

Qualitats del so



Alumne: Ariel Hernán Córscico

Curs: 2n B Batxillerat

Centre: INS Pere Ribot

Tutora: Paz González

Data: 18-01-2013

Índex

0. Introducció.....	1
1. QUÈ ÉS EL SO? COM ES FORMA?.....	3
1.1 Moviment vibratori harmònic simple.....	4
1.2 Moviment ondulatori.....	5
2. QUALITATS DEL SO. PSICOACUSTICA.....	6
2.1 La sonoritat (volum).....	6
2.1.1 Concepte.....	6
2.1.2 Estudi físic.....	6
2.2 El to (nota).....	8
2.2.1 Concepte.....	8
2.2.2 Estudi físic.....	8
2.3 El timbre (instrument).....	9
-Introducció teòrica.....	9
2.3.1 Concepte.....	10
2.3.2 Estudi físic.....	10
-Transformades de Fourier.....	12
-Espectre continu. Soroll.....	12
3. FUNCIONAMENT DE L'OÏDA.....	13
4. ENREGISTRAMENT I REPRODUCCIÓ DEL SO.....	15
4.1 Enregistrament.....	15
4.1.1 Principis de l'enregistrament del so.....	15
4.1.2 Funcionament dels micròfons.....	15
4.2 Reproducció.....	16
4.2.1 Principis de l'enregistrament del so.....	16
4.2.2 Funcionament dels altaveus.....	27
5. ANÀLISIS GRÀFICS.....	18
5.1 Comparativa segons volum.....	18
5.2 Comparativa segons nota.....	19
5.3 Comparativa segons instrument.....	20
6. CONCLUSIONS.....	25
BIBLIOGRAFIA.....	26
Annex 1: Anàlisi soroll de fons.....	27

Annex 2: Taules de dades.....	28
Annex 3: Procediment de presa de mostres.....	29

0. Introducció

Nosaltres sentim moltes coses cada dia, però per què? Què és el que sentim en veritat? Com podem sentir-ho? Per què quan hi ha un cotxe passant per davant de casa nostra, nosaltres sabem perfectament que és un cotxe, i no un ocell? Per què quan escoltem una cançó, podem entendre i interpretar els diferents sons? Com pot un mateix altaveu reproduir tants sons diferents a la vegada? I la pregunta més difícil de respondre per mi: Com pot sonar tant diferent una mateixa nota produïda per diferents instruments? Si les vibracions per segon son les mateixes!

És interessant parar-nos a pensar en com evoluciona la nostra manera de respondre aquestes preguntes, o com a mínim d'intentar-ho. Quan som petits, molt petits, ni tant sols ens preocupem per això, simplement sabem que es produeixen uns sons i nosaltres els sentim, sense qüestionar-ho. I a qui li importa com podem produir un simple crit, si sabem que els altres el poden sentir i amb això cridem la seva atenció? No cal saber més.

Després hi ha una segona etapa, en la que tenim prou coneixements com per començar a fer-nos preguntes, però no els suficients com per donar-hi resposta. És una etapa angoixant i frustrant, perquè sovint arribes a sentir-te inútil. Jo vaig passar molt de temps en aquesta situació, preguntant-me molts "per què?" sense trobar cap "perquè".

I finalment, vas adquirint poc a poc coneixements amb el transcurs dels cursos acadèmics i comences a saber quines preguntes fer exactament per arribar a trobar alguna resposta. Amb una mica d'interès podem entendre el funcionament del so i tot el relacionat, però cal fer un petit esforç.

Un altre motiu que m'ha impulsat a triar aquesta temàtica per fer el treball de recerca és la meva passió per la música, la qual porto temps estudiant, i que darrerament el meu professor en aquesta matèria, l'Adrien Faure, m'està ensenyant com tractar el so a les gravacions i com es comporta. Això m'ha portat a trobar interessant aprendre com s'origina tot, i així poder entendre-ho millor.

Qualitats del so

Començaré per plantejar la hipòtesi del treball: A més d'investigar i aprendre què és i com es comporta el so, el meu objectiu marcat més important és esbrinar què fa que un so sigui més agressiu o suau, i què fa que sigui brillant. En definitiva descobrir que diferencia un timbre d'un altre.

La manera en què he estructurat el treball ha estat començant per fer una breu explicació introductòria sobre què és el so. Hi menciono i explico el moviment vibratori harmònic simple i el moviment ondulatori.

El segon capítol és l'explicació i estudi físic de cadascuna de les tres característiques dels sons: intensitat, altura i timbre.

Posteriorment dedico un apartat al funcionament de l'oïda humana, i un altre a l'enregistrament i la reproducció dels sons, tot explicant en què consisteixen respectivament i com es duen a terme.

Rere la part teòrica, passo directament a la part experimental del treball: intento esbrinar, mitjançant preses de mostres de diferents sons, què fa que un so el percebem d'una determinada manera o d'una altra.

Per fer-ho m'ajudo d'un material cedit per l'institut que serveix per fer mostres de diferents fenòmens i analitzar-les. L'aparell es diu MultiLog, i el programa informàtic MultiLab. El seu funcionament queda explicat en un dels annexes adjuntats al treball.

La metodologia del treball ha estat bàsicament, per la part teòrica, cerca d'informació per la xarxa, per llibres, i preguntant a coneguts que treballen o estudien al món del so. Per la part pràctica, la metodologia emprada ha estat prendre mostres dels fenòmens desitjats (diapasó a diferents intensitats, diferent nota o mateixa nota produïda per diferents instruments), i posteriorment analitzar-les a l'ordinador per establir relacions entre les diferents variacions entre els fenòmens.

1. QUÈ ÉS EL SO? COM ES FORMA?

El so, tal com nosaltres l'entendem, es tota aquella vibració que ha provocat una ona, que s'ha propagat a través de l'aire i ha arribat al nostre timpà fent-lo vibrar. Tot això succeeix molt ràpid. Quan nosaltres, per exemple, colpegem una taula amb els artells, la fusta, per poc que sigui, es posa a vibrar. Depenent de la densitat de la fusta en si, pot ser que vibri més o menys, més ràpid o més lent, etc, i per això serà diferent el so quan la taula sigui de pi que quan sigui de caoba.

Tornant a l'instant en que piquem a la taula, o més en general, quan originem el so, el que estem produint en aquest moment és un **moviment oscil·latori harmònic**. Aquesta vibració és molt petita, tant que la majoria de vegades no es pot apreciar a simple vista (com en el cas de la taula de fusta), i d'altres si (com a les cordes d'una guitarra), però és la suficient com per generar una ona que es propaga per l'aire. Com que aquestes ones aèries no es poden veure, ja que l'aire és invisible, és més fàcil entendre aquest fenomen a l'aigua. Quan tirem una pedra al mig d'una piscina, es generen unes ones circulars concèntriques, amb origen al punt on ha caigut la pedra, i que es van propagant fins arribar a les parets de la piscina (límit de la substància de propagació), és a dir, les circumferències es van fent més grans a mesura que s'allunyen del centre. La distància entre les crestes d'aquestes ones és periòdica, i se l'anomena **longitud d'ona**.

Doncs bé, quan pertorbem l'estat d'equilibri d'un cos, i el fem vibrar, produeix unes ones que es comporten igual que les ones a la superfície de la piscina, tot i que en aquest cas les ones, en comptes de ser bidimensionals, amb forma circular, són tridimensionals, amb forma esfèrica. Existeixen diferents tipus d'ones en funció de la seva forma, sent la més senzilla (des d'un punt de vista físic) l'ona sinusoidal, que es diu així perquè és la forma de la funció matemàtica $f(x)=\sin(x)$. Ara bé, els sons que percebem habitualment no són gairebé mai sons purs, és a dir, que tinguin una sola ona sinusoidal, sinó que són una composició de varies ones: L'ona principal, que és la de major amplitud, que predomina sobre les altres, i unes ones complementàries, de menor amplitud, que poden ser poques o moltes, anomenades **harmònics**. Aquest és l'anomenat Teorema de Fourier, anomenat així pel seu descobridor, Joseph Fourier.

Qualitats del so

Però perquè nosaltres sentim el so com a tal, han de transmetre's aquestes ones fins les nostres oïdes i fer vibrar el nostre timpà. El timpà és una membrana que recull les vibracions i les transforma en senyals elèctrics que mitjançant el nervi auditiu i el sistema nerviós arriben al nostre cervell, on interpretem aquestes ones com sons.

1.1 Moviment vibratori harmònic simple.

El moviment vibratori harmònic simple és el moviment periòdic que es produeix quan hi ha una força directament proporcional al desplaçament del cos des de la posició d'equilibri, amb direcció la del desplaçament i sentit cap a la posició d'equilibri, provocant un moviment d'anada i tornada de manera indefinida.

Una partícula que es mou al llarg de l'eix x realitza un moviment vibratori harmònic simple si la seva posició varia en funció del temps seguin l'expressió:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

On:

-A: Amplitud, que és el màxim valor de x en un cicle.

$-\omega t + \varphi$: Fase.

A velocitat constant (en el cas del so, 343 m/s a 20°C i 1atm), la freqüència i la longitud d'ona son inversament proporcionals:

$$f \cdot \lambda = v = cnt$$

On: -f: Freqüència

$-\lambda$: Longitud d'ona

En el moment que pertorbem la situació d'equilibri d'un cos en repòs que presenta aquesta força de restitució proporcional al desplaçament i es provoca aquest moviment, es comença a propagar per l'aire formant ones, fenomen que coneixem com **moviment ondulatori**.

1.2 Moviment ondulatori

El moviment ondulatori és una transmissió d'energia i quantitat de moviment, **sense transport de matèria**, mitjançant la propagació d'una pertorbació anomenada ona. Les ones que conformen el so són ones mecàniques (perquè necessiten un medi per propagar-se i són causades per moviments, canvis de pressió, etc), i tridimensionals en la gran majoria de casos (quan es propaga a través de l'aire, l'aigua, etc).

El moviment ondulatori es pot entendre com una successió de moviments vibratoris harmònics simples. El gràfic d'un moviment ondulatori és la representació de l'elongació del mvhs en funció del temps.

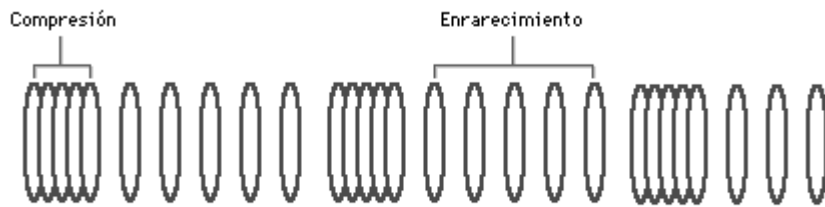


Figura 1: ona longitudinal

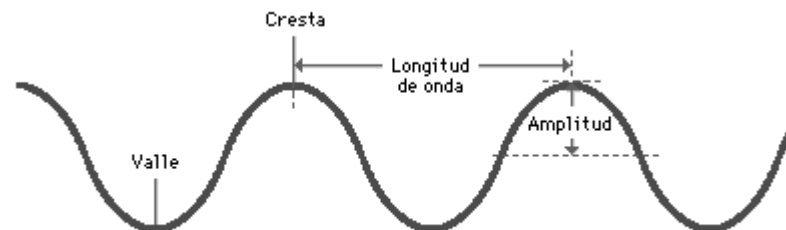


Figura 2: ona transversal

Il·lustración de Microsoft

Il·lustració 1: Moviment ondulatori.

2. QUALITATS DEL SO. PSICOACUSTICA

No tots els sons iguals, sinó que hi ha una àmplia diversitat, i per això podem interpretar què són, com són i què signifiquen. La psicoacústica estudia com entenem les variacions dels sons. Per exemple, si un so és més agut o més greu, més fort o més fluix, i quin origen té. Les qualitats del so són el to, la intensitat i el timbre, respectivament.

2.1 La sonoritat (volum)

2.1.1 Concepte

La sonoritat és la qualitat del so que nosaltres interpretem com variació del volum. La sonoritat (o intensitat) ens permet distingir entre un so més fort i un de més fluix, com quan sentim algú picant a la nostra porta (més fort) o a la porta del veí del pis de dalt (més fluix), ja que el so ha arribat atenuat per la distància que ha hagut de recórrer i per les parets que s'ha trobat pel mig.

2.1.2 Estudi físic

Físicament, definim la sonoritat com **l'amplitud d'ona**, és a dir, el valor màxim que assoleix la vibració en un cicle. Tot i això, la sonoritat està en molts casos fortament relacionada amb la freqüència. Si comparem dos sons de igual freqüència amb diferents amplituds, observarem clarament que el so amb l'ona més ample és el que sentirem més fort, però si augmentem al so que a priori percebem amb menys sonoritat, podem fer que arribi a sentir-se igual, o fins i tot més que el que tenia major amplitud, mantenint l'amplitud de l'altre amb el mateix valor. Aquest fenomen es deu a que l'oïda humana té més sensibilitat a les freqüències centrals, com estudiaré més endavant. Les comparacions dels diferents sons també les faré després.

La sonoritat també està relacionada amb el **Nivell de Pressió Sonora**, que és la variació de pressió atmosfèrica deguda a la presència d'un so en relació amb el nivell de pressió en repòs (1 atm). La unitat en què es mesura la pressió sonora és el Pascal (Pa) i les pressions sonores audibles van des del 20 μ Pa fins als 20 Pa, però com que aquest marge és molt ampli i els valors molt petits, s'acostuma a fer servir més sovint els decibels (dB), unitat de intensitat sonora, i els valors audibles van dels 0 dB (llindar d'audició) fins als

Qualitats del so

140 dB (llindar de dolor). Per determinar matemàticament la intensitat sonora es calcula;

$$B = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_0}$$

On:

- P_0 : Pressió de referència, per la qual s'agafa el valor del llindar

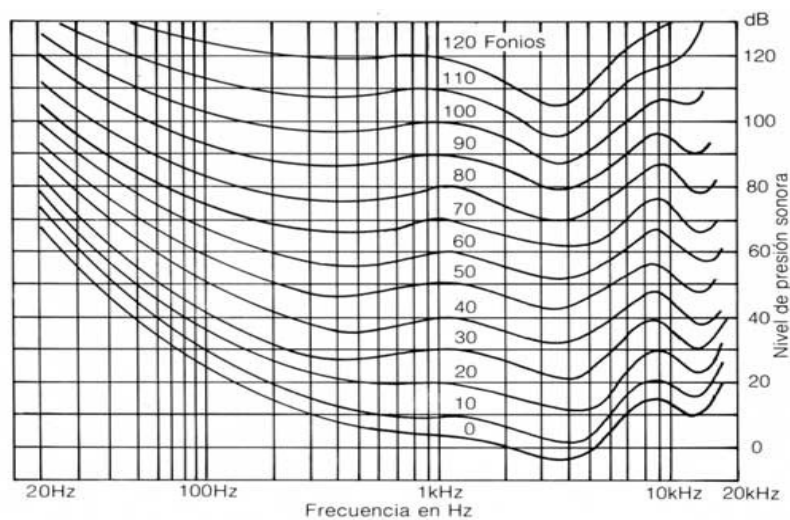
d'audició 0 dB o 20 μ Pa

- P_1 : Pressió sonora instantània.

I_0 : És la intensitat llindar. Al SI 10^{-12} W/m

I_1 : Intensitat en un determinat instant

Els nord-americans anomenats Fletcher i Munson van fer uns experiments consistents a fer sentir a unes persones amb bona audició un to pur (és a dir, amb una única ona sinusoidal) de freqüència 1 KHz amb una pressió sonora coneguda, per exemple 40 dB, i posteriorment un altre to pur amb una altra freqüència, per exemple 200 Hz, i se'ls demanava que ajustessin el volum per sentir la mateixa sonoritat que amb l'altre so, i mesuraven la pressió sonora en aquell moment. D'aquesta manera van obtenir les corbes isofòniques de Fletcher i Munson, que ens permeten definir el nivell de sonoritat (NS) d'un to qualsevol com el nivell de pressió sonora d'un to d'1 KHz igualment sonor que aquest to.



Gràfic 1: Corbes de Fletcher i Munson

Per diferenciar el nivell de sonoritat NS del nivell de pressió sonora NPS l'expressem com a **fon**. En el gràfic es pot observar clarament com un to de 100 Hz que té una pressió sonora de 60 dB sona igual de fort que un to de 5 Khz amb una pressió sonora de 40 dB, ja que els trobem sobre la mateixa corba.

2.2 El to (nota)

2.2.1 Concepte

El to (o altura) és el que ens permet diferenciar entre un so més agut i un de més greu. Per exemple, si sentim un xilòfon tocant una melodia, percebrem un seguit de notes diferents, que juntes formen el que entenem com música. Hi ha tot un estudi sobre com reacciona el cervell a les diferents combinacions de notes, si són més o menys agradables, si tranquil·litzen o estressen, etc; Jo em centraré en la física.

2.2.2 Estudi físic

Físicament, està definit directament per la freqüència de l'ona, però, així com la sonoritat també depèn de la freqüència, el to pot variar lleugerament amb la intensitat del so. Així, quan toquem una corda d'una guitarra, si la toquem més fort ens pot semblar que sona més agut que si la toquem més suau. A vegades també un so amb un timbre brillant ens pot semblar més agut que un amb un timbre més opac, tenint la mateixa freqüència i amplitud.

La freqüència es defineix com el nombre de cicles que es fan per unitat de temps, i en acústica la unitat que es fa servir són els Hertz (Hz). Un cicle és el recorregut sencer que efectua una partícula des de la seva posició central fins tornar a aquesta posició, havent passat per la seva posició màxima i mínima. Per mesurar la freqüència comptem com a cicle el de la ona sinusoidal principal, sense preocupar-nos gaire pels harmònics o ones secundàries.

L'altura dels sons té una relació matemàtica bastant simple. Coneixent la freqüència d'una nota determinada de l'escala, podem esbrinar la freqüència del semitò superior amb la fórmula:

$$F_2 = \sqrt[12]{2} \cdot F_1$$

Qualitats del so

Per exemple, coneixent que la freqüència del La de l'octava central és 440Hz, podem esbrinar la del Si_b formulant:

$$F_{Si_b} = \sqrt[12]{2} \cdot F_{LA} = \sqrt[12]{2} \cdot 440 \simeq 466,16 \text{ Hz}$$

Per trobar la freqüència del semitò inferior, en comptes de multiplicar per $\sqrt[12]{2}$ ho dividim.

També, per trobar la freqüència d'una nota a l'octava superior multipliquem la freqüència per 2. Per exemple, si $F_{LA3}=440$, $F_{LA4}=440 \cdot 2=880$

Tanmateix, per trobar la freqüència d'una nota a l'escala inferior dividim per 2.

La freqüència es defineix com el nombre de cicles que es fan per unitat de temps, i en acústica la unitat que es fa servir són els Hertz (Hz). Un cicle és el recorregut sencer que efectua una partícula des de la seva posició central fins tornar a aquesta posició, havent passat per la seva posició màxima i mínima. Per mesurar la freqüència comptem com a cicle el de la ona sinusoidal principal, sense preocupar-nos gaire pels harmònics o ones secundàries.

2.3 El timbre (instrument)

-Introducció teòrica

Com hem vist, l'ona més simple és la sinusoidal, que és la que té la forma de la gràfica de la funció $f(x)=\sin(x)$. Al món real, els sons amb ones totalment sinusoidals són gairebé inexistents. Un d'aquests sons és per exemple el d'un diapasó d'afinació, que quan se'l fa vibrar i es recolza en una caixa de ressonància produeix una ona sinusoidal amb freqüència 440 Hz (la freqüència del La central). Una flauta de bec tocada amb suavitat s'aproxima també a una ona d'aquest tipus, però en general, es pot afirmar amb certesa que la majoria de sons que sentim a la nostra vida quotidiana són ones compostes, és a dir varies ones sinusoidals que se superposen, i al sumar-les fan una ona diferent, amb una forma menys "perfecta", però amb una ona clarament predominant sobre les altres, anomenada ona fonamental. La funció d'aquesta ona és donar l'altura del so i en gran mesura la seva sonoritat. Les altres ones, anomenades harmònics, són ones de menor

Qualitats del so

amplitud (cada harmònic pot tenir amplitud pròpia) la freqüència dels quals és múltiple de la freqüència de l'ona fonamental. Si l'ona principal té una freqüència f , doncs els seus harmònics podrien ser $2f$, $3f$, $4f$, $5f$, etc. La informació de les freqüències que conté un determinat so i les seves respectives amplituds constitueixen l'espectre del so.

No obstant, no hi ha cap raó per la qual aquestes ones secundàries no puguin tenir freqüències qualsevol, sense ésser múltiples de l'ona fonamental. Aquest és el cas per exemple del so d'una campana, o d'un tambor. Aquests sons no són periòdics, motiu pel qual no se'ls pot identificar amb una nota. Les ones sinusoidals d'aquests casos en comptes d'anomenar-se harmònics s'anomenen sons parcials, l'espectre corresponent a aquests sons s'anomena espectre inharmonic.

2.3.1 Concepte

El timbre és la qualitat del so que ens permet identificar la procedència del so, és a dir, què o quin instrument l'està produint. El timbre és la qualitat més complexa d'entendre, ja que no és tant gràfica com la sonoritat (mirant l'amplitud podem dir quin és més fort o més fluix) o el to (mirant la longitud de l'ona podem dir quin to és més agut o més greu), sinó que no podem distingir a simple vista quin instrument o de quina naturalesa és el so només mirant la forma de l'ona (tot i que si que es podria deduir si el so és més suau o més "aspere", per exemple).

2.3.2 Estudi físic

Hi ha dos elements bàsics que afecten al so per determinar-ne el seu timbre.

El primer són les envolupants. L'envolupant primària és la que determina la forma en què varia l'amplitud general en funció del temps, i les envolupants secundàries determinen les variacions temporals relatives dels harmònics o parcials, depenent del tipus de so. Les envolupants primàries afecten a la manera en que es produeix el so i amb quina rapidesa es va atenuant. Hi ha quatre fases:

-L'atac: és el temps que triga el so a assolir el seu punt màxim en amplitud. Un so de percussió té un atac més curt que un so de vent, per exemple.

Qualitats del so

-Caiguda: és la fase en que el so decau de la seva amplitud màxima a la de sosteniment.

-Sosteniment: a diferència de les altres fases, no és un temps, sinó un nivell, en el qual la senyal es conservarà estable.

-Relleu: temps que triga a esvair-se des del moment que el so deixa d'ésser produït al seu origen.

Veritablement, aquesta envolupant és pròpia de sintetitzadors electrònics, però en els sons en general podem trobar un comportament molt semblant. Aquestes envolupants varien amb l'altura i la intensitat del so. Quant més agut sigui el so, més ràpida serà l'envolupant, i viceversa, i quant més fort sigui el so, es produeix un efecte equivalent a una distorsió de les ones, cosa que afegeix freqüències o reforça unes de ja presents, modificant les envolupants secundàries.

El segon són les formants, originades per l'existència de ressonàncies en els components del mecanisme de producció del so. Aquestes ressonàncies filtren el so, reforçant algunes freqüències més que d'altres. Per exemple, quan nosaltres parlem l'aire passa per diferents conductes filtrant el so com tubs que donen al so un color diferent. Cada conducte afavoreix unes freqüències diferents. Quan estem refredats l'aire deixa de sortir per la cavitat nasal, modificant aquesta ressonància. Com a conseqüència, la nostra veu sona diferent, més nasal: té un altre timbre.

El nostre cervell és capaç d'analitzar, inconscientment, els sons que percep per identificar les formants característiques d'una font sonora, i poder identificar els diferents sons emesos per la mateixa font. Així, quan escoltem música en un equip deficient, evidentment no sona igual que amb un equip més fidel, però això no ens priva de reconèixer la guitarra com a tal, o altres instruments, ja que les formants principals acostumen a estar entre els 200 i els 400 Hz. No obstant, ens seria pràcticament impossible reconèixer el baix, ja que les freqüències més greus queden eliminades.

Individualment, ni les envolupants ni les formants ens permeten definir el concepte de timbre com a tal, sinó que és una combinació de les dues idees. Per exemple, si a una nota del piano li traiem el seu atac, és a dir, la comencem a escoltar des del moment que arriba a l'amplitud màxima, sembla més aviat un instrument de vent, ja que les formants són semblants.

-Transformades de Fourier.

La transformada de Fourier és una funció de nivell matemàtic avançat que la meva tutora m'ha desaconsellat d'estudiar. En aquest treball de recerca farem servir aquesta funció per analitzar les dades recollides ja que el programa utilitzat ens permet aplicar directament la transformada de Fourier a les dades sense cap tipus de complicació. El benefici que ens aporta aquesta funció, i pel que la faré servir en l'anàlisi, és que donada una funció derivable f , que en el nostre cas seria el so que hem enregistrat, expressat en amplitud en funció del temps, ens retorna una funció g expressada en amplitud en funció de la freqüència. És a dir, si tenim una ona composta d'ones sinusoidals, en aplicar-li la transformada de Fourier veurem l'amplitud de cada una de les ones pures, o harmònics.

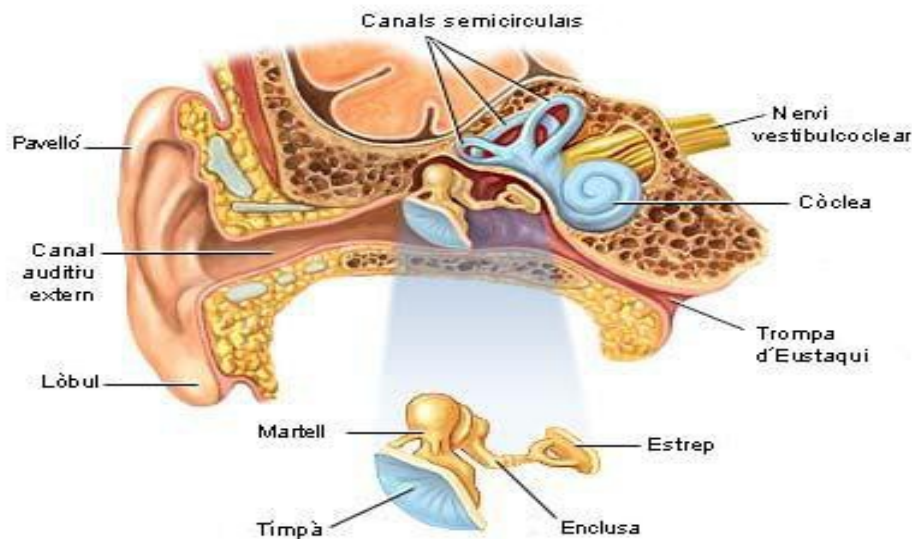
-Espectre continu. Soroll.

Hi ha un altre tipus de sons formats per harmònics molt propers entre sí. Aquests sons reben el nom de **soroll**. No tenen una fonamental predominant, sinó que hi ha més d'una ona "lluïtant" i això ens provoca una sensació desagradable, de malestar. És el cas per exemple del fregament de dues peces de metall o del so de les onades del mar.

3. FUNCIONAMENT DE L'OÏDA.

L'oïda està formada per tres parts: l'oïda externa, l'oïda mitjana i l'oïda interna.

L'oïda externa és l'encarregada de captar les ones, i està formada bàsicament per l'orella o pavelló. Les ones sonores entren pel conducte auditiu pel forat de l'orella i arriben a l'oïda mitjana. A més a més, el conducte auditiu també té la funció de protegir els components interns de l'oïda de partícules de brutícia mitjançant la cera, un compost segregat per les glàndules sebàcies i les ceruminoses encarregat de recollir la brutícia perquè no penetri.



Esquema 1: Secció de l'oïda i les seves parts.

L'oïda mitjana és l'encarregada de transformar les ones recollides per l'oïda externa en vibracions i està formada per la membrana timpànica i la cadena ossicular. Quan una ona sonora penetra pel conducte auditiu, xoca amb la membrana timpànica, produint una vibració de la mateixa, que és transmesa a la cadena ossicular, una unió de tres ossos (el martell, l'enclusa i l'estrep) que transmet la vibració fins l'oïda interna. El propi timpà actua d'amplificador, ja que té una forma similar a la d'un embut que permet multiplicar la pressió de les ones sonores, així com una xinxeta està dissenyada de forma tal que tota la força es concentri a la punta, i la cadena ossicular continua multiplicant la vibració fins la còclea.

Qualitats del so

L'oïda interna està formada per l'aparell vestibular, la còclea i el nervi auditiu. Les vibracions que arriben a la còclea exciten les fibres ciliades de l'òrgan de Corti, que generen patrons diferenciats, característics de cada freqüència. Aquestes cèl·lules generen un compost químic que produeix impulsos elèctrics que són transmesos al nervi auditiu. Aquest nervi transmet aquests impulsos elèctrics codificats al cervell, que els interpreta i ens fa sentir els sons.

4. ENREGISTRAMENT I REPRODUCCIÓ DEL SO.

4.1 Enregistrament

Enregistrar un so és traduir les vibracions sonores en senyals elèctrics o magnètics amb la finalitat de guardar aquests sons per la seva posterior reproducció, és a dir, gravar un so i emmagatzemar-lo per poder-lo tornar a sentir en qualsevol altre moment. La primera vegada que es va enregistrar un so ho va fer Thomas Edison al 1877. Des de llavors s'han millorat les tècniques, i és el fonament principal de la indústria musical, permetent gravar les cançons en suports físics i vendre'ls.

4.1.1 Principis de l'enregistrament del so

L'enregistrament del so es basa en recollir les variacions de pressió atmosfèrica generades per les vibracions sonores mitjançant un micròfon, que tradueix aquests canvis de pressió en senyal elèctric. L'enregistrament pot ser analògic o digital. En l'enregistrament analògic el senyal elèctric es tradueix en un senyal magnètic (en el cas del magnetòfon) o en solcs que representen les ones (en el cas del fonògraf).

Quan al magnetòfon li arriba un senyal elèctric corresponent a unes ones sonores, magnetitza una cinta seguint un patró corresponent a les ones. La cinta queda magnetitzada i el so enregirat es podrà reproduir posteriorment invertint el procés.

En el cas del fonògraf, una agulla genera uns solcs en una superfície de vinil corresponent al senyal elèctric que hi arriba del micròfon. Al disc de vinil posteriorment es podrà reproduir invertint el procés.

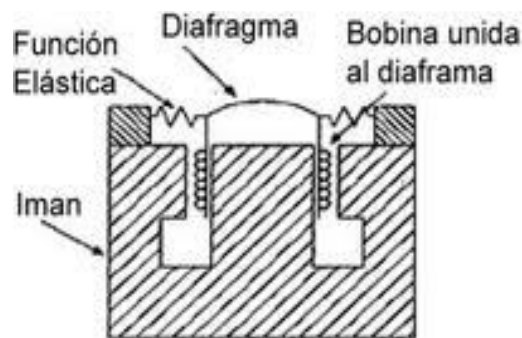
L'enregistrament dels sons va ser un gran pas endavant perquè permet transportar els sons i poder-los sentir en un altre lloc i, lògicament, en un altre moment.

4.1.2 Funcionament dels micròfons

Un micròfon funciona de manera semblant a l'oïda. Els canvis de pressió

Qualitats del so

generats per les vibracions fan moure el diafragma, una bobina mòbil que amb el moviment varia la distància respecte un imant immòbil, generant un corrent elèctric variable, la diferència de potencial en cada moment del qual serà anàloga a la posició de la bobina mòbil, i per tant a la vibració que volem enregistrar. Com que la vibració és un moment alternatiu, generarà un corrent altern, que passarà de positiu a negatiu i viceversa. Quant més gran sigui el diafragma aconseguirem captar freqüències més baixes, i per tant per gravar sons greus necessitarem un micròfon més gran.



Esquema 2: Secció d'un micròfon

4.2 Reproducció

Reproduir un so es genera unes vibracions iguals o similars a les originals mitjançant uns altaveus després d'haver-les enregistrar.

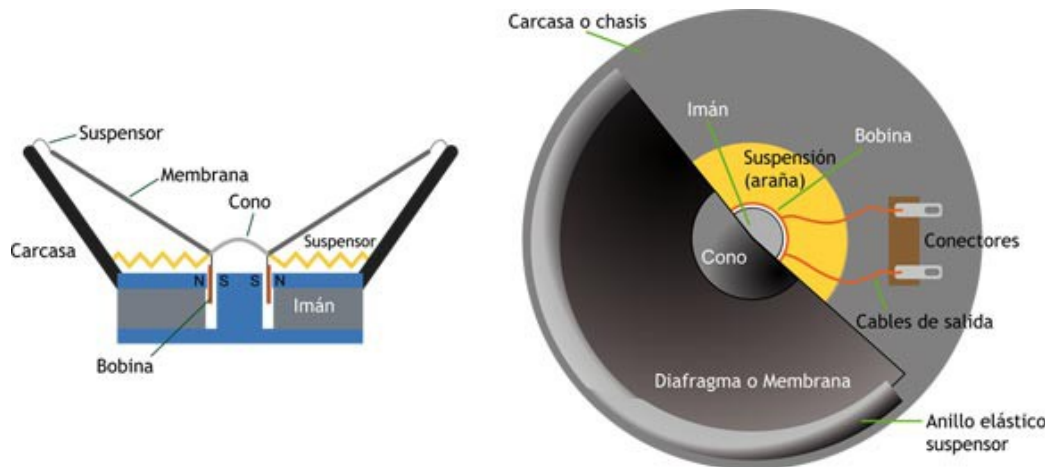
4.2.1 Principis de l'enregistrament del so

La reproducció de sons es fonamenta en invertir el procés d'enregistrament: es tradueix el corrent elèctric en vibracions mitjançant els altaveus.

En el cas del fonògraf, una agulla passa pels solcs del vinil generant un corrent elèctric. El magnetòfon, en canvi, genera el corrent mitjançant el magnetisme.

4.2.2 Funcionament dels altaveus

Els altaveus són instruments molt semblants a un micròfon: consten d'un imant, una bobina mòbil i una membrana, entre d'altres, però hi ha unes diferències molt importants. Per exemple, la membrana dels altaveus no és com la del diafragma dels micròfons, sinó que està feta de tal manera que estigui preparada per generar les vibracions, en comptes de captar-les. Normalment tenen forma de con, i la membrana és la paret.



Esquema 3: Parts d'un altaveu

Si en el micròfon el moviment de la bobina simpàtica a la membrana induïa un corrent a l'imant, en un altaveu és l'imant qui fa reaccionar la bobina mòbil pel corrent que rep. Així, fa moure la membrana, que està unida a un suspensor que la fa tornar a la posició d'equilibri en absència de corrent. Com que el corrent és altern, la membrana tindrà un moviment de vaivé i generarà la vibració corresponent.

5. ANÀLISIS GRÀFICS.

Com a part pràctica d'aquest Treball de Recerca, he triat fer una comparació dels diferents sons que es poden produir variant els seus paràmetres de intensitat, to i timbre, ajudant-nos de la seva representació gràfica.

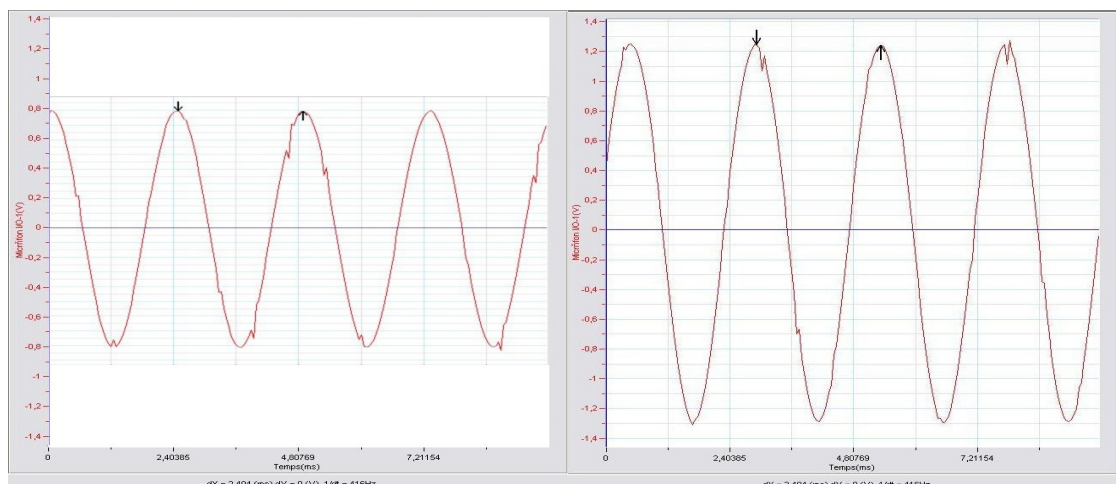
Per fer aquesta comparació farem servir:

- Dos sons enregistrats d'un diapasó amb la mateixa nota i intensitat diferent.
- Un so enregistrat d'un diapasó amb una nota diferent i intensitat similar a un dels dos primers.
- Un so enregistrat d'una guitarra elèctrica, un piano i una harmònica amb la mateixa nota del primer diapasó.

5.1 Comparativa segons volum

Com ja hem vist, el volum depèn principalment de l'amplitud d'ona. Als gràfics és realment molt fàcil distingir un so intens d'un altre de més flux.

En aquest cas, s'ha enregistrat un diapasó vibrant a una freqüència de 416Hz i a diferents intensitats. Es pot veure una diferència (tot i que no molt evident) en les seves amplituds d'ona.



Gràfic 2: Diapasó vibrant poc intensament

Gràfic 3: Diapasó vibrant intensament

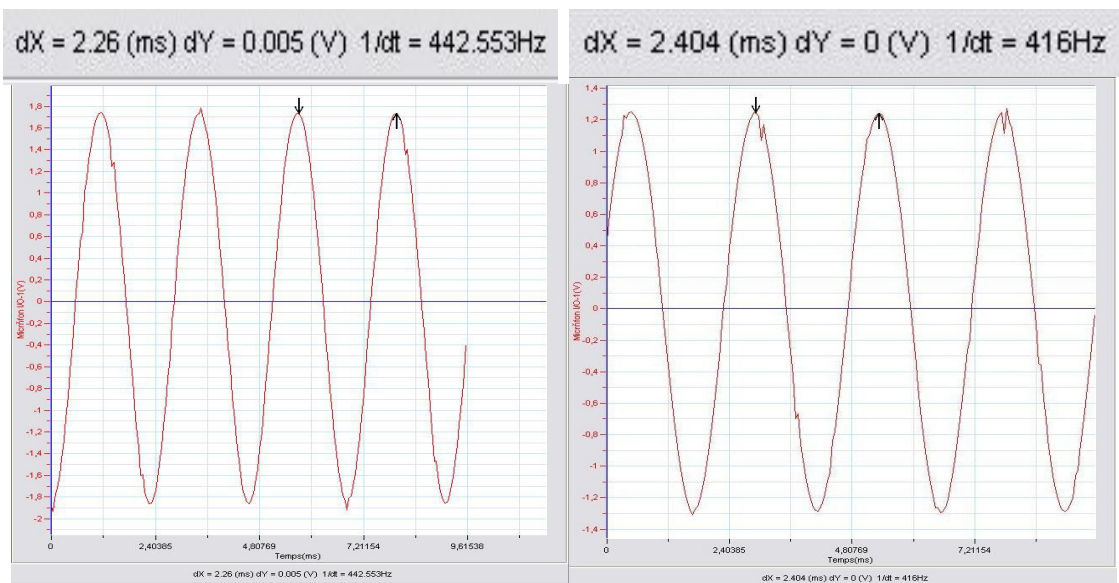
Qualitats del so

Es poden observar uns pics petits a les ones que podem atribuir a soroll de fons, ja que la seva intensitat és molt petita i no els arribem a percebre com a components del so.

Com veiem, el so que nosaltres percebem més fort (el segon) és també el que es correspon al cop més fort al diapasó. Veiem que arriba a assolir un valor d'1,2 V (amplitud mesurada en Volts pel programa, és proporcional als dB). En canvi el primer so, que percebem més fluix, arriba a una amplitud màxima de 0,8 V.

5.2 Comparativa segons nota

Per variar la nota hem estudiat que cal variar la freqüència del so, i per això hem enregistrant una altra vegada el diapasó vibrant a una freqüència diferent. Això ho he fet traient uns frens que havia aplicat perquè vibrés més lent.



Gràfic 4: Diapasó vibrant a 440Hz

Gràfic 5: Diapasó vibrant a 416 Hz

Per mesurar la freqüència dels sons, s'ha de seleccionar dos punts consecutius de l'ona en el mateix estat de vibració. Per motius pràctics he triat seleccionar dues crestes contigües.

Havent seleccionat dues crestes contigües, el software ens confirma que el primer so, que nosaltres qualifiquem com " greu", té una freqüència inferior al so qualificat com " agut".

NOTA: Degut a una falta de precisió del programari fet servir, en el segon cas no és possible seleccionar dos punts que es trobin exactament en la mateixa fase, per això ens diu que la freqüència és 442,5 Hz, tot i que sabem que ha estat fabricat per vibrar a 440 Hz. De totes maneres, a efectes pràctics aquest error inferior a l'1% no ens impedeix fer una comparativa perquè la diferència és clara.

5.3 Comparativa segons instrument

Sent el timbre la magnitud més complexa de l'estudi bàsic del so, és també gran la complexitat per analitzar l'ona. Així com mirant un gràfic podem dir si un so és fort/fluix o greu/agut, no és suficient per dir si la forma de l'ona es correspon a un instrument o un altre, sinó que només podríem fer-nos una idea (sense aprofundir gaire) de si és un so ric (amb molts harmònics) o pobre (menys harmònics), si és suau (amb forma propera a una ona sinusoidal) o aspre (forma més quadrada o amb pics). Una vegada conscient de que l'anàlisi no podria arribar molt enllà, he decidit comparar les ones d'alguns instruments amb timbres diferents per poder atribuir unes determinades qualitats a aquelles característiques comuns que puguem distingir als diferents sons.

Començaré l'anàlisi retornant al tema de les transformades de Fourier introduït anteriorment¹, que ens dona l'amplitud en funció de la freqüència, el que ens permet veure amb claredat per quins harmònics està format un so i quina intensitat té cadascun.

El MultiLab ens dóna automàticament la gràfica resultant per poder-la analitzar. Mirant la gràfica i la taula de dades podrem analitzar la complexitat del so i la seva riquesa en harmònics. Un punt a tenir en consideració és que el programa ens dóna l'amplitud en Volts (V), que és la unitat de diferència de potencial del corrent generat pel micròfon, magnitud que veritablement mesura l'ordinador com he explicat a l'apartat explicatiu dels micròfons. Per tant, no puc donar dades exactes en decibels, però puc fer una anàlisi proporcional dels harmònics components del so.

En aquest experiment intentaré demostrar que quants més harmònics tingui un so, més agressiu és el so, i que quanta més presència en les freqüències agudes, més brillant.

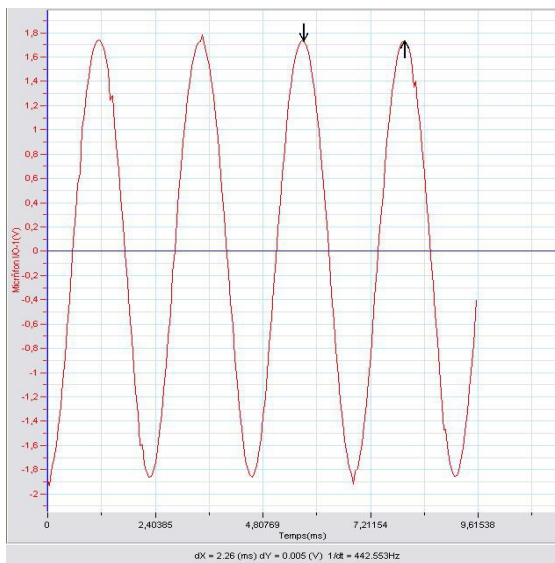
¹ Funció presentada a la pàg. 17

Qualitats del so

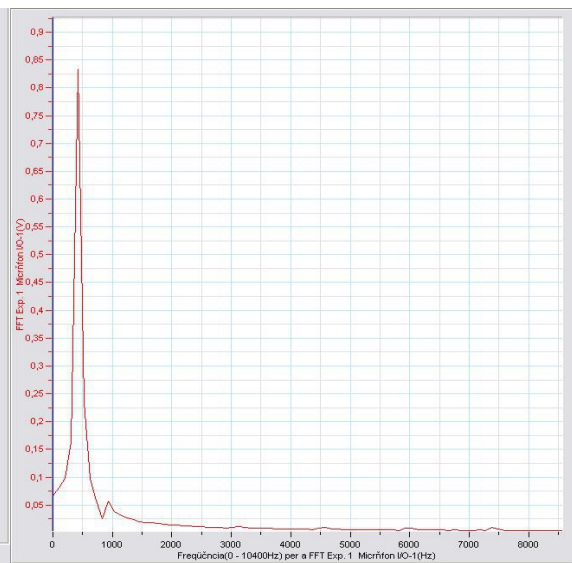
Com hem vist abans, el diapasó té una ona sinusoidal pura de 440 Hz, i per tant si féssim un anàlisi de Fourier només hi trobaríem aquesta freqüència. Aquest és un so molt suau (no en el sentit de flux, sinó en el de no-aspre), i d'aquí parteixo per deduir que, si una ona amb només una ona és suau, amb moltes ones ha de ser més aspre.

-Diapasó

Per començar, vull recordar que l'ona que produeix un diapasó és **sinusoidal**, és a dir, té la forma de la funció sinus. Manca d'harmònics, pel que només hi ha una ona que té una forma a priori perfectament sinusoidal.



Gràfic 6: Registre de l'ona: Diapasó



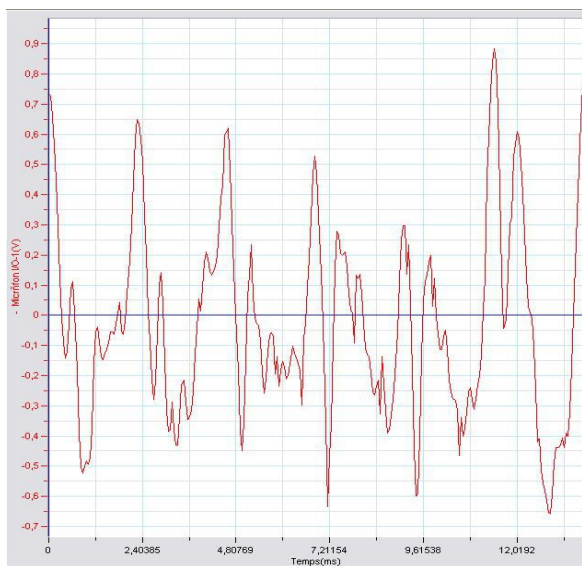
Gràfic 7: Espectre de freqüències: Diapasó

Amb l'anàlisi de Fourier confirmem que el diapasó només vibra a 440 Hz, sense més freqüències amb l'excepció d'un pic als 900 Hz de molt baixa intensitat degut a soroll de fons.

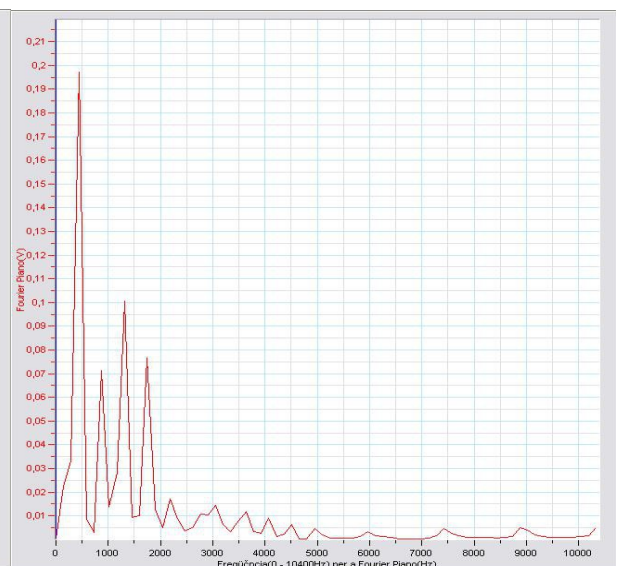
He dedicat un annex a demostrar a quina freqüència trobem el soroll de fons a casa meua per desestimar aquestes freqüències als experiments, el podeu trobar al final del dossier.

-Piano

El primer so a analitzar serà el del piano. El piano és un instrument de corda percutida, que es toca mitjançant tecles que accionen els martells que percudeixen les cordes. Els factors que intervenen en el timbre, com he estudiat en l'apartat teòric, són les envolupants, pròpies de la manera de produir el so, i les formants, pròpies de l'instrument en sí. De les envolupants, el moment més característic és l'atac, raó per la qual he seleccionat un fragment de temps molt proper a l'instant en què es produeix el so (sense ser exactament en el que es produeix donat que em trobaria amb el soroll produït per la tecla en el moment del cop).



Gràfic 8: Registre de l'ona: Piano



Gràfic 9: Espectre de freqüències: Piano

Com podem veure al gràfic ja no tenim una ona sinusoidal com en el cas del diapasó, sinó que la ona obtinguda és molt més irregular a causa de l'elevat nombre d'harmònics que té (14). Això vol dir que la corda del piano no vibrarà només pel mig: ahora les seves dues meitats vibraran a una altra freqüència, i les seves respectives meitats, etc. Depenent de la corda aquests parcials seran diferents.

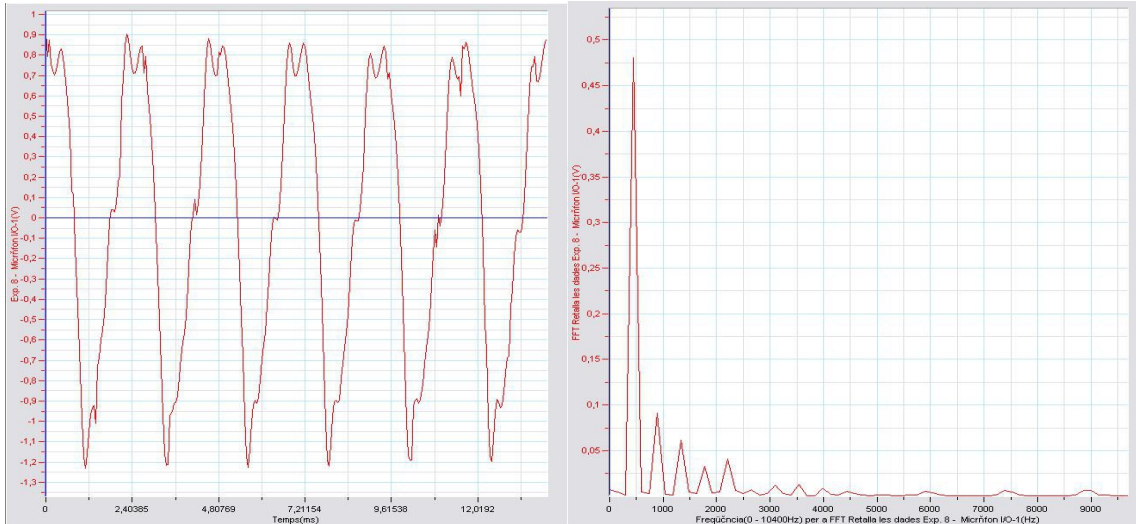
En el gràfic de l'espectre podem veure 4 freqüències predominants: 440 (la fonamental), 880, 1320 i 1760 (en Hz), és a dir: f , $2f$, $3f$ i $4f$. La resta d'harmònics tenen una intensitat clarament inferior, però l'oïda humana els percep i determinen el timbre del so.

Podem dir que el piano té un timbre opac, amb harmònics greus.

Freq (Hz)	Amplitud ($\cdot 10^{-3}$ V)
440	266
880	73
1320	93
1760	84
2200	23
2640	11
3080	16
3540	10
4100	7
4540	6
4980	8
6000	3
7470	3

-Guitarra

El següent so per analitzar és la guitarra. La guitarra és un instrument de corda pulsada, i la lògica diria que, sent de corda igual que el piano hauria de tenir un timbre força semblant pel que fa a les formants pròpies de la corda, a part de les diferències de ressonància dels instruments.



Gràfic 10: Registre de l'ona: Guitarra

Gràfic 11: Espectre de freqüències: Guitarra

A simple vista observem que l'ona és molt més senzilla i s'assembla més aviat a l'ona del diapasó que no pas a la del piano.

Mirant la gràfica corresponent a l'espectre de freqüències podem confirmar que els harmònics importants que trobem en aquest so (a part de la fonamental) són 4, en comptes dels 3 del piano, però tenen una intensitat, en relació amb la fonamental, més baixa (gairebé els 4 tenen una intensitat molt propera al primer harmònic no-predominant del piano).

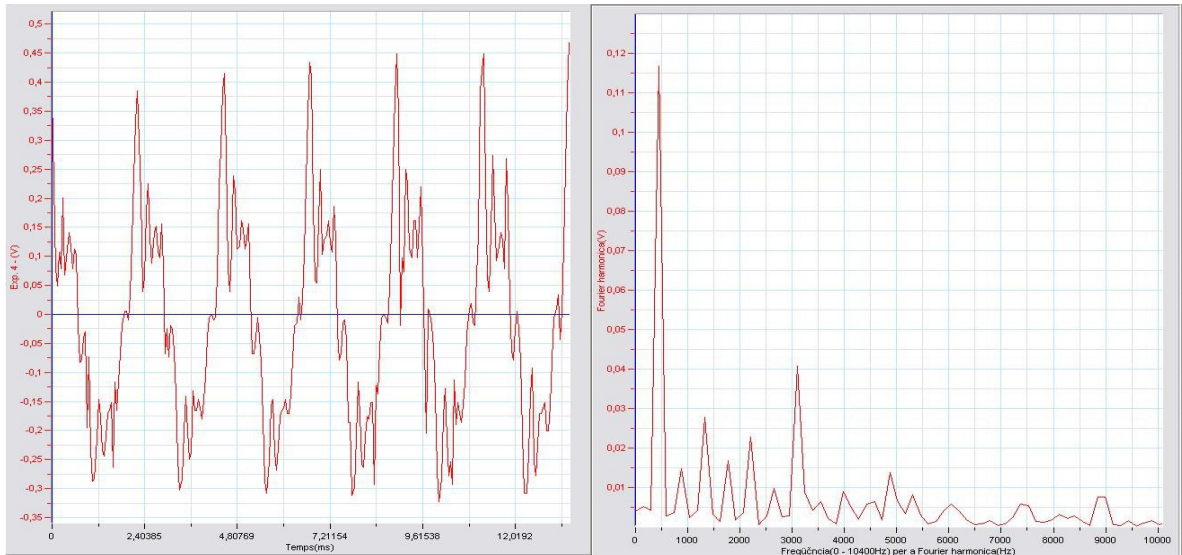
En conclusió, la guitarra té un timbre més opac encara que el piano, i el que sentim és pràcticament la nota pura, sense gaires freqüències afegides que donin color al so.

Freq (Hz)	Amplitud ($\cdot 10^{-3}$ V)
440	480
880	91
1320	62
1760	33
2200	41
2640	7
3080	12
3540	13
3980	8
4425	5
5900	6

Però... què passarà amb un instrument de vent, que té un timbre totalment diferent? Es plasmaran aquestes diferències en el paper?

-Harmònica

L'harmònica és un instrument de vent que produeix el seu so quan la pressió del vent fa moure les llengüetes que hi ha al seu interior. M'ha interessat analitzar aquest instrument perquè té un timbre força brillant i agressiu.



Gràfic 12: Registre de l'ona: Harmònica

Gràfic 13: Espectre de freqüències: Harmònica

Les gràfiques ens confirmen que aquest és l'instrument amb més riquesa d'harmònics, tot i que no destaquin massa en intensitat. És un so amb presència als harmònics propers a la fonamental, com la resta de sons, però també als més aguts, a diferència d'aquests. Això es tradueix en un so més brillant i agressiu. M'agradaria destacar l'harmònic situat als 3080Hz, ja que és un harmònic que, si bé el podem trobar als altres dos sons, no té la mateixa importància: en l'harmònica és l'harmònic més intens.

Podem concloure, doncs, que el timbre de l'harmònica fa honor al seu nom, donat que és molt ric en harmònics.

Freq (Hz)	Amplitud ($\cdot 10^{-3}$ V)
440	117
880	15
1320	28
1760	17
2200	23
2640	10
3080	41
3540	6
3970	9
4540	6
4870	14
5310	8
6050	6
6780	2
7470	6
8110	3
8400	3
9440	2
9880	2

6. CONCLUSIONS.

Resumint la part experimental del meu treball, podem destacar la resposta a la pregunta que em feia al principi del treball: El timbre d'un so depèn de dos elements característics de la font del so: envolupants (característiques de la manera de produir el so) i les formants (característiques de la font en sí). Aquests dos factors afecten al so aportant o no harmònics, és a dir sons que es produeixen a la vegada (de manera "paral·lela") amb freqüències múltiples de la fonamental i d'intensitat més baixa que aquesta. He pogut demostrar que quant més harmònics té el so més agressiu el percebem, i quant més presència d'aquests a les freqüències més agudes el qualifiquem de més brillant. També he demostrat que la intensitat depèn de l'amplitud d'ona principalment, i que l'altura depèn de la freqüència de l'ona fonamental.

A la part més teòrica els punts més importants són el complex funcionament de l'oïda humana, difícil d'arribar a comprendre sense uns coneixements previs de biologia sobre el funcionament del cervell i els nervis, i que el funcionament dels micròfons i els altaveus està basat en la inducció electromagnètica.

Aquest treball m'ha servit per entendre molt millor el so, i em servirà per treballar-lo en el meu àmbit: la música. Saber en què consisteix el timbre em serà molt útil d'ara en endavant, ja que tinc una mentalitat molt més oberta: aquest so no és així perquè l'hagi produït una guitarra, sinó perquè està compostat per unes ones que en sumar-se fan que soni així.

BIBLIOGRAFIA

Llibres:

MIYARA, Federico. *Acústica y Sistemas de Sonido*. Llibre digital (suport per curs a distància) Capítols 1-2.

Pàgines web:

<http://www.sangakoo.com/blog/analisis-armonico-transformada-de-fourier> > (amb accés el 24 d'agost del 2012)

< <http://www.ehu.es/acustica/espanol/basico/casoes/casoes.html> > (amb accés el 24 d'agost del 2012)

<<http://www.masterkit.com/escuela/glosario.htm> > (amb accés el 25 d'agost del 2012)

<<http://www.analfatecnicos.net/pregunta.php?id=44> > (amb accés el 30 de setembre del 2012)

<<http://www.ieslosviveros.es/electronica/material/asig10/3altavocesPDF.pdf>> (amb accés el 30 de setembre del 2012)

<http://es.wikipedia.org/wiki/Intensidad_de_sonido> (amb accés el 27 d'octubre de 2012)

<http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io8/public_html/Altavoces.html > (amb accés el 22 de novembre del 2012)

<<http://www.rodriгодadiz.com/imc/html/Envolventes.html>> (amb accés el 13 de desembre del 2012)

Imatges:

Il·lustració1: <<http://html.rincondelvago.com/000045380.png>>

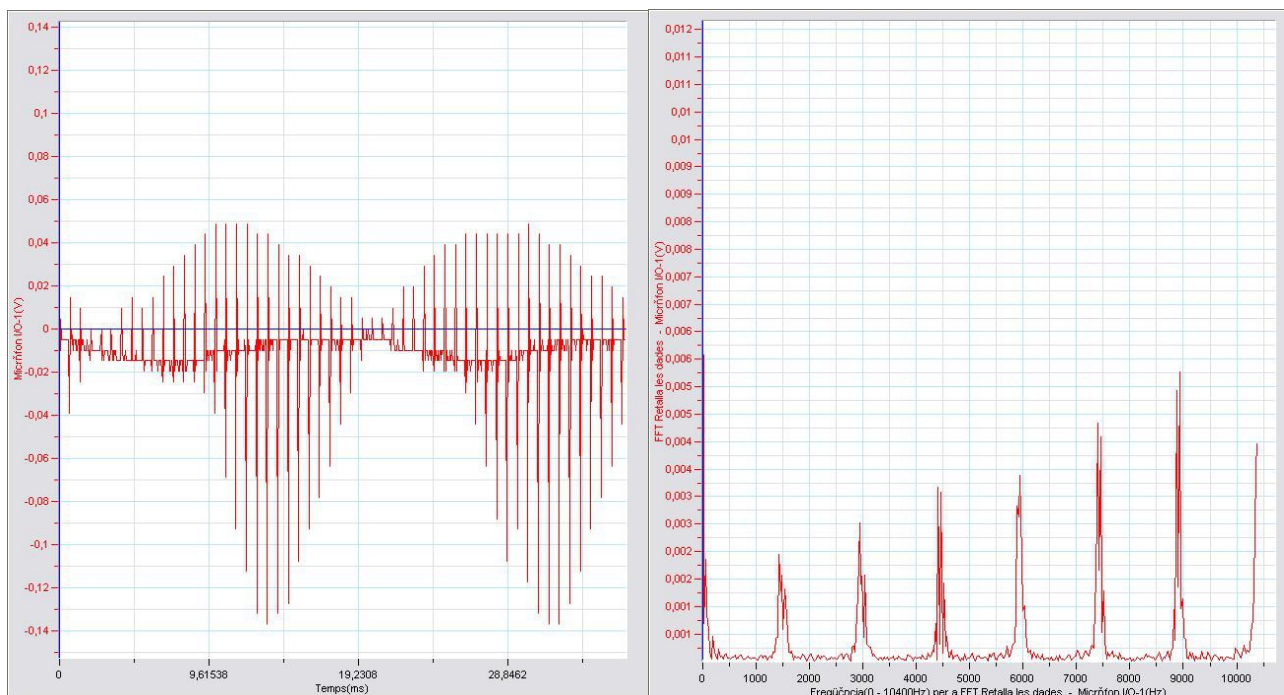
Gràfic1: Extret del llibre "Acústica Sonora y Sistemas de Sonido", de Federico Miyara.

Esquema1: <<http://38ccda.medialib.glogster.com/media/9c21a7b816e8ed039fe83bace49119154d71d5f078607e849c9e101f94e67f8c/oida-cat.jpg>>

Esquema2: <http://www.escueladecineonline.nucine.com/ima/clip_image016_0001.jpg>

Esquema3: <<http://www.analfatecnicos.net/fotos/162.jpg>>

Annex 1: Anàlisi soroll de fons



Registre de l'ona: soroll de fons

Espectre de freqüències: soroll de fons

Com que és un treball científic, he adjuntat aquest annex per demostrar a quines freqüències es troba el soroll de fons present a les mostres realitzades a casa meva, per poder desestimar aquestes freqüències en les anàlisis del cos del treball.

Per fer-ho he realitzat varies gravacions del silenci en el mateix moment en que realitzava les mostres, i sempre sortien les mateixes freqüències. Per tant aquest soroll pot ser causat pel mateix multilog o per algun aparell veí.

Freq (Hz)	Amplitud ($\cdot 10^{-3}$ V)
54	2
1425	2
1479	2
1534	1
2932	3
4412	3
4466	3
5946	3
7399	4
7454	4
8879	5
8933	5

Annex 2: Taules de dades

Temps (ms) - Amplitud (V)					
0	0.732	2.01923	0.073	3.99038	0.176
0.04808	0.727	2.06731	0.181	4.03846	0.21
0.09615	0.659	2.11538	0.298	4.08654	0.186
0.14423	0.561	2.16346	0.444	4.13462	0.146
0.19231	0.449	2.21154	0.586	4.13462	0.146
0.24038	0.298	2.25962	0.649	4.18269	0.132
0.28846	0.127	2.30769	0.635	4.23077	0.146
0.33654	-0.01	2.35577	0.586	4.27885	0.161
0.38462	-0.088	2.40385	0.508	4.32692	0.2
0.43269	-0.142	2.45192	0.332	4.375	0.293
0.48077	-0.117	2.5	0.205	4.42308	0.391
0.52885	-0.029	2.54808	0.01	4.47115	0.43
0.57692	0.088	2.59615	-0.083	4.51923	0.596
0.625	0.112	2.64423	-0.21	4.56731	0.605
0.67308	0.01	2.69231	-0.278	4.61538	0.62
0.72115	-0.186	2.74038	-0.22	4.66346	0.483
0.76923	-0.391	2.78846	-0.059	4.71154	0.308
0.81731	-0.503	2.83654	0.098	4.75962	0.146
0.86538	-0.522	2.88462	0.142	4.80769	0
0.91346	-0.498	2.93269	0.039	4.85577	-0.186
0.96154	-0.483	2.98077	-0.151	4.90385	-0.381
1.00962	-0.493	3.02885	-0.317	4.95192	-0.449
1.05769	-0.474	3.07692	-0.386	5	-0.352
1.10577	-0.371	3.125	-0.381	5.04808	-0.146
1.15385	-0.161	3.17308	-0.288	5.09615	0.059
1.20192	-0.054	3.22115	-0.381	5.14423	0.132
1.25	-0.039	3.26923	-0.43	5.19231	0.234
1.29808	-0.088	3.31731	-0.43	5.24038	0.063
1.34615	-0.137	3.36538	-0.337	5.28846	-0.01
1.39423	-0.146	3.41346	-0.229	5.33654	-0.029
1.44231	-0.127	3.46154	-0.215	5.38462	-0.034
1.49038	-0.112	3.50962	-0.288	5.43269	-0.083
1.53846	-0.093	3.55769	-0.347	5.48077	-0.19
1.58654	-0.054	3.60577	-0.337	5.52885	-0.259
1.63462	-0.054	3.65385	-0.317	5.57692	-0.21
1.68269	-0.063	3.70192	-0.254	5.625	-0.117
1.73077	-0.029	3.75	-0.127	5.67308	-0.068
1.77885	0.005	3.79808	-0.044	5.72115	-0.059
1.82692	0.044	3.79808	-0.044	5.76923	-0.068
1.875	-0.054	3.84615	0.054	5.81731	-0.195
1.92308	-0.063	3.89423	0.015		
1.97115	-0.02	3.94231	0.093		

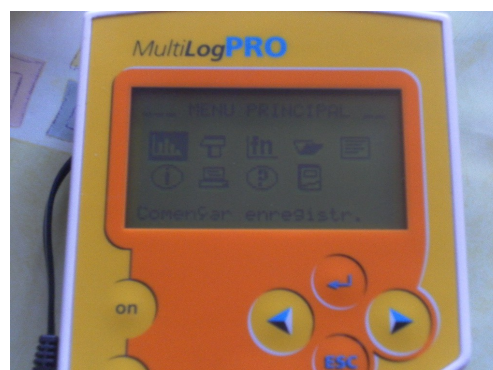
Taula 1: Taula de dades: Piano

Disposo de totes les taules de dades, però per dificultats tècniques que presenta el programa per copiar-les, i per estalviar paper (ja que la taula de dades poca utilitat té una vegada feta la gràfica) he decidit adjuntar-ne només una, amb el propòsit de demostrar d'on provenen les gràfiques i certificar l'existència de la presa de mostres. Si és de l'interès del tribunal, puc proveir-los de totes les taules en una unitat d'emmagatzemament digital.

Annex 3: Procediment de presa de mostres

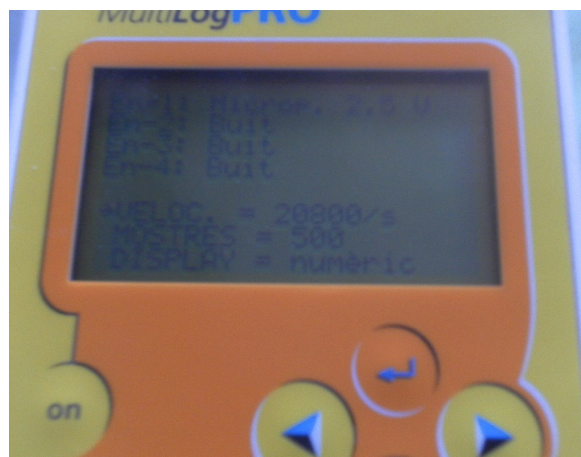
Aquest annex té la finalitat d'explicar com he fet servir el MultiLog per la realització d'aquest Treball de Recerca.

El Multilog és una consola acompanyada d'una sèrie de sensors de diferents tipus que dóna la facilitat de poder realitzar mesures en qualsevol lloc i moment gràcies a la seva autonomia. El sensor que he fet servir jo és el micròfon, el funcionament del qual he explicat a l'apartat 3. Aquest va connectat mitjançant un cable a la consola. Per començar a enregistrar primer s'han de configurar les mostres per segon que es volen prendre, depenent del tipus d'experiment, i la quantitat de mostres totals que volem. Segons el teorema de mostreig de Nyquist-Shannon, s'han de prendre el doble de mostres de la màxima freqüència estimada que es pot arribar a voler enregistrar. Com que la màxima freqüència audible per l'oïda humana és 20.000 Hz, hauríem de prendre 40.000 mostres per segon, però la consola només ens permet prendre 20.800 mostres per segon. És suficient per les mostres que he pres, però no és estrictament científic, ja que no sabem si hi havia alguna freqüència superior als 10.000 Hz que haguem perdut, tot i que aquest cas és poc probable en haver tocat una nota suficient greu perquè no hi hagi harmònics massa aguts per l'aparell.



En aquestes imatges es pot veure la consola i la seva pantalla.

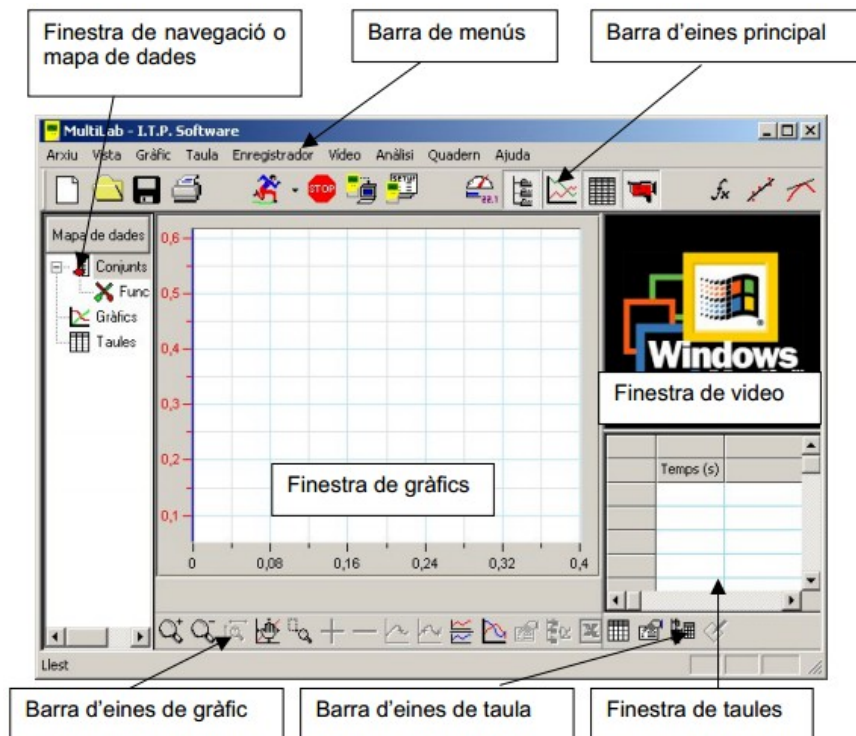
Configuració pel mostreig:



Les següents imatges són de les preses de mostres:



Després de la presa de mostres ve l'anàlisi, que es fa mitjançant el programa que ve amb el MultiLog: el MultiLab. Aquest es un programa que importa els arxius guardats al MultiLog i genera tant la taula com la gràfica. Té diverses funcions que permet treballar sobre les dades. Algunes funcions que he fet servir jo són per exemple determinar la freqüència de les ones i fer l'anàlisi de Fourier.



Alguns problemes que m'he trobat amb el programa són la falta de precisió a l'hora de triar un punt amb els dos selectors per determinar la freqüència, impeding-me triar dos punts en el mateix punt exacte de fase, o la impossibilitat d'exportar fàcilment les taules de dades, havent-les de copiar i enganxar repetidament en un document per adjuntar-la en aquest treball.