una altra via per la qual les ones sonores penetren a l'orella interna. És possible gràcies a que aquesta última part del sistema auditiu perifèric es troba encastada dins l'ós temporal del crani cosa que permet que el material limfàtic no oscil·li només amb el moviment del timpà i els ossicles. Actualment s'utilitza com a via de transmissió principal de les ones en aquelles persones amb problemes a l'orella externa o mitjana.

La transmissió òssia és el motiu per qual sentim la nostra veu amb un timbre diferent al que percep la resta de persones.

2.1.2 Sistema auditiu central

Es tracta de la part més important del sistema auditiu tot i que no es coneix exactament com funciona a causa de l'escassa informació de què es disposa sobre el cervell, un òrgan molt complex. El sistema auditiu central s'encarrega de traduir i processar la informació rebuda atribuint un significat als sons transmesos pel nervi auditiu en forma d'impulsos elèctrics.

També existeixen altres sistemes de transmissió però se'n té poc coneixement: Es tracta de les neurones descendents que ajuden a diferenciar les freqüències captades per les cèl·lules ciliars i incrementen la diferència de temps, amplitud i freqüència entre els dos oïdes.

El sistema auditiu central està format pels nervis acústics i els sectors cerebrals anomenats hemisfèrics, que intervenen en el procés de la audició.

2.1.2.1 ELS NERVIS ACÚSTICS

Aquests nervis poden arribar a reunir unes 30.000 neurones i s'encarreguen de transmetre al cervell les ones sonores percebudes pel sistema auditiu perifèric mitjançant impulsos elèctrics. Per tant, és l'òrgan que connecta ambdós sistemes

2.1.2.2 EL CERVELL

Es tracta d'un òrgan electroquímic el qual ha patit una important evolució al llarg de la història fins adoptar les característiques actuals, atribuint-nos un dels principals trets que ens diferencien de la resta d'animals: la capacitat de raonament.

Actualment es té escassa informació sobre el seu funcionament a causa de l'alta complexitat que mostra l'òrgan. Coneixem que s'hi localitzen les neurones, unes cèl·lules que es caracteritzen per la seva forma i la llarga longitud que poden mostrar els seus

axons recoberts de mielina. S'encarreguen de rebre i transmetre impulsos elèctrics entre elles per tal de transportar informació, formant importants xarxes neuronals. Aquestes cèl·lules no es regeneren, sinó que des que naixem es van morint. Per tant, el nostre aprenentatge és fruit d'aquestes connexions que atribueixen una alta eficàcia i potència al nostre cervell.

En el procés de l'audició la ment compara amb la memòria la informació rebuda a partir del nervi auditiu i la deformació de les cèl·lules ciliars de l'òrgan de Corti. Ho fa intentant trobar patrons semblants emmagatzemats en la memòria a partir de l'experiència. Igualment que hi hagi casos on no es pot atribuir cap similitud, el cervell intentarà adaptar el so rebut en algun de prescrit. Si no hi ha la possibilitat, l'òrgan té dues opcions: rebutjar-lo, o emmagatzemar-lo a curt, mitjà, o llarg termini a la ment, per tal que es converteixi en un nou patró de comparació amb futurs sons. Per exemple, si escoltem un conjunt de sons aïllats de diferents freqüències, el nostre cervell intentarà crear una sèrie harmònica entre ells per tal de atribuir-los un significat.

La memòria és una facultat molt important del nostre cervell ja que ens permet recuperar la informació captada per l'experiència al llarg del temps. Tots els fets es guarden en localitats diferents de la ment de manera associativa, constituint importants xarxes i connexions neuronals.

El cervell organitza la informació seguint un procediment de tres passos: inicialment localitza el lloc de procedència del so gràcies a l'escolta binaural (dos sistemes perifèrics) que ens permet rebre dues percepcions simultànies i diferents. Tot seguit identifica les característiques tímbriques del so i finalment identifica les propietats temporals dels sons. És a dir, que la importància de cada patró dependrà de la informació que el succeeix o antecedeix. Per això té una elevada importància el desenvolupament de la parla i la música.

Distribuïm el cervell en els hemisquis cerebrals que, a causa de l'encreuament dels nervis a la columna cerebral, cada part de l'òrgan controla la part oposada del cos. Cada hemisqui té una funció específica i s'estima que l'esquerra, s'encarrega del llenguatge i les funcions lògiques mentre que el dret controla les funcions no verbals, les emocions, i les activitats artístiques.

Davant dels sons cada hemisfiri actua i intervé diferent. Tot i així la percepció i l'assignació de cada so específic es creu que depèn de cada individu. Per exemple, en el cas d'un músic, la música és processada per l'hemisfiri esquerra ja que la persona treballa lògicament aquesta disciplina. En canvi, un individu qualsevol, aquest conjunt de sons és estudiat per l'hemisfiri dret.

2.2 FUNCIONAMENT DEL SISTEMA AUDITIU: L'AUDICIÓ

Constantment captem ones sonores que som capaços de transformar-les en informació que posteriorment és interpretada pel cervell.

Aquestes ones són recollides pel pavelló auricular i posen en moviment la membrana timpànica passant anteriorment pel conducte auditiu. Les ones rebudes més ràpides corresponen a sons aguts, i les més lentes, a sons greus. A més l'oïda amplifica automàticament aquells sons més fluixos i segrega cera que tanca el conducte auditiu quan en rep de molt forts (si existís l'amenaça de danyar l'orella). Tot seguit, la vibració es desplaça per la cadena d'ossicles fins a la còclea; es tracta d'un procés mecànic: a l'orella mitjana es produeix la transducció que consisteix en la transformació de l'energia acústica, en energia mecànica. A continuació el peu de l'estrep empeny la finestra oval posant en moviment el fluid de la còclea. Aquestes oscil·lacions transmeten les vibracions a l'orella interna, provocant la inclinació de les cèl·lules ciliars de l'òrgan de Corti que posseeixen diferents graus de sensibilitat, cosa que permet captar un important rang de sons. També sabem que es troben disposades al llarg de la còclea de menys a més freqüència començant pel centre. Cal dir que el moviment de la membrana basilar afecta de forma diferencial les cèl·lules piloses depenent de la ressonància de les ones captades.

Finalment aquestes cèl·lules segreguen un compost químic que genera impulsos elèctrics que posteriorment són enviats al cervell a través del nervi auditiu.

Aquesta capacitat que té el cervell, anomenada plasticitat neuronal, és major quan la mielització de la via neuronal és menor. Als 6 anys, pràcticament ja està desenvolupada i consegüentment, es rehabilita l'audició quan les persones tenen ja una edat avançada.

2.3 DISFUNCIONS DEL SISTEMA AUDITIU

Existeixen un conjunt de patologies que el nostra sistema auditiu pot patir i que posteriorment poden desenvolupar casos de pèrdua auditiva o de sordesa entre altres conseqüències.

2.3.1 Patologies auditives (vista general)

Classifiquem les patologies auditives depenent de si són congènites (des del naixement) o adquirides (al llarg de la vida).

Les patologies congènites recullen els casos de malformacions que es poden desenvolupar durant la gestació de l'embrió (aquestes són les més freqüents i actuen a l'orella externa i mitjana), les infeccions produïdes a l'embaràs com la toxoplasmosi o la rubèola (poden arribar a provocar sordesa al fetus) i altres alteracions donades al llarg d'aquest període a causa d'un traumatisme, d'una possible exposició a radiació, o bé per la ingesta d'alguns medicaments.

Per altra banda, les patologies adquirides com l'otitis mitjana, l'otitis mitjana crònica, l'otitis externa, i el col·lesteatoma, són infeccions que es poden solucionar mèdicament o bé quirúrgicament.

Cal dir que també trobem un conjunt de trastorns que actuen en el sistema auditiu central. Com que no es tracten d'implicacions durant la transmissió del so sinó que afecta en el processament de patrons d'informació, aquestes complicacions influeixen en l'aprenentatge i en altres factors importants. Per tant, poden provocar un retard en la maduració cerebral, en el llenguatge o en la paraula, com la dislèxia, el dèficit d'atenció,...Tot i així totes aquestes anomalies poden ser fruit d'altres patologies com càncers, trastorns degeneratius, infeccions virals, ect.

2.3.2 La deficiència auditiva

Distingim dues possibles classificacions: segons la zona de l'orella afectada, o bé segons el grau de pèrdua auditiva.

2.3.2.1 SEGONS LA ZONA AFECTADA

-Hipoacúsia conductiva o de transmissió

La patologia es focalitza a l'orella externa o mitjana i impedeix la transmissió del so. Es tracta de pèrdues generalment lleus o moderades ja que oscil·len entre els 25 i 60 decibels i es poden solucionar mèdicament o quirúrgicament. Tot i així existeixen altres

vies com la utilització d'un audiòfon o l'implant d'orella mitjana.

Cal dir que és possible que es tracti d'una anomalia temporal.

-Hipoacúsia neurosensorial

És el resultat del deteriorament de les cèl·lules ciliades de la còclea i pot esdevenir una anomalia permanent tot i que s'hi distingeixen diferents graus. Afecta l'orella interna o la via auditiva central i les solucions més freqüents correspondrien a l'implant d'orella mitjana o la utilització d'audiòfons. Tot i així es pot donar el cas que només afecti a la percepció d'altres freqüències i per tant, tan sols és la base de la còclea que es troba en un estat disfuncional.

-Hipoacúsia mixta

Es tracta de la combinació de la pèrdua auditiva neurosensorial amb la conductiva i per tant pot actuar en qualsevol part del sistema auditiu perifèric. L'ús de medicació, la utilització d'audiòfons o l'implantament d'orella mitjana corresponen a les principals solucions.

-Hipoacúsia retococleolar

És el deteriorament del nervi auditiu o bé a la seva absència. Normalment es tracta d'una patologia severa i permanent. Tant els audiòfons com els implants d'orella mitjana no servien per solucionar aquesta anomalia ja que és el nervi que no pot transmetre la informació necessària al cervell. Actualment es recorre com a solució terapèutica, la implantació de tronc cerebral.

2.3.2.1 SEGONS EL GRAU DE PÈRDUA AUDITIVA

Pèrdues tonals mitjanes (Classificació elaborada per BIAP: Bureau International d'AudioPhonologie):

-Audició infranormal: 1a 20 decibels

-Deficiència auditiva lleugera: 21 a 40 decibels

-Deficiència auditiva mitjana: 1r grau: 41 a 55 decibels; 2n grau: 56 a 70 decibels

-Deficiència auditiva severa: 1r grau: 71 a 80 decibels; 2n grau: 81 a 90 decibels

-Deficiència auditiva profunda: 1r grau: 90 a 100 decibels; 2n grau: 101 a 110 decibels; 3r grau: 111 a 119 decibels

-Deficiència auditiva *total-cofosi*: a partir de 120 decibels.

2.4 L'OTORINOLARINGOLOGIA

La Otorinolaringologia és l'especialitat mèdica que s'ocupa del diagnòstic, de la prevenció i del tractament tant mèdic com quirúrgic de les alteracions que afecten: l'oïda i l'aparell auditiu, el nas i les parts del crani relacionades i a la boca, faringe i laringe (part de la via respiratòria determinada des de la boca fins a les cordes bucals). També intervé en altres zones veïnes al coll i el cap com les minoves (uns ganglis) igual que estudia les alteracions de la veu, de la deglució i de l'equilibri. Són els otorinolaringòlegs els metges especialistes en aquesta branca de la medicina. Dins l'Otorinolaringologia distingim la Audiologia que estudia el funcionament del sistema auditiu i de l'audició.

A més a més tracta la sordesa a totes les edats, les alteracions en l'equilibri, les infeccions del sistema auditiu i els problemes de nervi facial.

2.5 TÈCNiques DE DIAGNÒSTIC

Amb l'ajuda d'un conjunt de proves mèdiques els otorinolaringòlegs poden concretar un diagnòstic. Les podem classificar en funció de la necessitat de la participació del pacient.

2.5.1 Proves subjectives

Demanen la opinió del pacient i actualment només se'n distingeix una: l'audiometria.

-L'audiometria

L'audiometria és una prova mèdica que permet determinar el funcionament del sistema auditiu del pacient. Dona a saber si la seva audició està alterada durant la percepció i la transmissió del so, o si és un problema relacionat amb el sistema auditiu central. S'executa amb un audiòmetre en una habitació acústicament aïllada i consisteix en l'emissió de senyals sonors de pressions i freqüències diferents. Simultàniament se li pregunten unes qüestions al pacient per tal de determinar un diagnòstic.

2.5.1 Proves objectives

Són aquelles on és prescindible la intervenció del pacient. Tot i que n'hi ha moltes en estat d'investigació com la tomografia per emissió de positrons, actualment en els hospitals trobem la impedanciometria, els potencials evocats auditius, l'otomicroscòpia, i la videonistagmografia.

-La impedanciometria

La impedanciometria permet saber el funcionament de l'orella mitjana del pacient (tant la mobilitat de la membrana timpànica com la continuïtat dels ossicles) davant una ona sonora. És una prova indolora i consisteix en la introducció d'una sonda auditiva formada per tres conductes: un altaveu que emet sons de baixes freqüències; un micròfon per tal de transformar els sons en senyals elèctrics; i una bomba de pressió per variar la pressió dels sons.

Simultàniament es realitza una timpanometria (estudi de l'estat del timpà) i un estudi del reflex estapeïdal que és un protector de l'orella davant de sons molt forts.

-L'otomicroscòpia

S'observa l'estat interior de les dues orelles mitjançant un microscopi òptic de 200 mm i d'uns 6X.

-Potencials evocats auditius

La prova consisteix en analitzar el corrent elèctric del nervi auditiu mitjançant uns elèctrodes col·locats a la pell i es realitza amb l'objectiu d'avaluar l'oïda d'un infant.

A partir dels 6 anys, el diagnòstic d'una patologia auditiva sorgida molt avans pot provocar un sever retard en el llenguatge i en la comprensió. Per aquesta raó és important realitzar la prova als nadons d'entre 3-5 mesos amb factor de risc de patir hipoacúsia.

-La videonistagmografia

Amb l'ajuda d'unes ulleres que contenen una videocàmera capaç d'enregistrar els moviments oculars mitjançant infrarojos, és possible diagnosticar diferents trastorns relacionats amb el sentit de l'equilibri. L'equip està format per unes ulleres especialitzades connectades a unes plataformes generadores d'estímuls lluminosos que es mostren al pacient a partir d'un projector.

2.6 ELS AUDIÒFONS

Actualment la solució més utilitzada per tractar la hipoacúsia són els audiòfons, uns aparells electrònics que es col·loquen dins i darrera de l'orella. Amplifiquen els sons amb l'objectiu que siguin més fàcils de percebre, i els ajuda a penetrar dins el sistema auditiu.

Un audiòfon està format per tres parts essencials: un amplificador, un micròfon i una botzina. En general el micròfon recull les ones sonores i les converteix en senyals

elèctrics seguidament amplificats. D'aquesta forma poden arribar a l'interior de l'orella amb més força i volum, amb l'acció final de la botzina.

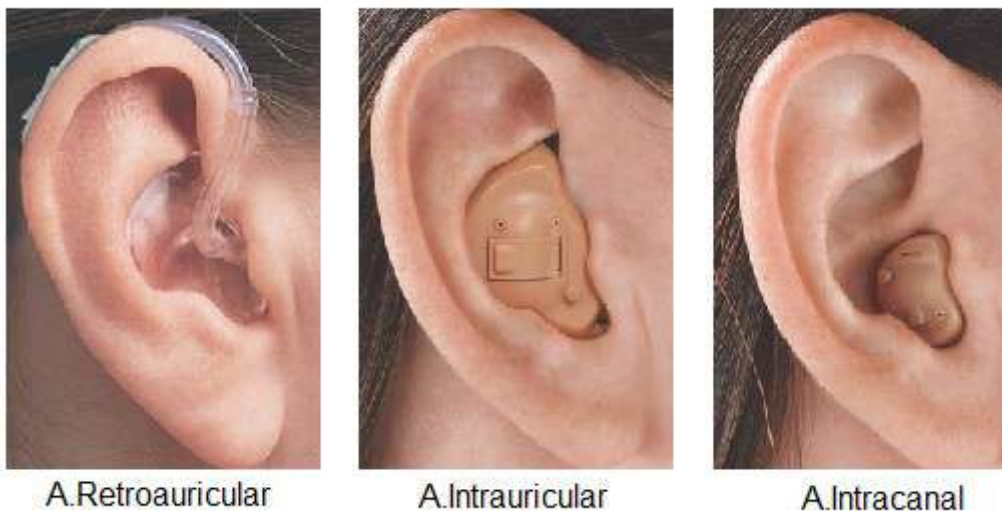
Els grans avenços que s'han donat en aquests aparells no han impedit que un important nombre de pacients renunciïn a aquesta solució fins a no trobar-ne una altra.

Cal tenir present que representa un petit canvi estètic que a força gent li pot ser difícil d'acceptar. Tot i així, com qualsevol altre part del cos que no es troba estimulada, es deteriora i empitjora al llarg del temps. Per aquesta raó és important tractar la hipoacúsia al més ràpid possible igualment que s'hagi de recórrer als audiòfons.

2.6.1 Tipus d'audiòfons

2.6.1.1 SEGONS LA GRANDÀRIA, EL GRAU D'AMPLITUD I LA ZONA ON ES COL·LOQUESN

Dins aquesta classificació distingim tres classes d'audiòfons.



Il·lustració 7: Tipus d'audiòfons -Font: <http://masaudio.cl>

-Audiòfons retroauriculars

Els audiòfons retroauriculars són els més utilitzats per totes les edats i estan formats per una caixeta dura de plàstic que conté tots els dispositius elèctrics.

Aquesta es col·loca darrere l'orella i connecta amb un motlle adaptable a cada cas.

Actualment existeixen els audiòfons d'adaptació oberta els quals només ocupen la part anterior de l'orella gràcies a un conducte establert des d'aquesta part del pavelló fins al conducte auditiu. Aquesta opció s'utilitza en aquelles persones que segreguen importants quantitats de cerumen que poden danyar els aparells.

-Audiòfons intrauriculars

Es recomana el seu ús a les persones adultes amb el sistema auditiu madur. Donen solució a tot tipus d'hipoacúsia i es diferencien dels altres audiòfons ja que s'introdueixen completament a l'orella externa tot i tenir els mateixos components dels retroauriculars.

-Audiòfons de conducte auditiu

Són els més petits de tots tres i es col·loquen completament dins el conducte auditiu. S'utilitzen per tractar hipoacúsies lleus en pacients adults: el seu petit tamany no permet que tingui una gran potència i amplificació.

En els audiòfons de conducte auditiu s'hi diferencien els intracanal, fabricats específicament per cada cas, i els audiòfons complets, que s'introdueixen dins el conducte per tal d'ocultar-los.

2.6.1.2 SEGONS EL FUNCIONAMENT

A partir del sistema electrònic utilitzat per aquests aparells, distingim dues classes d'audiòfons depenent del seu funcionament.

-Audiòfons anàlegs

Es tracta dels models més barats i es caracteritzen per transformar les ones sonores en senyals elèctrics posteriorment amplificats. Normalment són fabricats expressament per cada pacient tot cenyint-se en el diagnòstic de l'otorinolaringòleg. S'hi troben diferents programes dins un mateix aparell els quals el pacient pot seleccionar segons on es trobi a cada instant.

-Audiòfons digitals

Aquests aparells transformen els sons en codis numèrics seguidament amplificats. Aquests patrons són semblants als codis binaris dels ordinadors i contenen la informació sobre el to i la intensitat de les ones sonores. D'aquesta manera es poden seleccionar només aquelles freqüències que es desitja que siguin amplificades. També hi ha la possibilitat que siguin programats per intervenir en els sons que provenen d'una direcció concreta. Cal dir que aquest sistema és adaptable a qualsevol classe d'audiòfon.

3. LES ONES

A la natura es produeixen una sèrie de fenòmens ondulatoris i físics pels quals es propaga energia d'un punt a un altre de l'espai a través d'un medi sòlid, líquid, gasos, o al buit, sense el transport de matèria. Aquest tipus de propagació és el que anomenem ona.

Cal dir que per la seva propagació i formació és imprescindible i necessària la variació d'alguna de les propietats físiques del sistema com podria ser la pressió, la temperatura o la densitat.

Hi ha força exemples per entendre el concepte i les seves propietats, com podria ser el moviment ondulatori d'un fuet on en la seva punta s'hi descarrega tota l'energia. També, per explicar la deformació de les propietats físiques podem agafar la situació en què llancem una pedra a una bassa.

3.1 PARÀMETRES QUE DEFINEIXEN UNA ONA

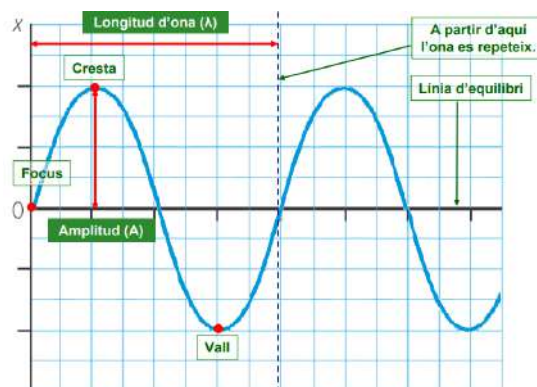
Una ona es pot caracteritzar per un conjunt de paràmetres els quals poden variar. Aquest són: el període, la freqüència, la longitud d'ona, la velocitat de propagació i l'amplitud.

El període (T): Representa el temps en què una ona tarda, entre dos punts equivalents i es realitza una oscil·lació on al final es recuperen les condicions inicials (velocitat, amplitud i posicions).

La freqüència: Es mesura amb hertz (Hz) i és l'inversa del període i s'entén com el nombre de vibracions que fa un punt de l'ona en 1s.

Longitud d'ona: Correspon a la distància que hi ha entre dos punts consecutius que es troben en el mateix estat d'oscil·lació en un instant de temps determinat, i es mesura amb metres.

L'amplitud (A): Coneixem l'amplitud d'ona com la distància (es mesura amb metres) que hi ha entre la posició màxima o mínima d'una partícula del medi i la seva posició d'equilibri.



Il·lustració 8: Paràmetres d'ona -Font: <http://estudis.uib.cat>

3.2 CLASSIFICACIÓ DE LES ONES

Podem classificar les ones depenent: del medi de propagació, de la seva direcció, del moviment de les seves partícules o de la seva periodicitat.

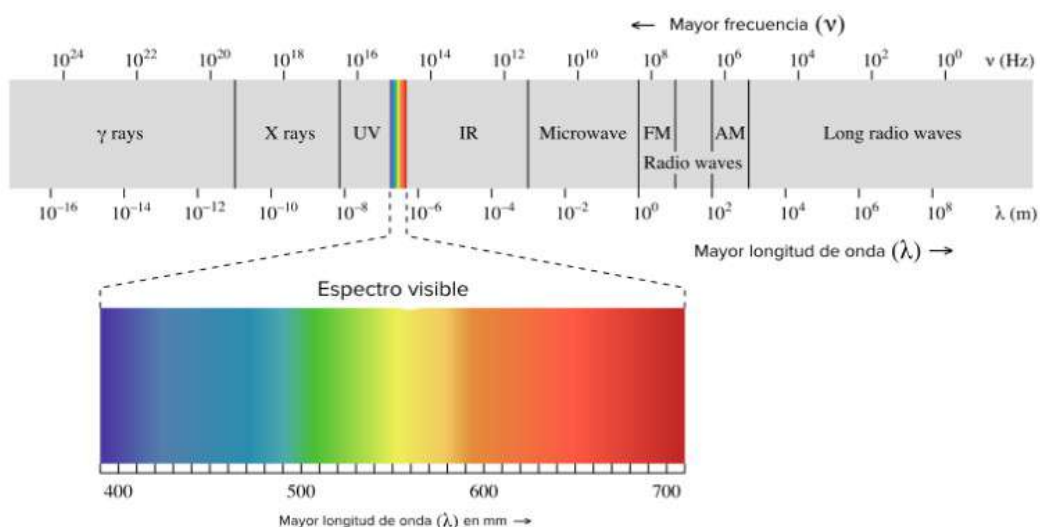
3.2.1 Segons el medi que es propaguen

Ones mecàniques: les ones mecàniques requereixen un medi material elàstic (sòlid, líquid o gasós) per propagar-se, però no ho poden fer en el buit. Les partícules del medi oscil·len al voltant d'un punt fix, de manera que no hi ha transport net de matèria a través del mitjà, sinó d'energia.

Un exemple físic seria al moviment d'una corda o bé al de l'aigua al tirar-hi una pedra. Dins de les ones mecàniques tenim les ones elàstiques (que es propaguen a la superfície de l'aigua) les ones sonores i les ones de gravetat.

Ones electromagnètiques: es propaguen per el buit, i no per un mitjà material com les ones mecàniques. Això és a causa que les ones electromagnètiques són produïdes per les oscil·lacions d'un camp elèctric en relació a un camp magnètic (la llum). Les ones electromagnètiques viatgen aproximadament a una velocitat de 300.000 km/s, i les podem ordenar a partir de un rang de freqüència conegut com Espectre Electromagnètic. Els raigs X, la llum visible o els raigs ultraviolats són exemples d'ones electromagnètiques.

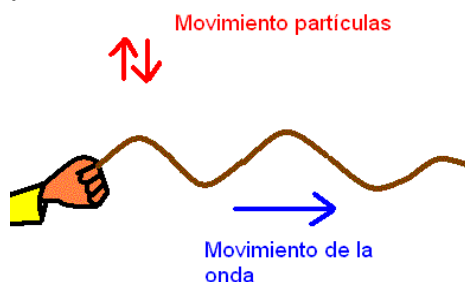
Les ones gravitacionals: són perturbacions que alteren la geometria de l'espai-temps. Tot i que s'estima que viatgen en el buit, no ho podem afirmar perquè són alteracions de l'espai-temps.



Il·lustració 9: Espectre electromagnètic -Font: <https://es.khanacademy.org>

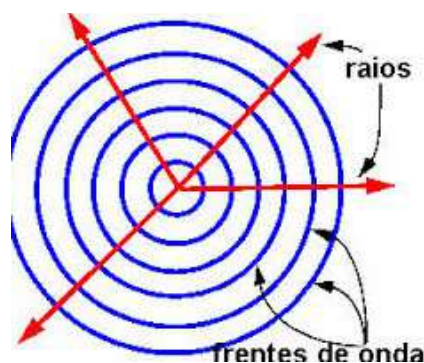
3.2.2 Segons les dimensions de propagació

Ones unidimensionals: són aquelles que es propaguen al llarg d'una sola direcció en l'espai, com les ones que fan les cordes. Si l'ona es propaga en una direcció única, els seus fronts d'ona són plans i paral·lels.



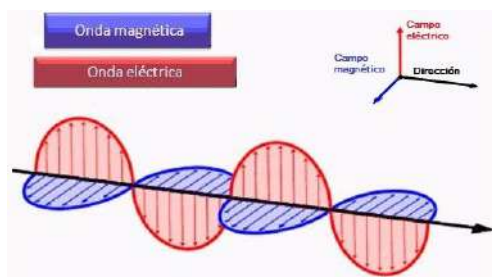
Il·lustració 10: Ona unidimensional -Font: <https://mind42.com>

Ones bidimensionals: són ones que es propaguen en dues direccions però per una mateixa superfície, per això s'anomenen també ones superficials. Un exemple seria les ones que es produeixen en una superfície líquida en repòs on s'hi deixa caure una pedra.



Il·lustració 11: Ona bidimensional -Font: <https://mind42.com>

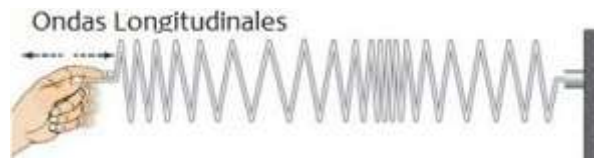
Ones tridimensionals: són ones que es propaguen en tres direccions i també es coneixen com ones esfèriques ja que els seus fronts d'ones són esferes concèntriques que surten de la font de pertorbació (esdevenint excèntriques), i s'expandeixen en totes direccions. Serien, per exemple, el so o les ones electromagnètiques.



Il·lustració 12: Ona tridimensional -Font: <https://mind42.com>

3.2.3 Segons la direcció en què vibren les partícules del medi amb relació a la direcció de propagació de l'ona

Ones longitudinals: són aquelles que es caracteritzen perquè les partícules del medi es mouen o vibren paral·lelament a la direcció de propagació de l'ona. Per exemple les ones sonores, les oscil·lacions d'una molla i la majoria d'ones que es transmeten per un fluid.



Il·lustració 13: Ones longitudinals -Font: <https://mind42.com>

Ones transversals: són aquelles que es caracteritzen perquè les partícules del medi vibren perpendicularment a la direcció de propagació de l'ona. Per exemple, les ones del mar, les ones que es propaguen en una corda, les ones sísmiques (només les S i no les P que aquestes es transmeten per fluids)...



Il·lustració 14: Ones transversals -Font: <https://mind42.com>

3.2.3 Segons el seu període

Ones periòdiques: les ones periòdiques es caracteritzen perquè la pertorbació inicial crea cicles repetitius i iguals, com una ona sinusoidal (valor del potencial del corrent altern).

Ones no periòdiques: la pertorbació inicial assimila successives pertorbacions amb característiques diferents.

3.3 FUNCIO MATEMÀTICA D'UNA ONA

No totes les ones són sinusoidals, per exemple, el moviment d'una corda en el terra. Tot i així, l'equació d'ones és una equació diferencial que descriu el pas d'una ona harmònica per un medi. L'equació té diferents formes les quals depenen de diferents factors com la forma en què es transmet o en quin medi es propaga.

Si fixem un punt concret de la corda i ens dediquem a filmar el seu moviment al llarg del

temps, podem observar que obtenim una relació periòdica. Per tant, l'elongació que experimenta cada una de les partícules del medi material pel qual es propaga una ona és doblement periòdica, respecte del temps i de la coordenada x .

A partir del gràfic representatiu d'una ona on a l'eix de les ordenades i tenim l'elongació d'ona i a l'eix de les abesses la velocitat de propagació, obtenim la següent equació:

$$\Psi(t, x) = A \cdot \cos \left[2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0 \right]$$

És l'equació d'Almbert o de les ones harmòniques bidimensionals on es pot escriure tant amb sinus o cosinus i si avança cap a la dreta, els signes dels parèntesis són diferents.

4. EL SO I L'ACÚSTICA

4.1 EL SO

El concepte del so es pot entendre de dues formes diferents respecte de la branca de la ciència en què s'estudia:

En la física s'entén com una ona mecànica longitudinal que es propaga per un medi ja sigui sòlid, líquid o gasós, i no en el buit com seria a l'espai. Aquesta disciplina recull tots els sons, ja siguin audibles o no.

Es forma quan una font sonora provoca la vibració d'un medi elàstic que transmet l'ona a les molècules de l'aire, propagant-se longitudinalment gràcies a les expansions i contraccions produïdes entre elles a causa dels xocs i l'agitació tèrmica. Aplicant la llei dels gasos ideals, que explica que els gasos són fàcilment compressibles (si varia el volum, la pressió també ho fa però de forma inversament proporcional), es pot entendre el so com una ona de pressió longitudinal: l'alteració de la distància entre les molècules de l'aire provoca l'oscil·lació del valor del volum i per tant també de la pressió.

Per altra banda, en les ciències biomèdiques es defineix com una sensació percebuda pels animals fruit de la transformació de les ones sonores a energia mecànica i posteriorment a impulsos elèctrics a partir del sistema auditiu.

4.1.1 LES QUALITATS DEL SO

El nostre cervell es basa en quatre característiques pròpies de cada so per identificar els senyals elèctrics rebuts: la intensitat, l'altura, la durada i el timbre:

Intensitat

La intensitat acústica és l'energia que travessa la unitat de superfície perpendicular a la propagació de l'ona, és a dir, representa la quantitat d'energia transportada. És determinada per l'amplitud de l'ona ja que com més gran és la distància entre mínims i màxims, més fort serà el so (més intensitat), mentre que si es tracta d'un cas contrari, el so serà més fluix (menys intensitat).

S'expressa en potència per metre quadrat: W/m^2

Altura

L'altura (o to) ve determinada per la freqüència de l'ona i defineix si un so és greu o agut. En la cultura musical els diferents tons corresponen a les notes i en el cas de l'oïda humana, es té un rang de freqüència determinat que es prolonga dels 20 Hz fins els 20.000 Hz.

Per tant les pertorbacions lentes (baixa freqüència) expressaran sons greus mentre que les partícules que vibren ràpidament (alta freqüència) esdevindran sons aguts.

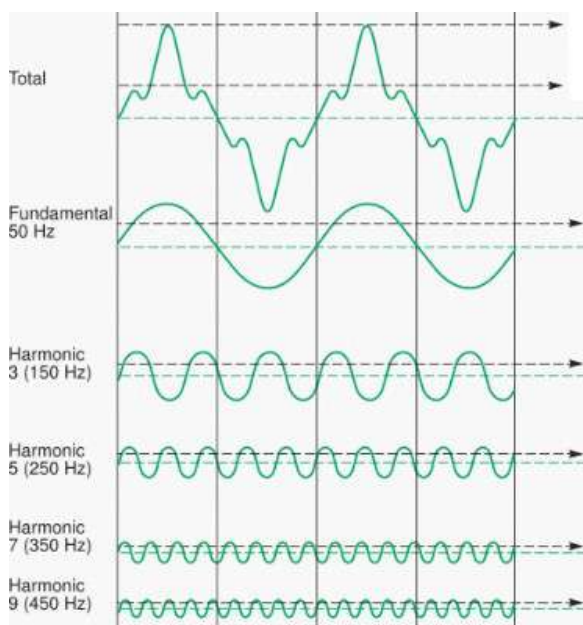
Timbre

El timbre permet que el sistema auditiu pugui diferenciar sons de mateixa altura i intensitat a partir dels harmònics. D'aquesta manera el nostre cervell pot determinar la font sonora de l'ona i ens permet diferenciar el so d'un violí amb un de guitarra.

Durada: Representa el temps que es manté un so determinat.

Què són els harmònics?

Si estirem i fixem una corda pels seus extrems podem representar el moviment ondulatori d'una ona sonora, i com podem comprovar s'obtenen diferents modes de vibració cada un dels quals representa un harmònic. El moviment oscil·latori de la corda mostra una funció sinusoidal pura (o harmònica), com el so pur (aquestes ones sonores només són transmiseses per objectes molt concrets com un diapasó). En canvi els instruments musicals i la majoria de sons corresponen a sons complexos formats per diferents harmònics de diferents freqüències combinades simultàniament. Com que totes les freqüències són múltiples, de l'harmònic del fonamental (el primer estat de vibració) s'obté una funció periòdica però no harmònica.



Il·lustració 15: Harmònics d'una ona -Font: smartestabanell.blogspot.com.

4.2 L'ACÚSTICA

L'acústica és la branca de la ciència que estudia la percepció, producció i transmissió del so tant a l'interval sonor de l'oïda humana com les freqüències ultrasòniques i infrasoniques.

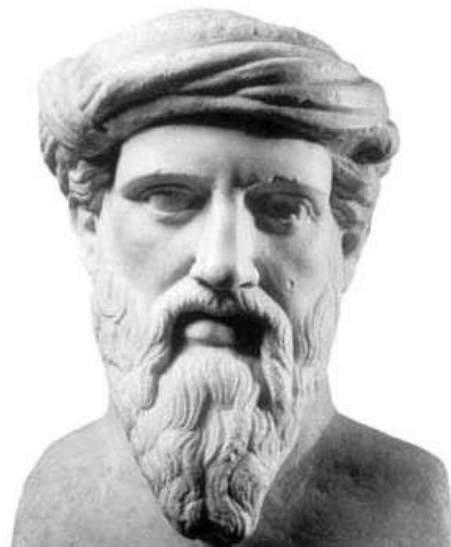
Els nervis auditius humans només són capaços de captar sons de 20 Hz a 20.000 Hz i aquells que superen aquest rang de freqüència corresponen als ultrasons. Poden arribar a ser un mitjà de comunicació per alguns animals marins igual que poden esdevenir un

sistema de visió com el que utilitzen els ratpenats, tenint en compte poden captar vibracions fins a 120.000 Hz. Per altra banda, com que alguns aparells electrònics utilitzen freqüències entre 20 Hz i 30 Hz, s'entén com a infrasò aquelles pertorbacions de 0 Hz a 30 Hz.

L'acústica entén el so com una vibració que es propaga per l'aire a una velocitat de 340 m/s a nivell del mar (1 atmosfera) i a 20 graus centígrads de temperatura.

4.2.1 Història

S'estima que s'inicià l'interès per l'estudi del so durant l'Edat Antiga (segle IV aC – segle I dC) partint de la música, una disciplina molt important de l'època que mai havia estat estudiada científicament. Pitàgores va ser qui es va fixar per la formació dels intervals musicals; desitjava saber què determinava que un so fos agradable. Finalment va arribar a una resposta que es basava en intervals numèrics. A més a més, Pitàgores va ser el primer en documentar un estudi sobre els diferents estats de vibració d'una corda. Tot i així va ser Aristòtil que va explicar que el so consistia en un seguit de contraccions i expansions de l'aire. A prop de l'any 0 Virtuvi, un arquitecte romà, va escriure sobre l'acústica dels teatres introduint alguns conceptes com la ressonància o la interferència que posteriorment van ser desenvolupats i perfeccionats.



Il·lustració 16: Pitàgores -Font:
<http://www.xtec.cat>

Durant i després de la Revolució Científica es van produir els majors avenços en la matèria: Galileo Galilei i Marsenne van descobrir les lleis de la corda vibrant, un treball que inicià ja Pitàgores; Galileo també va explicar que "les ones són produïdes per les vibracions d'un cos sonor, que es difonen per l'aire, portant al timpà de l'orella un estímul que la ment interpreta com so". Aquest va ser el punt de partida d'una de les moltes branques de l'acústica: la psicoacústica.

A mitjans del segle XVII es van realitzar les primeres experiències per mesurar la velocitat del so en l'aire. Isaac Newton va determinar la fórmula per saber la velocitat del so en els sòlids i gràcies als importants avenços matemàtics es va aconseguir elaborar la teoria de la propagació d'ones.

Les figures més importants de l'època contemporània van ser Helmholtz (1821-1894), un alemany que consolidà l'acústica fisiològica i Lord Rayleigh (1842-1919), un anglès que va

redactar la teoria del so. Tot i així hi van haver altres físics destacats com Ohm (1789-1854) que va escriure l'analogia entre el so i l'electricitat. No va ser fins al segle XX que van sorgir les aplicacions de la matèria i totes les seves branques.

4.2.2 Branques de l'acústica

A part d'algunes disciplines de l'acústica sorgides en moments puntuals de la història, la majoria de branques apareixeran al segle XX, quan aquesta actitud ja estava consolidada. Tot seguit s'observen les branques més importants de l'acústica:

| Branques | Definició/estudi |
|-------------------------|---|
| Aeroacústica | Generació de so amb el moviment de l'aire |
| Acústica arquitectònica | Disseny de propietats acústiques i aïllament sonors |
| Psicoacústica | Estudi de la percepció del so en humans i de la seva comprensió |
| Bioacústica | Estudi de l'audició animal |
| Acústica ambiental | Estudi del so exterior |
| Acústica subaquàtica | Detecció d'objectes en el fons del mar (sonar) |
| Acústica musical | Estudi de la producció i l'afinació del so amb instruments |
| Electroacústica | Estudi del tractament electrònic del so: captació (micròfons), processament, amplificació,... |
| Acústica fisiològica | Estudi del funcionament del sistema auditiu |
| ... | |

4.3 LA FÍSICA DEL SO

4.3.1 La propagació del so

Recordem que el so necessita un medi elàstic per propagar-se ja que es tracta d'una alteració mecànica de les partícules. Tot i que s'acostuma a transmetre per l'aire, hi ha alguns factors que en els sòlids i líquids poden alterar la velocitat de propagació, com la pressió sonora (si les partícules estan molt comprimides, la velocitat disminueix) com la densitat (menys densitat significa velocitat). D'aquesta manera s'estableix la següent relació entre la velocitat; en aquestes magnituds k és la constant elàstica i D és la densitat.

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

D'altra banda en els gasos la temperatura influeix a les dues magnituds anteriors.

En el cas que una ona sonora es propagui en un líquid incompressible, la pertorbació es manifestarà en forma d'ona de pressió. En canvi si es propaga per l'aire, com que es tracta d'un medi molt compressible, és necessària una alteració de la distància entre les partícules. Tot i així la velocitat del so depèn de la distància entre molècules i per tant, serà major en els sòlids després en els líquids i finalment en els gasos.

4.3.2 La velocitat del so en l'aire

El valor de la velocitat del so a una atmosfera de pressió (1 atmosfera o 10^5 pascals) i a 20 graus centígrads de temperatura (293 K) correspon a 344 m/s. Cal dir que canvia en funció de les condicions on es mesura la pertorbació. Tenint en compte que aquest moviment ondulatori és adiabàtic (sense transferència d'energia entre dos volums elementals) podem definir la velocitat en la següent fórmula on gamma és la constant adiabàtica amb un valor de 1,4 (en el cas dels gasos monoatòmics és 1,67):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

S'hi apliquem la llei general dels gasos podem saber la velocitat modificant la temperatura:

Llei general dels gasos: $p \cdot v = R \cdot T \cdot n$

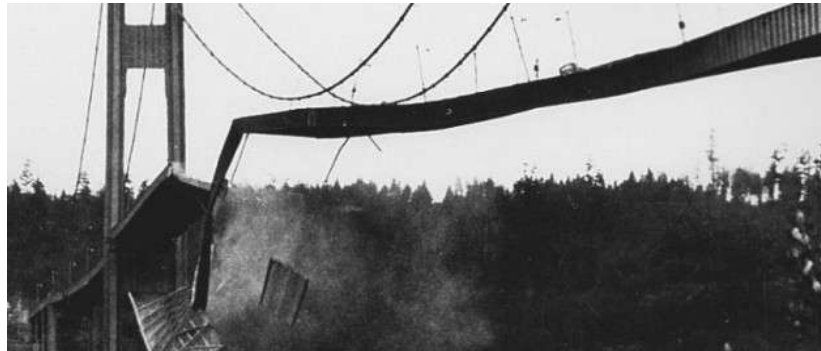
Si $n = m/M$, $p/d = (R \cdot T)/M$. Per tant:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

4.3.3 La ressonància mecànica

La ressonància mecànica és un fenomen físic que es produeix quan un objecte amb la capacitat de vibrar és tractat per una força que emet el mateix període del cos. D'aquesta manera provoca que augmenti progressivament l'amplitud de la vibració. Es pot comprovar aquest fet col·locant de costat dos diapasons que transmetin un so de la mateixa freqüència: en fer-ne vibrar un, l'altre sonarà de forma espontània.

Tot i així pot tractar-se d'un fenomen molt perillós. Per exemple, quan una tenor canta amb la mateixa freqüència que la vibració d'una copa, la pot arribar a trencar. També pot provocar accions destructives com va ser el cas del pont de Tacoma Narrows que, segons alguns autors, es va precipitar a causa de la ressonància mecànica produïda pels vehicles.



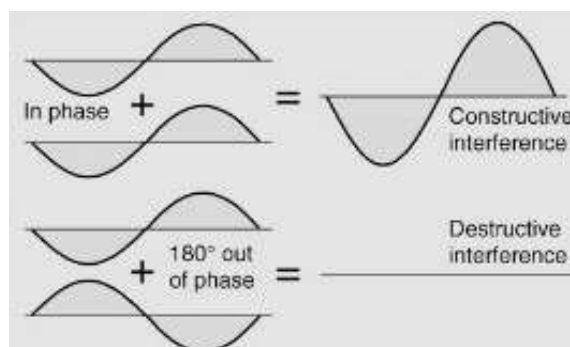
Il·lustració 17: Pont de Tacoma Narrows -Font: <http://naukas.com>

4.3.4 La interferència

La interferència és un fenomen que es dona quan dues ones de mateixa naturalesa coincideixen en una regió de l'espai en un temps i punt determinats. Això origina que es sobreposin i que surti una ona resultant. Per tant l'equació final serà la suma de la de les ones. Tot i que es pot comprovar utilitzant el so, també es pot fer mitjançant la llum, les ones de ràdio, etc.

Distingim dues classes d'interferència:

- La interferència destructiva: Es produeix en els punts on l'amplitud és nul·la.
- La interferència constructiva: Es produeix en els punts on l'amplitud resultant és valor màxim.



Il·lustració 18: Classes d'interferències -Font: <http://slideplayer.es>

4.4 LA PSICOACÚSTICA

La psicoacústica és una disciplina que connecta l'acústica amb la fisiologia auditiva ja que s'encarrega de la relació entre les característiques del so amb la sensació auditiva que provoca.

La percepció humana del so es troba delimitada entre 20 Hz i 20.000 Hz tot i que al pas dels anys disminueix aquest interval a causa del desgast de l'òrgan. Malgrat no poder rebre els sons que no superen els 20 Hz, podem percebre aquells entre 4Hz a 16 Hz mitjançant el sentit del tacte.

Un concepte molt lligat en aquesta branca de la física és la sonoritat, una mesura subjectiva de la intensitat del so interpretat per l'oïda humana. Ens permet ordenar els sons de més a menys forts utilitzant els decibels (dB) com a unitat. En física també es coneix com el nivell d'intensitat sonora B que es pot calcular utilitzant la següent fórmula on I_0 representa una intensitat de referència:

$$B = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

4.4.1 Característiques de la sonoritat

-Límit mínim:

Correspon a la mínima pressió acústica que l'oïda humana pot percebre en un ambient de silenci. Varia en funció de la freqüència i la pròpia persona.

-Límit màxim:

Representa el mínim nivell de pressió acústica que provoca una sensació de mal estar. Igual que en el límit mínim, aquest valor depèn de la freqüència i de la persona.

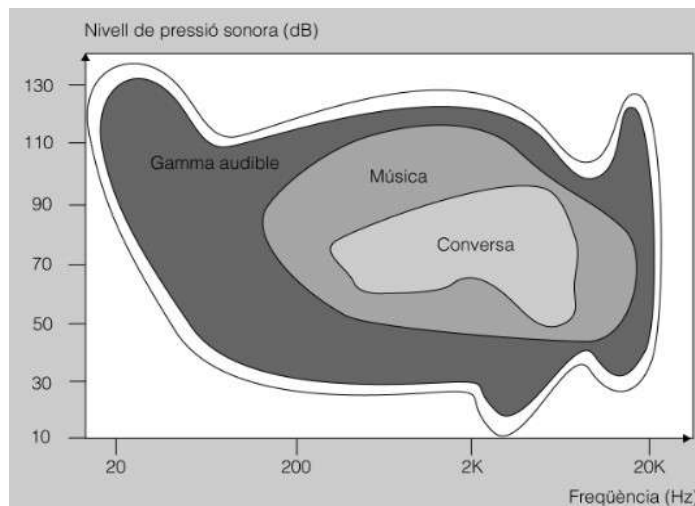
-Límit normal:

És el valor mitjà entre el del límit màxim i mínim.

4.4.2 Camps auditius

Es coneix com a camp auditiu o àrea d'audició la zona de sensació auditiva delimitada pels límits mínims i màxims.

Recordem que els humans tenim una percepció sonora de 20 Hz a 20.000 Hz. Tot i així la sensibilitat i precisió auditives són més precises amb les freqüències de 500 Hz a 8.000 Hz i per això definim aquest interval com el nostre camp auditiu que està comprès entre 0,02 Pa i 20 Pa de pressió acústica. A les freqüències més altes o baixes respecte aquest rang, és necessària una major afinitat per determinar el límit auditiu.



Il·lustració 19: Camp auditiu -Font: <https://ioc.xtec.cat>

4.4.3 Efecte de Haas

Helmut Haas, un metge alemany, va centrar la seva tesi doctoral de 1949 en l'efecte prioritari sonor que posteriorment va batejar amb el seu nom. Aquest fenomen intervé quan un conjunt de sons independents penetren en el nostre sistema auditiu central en menys de 50 mil·l·segons.

Això provoca que el cervell els fusioni i els interpreti com un de sol ja que ha perdut el sentit de percebre la direcció de cada vibració i tradueix els sons posteriors com un ressò del primer.

4.4.4 Emmascarament Sonor

Ens referim en aquest concepte quan un so impedeix la percepció d'un altre, és a dir, es desplaça el límit auditiu de la persona durant un temps determinat. Per exemple experimentem l'efecte d'aquest fenomen quan intentem conversar amb un company però a causa del soroll del trànsit o de la música exterior, percebem parcialment o no, les paraules. Distingim dues classes d'emascarament:

-Emmascarament total: un so de baixa intensitat es troba temporalment a prop d'un so més alt.

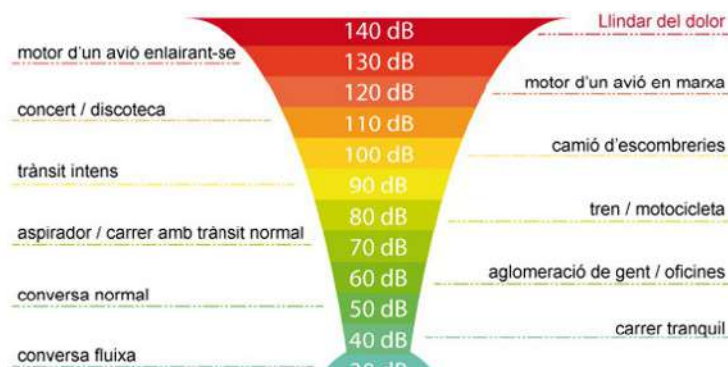
-Emmascarament freqüencial: dos sons són percebuts simultàniament i un queda eclipsat davant de l'altre.

4.5 LA CONTAMINACIÓ ACÚSTICA

Actualment estem exposats a sorolls constants ja sigui a fora o a dins dels habitatges. D'aquest problema va néixer un concepte relativament modern: la contaminació acústica. Representa l'excés sonor que pot provocar canvis tant en l'ambient com en la vida quotidiana de la població. Per aquesta raó l'OMS (Organització Mundial de la Salut) ha establert uns màxims d'intensitat sonora en els habitatges, ja que es tracta d'una contaminació molt subjectiva i era necessari que s'hi possessin límits. Aquesta plataforma va arribar a la conclusió que a partir dels 45dB es poden causar alteracions a la salut. També assegura que la major part de la ciutadania està exposada a nivells superiors als 55dB i que a partir dels 85dB tots els éssers vius pateixen conseqüències.

Les patologies més freqüents a causa de la contaminació acústica són les cardíques: a part dels trastorns mentals i canvis a l'estil de vida, pot provocar un augment del ritme cardíac, hipertensió arterial, augment de patir malalties coronàries, etc. Tot i així pot afectar als sistemes endocrí i digestiu.

Si s'està exposat a nivells alts de soroll de forma continuada es pot originar una pèrdua auditiva (de diferents graus) irreversible si els sons superen els 90dB.



Il·lustració 20: Alguns nivells de soroll -Font: <http://blogscat.com>

4.5.1 El sonòmetre

El sonòmetre és un instrument de mesura que determina el nivell de pressió sonora. S'utilitza per conèixer casos de contaminació acústica al moment, que es basa en els decibels com a unitat de mesura.

L'aparell està format per un micròfon que capta les freqüències de 8Hz a 22.000Hz, un circuit electrònic, una unitat de lectura com podria ser una pantalla i una sortida per poder connectar un oscil·loscopi (a partir de la mesura de la pressió sonora crea la imatge de l'ona).

Es distingeixen 4 classes de sonòmetres diferents:

- Sonòmetre 0: el trobem en els laboratoris
- Sonòmetre 1: s'utilitza per feines rutinàries
- Sonòmetre 2: exerceix la mateixa funció que l'1 però obtenint uns resultats més generals
- Sonòmetre 3: només s'utilitza per dur a terme reconeixements ja que és el menys precís de tots.



Il·lustració 21: Sonòmetre
-Font:
<https://www.twilight.mx>

5. PLACA DE CHLADNI

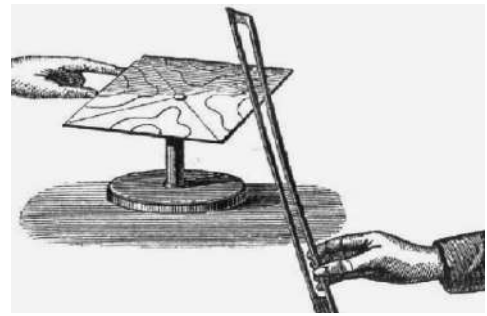
5.1 OBJECTIUS

L'objectiu principal és l'estudi de les ones estacionàries en dues dimensions el qual consistirà en visualitzar i analitzar els modes propis de vibració d'una placa metàl·lica quadrada.

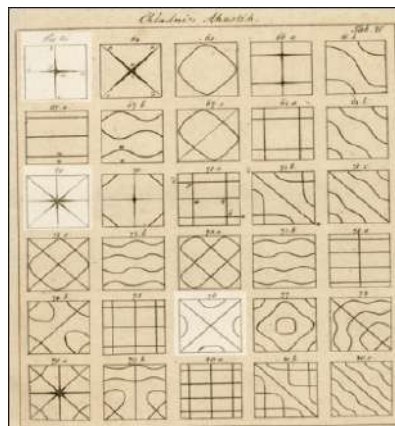
5.2 INTRODUCCIÓ

Ernst Florenz Friedrich Chladni (novembre de 1756 – abril de 1827) va ser un físic alemany considerat un dels pares de l'acústica gràcies als seus estudis sobre la vibració de plaques metàl·liques, i sobre la velocitat del so en diferents gasos. A part, també se'l considera el fundador de la investigació moderna sobre els meteorits arran d'un llibre que va publicar al 1794 on explicava que aquests materials que arribaven del cel no eren d'un volcà sinó que eren de l'espai exterior. Tot i així és conegut especialment per l'estudi de les línies nodals i la formació d'unes figures geomètriques a causa de la vibració d'una placa que provocava el desplaçament de la sorra fina. Posteriorment va batejar amb el seu nom com a Figures de Chladni.

Respecte aquest fenomen, el físic alemany amb estudis de dret i música va determinar una relació senzilla entre la freqüència i els patrons propis de vibració de cada placa. En el seu cas va utilitzar peces subjectades pel centre i amb l'ajuda de l'arc d'un violí provocava que la freqüència originada fes visible les línies nodals formant curioses figures. Chladni va traslladar aquests patrons a mà i es va dedicar a mostrar l'experiència en el públic europeu on Napoleó Bonaparte s'hi va interessar molt, ja que deia que per primera vegada el so es podia veure.



Il·lustració 22: Muntatge original -Font: <http://www.dfists.ua.es>



Il·lustració 23: Recull original de les plaques de Chladni -Font: <http://www.dfists.ua.es>

Definim aquestes figures com a patrons geomètrics formats per sorra fina sobre una base llisa de vidre o metall. S'originen pel desplaçament de les ones estacionàries a diferents freqüències formant línies nodals expressades per la sorra.

5.3 FONAMENTS TEÒRICS: La llei de Chladni

Aquesta relació de la freqüència de la vibració d'una placa circular fixada per el centre amb el número de línies nodals radials (m) i no radials(n) és coneguda com la llei de Chladni on **f** és la freqüència i la **C** és una constant pròpia de cada cas:

$$f=C \cdot (m+2n)^2$$

En el cas d'una placa quadrada es necessita resoldre l'equació d'ones en dues dimensions. Com a solució obtenim les freqüències de ressonància si considerem els contorns de la placa antinodes. L'equació és la següent on v és la velocitat del so, a és les dimensions de la peça i m i n corresponen a les línies nodals horitzontals i verticals:

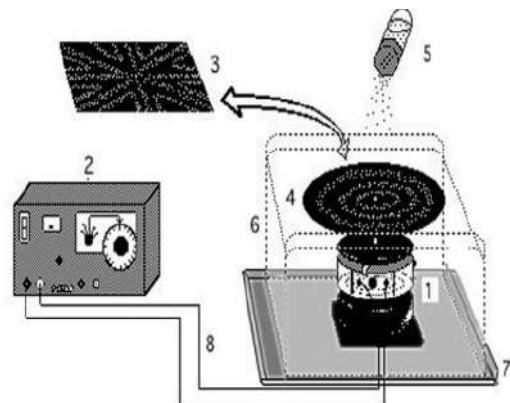
$$w = (v\pi / a) \cdot (m^2 + n^2)^{(1/2)}$$

5.4 MATERIAL I MUNTATGE

La realització de l'experiència de la Placa de Chladni es caracteritza pel muntatge senzill que es necessita, cosa que no és propi de les pràctiques d'acústica. Per tant és imprescindible el següent material tot i que hi han moltes estructures possibles:

- Placa metàl·lica quadrada
- Altaveu o motor
- Amplificador
- Generador de freqüències
- Cables i connectors
- Bicarbonat de sodi
- Element de ressonància com un tub de longitud curta o un vas de plàstic

El sistema està format per una placa metàl·lica quadrada connectada a través d'un element que creï ressonància a un altaveu no necessàriament molt gran. A part d'aquestes dimensions del plat també es pot utilitzar altres formes geomètriques com un triangle equilàter o un cercle. En el meu cas la placa té unes dimensions de 20x20 cm i una amplada de 1,5 mm.



Il·lustració 24: Muntatge Placa de Chladni -Font: <http://www.clickonphysics.es>

Tot seguit a l'altaveu li arriba la formació de les ones acústiques a través de l'amplificador que es troba unit al generador de freqüències. En el meu cas he utilitzat una *app* anomenada *Frequency Generator* que em permetia canviar de freqüència gradualment de forma senzilla, només lliscant el dit de dreta a esquerra i viceversa.

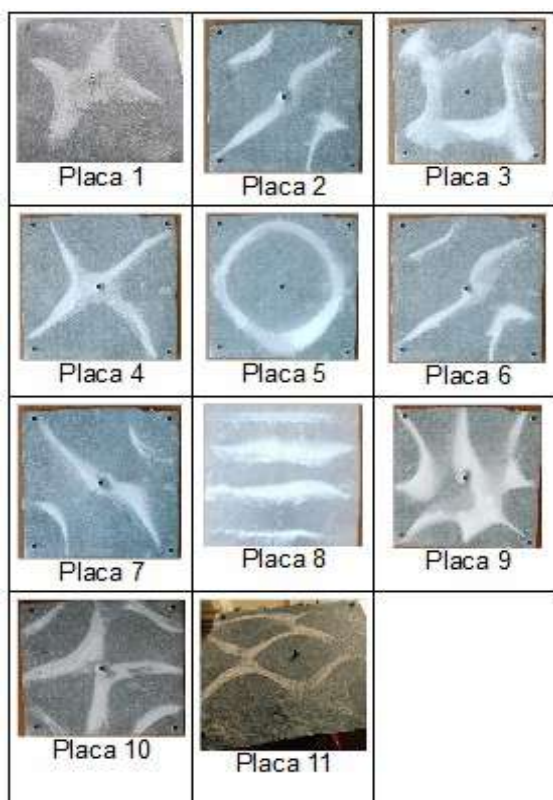
Gràcies a aquest muntatge les ones estacionàries es transmeten a la placa metàl·lica que origina el desplaçament del bicarbonat de sodi repartit per sobre de forma homogènia, tot i que només en determinades freqüències.

D'aquesta forma s'obtenen les figures de Chladni ja que s'ha acumulat el bicarbonat en certs punts de la placa on la vibració és mínima, formant les línies nodals.

Cal tenir en compte algunes precaucions alhora del muntatge perquè si no es realitza correctament poden influir en el resultat; sobretot és necessari que la placa sigui pràcticament quadrada i llisa intentant que no es ratlli. Això es pot aconseguir utilitzant una serra mecànica per plaques de metall mentre que amb una convencional es poden provocar irregularitats en els contorns i originar pujades i baixades lleugeres al llarg a peça.

5.5 RECOLLIDA I ANÀLISI DELS RESULTATS

Tot seguit es mostren les figures obtingudes durant l'experiència utilitzant els mètodes i els materials plantejats.



Il·lustració 25: Plaques de Chladni obtingudes -Font pròpia

Cal dir que cada patró es forma en una freqüència independent a altres casos explicats en diferents fonts de recerca, ja que no s'utilitza ni la mateixa base, ni la mateixa font sonora (altaveu/motor) ni la mateixa via de transmissió de la ressonància. A continuació es realitza la comparació amb les figures de Chladni obtingudes amb les originals. Tot i així gràcies al muntatge més modern respecte al que va presentar el físic alemany, ha permès obtenir moltes altres representacions de les ones estacionàries.

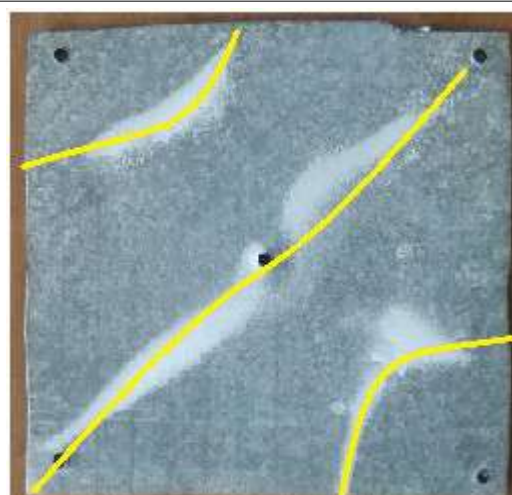
Les línies grogues marcades sobre cada figura representen de forma clara les línies nodals per facilitar l'anàlisi:



Il·lustració 26: Placa 1 -Font pròpia

Placa 1: La primera figura s'obté amb una freqüència de 88 Hz sobre la placa metàl·lica de 1,5 mm de gruix. Si la es compara amb el catàleg que va determinar Chladni s'observa que coincideix amb el primer patró amb forma de creu .

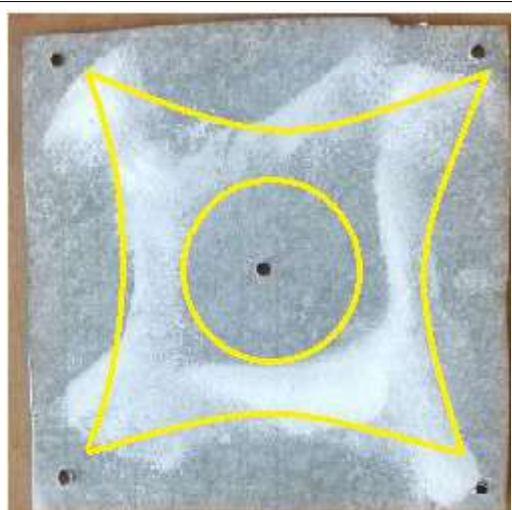
Com observació externa és necessari explicar que les línies nodals no es defineixen amb molta definició segurament a causa de les irregularitats de la placa.



Il·lustració 27: Placa 2 -Font pròpia

Placa 2: Quan el generador de freqüències marca els 102 Hz es forma la imatge adjuntada tot i tractar-se d'una figura de transició ja que no coincideix amb cap dels patrons de Chladni.

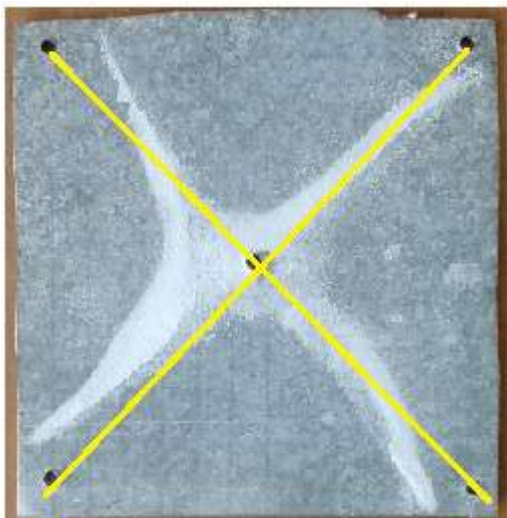
En aquest cas s'aprecien amb força claredat les línies nodals i les corbes que mostren.



Il·lustració 28: Placa 3 -Font pròpia

Placa 3: El moment en què $f_3 = 124$ Hz es forma una nova figura geomètrica però no de Chladni. Correspon a un estat de transició ja que s'observen les dues figures diferents per ordre de menys a més freqüència començant pel centre; posteriorment el cercle creixerà i compondrà la figura 5. Tot i així abans es formara una altra figura en forma d'ix.

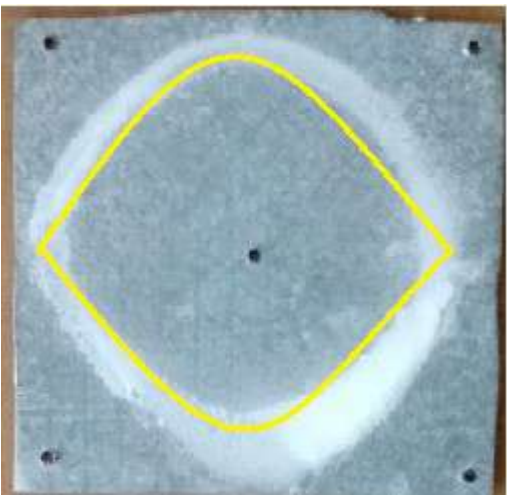
Com a resultat d'utilitzar una placa amb forces irregularitats és difícil reconèixer el patró.



Il·lustració 29: Placa 4 -Font pròpia

Placa 4: Esmentat en l'anàlisi de la placa 3, es forma una creu amb forma d'ix si es manté una freqüència de 131 Hz en aquest cas. Es defineix com la segona figura de Chladni ja que la trobem representada en els seus esquemes.

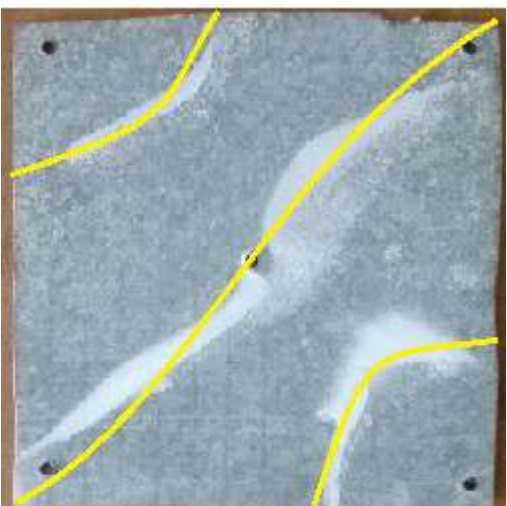
S'ha format una imatge nítida on s'aprecien clarament les línies nodals, per tant no ha afectat gaire l'estat de la base.



Il·lustració 30: Placa 5 -Font pròpia

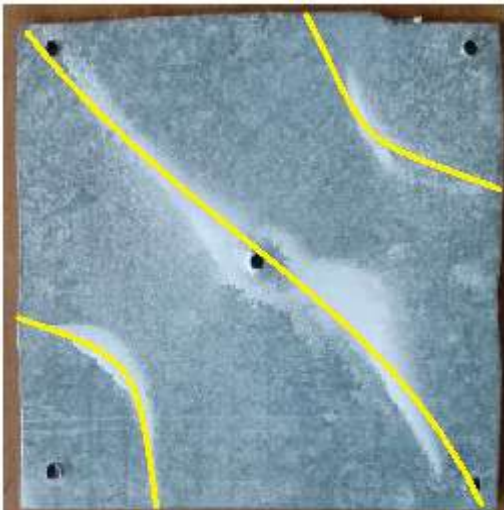
Placa 5: Com indicava la placa 4 de transició s'ha originat un cercle o bé un rombe amb les puntes força arrodonides i de costats iguals. S'ha format en una freqüència de 161 Hz i correspon a la tercera figura de Chladni.

Igual que en el cas anterior les línies nodals determinen la figura amb molta definició.



Il·lustració 31: Placa 6 -Font pròpia

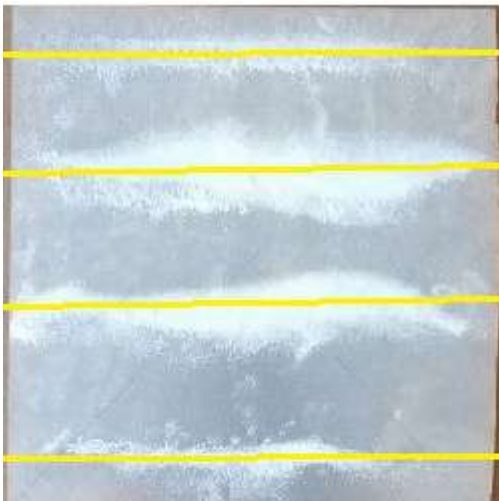
Placa 6: Aquesta figura té les mateixes formes que la placa 3 tot i formant-se a una freqüència de 204 Hz. Podem dir, per tant, que per dues freqüències diferents poden sorgir dos patrons iguals. Com que no apareix en els esquemes d'Ernest Chladni s'interpreta que és una figura de transició de la següent placa.



Il·lustració 32: Placa 7 -Font pròpia

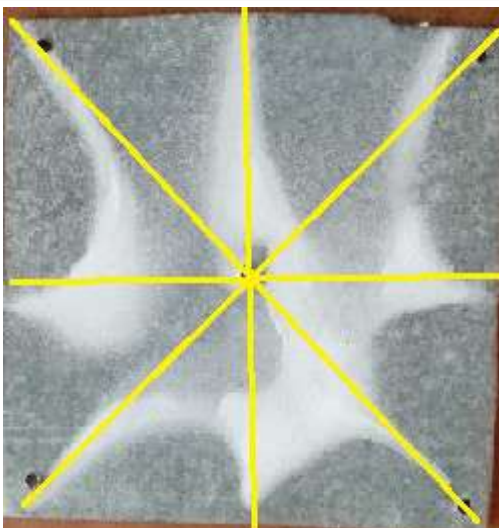
Placa 7: Aquest model originat correspon a la inversa de la placa anterior i s'ha format amb una freqüència de 224 Hz. És el cinquè patró que Chladni va recollir i es defineix com una de les seves figures.

No és difícil reconèixer el dibuix respecte altres casos perquè s'observa clarament la diagonal corbada que travessa la placa i les figures dels dos vèrtexs.



Il·lustració 33: Placa 8 -Font pròpia

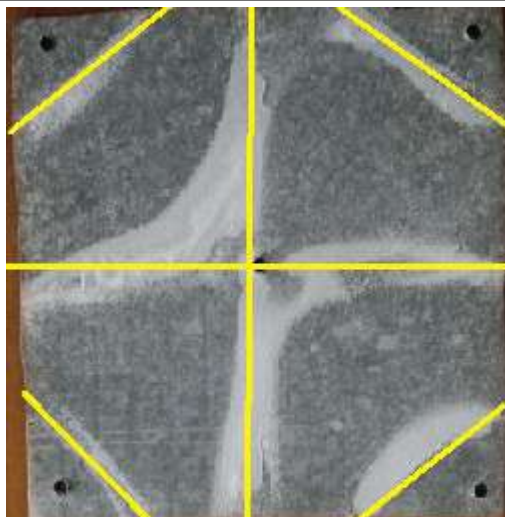
Placa 8: En aquest cas s'ha format la imatge sobre una base d'alumini de 1 mm d'amplada. Tot i així en el 371 Hz s'ha format el sisè patró de les figures de Chladni amb força definició de les quatre línies nodals horitzontals.



Il·lustració 34: Placa 9 -Font pròpia

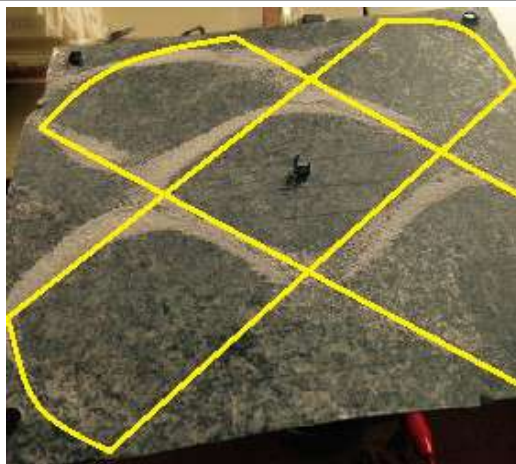
Placa 9: Com en la majoria de mostres s'ha format el patró sobre la placa metàl·lica quan $f_9 = 419$ Hz. Concorda amb l'onzena imatge de les figures de Chladni i alhora és una composició de les plaques 1 i 4 ja que està formada per una creu i una ix.

Tot i que el centre de la figura està poc definida, els extrems llargs i prims permeten identificar la placa.



Il·lustració 35: Placa 10 -Font pròpia

Placa 10: Igual que a la placa 9 i altres figures de Chladni, la imatge 10 està composta per dos patrons anteriors: l'1 i el 5 considerant que el rombe ha augmentat les seves dimensions i al centre s'ha format una creu. En aquest cas quan $f_{10}= 488\text{Hz}$, el bicarbonat sòdic ha format amb bona definició les línies nodals. Cal dir que s'identifica com la dotzena figura de Chladni.



Il·lustració 36: Placa 11 -Font pròpia

Placa 12: La següent placa no s'ha originat fins que $f_{11}= 747\text{Hz}$. Està formada per cinc rombes ovalats i alineats tot i que a la imatge no es pot apreciar del tot a causa que la foto adjunta està presa des d'una altra perspectiva. Correspon a la divuitena figura de Chladni i s'identifica sense complicacions ja que les línies nodals defineixen la imatge amb molta nitidesa.

5.6 CONCLUSIONS

Gràcies a l'experiència s'ha pogut visualitzar les ones estacionàries a dues dimensions on les línies nodals es formaven a les zones de la placa on la vibració era casi nul·la. És a dir, s'ha consistit un reconeixement indirecte tenint en compte que les ones són de caràcter tridimensional.

De les onze figures analitzades només tres són de transició. En canvi les altres vuit corresponen a les figures de Chladni que en el seu moment el físic alemany va traslladar al paper. Per aquesta raó es poden corroborar els resultats finals ja que s'ha establert una relació anàloga. A part, s'ha comprovat que molts dels patrons sorgeixen de la base d'altres imatge o fins i tot són la complementació de dues figures anteriors.

Tot i que hi ha imatges molt clares i nítides, la majoria s'han vist influenciades per l'estat de la base que presentava moltes irregularitats formades alhora d'obtenir el tall de les dimensions necessàries.

Durant l'execució i l'obtenció dels resultats s'han produït alguns imprevistos que han condicionat el nombre de mostres obtingudes i la seva qualitat.

Per exemple, s'ha recorregut fins a tres muntatges diferents abans d'escollir el correcte el qual s'ha mantingut al llarg de tota la pràctica. També ha sorgit la necessitat de canviar d'altaveu a la meitat del procediment per un de menys potent ja que va deixar de funcionar.

Malgrat tot s'ha aconseguit l'objectiu principal de l'estudi tenint en compte la complexitat de la majoria d'experiències d'acústica.

6. TUB DE KUNDT

6.1 OBJECTIUS

L'objectiu principal és l'estudi de les ones estacionàries formades a l'interior d'un tub de metacrilat. Aquesta investigació vindrà pautada per la determinació de la velocitat del so, la visualització del fenomen de la ressonància i la identificació de les parts d'una ona.

6.2 INTRODUCCIÓ

August Adolf Eduard Eberhard Kundt (novembre de 1839 – maig de 1894) va ser un físic alemany destacat dins l'estudi de la visualització i el tractament de les ones sonores i lluminoses a part dels camps magnètics. Tot i començar els seus estudis sobre l'astronomia, va acabar dedicant-se al món de la física fins a ser professor a la Universitat de Berlín i de l'Escola Politècnica Federal de Zúrich.



Il·lustració 37: August Kundt
-Font: <http://tecnoedu.com>

Al 1866 va publicar l'experiment del tub de Kundt que va ser el més important que va realitzar el físic dins el camp del so i l'acústica. Inicialment pretenia estudiar les ones estacionàries i més tard hi va calcular la velocitat del so en diferents gasos. Tot i així va ser Wilhelm Eduard Weber que va adonar-se que fregant un tub de vidre horitzontal, el suro de l'interior es desplaçava, però Kundt va adoptar l'experiment i va donar explicació a aquest fenomen i hi va realitzar estudis posteriors.

El físic alemany va descobrir que emetent ones longitudinals a

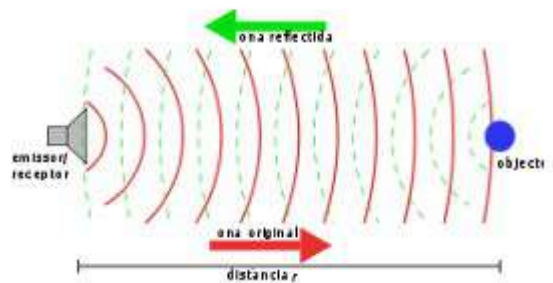
un tub de vidre horitzontal amb els dos extrems oberts i amb pols de *Lycopodium* (una planta de fulles petites i simples) aquestes partícules es distribuïen homogèniament al llarg del tub. En canvi, si hi havia un extrem tancat, es distribuïen acumulant-se en punts concrets i en pilons de diferent mida.

Actualment s'ha modernitzat l'experiment i s'utilitza un altaveu com a font sonora en lloc d'un cable metàl·lic. A més s'utilitza per mesurar la velocitat del so i estudiar les impedàncies acústiques com gasos o membranes.

6.3 FONAMENTS TEÒRICS: Les ones estacionàries

Recordem que la interferència consisteix en una superposició de dues o més ones depenent de l'amplitud i la longitud de cadascuna. Un cas d'aquest fenomen són les ones estacionàries ja que es produeixen sempre i quan es troben un obstacle que impedeixi la seva propagació i obliga el seu reflex interferint amb l'ona incident. Per tant es sobreposen dues ones de mateixos paràmetres però en sentit contrari. Normalment s'originen en espais limitats on l'energia s'acaba perdent a causa del fregament amb l'obstacle, que provoca finalment la seva dissipació.

Si suposem que la ona original (incident) es desplaça cap a la dreta, la seva equació d'ona correspondrà a $y_i(x,t) = A_i \sin(\omega t + kx)$ mentre que l'equació de l'ona reflectida que es desplaça en sentit contrari serà $y_r(x,t) = A_r \sin(\omega t - kx)$.



Il·lustració 38: Ones estacionàries -Font: <http://web.ula.ve>

L'oscil·lació (y) de qualsevol punt de l'ona produïda per la interferència dels dos moviments ondulatoris ve representada per la

suma de les seves equacions: $y(x,t) = y_i(x,t) + y_r(x,t) = A_i \sin(\omega t + kx) + A_r \sin(\omega t - kx)$.

En la font de l'ona $x=0$ i per tant, no s'ha produït cap oscil·lació ja que és igual a 0. D'aquesta forma demostrem que l'ona reflectida i incident tenen la mateixa freqüència, amplitud i longitud d'ona però són de sentit contrari:

$$y(0,t) = (A_i + A_r) \sin \omega t$$

$$0 = A_i + A_r$$

$$A_i = -A_r = A$$

Ara podem determinar que l'equació de l'ona estacionària és $y(x,t) = A \sin (wt + kx) + (-A)\sin (wt - kx)$. L'expressió final l'obtenim si traiem factor comú a A i apliquem la relació trigonomètrica $\sin Z - \sin B = 2\sin \cdot 1/2 (Z-B) \cdot \cos 1/2 (Z+B)$:

$$y(x,t) = 2 \cdot A \sin(kx) \cdot \cos(wt)$$

Com que no correspon a una ona que es propaga, determinem que es tracta d'un moviment harmònic simple on l'amplitud depèn del punt, ja que hi ha punts amb amplitud màxima on la pressió és mínima (ventre) i viceversa (node).

Si sabem el valor de l'amplitud en els nodes, podem identificar la seva posició perquè $k = 2\pi/\lambda$: $x = n\lambda / 2$, on $n=0,1,2,3,\dots$ tenint en compte que només pren nombres positius. Cada node està separat del següent a una distància de $\lambda / 2$, igual que entre els ventres.

En el cas que sapiguem la longitud podem determinar la amplitud aïllant-la de la equació anterior: $\lambda = 2L/n$. Com que l'expressió velocitat= $\lambda \cdot f$ relaciona la longitud d'ona i freqüència: $f = (v/2L) \cdot n$.

6.4 MATERIAL I MUNTATGE

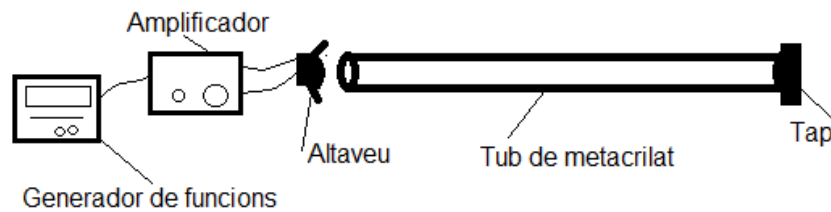
Per dur a terme la següent experiència són necessaris els següents objectes que formaran el Tub de Kundt:

- Tub de metacrilat
- Boletes de porexpan
- Altaveu
- Amplificador
- Cinta mètrica
- Cables connectors
- Generador de funcions

En general s'utilitza també un oscil·loscopi tot i que no és necessari. En el meu cas no l'he fet servir i a part, he creat uns suports de cartró ploma amb l'ajuda d'un compàs, regla i cúter perquè el muntatge sigui més estable i senzill de fer servir.

Inicialment es connecta l'altaveu a un amplificador unit a un generador de freqüències com pot ser una aplicació per *smartphone* o un programa informàtic per ordinador.

Tot seguit es col·loca l'altaveu en un dels extrems del tub de metacrilat mentre que en l'altre s'hi posa un tap.



Il·lustració 39: Muntatge del tub de Kundt -Font pròpia

El generador de freqüències proporciona un senyal audible que posteriorment és amplificat per l'altaveu (i l'amplificador) transmès a l'interior del tub. Les ones sonores impacten elàsticament contra un obstacle al final del tub provocant la seva reflexió. D'aquesta forma s'origina una interferència destructiva o constructiva ja depenent dels paràmetres i la zona on incideixin les dues oscil·lacions. Per això en unes condicions determinades les boletes de porexpan comencen a vibrar i a desplaçar-se per l'interior del tub fins a interpretar en tres dimensions les ones estacionàries.

6.5 RECOLLIDA DE RESULTATS I DADES

Seguint el procediment esmentat s'obtenen els següents resultats fotografiats tenint en compte que la longitud del tub és d'un metre:

a) Quan la n és igual a 1 es necessita una freqüència de 117Hz perquè es formi el primer harmònic, el fonamental. S'observa un ventre i un node ja que la part dreta de l'oscil·lació encara està en vibració.

Perfil A:



Il·lustració 40: Perfil del primer harmònic -Font pròpia

Ventre

Node

Alçat A:



Il·lustració 41: Alçat del primer harmònic -Font pròpia

b) Tot seguit si n correspon a 2 es necessita una freqüència de 219 Hz per la formació del segon harmònic. Es diferencia un ventre complet i la meitat d'un altre, a part dels dos nodes que s'aprecien tant en el perfil com l'alçat.

Perfil B:

Ventre



Il·lustració 42: Perfil del segon harmònic -Font pròpia

Ventre

Alçat B:

Node

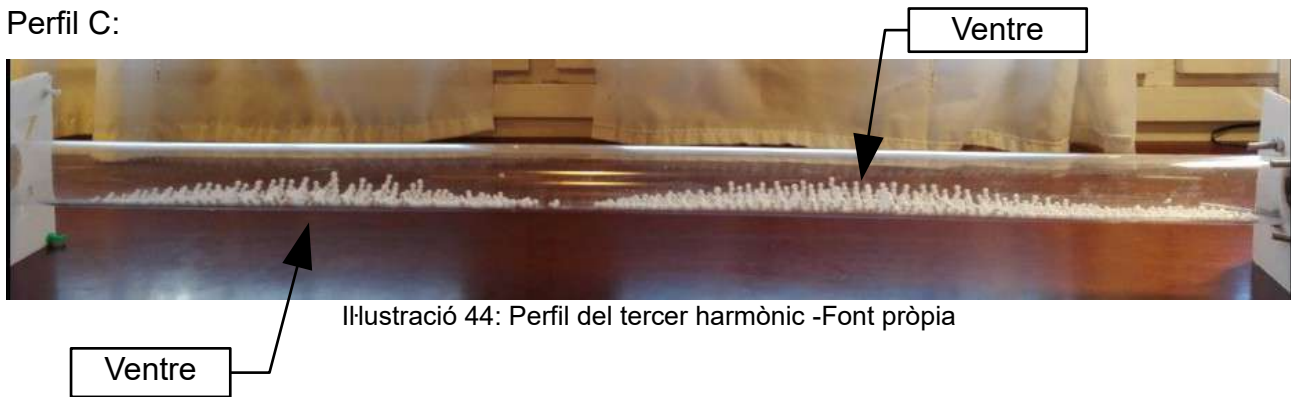


Il·lustració 43: Alçat del segon harmònic -Font pròpia

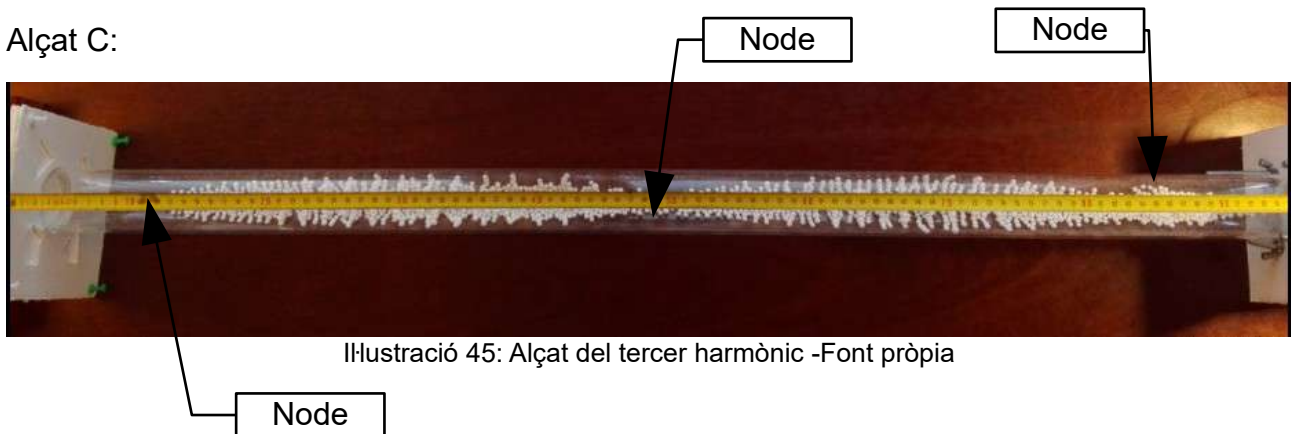
Node

c) Finalment s'aprecia el tercer harmònic ($n=3$) quan el generador de freqüències marca els 378 Hz. En les imatges podem distingir dos clars ventres igual que els dos nodes de l'esquerra. En canvi en els últims 20cm del tub (zona de la sortida de les ones acústiques) hi ha un grup considerat de boles de porexpan en vibració tot i que no acaben de definir un nou ventre.

Perfil C:



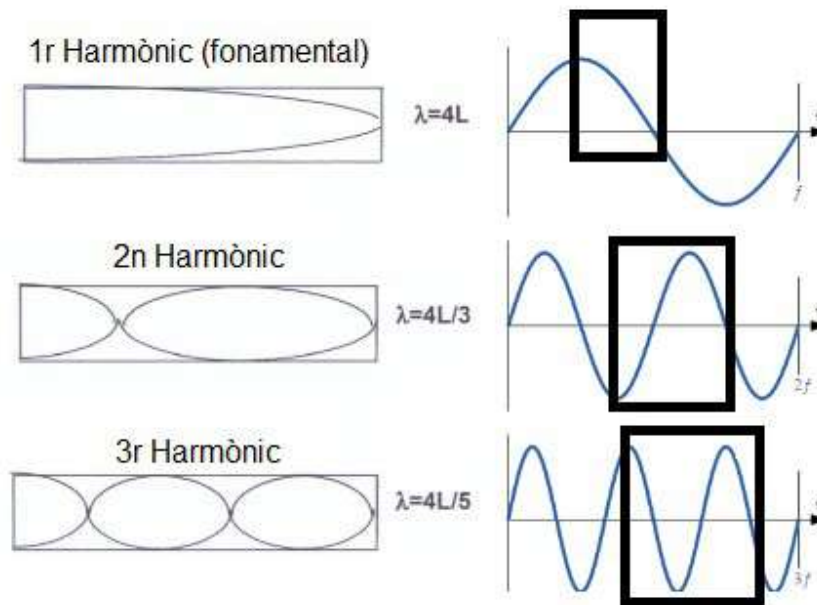
Alçat C:



6.6 TRACTAMENT DELS RESULTATS

Per calcular la velocitat del so durant l'emissió de diferents ones dins el tub s'aplica la fórmula que relaciona la longitud d'ona amb la freqüència: $v=f \cdot \lambda$. El valor de la freqüència ve donada pel generador mentre que la longitud l'obtenim fent l'equivalència del primer harmònic amb els dos següents:

Com s'observa en la il·lustració, si es considera que l'altaveu es troba a l'esquerra, l'amplificador sempre és un màxim, mentre que l'altre extrem del tub on hi ha col·locat el tap, sempre resulta mínim. Respecte això, la primera ressonància es produirà amb una longitud d'ona $\lambda/4$ ja que es forma un quart d'ona. Tot seguit a la segona hi haurà una semilongitud del tub ($\lambda/2$) més un quart ($\lambda/4$). Finalment quan n és igual a 3 s'esdevé la tercera ressonància formada per dues semilongituds $[(\lambda/2) + (\lambda/2)]$ del tub més un quart ($\lambda/4$). Establint aquestes equivalències es pot saber quan val la longitud d'ona de cada cas respecta la longitud del tub.



Il·lustració 46: Primers 3 harmònics en el tub de Kundt amb un extrem obert -Font pròpia

Com que la longitud del tub és d'un metre obtenim els valors de les longituds d'ona que es poden apreciar a la taula, igual que el de la velocitat del so per cada ressonància:

| n | Freqüència (Hz) | Longitud d'ona (m) | Nº nodes | Nº ventres | Velocitat (m/s) |
|---|-----------------|--------------------|----------|------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 117 | 4 | 1 | 1 | 468 |
| 2 | 219 | 1,3 | 2 | 2 | 284 |
| 3 | 378 | 0,8 | 3 | 3 | 302,4 |

Per tal d'aconseguir una dada general de la velocitat acústica pràctica és necessari calcular la mitjana dels tres valors donats:

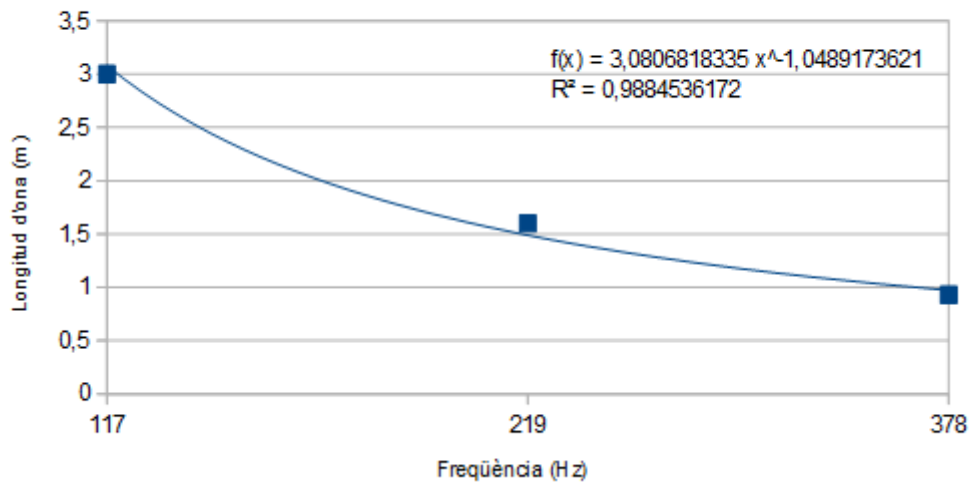
$$\bar{V} = (468 \text{ m/s} + 284 \text{ m/s} + 302,4 \text{ m/s})/3 = \mathbf{351,47 \text{ m/s}}$$

A partir de l'equació $\lambda = v/f$ s'obté una gràfica utilitzant les dades obtingudes com la velocitat pràctica, la longitud d'ona i la freqüència:

| Freqüència (Hz) | Longitud d'ona |
|-----------------|----------------|
| 117 | 3 |
| 219 | 1,6 |
| 378 | 0,93 |

Velocitat del so= 351,47 m/s

Gràfic Longitud d'ona - freqüència



A partir dels punts de dispersió s'observa una recte de tendència que gràcies a la seva l'equació es pot saber que es tracta d'un gràfic potencial. També s'observa un corrent de correlació del 0,988.

Una forma de corroborar el valor de la velocitat consisteix en calcular la teòrica utilitzant la fórmula de la velocitat del so on la constant té un valor de 1'40, la massa molar és de 0'0288 kg/mol i la pressió és igual a 8'31 J/(K·M):

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{(1,40 \cdot 8,31 \cdot 297,5) / 0,0288} = 346,67 \text{ m/s}$$

D'aquesta forma podem obtenir el gràfic λ - f quan la velocitat és de 346,67 m/s i el es pot comparar amb l'anterior:

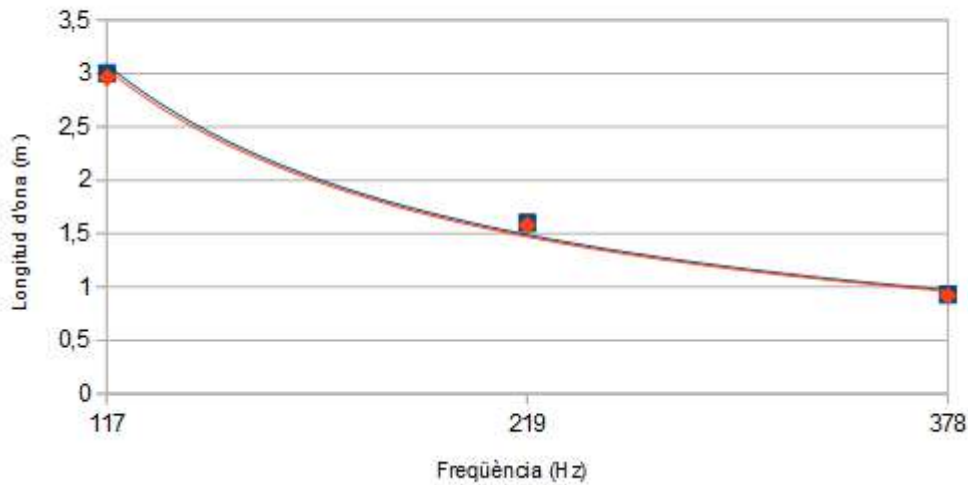
| Freqüència (Hz) | Longitud d'ona (m) | |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|
| | $v = 351,47 \text{ m/s}$ | $v = 346,67 \text{ m/s}$ |
| - | $v = 351,47 \text{ m/s}$ | $v = 346,67 \text{ m/s}$ |
| 117 | 3 | 2,96 |
| 219 | 1,6 | 1,58 |
| 378 | 0,93 | 0,92 |

| | |
|---|-------------------|
| ■ | Quan $v = 351,47$ |
| ■ | Quan $v = 346,67$ |

$f(x) = 3,0806818335 x^{-1,0489173621}$
 $R^2 = 0,9884536172$

$f(x) = 3,0390184037 x^{-1,0466645971}$
 $R^2 = 0,988570865$

Gràfic Longitud d'ona - freqüència



En el gràfic anterior ens mostra que les dues línies de tendència són molt semblants perquè tenen una equació i un coeficient de correlació força iguals tot i que les dades s'han obtingut a partir d'una velocitat diferent.

6.7 CONCLUSIONS

Posteriorment a l'estudi es pot concloure que s'ha aconseguit visualitzar els harmònics esperats a unes determinades freqüències tot i que en el tercer ha faltat part d'un ventre. Per tant s'ha apreciat el perfil d'una ona igual on s'han distingit els nodes i ventres amb nitidesa. També s'ha deixat constància del fenomen de la ressonància quan el tub té un extrem obert.

Gràcies a l'estudi físic que s'ha dut a terme, s'ha calculat i comparat el valor de la velocitat pràctica i teòrica del so. Com que els dos valors són molt propers es pot corroborar la velocitat del so dins el tub de Kundt (351,47 m/s), ja que la velocitat teòrica és de 346,67 m/s. A més la comparativa dels dos gràfics és molt anàloga: les seves respectives línies de tendència són pràcticament idèntiques malgrat que la longitud d'ona s'hagi obtingut a partir de velocitats diferents. Finalment, com que els coeficients de correlació de cada recte són molt semblants i molt aproximats a 1 pot servir per reafirmar la comparativa.

7. CONSIDERACIONS FINALS

En general ha estat difícil comprendre alguns conceptes relacionats amb el so però ho he aconseguit dedicant-hi temps i esforç. Vull destacar les complicacions sorgides durant la pràctica de la placa de Chladni tenint en comte que es tractava d'un estudi bidimensional i que vaig haver de recórrer a tres muntatges diferents abans d'obtenir el mètode correcte. També cal destacar que en la meitat de l'obtenció de resultats l'altaveu es va avariar i va obligar-me a substituir-lo per un de menys potent. A més, en no disposar d'una serra mecànica, la placa metàl·lica presentava moltes irregularitats que van influir en la definició de les figures.

M'hauria agradat profunditzar de forma pràctica en el camp de l'audició però els estudis acústics requereixen un temps, un esforç i una dedicació més profunds i els meus coneixements inicials eren massa elementals.

Malgrat tot estic molt satisfet del resultat del treball i no em penedeixo d'haver escollit aquesta temàtica. M'he sentit molt còmode i realitzat en tot aquest estudi; considero que els meus coneixements sobre aquests camps han millorat de forma considerable, igual que la capacitat de resoldre problemes imprevistos i d'imaginar, assimilar i comprendre conceptes abstractes molt difícils d'estudiar.

8.BIBLIOGRAFIA

Llibres:

- Mercadé, Joan, Serra, Salvador i Armengol Montserrat. *Física de 2n de batxillerat*. Editorial McGrae-Hil/Interamèrica de España, S. A. U. Madrid, 2009.

-Directores: R.Putz y R. Pabs. Sobotta, *Atlas de la anatomia huana; Cabeza, Cuello, Miembro Superior*. Editorial Medica Panamericana.

-Grupo Crón de Didáctica de la Física, *Física segundo de Batchillerato*. Editorial Santillana 2007.

Llibres en suport digital:

Thomas D Rossing, Neville H. Fletcher, *The Physics of Musical Instruments 1991*.
<http://kellerphysics.com/acoustics/Lapp.pdf> [Consulta: 8 d'agost de 2017]

Informacions extretes d'internet:

-Ernest Vidal Garcia LA CIMÀTICA EN DUES FREQUÈNCIES SIMULTÀNIES. Publicació: octubre de 2015 [http://premisrecerca.udg.edu/Portals/0/CS/Premis2016/1838-tdr15vidalernest-memoria-annexos\(2\).pdf](http://premisrecerca.udg.edu/Portals/0/CS/Premis2016/1838-tdr15vidalernest-memoria-annexos(2).pdf) [Consulta: 16 d'agost de 2017]

-Juan Carlos Sánchez Reyes, Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias, Dep. Física; Tubo de Kundt. Publicació: 2004.

http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/sanrey/tubo_kundt.pdf [Consulta: 7 de Setembre de 2017]

-María Alfonso Moro Olga Arroyo Gascón Computación I, 1º Grado en Física, PLACAS DE CHLADNI, 2011. <http://popia.ft.uam.es/aknebe/page3/files/Computacion/Project-SampleReport.pdf> [Consulta: juliol - setembre 2017]

-Universidad de Alicante, Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal (2005); Ondas estacionarias en una placa cuadrada: Figuras de Chladni
http://www.dfists.ua.es/experiencias_de_fisica/pdfs/8_chladni.pdf [Consulta: 20 d'Agost de 2017]

-Universidad de Oviedo: Acústicas. Publicació: setembre de 2010
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Temall.2.4.ACUSTICAS.B.pdf> [Consulta: 13 de maig del 2017]

-UPC: El Soroll Caracterització Física. Publicació: març del 2006
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6031/05.pdf?sequence=6&isAllowed=y> [Consulta: 24 d'agost de 2017]

