

Treball de recerca

Els harmònics del violí

Paco De La Vega

Dirigit per

2n de Batxillerat

3 de desembre de 2018

Índex

0	Introducció.....	1
1	Què és un violí?.....	2
2	Parts del violí.....	3
3	Índex acústic científic i franco-belga.....	8
4	Les ones sonores.....	9
4.1	Qualitats del so.....	9
4.1.1	El to.....	9
4.1.2	La intensitat.....	11
4.1.3	La durada.....	12
4.1.4	El timbre.....	12
5	Com i per què sona un violí?.....	13
6	Tècniques de tocar el violí.....	15
6.1	Pizzicato.....	15
6.2	Vibrar.....	15
6.3	Ponticello.....	15
7	Els luthiers i la construcció del violí.....	16
7.1	Acústica de les tapes del violí.....	18
8	El perquè del sistema musical actual i la relació matemàtica que té amb el llenguatge musical respecte el so.....	21
8.1	El sistema musical pitagòric i l'escala pitagòrica.....	21
8.2	Els intervals, l'afinació relativa i la coma pitagòrica.....	23
9	Les notes i els harmònics.....	28
10	L'anàlisi de Fourier.....	32
11	Expemients.....	33
11.1	Experiment 1: Comparació de la nota La 440 Hz amb el violí I, II i III.....	33
11.1.1	La 440 Hz amb el violí I (el meu violí).....	34
11.1.2	La 440 Hz amb el violí II (del meu pare).....	36
11.1.3	La 440 Hz amb el violí III (de la meva germana).....	37

11.1.4 Anàlisi.....	41
11.1.5 Conclusió.....	41
11.2 Experiment 2. Demostració: La pur només té una freqüència, la fonamental.....	42
11.2.1 La 440 Hz amb el diapasó.....	42
11.2.2 La pur 441 Hz amb ordinador.....	43
11.2.3 Conclusió.....	44
11.3 Experiment 3: Comparació del La 221 Hz entre el violí I i el violí II.....	45
11.3.1 Desenvolupament i resultats.....	45
11.3.2 Anàlisi i conclusions.....	47
11.4 Experiment 4: La 441 Hz tocat amb el violí II a prop del pont (ponticello)....	47
11.4.1 Desenvolupament i resultats.....	47
11.4.2 Anàlisi.....	48
11.4.3 Conclusions.....	48
11.5 Experiment 5: Altres cordes obertes: Sol 197 Hz, Re 296 Hz i Mi 660 Hz amb el violí I.....	49
11.5.1 Desenvolupament i resultats.....	49
11.5.2 Anàlisi i conclusions.....	51
11.6 Experiment 6: La 440 Hz pizzicato amb el violí I.....	52
11.6.1 Desenvolupament i resultats.....	52
11.6.2 Anàlisi i conclusions.....	53
11.7 Experiment 7: La 886Hz amb el violí I.....	53
11.7.1 Desenvolupament i resultats.....	53
11.7.2 Anàlisi i conclusions.....	54
11.8 Experiment 8: Notes molt agudes: Do#6 2179Hz i Re#6 2511Hz.....	55
11.8.1 Desenvolupament i resultats.....	55
11.8.2 Anàlisi i conclusions.....	57
11.9 Experiment 9: La 442 Hz amb el violí I amb sordina.....	57
11.9.1 Desenvolupament i resultats.....	57
11.9.2 Anàlisi i conclusió.....	58

11.10 Experiment 10: La 884 Hz mitjançant un harmònic natural (terme musical).....	58
11.10.1 Harmònics naturals i harmònics artificials.....	58
11.10.2 La 884 Hz violí del meu pare realitzat mitjançant un harmònic natural (terme musical).....	60
11.10.3 Anàlisi i conclusions.....	61
11.11 Experiment 11: La 442 Hz. Comparació de l'espectre de freqüències entre els violins més petits: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i $\frac{3}{4}$	61
11.11.1 Violí $\frac{1}{4}$	62
11.11.2 Violí $\frac{1}{2}$	63
11.11.3 Violí $\frac{3}{4}$	64
11.11.4 Anàlisi i conclusions.....	65
11.12 Experiment 12: La-Sib 900 Hz amb la flauta dolça de l'escola.....	65
11.12.1 Desenvolupament i resultats.....	65
11.12.2 Anàlisi i conclusions.....	67
11.13 Experiment 13: La 440 Hz vent: Flauta travessera, saxo alto, saxo tenor i clarinet.....	67
11.13.1 Flauta travessera.....	67
11.13.2 Saxo alto.....	69
11.13.3 Saxo tenor.....	70
11.13.4 Clarinet.....	71
11.14 Experiment 14: La 216 Hz Violoncel.....	72
11.14.1 Desenvolupament i resultats.....	72
11.14.2 Anàlisi i conclusions.....	73
11.15 Experiment 15: Instruments de percussió: vibràfon, marimba i xilòfon.....	73
11.15.1 Vibràfon.....	73
11.15.2 Marimba.....	75
11.15.3 Xilòfon.....	77
11.16 Experiment 16: La 440 Hz piano (teclat).....	78
12 Conclusions.....	79
13 Bibliografia.....	81
14 Annex.....	86

0 Introducció

La meva passió és tocar el violí. I sempre m'ha interessat saber per què sona un violí. I és per això que he aprofitat aquest treball de recerca per investigar-ho profundament.

Els meus objectius d'aquest treball són descobrir físicament com i perquè sona un violí, comparar harmònics i ones de diferents violins de diferents mides i qualitats per tal de trobar les diferències entre ells, i també, comparar el so dels violins amb altres instruments per tal de saber les diferències que hi ha.

D'una banda, he fet recerca de diversos conceptes essencials que crec que són necessaris per entendre la resta del treball. Com per exemple què és un violí, les seves parts, algunes tècniques de tocar, conceptes bàsics de música, qualitats del so i de les ones.

Per altra banda he investigat com és el funcionament del violí: com es produeix el so i perquè produeix un so que és diferent dels altres instruments. És per això que m'he centrat bastant amb la investigació dels harmònics del violí i d'altres instruments de vent, corda i percussió, per comparar-los. He realitzat 16 experiments. Vaig realitzar les mostres a Mollet, amb els alumnes de diferents instruments de l'Escola de Música de Mollet de Vallès. Amb les mostres d'aquests sons he comparat les ones i l'espectre de freqüències.

1 Què és un violí?

El violí és un instrument de corda fregada amb quatre cordes tensades sobre la caixa de ressonància, que produeix el so quan l'intèrpret passa l'arc per sobre les cordes o les punteja amb els dits (pizzicato). És l'instrument més agut de la seva família (formada també per la viola, el violoncel i el contrabaix).



Les cordes s'afinen per intervals de quintes: sol₂, re₃, la₃ i mi₄.

A l'hora d'afinar el violí es comença per la corda La, que s'afina amb una freqüència de 440 Hz, utilitzant com a referència un diapasó clàssic, de metall en forma de forquilla o un diapasó electrònic (també anomenat afinador). Actualment el que més s'utilitza és l'afinador. Però, el violí s'afina a 442 Hz, ja que les condicions del medi com la temperatura, o la progressiva destensió de les cordes fa que es desafinin lentament, i per compensar-ho s'afinen una mica per sobre, és a dir, a 442 Hz.



Diapasó clàssic



Afinador o diapasó electrònic

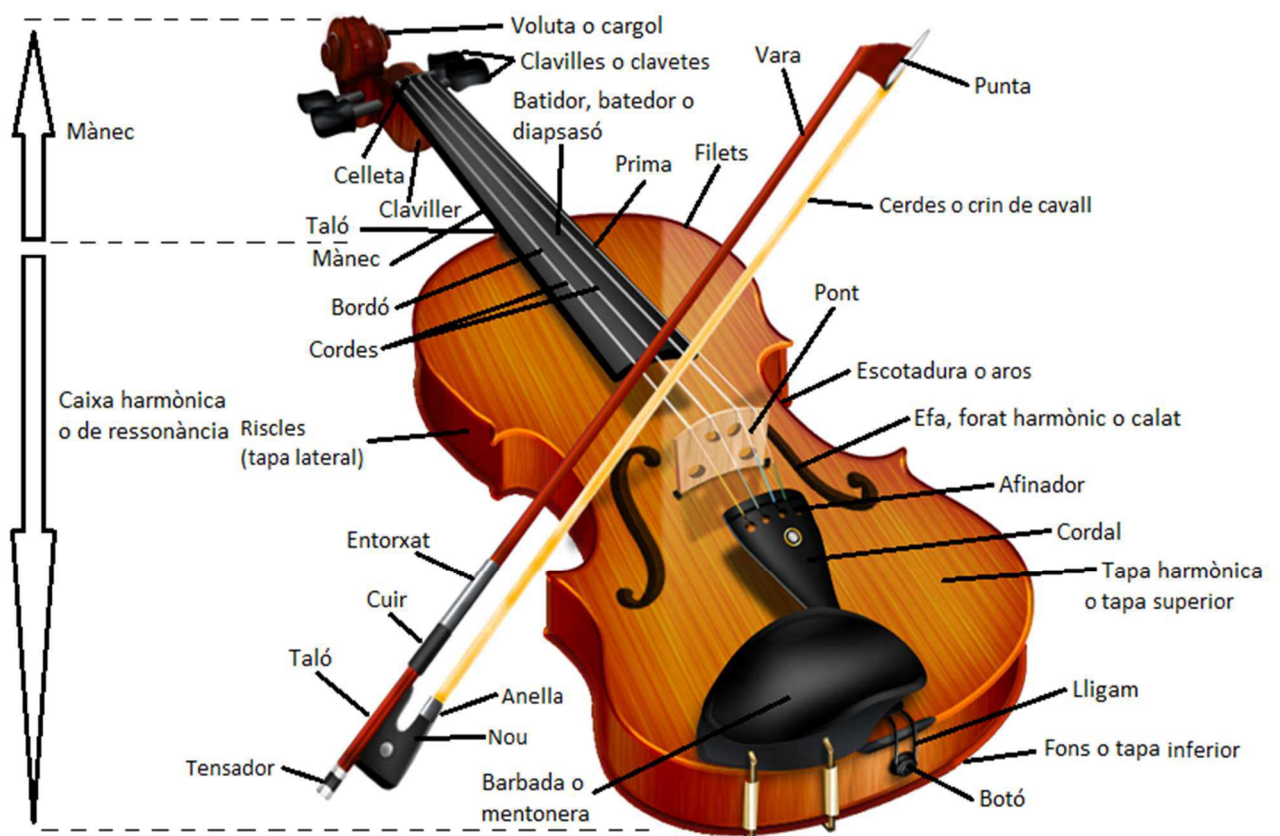
Les partitures per a violí es toquen amb clau de sol, antigament anomenada "clau de violí".

El violí és l'instrument més petit de la seva família, però també és el que pot arribar a tenir els preus més alts, sobretot en els models més valorats com per exemple els Stradivari del segle XVIII.

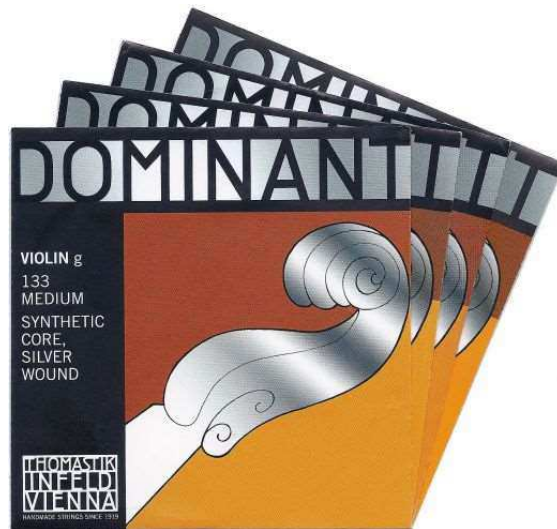
Les mides dels violins es classifiquen en: 4/4 (el més gran, utilitzat pels adults) i 3/4, 2/4 i 1/4 (violins de grandària menor per joves i nens). També existeix un 7/8 o violí "Lady", que el toquen algunes dones o homes adults de mans petites. Per nens molt petits també existeix 1/8 i 1/16.

2 Parts del violí

Sobre aquest dibuix d'un violí i el seu arc, he afegit tots els noms de les parts del violí i de l'arc, ja que durant el treball anomenaré algunes parts.



Les cordes són de metall o de budell barrejat amb alumini, plata o acer. En el cas de la corda mi (anomenada Cantino) és directament un fil d'acer i ocasionalment d'or. Avui en dia es fabriquen cordes de materials sintètics, que aconseguen quasi la bona sonoritat de les de budell i al mateix temps tenen la resistència de les de metall.



Cordes de violí marca Dominant, la primera és un sol (G) sintètic

Les cordes del violí estan sobre el batedor de banús (sense trasts) i queden lliures per ressonar entre la celleta i el pont. El pont té un disseny específic per tal que es faciliti la vibració de la corda, que es transmet directament cap a la caixa de ressonància. El pont no està enganxat a la tapa del violí sinó que s'aguanta per la pressió de les cordes.



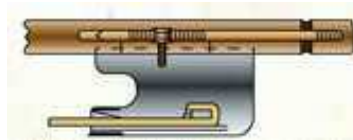
Pont del violí, aquest està construït al luthier Parramon de Barcelona

L'arc modern (des del segle XIX) és de pal de Brasil o de Pernambuco. L'arc és una fusta dura d'uns 77 cm de llarg, amb una cinta entre 100 i 120 cabells de crinera de cua cavall d'uns 70 cm de longitud. La crinera de més qualitat és anomenada Mongòlia i prové de cavalls de climes freds on el pèl és més fi i resistent. Per aconseguir el so del violí fregant l'arc a les cordes s'ha de posar sovint una resina anomenada colofònia. De vegades, per reduir costos, la crinera blanquejada de cavall pot ser substituïda per fibres viníliques.

A la part on s'agafa l'arc té un sistema de cargol (com una rodeta) que si la mous cap a un costat o cap a l'altre, les cerdes es tensen o es destensen.



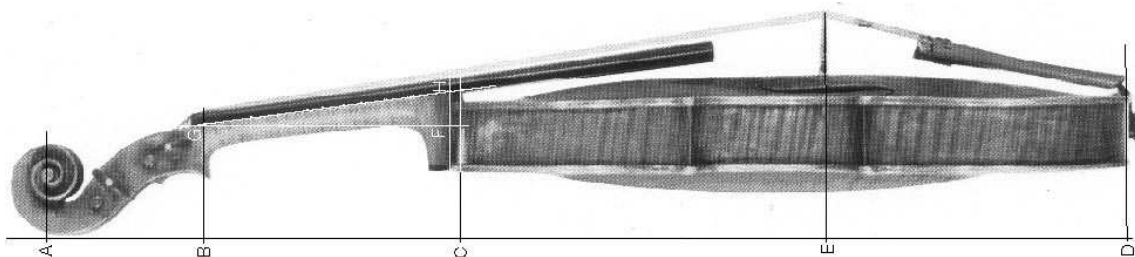
Arc del violí

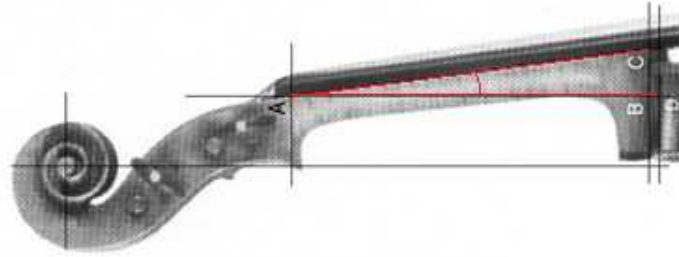


Mecanisme per tensar o destensar les cerdes de l'arc

Les tapes del violí estan fetes amb una lleugera corba que proporcionen la característica de voltat.

El mànec té una inclinació cap enrere respecte a l'eix vertical, que s'acaba amb un cargol anomenat voluta.





Inclinació del mànec

La caixa del violí està formada pels riscles i les tapes inferior i superior. La tapa superior, de fusta d'abet blanc té dos orificis en forma de efa, que la seva funció és projectar el so. Les dues tapes tenen un rivetejat o filet de fusta de blada que a part de ser decoratiu, protegeix el violí d'esquerdes que es puguin fer a les tapes.



Efes del violí

A la part inferior de la voluta, el claviller té les clavilles per afinar les cordes.

La barbada va ser un invent del violinista Ludwig Spohr a principis del segle XIX. Abans, el violí es tocava sense barbada. La barbada facilita el suport de l'instrument en tocar-lo. Les clavilles, el cordal i la barbada poden ser de fusta de banús, de boix o de palissandre.



Barbades de banús, de boix i de palissandre

També per facilitar el suport de l'instrument s'utilitza un accessori anomenat costella.



Costella

Per últim, la sordina és un dispositiu per modificar o disminuir la sonoritat del violí. Es col·loca sobre el pont.



Sordina a sobre del pont



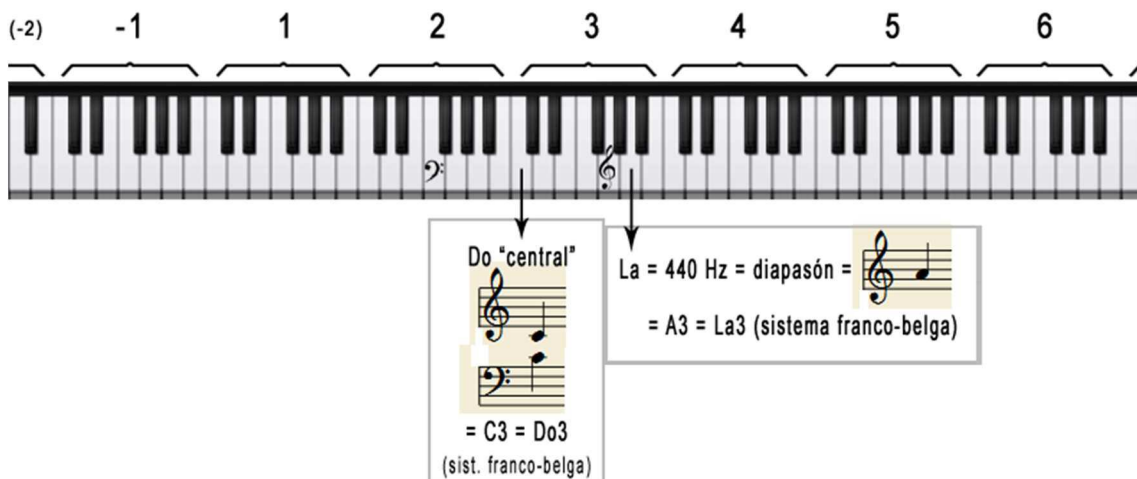
Disseny 3D de les parts del violí separades

3 Índex acústic científic i franco-belga

Les cordes del violí hem dit que són: sol₂, re₃, la₃ i mi₄.

El número que acompanya la nota és indicat per l'índex acústic franco-belga, un mètode per anomenar les notes en l'escala cromàtica occidental (l'escala o el mode musical que fem servir avui en dia) que s'utilitza a tot el món, segons la qual el do central del piano és un do₃. Aquest número ens indica el to, que ja veurem que és més endavant.

L'índex acústic franco-belga és propi de França, Bèlgica, Espanya, Itàlia i altres parts del món. Ja fa temps que existeix i per tant es basa en els pianos antics, que no tenien tantes notes greus, i ara com que els pianos poden fer més notes greus i agudes, pot haver-hi un La₋₁ o La₋₂.



Índex acústic franco-belga (numeració d'octaves)

D'altra banda hi ha l'índex acústic científic o internacional, més modern i ubicat principalment a Amèrica i al Canadà. I s'assigna el nombre 0 a l'octava que comença a la nota més greu de l'orgue, el do₀ (de 16,3516 Hz).

Per tant, és una mica confús, ja que per exemple el famós La 440Hz, en l'índex acústic franco-belga és un La₃, però en el científic és un La₄.

Durant tot el treball sempre que parli de l'índex acústic em referiré al franco-belga, ja que és el més típic.

4 Les ones sonores

Els sons són vibracions que es transmeten en el medi en forma d'ones sonores.

4.1 Qualitats del so

Les qualitats del so són: el to, la intensitat, la durada i el timbre.

Aquestes qualitats del so (el to, la intensitat, la durada i el timbre) es poden interpretar matemàticament a partir de la funció d'ona:

$$g(t) = A \sin(2\pi ft)$$

4.1.1 El to

El to és la característica d'un so (Ex: quan diem les notes do, re, mi...); i és determinat per la freqüència de la vibració (de l'ona sonora) fonamental o primer harmònic. La freqüència (símbol "f" o "v") ens permet distingir entre tons greus (freqüències baixes) i aguts (freqüències altes). La nota La₃ té una freqüència f=440Hz.

12 semitonos	Nota -12	La-1	27,5 Hz.	27,5 Hz.
12 semitonos	Nota 0	La0	55 Hz.	55 Hz.
12 semitonos	Nota 12	La1	110 Hz.	110 Hz.
12 semitonos	Nota 24	La2	220 Hz.	220 Hz.
12 semitonos	Nota 36	La3	440 Hz.	440 Hz.
12 semitonos	Nota 48	La4	880Hz.	880 Hz.
12 semitonos	Nota 60	La5	1760 Hz.	1760 Hz.

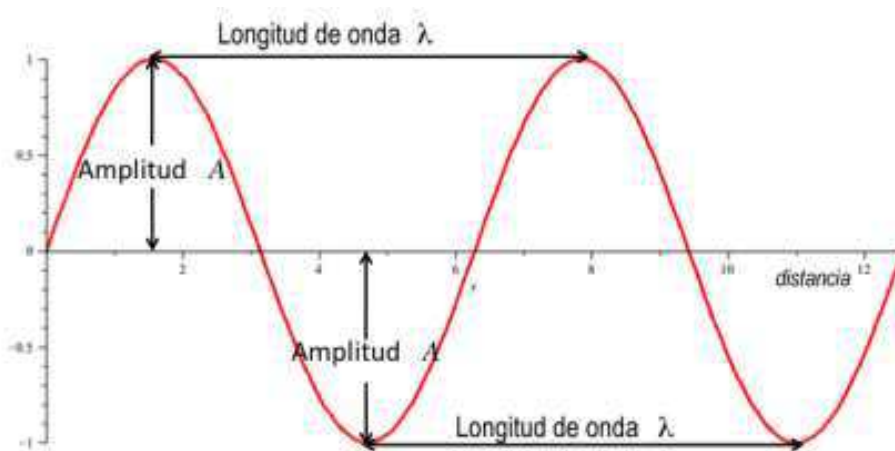
Aquí es pot veure diferents notes La de diferents octaves amb la seva freqüència al costat. A l'esquerra hi ha la diferència de freqüència entre cada octava i es pot veure

que és proporcional, per tant considerem que hi ha la mateixa distància de semitons entre octaves (12 semitons entre cada octava).

Aquesta equació relaciona la longitud d'ona amb la freqüència:

$$\lambda \cdot f = v_f$$

λ = **Longitud d'ona**: distància mínima entre dos punts que es troben en el mateix estat de variació:

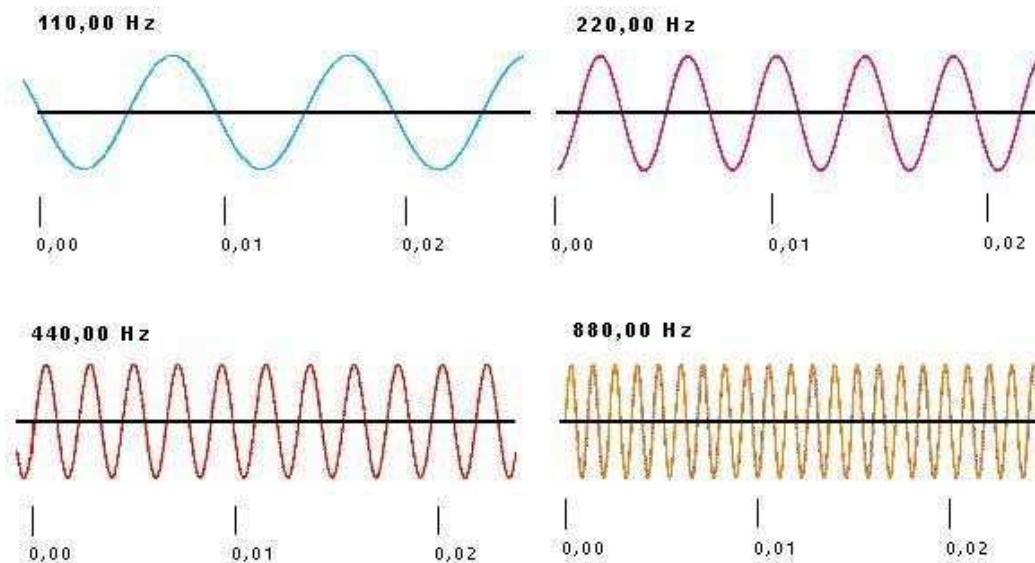


Com que són ones sonores, es mesura normalment en metres (m).

f = Freqüència: És la mesura del nombre de vegades que ocorre un esdeveniment per unitat de temps, en aquest cas és el número d'oscil·lacions per segon. Es mesura en hertz (Hz). És invers al període "T" (mesurat en segons).

$$f = \frac{1}{T}$$

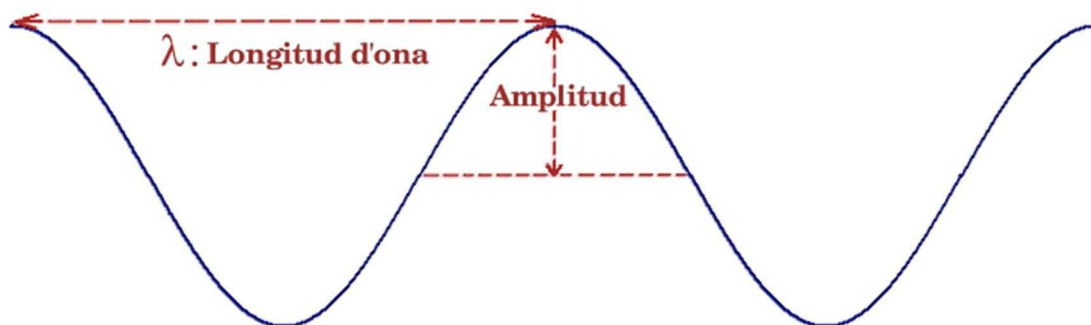
v_f = Velocitat de fase: És la velocitat de propagació de l'ona (com si miressis la cresta d'una ona i observessis la velocitat com avança). Si parlem d'ones sonores, la velocitat de fase és sempre un valor aproximat de 340 m/s en l'aire. El so és vibració de partícules, com més partícules hi hagi més de pressa es propagarà l'ona (més velocitat de fase). Per tant el so es propaga molt més ràpidament pels sòlids que no pas per l'aire. És difícil de calcular la velocitat de fase exacta en l'aire, ja que dependrà de la densitat de l'aire i la temperatura.



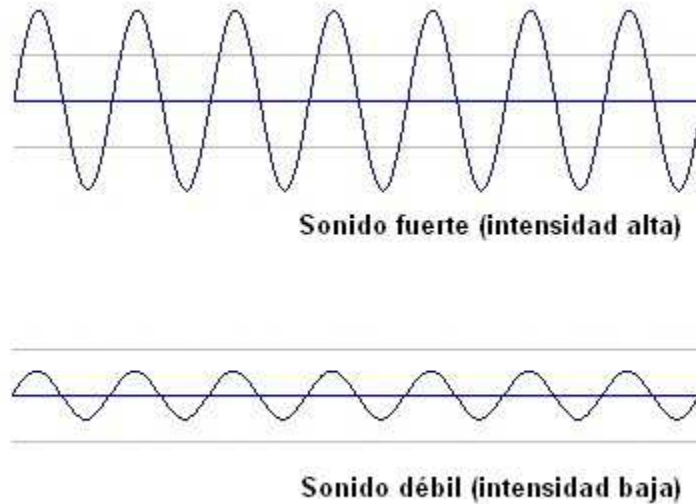
En aquesta imatge es pot veure diferents ones (notes La). Ho sabem perquè les freqüències són proporcionals i perquè la tercera ona és la La 440Hz. Podem veure també que totes tenen la mateixa intensitat perquè l'amplitud A és idèntica en totes les ones.

4.1.2 La intensitat

La intensitat és l'amplitud " A " de l'ona, permet distingir els sons forts o dèbils. Com es mostra a la imatge de la longitud d'ona, A és l'amplitud de l'ona respecte del centre. La intensitat sonora es determina com una funció logarítmica i es mesura en decibels (dB).



Amplitud i longitud d'una ona



Per exemple si un instrument toca molt fort, l'ona serà com la primera de la imatge anterior, i si toca més fluix serà com la segona.

La fórmula que ens indica el nivell d'intensitat sonora mesurat en decibels (dB) és:

$$B_{dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

On la intensitat (I) es mesura en W/m^2 .

La I_0 és el llindar d'audició, que és la intensitat mínima de so capaç de ser percebuda per l'oïda humana. És $10^{-12} W/m^2$.

4.1.3 La durada

La durada és la quantitat de temps que s'està reproduint el so.

4.1.4 El timbre

El timbre coincideix amb la forma d'ona i permet distingir els instruments, d'això en parlaré més endavant.

5 Com i per què sona un violí?

El so que produeixen els instruments es transmet per l'aire. L'aire és un important factor pel qual un instrument pot sonar. Quan aconseguixes tancar la vibració d'aquest aire que per exemple produeix una corda (sigui en una caixa de ressonància, una església, una sala tancada, en un tub, etc.) el que aconseguixes és amplificar aquest so, crear una ressonància. És per això, quasi tots els instruments tenen una caixa de ressonància o alguna plataforma per tancar aquest aire i poder amplificar el so; fins i tot, el cos d'una persona permet fer de caixa de ressonància de la seva veu.

En passar l'arc per la corda del violí, el moviment de l'arc frega les cordes i aquestes vibren i creen una ona. Aquesta ona té molt poca intensitat i es necessita la caixa de ressonància per amplificar-la. La vibració d'una corda produeix un so que depèn de la seva longitud:

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

A través del pont, la vibració que genera la corda es transmet a la caixa de ressonància del violí. Hi ha dos peces importants que fan que la vibració es transmeti a la caixa de ressonància: l'ànima i la barra harmònica.



Dins d'un violí: barra harmònica a d'alt a l'esquerra i l'ànima que és el cilindre

L'ànima és una peça cilíndrica situada a dins del violí, just a sota i a la dreta del pont. I la barra harmònica està situada longitudinalment a l'esquerra del pont. La barra harmònica s'encarrega de transmetre els greus i l'ànima els aguts.

Un cop la vibració està dins de la caixa de ressonància, les efes del violí ajuden a projectar el so cap a l'exterior. La forma característica de les efes és la més òptima perquè aquestes obertures de la tapa permetin treure el màxim de rendiment a l'instrument.

En posar la sordina sobre el pont, s'introdueix una massa, que interfereix aquest moviment oscil·lant del pont i per això l'instrument sona diferent.

El violí està format principalment per fusta i altres materials homogenis. Al ser homogenis, permeten que vibri molt més fàcilment que si les peces fossin d'un altre material que no ho fos, per exemple de plàstic.

Cal recordar que totes les peces que formen el violí no hi són perquè sí. La forma característica d'aquest instrument és la més especial que li permet ser el que és. Si es fes alguna petita modificació, hi ha un gran risc de desequilibrar el violí: no sonaria igual de bé. Per tant, totes les peces que formen el violí influeixen en el so. També influeixen en el so condicions externes. Des de la voluta, a les efes, al mànec, fins a la temperatura, la manera de tocar-lo, la densitat de l'aire, la pressió de l'aire, la situació sentimental de l'instrumentista (si està tens, relaxat, nerviós, el violí sonarà diferent)...

6 Tècniques de tocar el violí

Hi ha moltes tècniques a l'hora de tocar el violí, però només explicaré les que he utilitzat a la meva investigació: pizzicato, vibrar i ponticello.

6.1 Pizzicato¹

Consisteix a pinçar amb la punta dels dits la corda sense fer servir l'arc.

6.2 Vibrar

És una acció que es realitza quan s'està tocant una nota. La mà esquerra (la que té el dit posat a la corda) es mou lleugerament endavant i endarrere, de tal manera que el dit també es mou molt poc amunt i avall. Per tant, el so queda influenciat i se sent: una mica per sota de la nota inicial, després la nota inicial i després una mica per sobre. Aquest bucle es realitza ràpidament i d'una manera relaxada que permet aconseguir una sonoritat de la nota més bonica i expressiva.



Acció de vibrar la nota

6.3 Ponticello

Consisteix a tocar amb l'arc molt a prop del pont.

¹ Per veure el vídeo on surto jo fent un pizzicato amb el meu violí aneu a l'Annex del final de treball per escanejar el codi QR

7 Els luthiers i la construcció del violí

La construcció d'un violí és un procés artesanal, lent i precís. Es triga entre un mes i mig a tres mesos depenent del nivell d'acabat. Les tècniques de construcció parteixen del 1580.

Els constructors de violins s'anomenen luthiers. Jo vaig tenir l'oportunitat de visitar el taller del luthier Xavier Vidal de Barcelona.

Els luthiers estan especialitzats, en Xavier Vidal construeix, repara i restaura violins, violes i violoncels, però no arcs. Hi ha arqueters especialitzats.



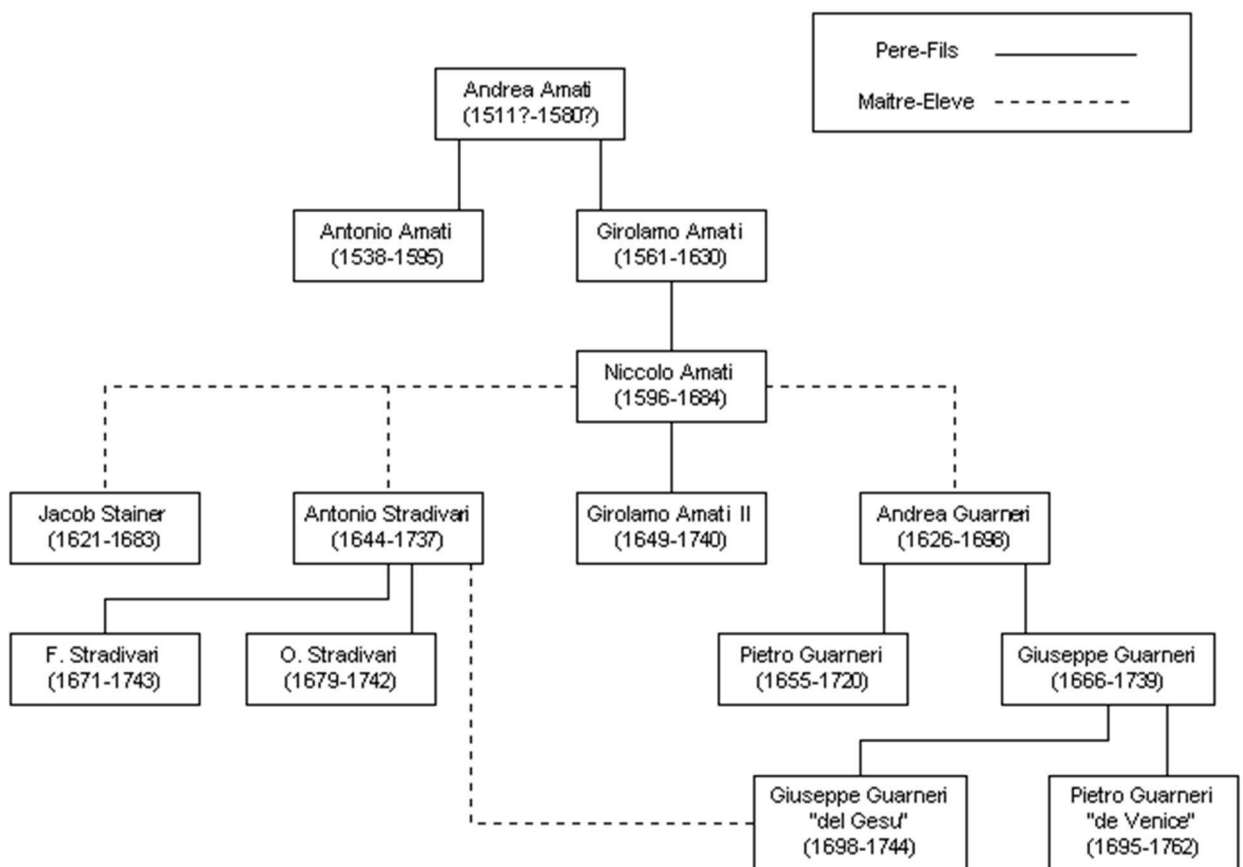
XAVIER VIDAL I ROCA
www.luthiervidal.com
violin – viola – cello



Fotos del taller del luthier Xavier Vidal

Un luthier és un artesà que fabrica, repara i restaura els instruments de música de corda pinçada o fregada com els violins, les violes, els violoncelles, les guitarres, etc. El terme deriva de luth, que significa llaüt.

No se sap exactament, però diuen que la invenció del violí, de la viola i el violoncel la va fer Andrea Amati (1511-1580) de Cremona, Itàlia. Després aquesta tradició de construir violins la va heretar la seva família, Amati va donar formació als seus fills, entre ells Nicolo Amati que va formar una escola que va tenir alumnes molt bons com Antonio Stradivari (1644-1737), Jakob Stainer (1621-1683) o Andrea Guarneri (1626-1698).



Luthiers de Cremona

Poc temps després que es construïssin els primers violins, la tècnica de construcció va assolir molta qualitat, ja amb alguns dels instruments construïts per Andrea Amati i que va seguir fins al segle XVIII amb l'escola de lutheria de Cremona. Els violins més valorats des de tots els punts de vista són els construïts per Antonio Stradivari i per Andrea Guarneri del Gesú. Altres constructors importants foren: Gasparo da Salò (a Brèscia),

Jakob Stainer, el més gran luthier del segle XVII (al Nord dels Alps) i al segle XIX van sobresortir alguns luthiers francesos com Mirecourt o Vuillaume. Avui en dia aquests violins tenen molt de valor musicalment per la seva perfecció en la construcció i en el so.

No se sap exactament perquè els violins Stradivarius sonen tan bé, hi ha diferents hipòtesis.

El que és segur, és que Antonio Stradivarius va fer uns canvis en l'estructura del violí que van aconseguir que tingués més capacitat acústica i més potència.

S'ha vist que la fusta d'auró, píceo o salze del qual estan formats és molt semblant a les fustes d'altres violins, però la diferència és que les dels violins Stradivarius contenen minerals: alumini, calci, coure, sodi, potassi i zinc. Hi ha dos possibilitats, o que va ser la composició del vernís que Stradivarius va aplicar als violins o que aquests minerals van arribar a la fusta per tractar-la de paràsits pels venedors de fusta.

S'ha descobert que la fusta dels violins Stradivarius tenen un 25% menys d'aigua que els violins de fabricació actual i com a conseqüència a menys humitat, més brillant i més net és el so i agrada més a l'oïda humana.

Els violins Stradivarius tenen més oxidació a la fusta, això vol dir més separació entre les fibres de fusta. Això ha estat causat per cents d'anys de tocar els violins: la vibració ha anat alterant el material. Ara sonen encara millor que a la seva època.

7.1 Acústica de les tapes del violí

Els luthiers tallen les peces del violí a partir de blocs massissos de fusta: la tapa a partir de dos blocs adjacents d'avet (*Picea abies*), de veta longitudinal, units per la meitat i el fons a partir d'una sola o diverses peces acoblades d'auró (*Acer platanoides*), dels quals les vetes transversals formen una "flama" o un ris.

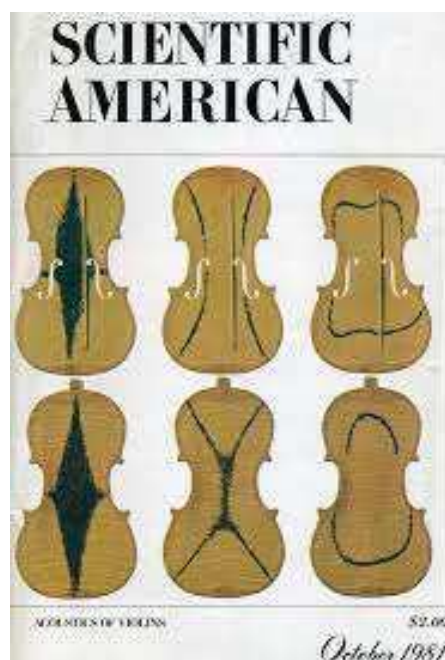
Cada arbre és completament diferent, fins i tot les fustes d'un mateix arbre, això fa que resulti impossible reproduir punt per punt les peces d'un violí òptim i aconseguir el mateix so. Per obtenir una rèplica d'un bon violí no n'hi ha prou en reproduir

mil·limètricament les seves peces geomètriques, s'ha de mirar també les propietats vibratòries de les fustes.

La tapa i el fons influeixen molt en el so. Es van fer estudis científics on van analitzar les vibracions de les tapes per separat i quan ja s'havien ajuntat. Per això posaven una tapa horitzontalment i li posaven serradures per sobre, llavors la feien vibrar emetent sons en diferents freqüències.

Els cossos rígids poden vibrar a una determinada freqüència que els caracteritza i que depèn del material del qual estan fets, de la seva forma i altres particularitats. Si emets la mateixa freqüència que pot absorbir el cos, el so arriba al cos a través de les d'ones que es transmeten amb la pressió de l'aire i el cos vibra. És aquí on apareix la ressonància. Si vas augmentant la intensitat del so, el cos es pot arribar a trencar. Un exemple seria quan una cantant d'òpera canta un so molt agut i aconsegueix trencar una copa de vidre.

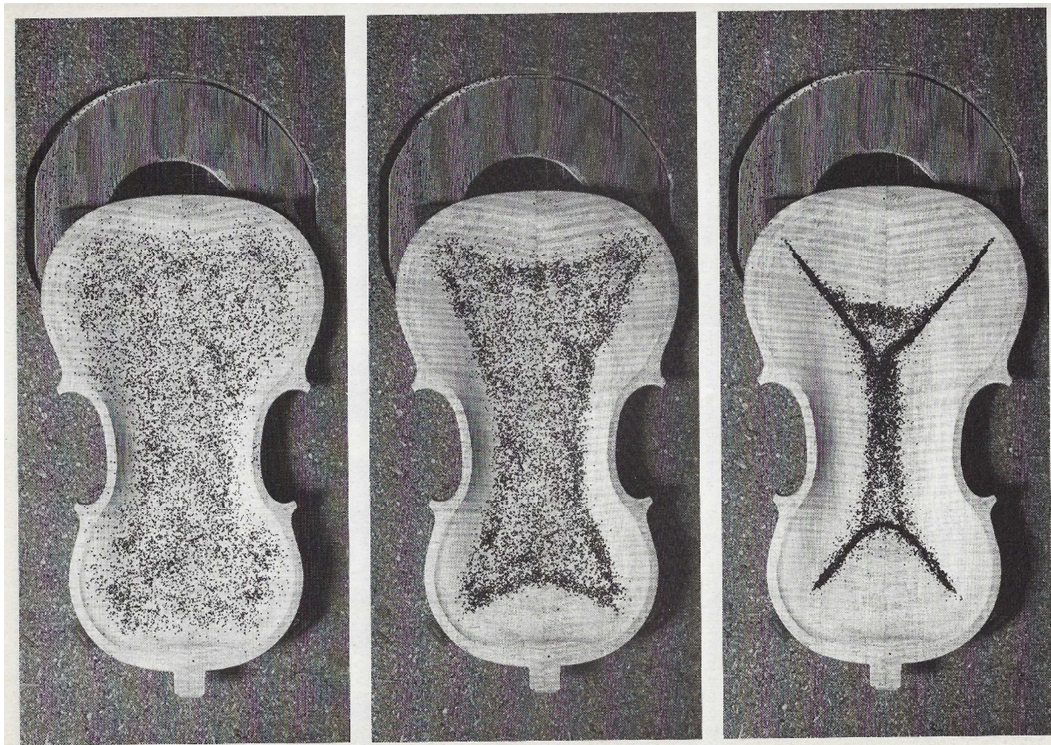
En els estudis van observar que a certes freqüències, les serradures es movien a zones de la tapa no sotmeses a la vibració, creant formes molt definides. Aquesta ressonància que es crea és el resultat de les característiques físiques de la rigidesa i la massa que originen uns patrons d'ones estacionàries com a resposta a la vibració de determinades freqüències, característiques de cada llistó de fusta.



Revista Scientific American de 1981, a d'alt les tapes superiors i a sota les inferiors

El físic i músic alemany Chladni (1756-1827) va arribar a la conclusió que en els bons violins el to de la tapa varia entre un $do\#_3$ i un re_3 , i en el cas del fons es troba entre el re_3 i el $re\#_3$. El 1960 es van fer molts més estudis que van aclarir-ho, de manera que es diu que un instrument és òptim des del punt de vista musical quan el to principal de la tapa i el del fons diferencien en un interval d'un to o un semitò.

Les propietats vibratòries de la tapa i el fons resumeixen la història que hagi viscut la fusta des del seu origen. Quan un luthier tria la fusta abans de construir el violí, ja és artesania. Els luthiers diuen que les làmines de fusta han de reposar i s'emmagatzemen apilades a l'aire lliure durant 5-10 anys en el cas de l'auró i una mica més en el cas de l'abet. Hi ha luthiers més exigents que diuen que s'ha d'emmagatzemar 50 anys abans de ser construïts. Agrònoms experts en fustes diuen que si es deixa reposar, la fusta madura de tal manera que augmenta el seu volum concretament en les zones cristal·lines de l'estructura cel·lular.



Aplicació del mètode Chladni per C. Maley publicada a la revista "Investigación y Ciencia" núm. 63 any 1981. Es veu l'evolució d'un fons de violí muntat sobre un altaveu que emet una única freqüència. Les partícules fines d'alumini o un altre material es desplacen creant una figura.

8 El perquè del sistema musical actual i la relació matemàtica que té amb el llenguatge musical respecte el so

Avui en dia, tenim un sistema musical complex, basada en una evolució de la música que hi ha hagut durant diversos anys. Totes les melodies, escales, acords, composicions, entre d'altres, estan creades amb unes estructures musicals basades en relacions matemàtiques. En alguns moments del treball anomenaré coses relacionades amb el llenguatge musical (escala, interval, 3a M, semitò...). És per això que a continuació hi ha una breu base matemàtica de l'origen del llenguatge musical amb l'objectiu que el lector pugui entendre el perquè del sistema musical actual.

8.1 El sistema musical pitagòric i l'escala pitagòrica

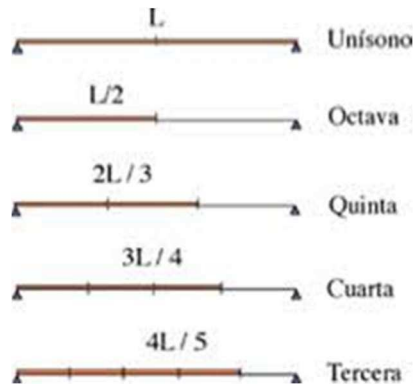
L'escola pitagòrica, activa des del segle VI aC, va observar que com més curta era una corda, la nota que sonava era més aguda. Van fer diferents experiments i van establir un model matemàtic d'un fenomen físic però mirant-ho de manera bonica i estètica, similar com el que va passar amb la proporció àuria:

Si agafes una corda d'una certa longitud i poses un dit a la meitat (relació numèrica 2:1), apareix un interval d'octava (8ª), per exemple és la distància que hi ha entre un Do i el següent Do.

La segona relació és quan es posa el dit a un terç de la longitud total de la corda (expressió numèrica 3:2), que musicalment correspon a un interval de quinta (5ª); per exemple la distància entre Do i Sol.

A continuació tenim aquella que es posa el dit a un quart del total (expressió numèrica 4:3) mentre que en l'àmbit musical correspon a un interval de quarta (4ª); per exemple la distància entre Do i Fa.

Després hi ha la tercera major (3ª M) (relació 5:4) i així anar fent, de manera que els intervals dels sons relacionats amb les fraccions de forma $\frac{n+1}{n}$ són agradables i bonics, queden bé.

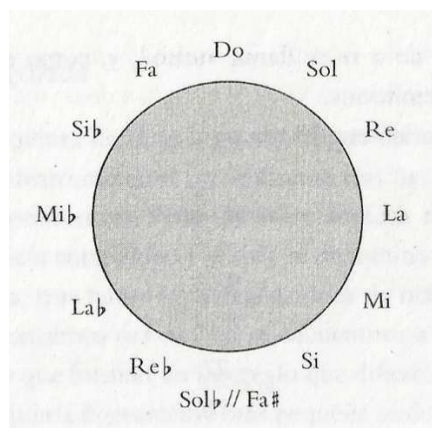


Intervals i la longitud de les cordes (marró)

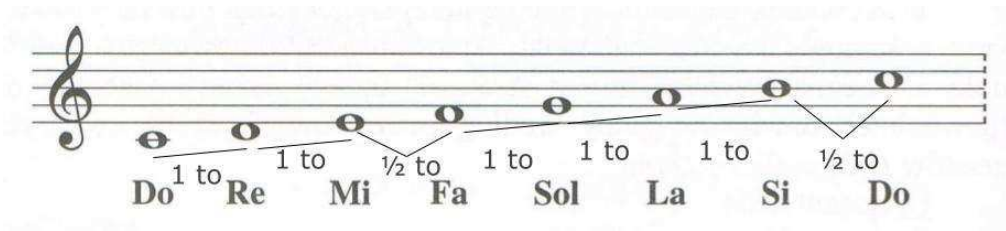
En aquest quadre hi ha la relació entre la freqüència i la longitud de la corda amb les notes o intervals:

Nota	Freqüència	Longitud de la corda	Exemple notes escala Do M
Original	f	L	Do
Octava	2f	$1/2 \cdot L$	Do (agut)
Quinta	$3/2 \cdot f$	$2/3 \cdot L$	Sol
Tercera	$5/4 \cdot f$	$4/5 \cdot L$	Mi

Gràcies a Pitàgores, que amb el seu instrument d'una corda anomenat Monocordio, va establir aquestes relacions matemàtiques per poder universalitzar més la música. Va crear la successió de 5tes perfectes, anomenada escala pitagòrica (Fa, Do, Sol, Re, La, Mi, Si) que més endavant, si ho ordenem, ha acabat sent l'escala cromàtica d'avui en dia (Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si).

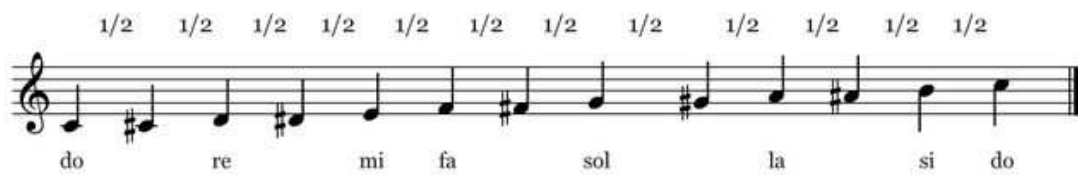


Escala Pitagòrica



Escala de Do M (escala diatònica)

L'escala cromàtica està formada per 12 notes que entre cadascuna hi ha un semitò o mig to. Dos semitons formen un to.



Escala cromàtica, entre cada nota hi ha una distància musical de mig to

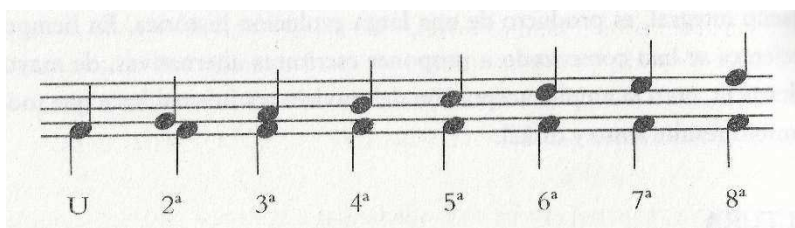
Els pitagòrics van establir unes relacions matemàtiques per definir les notes a través de les 5tes de tal manera que va quedar com aquest quadre:

Nota	Do	Re \flat	Re	Mi \flat	Mi	Fa	Sol \flat	Sol	La \flat	La	Si	Do
Relació de freqüències	1	$\frac{256}{243}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{32}{27}$	$\frac{81}{64}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{1024}{729}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{128}{81}$	$\frac{27}{16}$	$\frac{243}{128}$	2

Aquestes relacions són respecte el Do 1.

8.2 El intervals, l'afinació relativa i la coma pitagòrica

Els pitagòrics també van estudiar les relacions entre les notes, és a dir, els intervals. L'interval és la distància musical que hi ha entre dues notes. Cada interval es denomina per la quantitat de notes que s'ha de passar entre les dues notes. Per exemple l'interval que hi ha entre Do i Fa és una quarta perquè s'ha de passar per quatre notes (do-re-mi-fa). L'interval d'octava és per exemple de Do al següent Do o de Fa al següent Fa o de Re al següent Re... En el cas del do passa pel do-re-mi-fa-sol-la-si-do. Els intervals poden ser ascendents o descendents.



Intervals menors o iguals que una octava, en notació musical



Totes les combinacions d'intervals melòdics possibles entre els sons

La 8^{va}, la 5^{ta} i la 4^{ta} són els intervals musicals més importants dins d'una tonalitat perquè és la relació matemàtica més pròxima amb la nota principal. Aquests tres intervals són la base d'altres sistemes musicals que no són tan populars i no estan tan estandarditzats.

El següent quadre especifica la mesura en semitons dels diferents intervals:

Interval	Mesura en semitons
Uniso	0
2 ^a menor	1
2 ^a major	2
3 ^a menor	3
3 ^a major	4
4 ^a justa	5
4 ^a augmentada o 5 ^a disminuïda	6
5 ^a justa	7
6 ^a menor	8
6 ^a major	9
7 ^a menor	10
7 ^a major	11
8 ^{va}	12

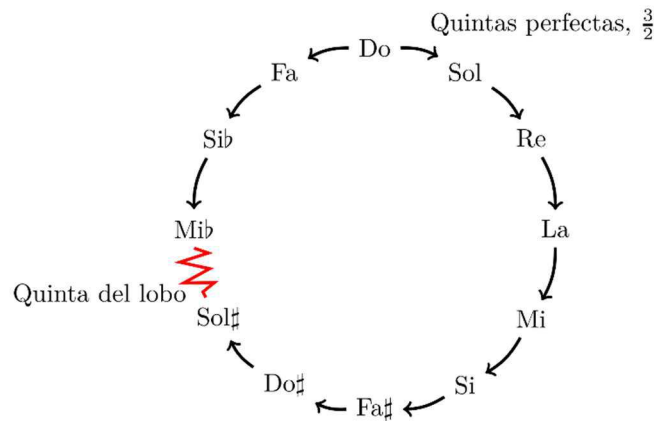
Els intervals també es poden calcular numèricament. Tenim una nota amb freqüència F_1 i volem fer una 5^{ta} (respecte a F_1) anomenada F_2 . Una quinta recordem que hi ha una relació de freqüències 3/2:

$$F_2 = F_1 \left(\frac{3}{2} \right)$$

Com he especificat a l'apartat 4 de les ones sonores, cada nota té una freqüència pròpia que s'identifica respecte de les altres. Però no és absoluta, és relativa. És a dir, que si el La 440 Hz sona a 439 Hz o 444 Hz, el reconeixem com a La però una mica més agut o greu. No té perquè que el La sempre sigui 440 Hz. Antigament, en l'època barroca, s'afinava a 415 Hz, perquè s'agafava el La de l'orgue que ja estava afinat. Depèn del lloc i el temps; ha variat durant els anys. Actualment hi ha orquestres que no agafen el 440 Hz, per exemple, quan vaig anar a fer un curs intensiu de música a Alemanya, vam afinar amb el La 441 Hz i normalment afinem a 442 Hz com he explicat al primer apartat del treball.

Així, dues notes de freqüències 440 Hz i 880 Hz es troben en perfecta relació d'octava; però dues notes de 442 Hz i 882 Hz també es trobaran perfectament afinades entre si en relació d'octava encara que no sigui uns *Las* "oficials". En canvi si n'hi ha dos de 443 Hz i 887 Hz no estaran afinades en perfecta relació d'octava però el so es reconeixerà perfectament com a octava no afinada.

Bastant més tard de Pitàgores, es va demostrar que l'afinació pitagòrica no és perfecte: Si continues amb la divisió de la corda fins a 12 quintes consecutives, després del Si hi hauria el Fa# que segons el llenguatge d'avui en dia hauria de ser el mateix so (mateixa freqüència) que un Solb. Doncs no. Sona desafinat. La distància que hi ha entre el Fa# i el Solb correspon a una coma pitagòrica. Per tant podem dir que són quasi el mateix so. Aquesta última 5^{ta} és lleugerament més petita que una 5^{ta} J i és anomenada com "la quinta del llop".

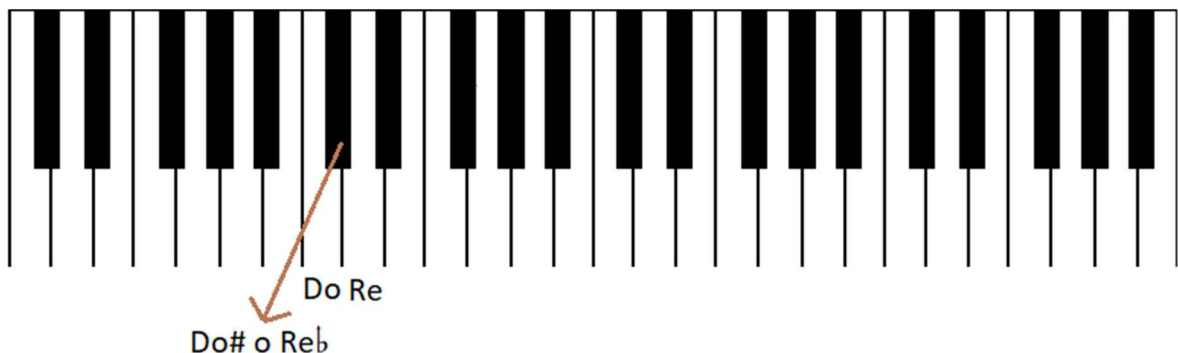


La coma pitagòrica correspon a un 1% aproximat de l'octava, equivalent quasi a un quart de semitò. Partint d'una freqüència f i afegint 12 quintes ($3/2$) i traient-li les 7 octaves, el seu càlcul matemàtic és:

$$\text{coma pitagòrica} = \frac{f \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^{12}}{f \cdot 2^7} = 1,013643265$$

La coma pitagòrica apareix perquè la quinta és incompatible amb l'octava.

En un piano l'afinació no és perfecte, és temperada. En el piano la màxima precisió d'afinació són els semitons: un $\text{do}\sharp$ i un $\text{re}\flat$ és el mateix so (el bemoll (\flat) resta un semitò i el sostingut (\sharp) suma un). Però amb el violí (i un violinista amb una molt bona oïda) pot tocar afinant a la màxima precisió; amb el violí es pot arribar a obtenir l'afinació perfecta.



En el piano el $\text{do}\sharp$ i el $\text{re}\flat$ és la tecla negra entre mig del Do i el Re

Llavors hi ha l'escala diatònica que determina l'afinació de les notes d'una manera molt més complexa que la de Pitàgores. En la majoria de la música, des de la música clàssica

fins al rock i molts altres, les notes d'una cançó estan relacionades amb una nota principal, anomenada tònica o centre tonal. Per exemple quan diem aquesta cançó està en Do M o en Re m, això és la tonalitat. Doncs el problema que hi ha amb l'escala diatònica és que l'afinació d'alguns intervals varia segons la tonalitat. I és ben còmode quan les notes que toques estan relacionades amb la tònica però quan canvies de cançó (fas un transportament) sona desafinat.

Per tant és quan finalment apareix el temperament, que consisteix a fer una aproximació de les notes de tal manera que toquis en la tonalitat que toquis sonarà parcialment afinat. És el cas de l'afinació del piano, que l'oïda humana l'accepta prou bé.

Però no deixa de ser una aproximació, no es pot aconseguir l'afinació perfecta en un piano. El violí, i en general els instruments de corda, i la veu humana permeten modificar l'altura o el to de la nota per obtenir una afinació perfecta i més precisa, cosa que molts altres instruments no poden fer.

D'altra banda, tocant el violí et pot aparèixer la incompatibilitat amb les 5^{tes} i les 3^{res} o les 5^{tes} i les 8^{ves} (quinta del llop). Això no és cap problema, ja que quasi inconscientment mous el dit una mica endarrere o endavant; només ho notes una mica quan es toquen dobles cordes (tocar dues cordes alhora).

Vincenzo Galilei, pare de Galileu va proposar en el segle XVI una divisió de l'octava en dotze notes amb una distància d'un semitò iguals per totes les notes de l'escala. Avui en dia principalment ens basem en aquest sistema de 12 notes i 12 semitons. Si 12 semitons formen una octava (2), el valor d'un semitò x seria equivalent a:

$$x^{12} = 2$$

$$x = \sqrt[12]{2}$$

$$x = 1,05946 \dots$$

9 Les notes i els harmònics

Una nota és un so (per tant una ona sonora). Aquesta nota pot ser simple o pura que és que només hi ha una freqüència única, per tant una vibració fonamental. Per exemple amb un diapasó es pot fer un La pur de 440 Hz. Aquest so es representa en funció del temps com:

$$g(t) = A \sin(2\pi ft)$$

Estranyament al nostre voltant hi ha sons purs si no que normalment apareix una ona composta. Els instruments musicals són la composició d'una vibració fonamental i altres vibracions anomenats harmònics.

Quan toquem una nota amb un instrument, com per exemple el violí, aquesta està acompanyada per diferents harmònics. Un harmònic és un membre acústic simple que s'integra amb altres mitjançant unes lleis regulars per a determinar una ona composta. És a dir, que l'ona que es genera quan toquem una nota amb el violí és composta, a part de la nota fonamental sonen moltes més notes proporcionals.

Per exemple, toquem un Do₀. El so fonamental és el Do₀, però a part d'aquesta nota també en sonen infinites més, múltiples enters positius respecte de la fonamental.



Aquests són els 16 primers harmònics del Do₀ (freqüència fonamental o 1r harmònic= 32,70 Hz).

El 2n harmònic és una 8^a J respecte la fonamental. És un Do₁ i la seva freqüència és el doble, per tant: 65,41 Hz.

El 3r harmònic és una 5^a J respecte del 2n, per tant és un Sol₁ de 98,1 Hz.

No és estrany trobar fins a 30 o 40 harmònics en un so tot i que l'oïda humana només pot apreciar els 16 primers.

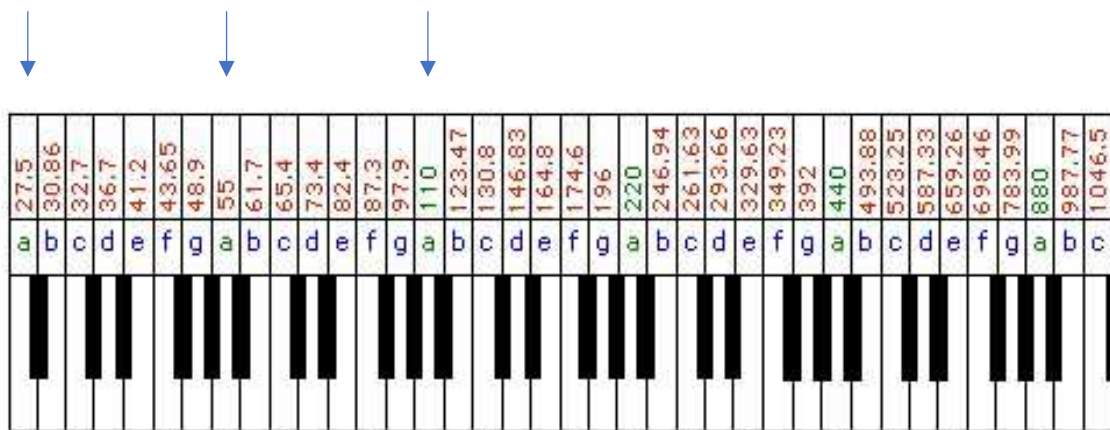
He fet aquesta taula que relaciona els 16 primers harmònics de qualsevol nota amb la freqüència i els intervals.

Harmònics	Distància segons el llenguatge tradicional (interval)*	Freqüència
1r o fonamental	-	1a freqüència
2n	8ª J respecte 1r harmònic	Freqüència del 1r x 2
3r	5ª J respecte 2n (8ª J + 5ª J = 12 respecte 1r)	1r x 3
4t	8ª J respecte 2n (8ª J + 8ª J respecte 1r)	1r x 4 2n x 2
5è	3ª M respecte 4t (més petita que la 3ª M típica del pentagrama)	1r x 5
6è	3ª m respecte 5è (més gran que el sistema temperat o de Pitàgores) o 5ª respecte el 4t	1r x 6 3r x 2
7è	L'aproximat ja no ens val prou: 3ª m respecte 6è (molt petita) o 2ª M (molt gran) respecte 8è.	1r x 7
8è	8ª J respecte 4t	1r x 8 4t x 2
9è	2ª M entre 8è i 9è (1t gran)	1r x 9
10è	2ª M entre 9è i 10è (1t petit)	1r x 10
11è	1 to (petit) entre 10 i 11 aprox.	1r x 11
12è	8ª respecte 6è i una 5ª respecte 8è	1r x 12 6è x 2
13è	Ens passa el mateix que el 11è i el 7è, l'aproximat ja no ens serveix	1r x 13

14è	No podem assegurar que formi una 8ª respecte el 7è per tenir el doble de freqüència.	1r x 14 7è x 2
15è	5ª respecte 10è	1r x 15
16è	5ª respecte 8è o 4 octaves respecte la fonamental; respecte l'harmònic 16 hi ha una 2a m o semitò diatònic (4 comes)	1r x 16 8è x 2

*Arriba un moment que el llenguatge musical d'avui en dia ja no és prou precís. Els sostinguts (#) i els bemolls (b) ja no són prou precisos i ens hauríem de basar amb les comes.

Si ens hi fixem, la freqüència dels harmònics sempre és la del primer harmònic multiplicat pel número d'harmònic que és. Això és perquè no hi ha un creixement lineal, sinó exponencial. Per exemple el La més greu del piano s'afina a 27,5 Hz. Per passar al següent La, la freqüència s'ha de multiplicar per 2, de manera que el següent La s'afinarà a 55 Hz, el següent a 110 Hz i així successivament.

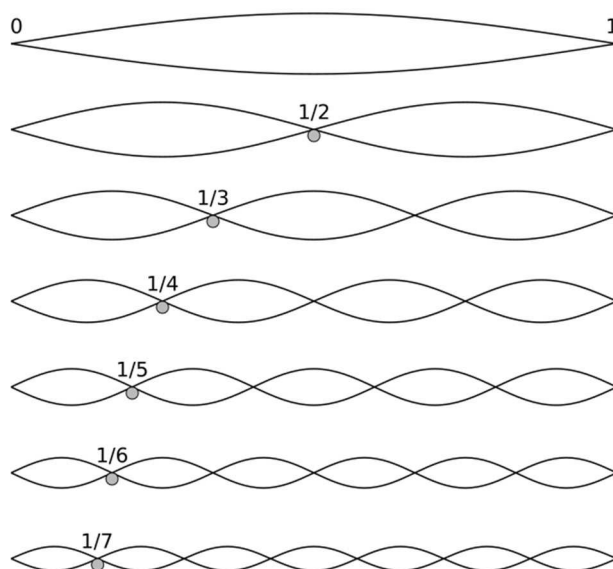


Teclat d'un piano on estan marcades les freqüències (Hz) de la nota de cada tecla. Les notes es designen amb la notació alfabètica americana. Les fletxes marquen les tres notes La consecutives.

Una corda vibra molt esbojarradament fent diferents oscil·lacions a la vegada:



Vibració d'una corda²



Harmònics
1r o fonamental
2n
3r
4t
5è
6è
7è

Totes les oscil·lacions anteriors són d'una mateixa corda. Cada vibració genera una nota (harmònic) i el conjunt és el que acaba formant l'ona composta.

La intensitat d'aquests harmònics varia segons l'instrument (si és de vent o si és de corda, si és un violí o és una viola, violoncel o contrabaix...) és el que se'n diu el timbre. Gràcies al timbre, una persona pot identificar l'instrument que està sonant, encara que toquin la mateixa nota.

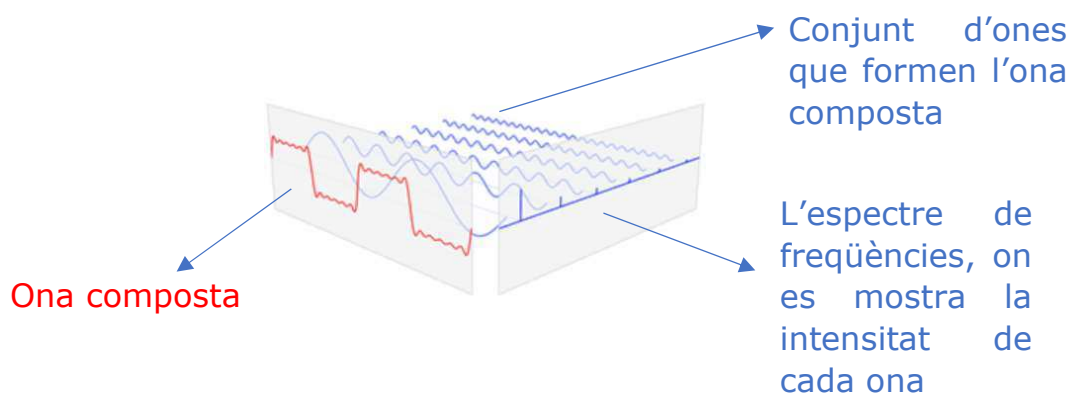
² Per veure el vídeo de la vibració d'una corda d'un violí aneu a l'Annex del final de treball per escanejar el codi QR

10 L'anàlisi de Fourier

La descomposició del so com a suma d'harmònics s'obté matemàticament amb l'anàlisi de Fourier o transformada de Fourier.

La transformada de Fourier és l'espectre de freqüències d'una funció d'ona. L'espectre és el conjunt de les ones sonores (de freqüències ben definides) que componen un so per superposició.

Amb la transformada de Fourier aconseguim trobar la intensitat de les ones que totes juntes formen una ona composta.



La transformada de Fourier³ és un procediment matemàtic molt complex, però existeixen programes informàtics que permeten fer aquest anàlisi amb el so captat per un micròfon. Jo faré servir el programa informàtic Audacity en la part pràctica.

³ Per veure l'animació de la imatge del procés de la transformada de Fourier aneu a l'Annex del final de treball per escanejar el codi QR

11 Experiments

Els experiments que he realitzat consisteixen a analitzar un so d'un instrument i representar l'ona i l'espectre de freqüències.

Les mostres que he pres en tots els experiments estan gravades amb el micròfon (Bang & Olufsen) del meu ordinador portàtil. Sempre intentant mantenir la mateixa distància del micròfon a l'instrument. Totes les mostres de so estan gravades en una sala concreta, que disposa de plaques d'insonorització, de l'Escola Municipal de Música de Mollet del Vallès. He passat les mostres per un filtre, HP noise Cancellation, un software intel·ligent que detecta tota classe de soroll ambiental que pugui haver i el cancel·la. Així automàticament se suprimeix el petit soroll que hi pugui haver-hi i que no formi part de l'instrument com pot ser el mateix soroll de l'ordinador, sons que no s'originin a l'aula, que vinguin de l'exterior, petites ressonàncies de la sala, respiracions de les persones...

L'objectiu del procediment de la presa de mostres és que sigui el més semblant possible en tots els experiments. M'he esforçat molt a fer tots els experiments en les mateixes condicions.

11.1 Experiment 1: Comparació de la nota La 440 Hz amb el violí I, II i III

L'objectiu d'aquest experiment és obtenir l'espectre de freqüències corresponent a una nota determinada de diferents violins.

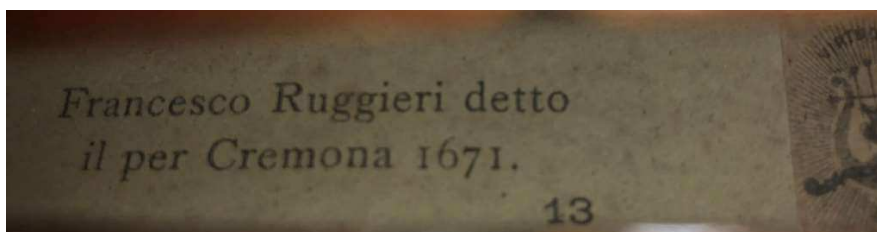
He gravat un La₃ 440 Hz corda oberta (no poso cap dit la corda per tocar la nota). I amb l'Audacity he fet la transformada de Fourier i he pogut veure clarament els harmònics del La₃ tocat amb el meu violí (violí I), el violí del meu pare (violí II) i el de la meua germana (violí III).

11.1.1 La 440 Hz amb el violí I (el meu violí)



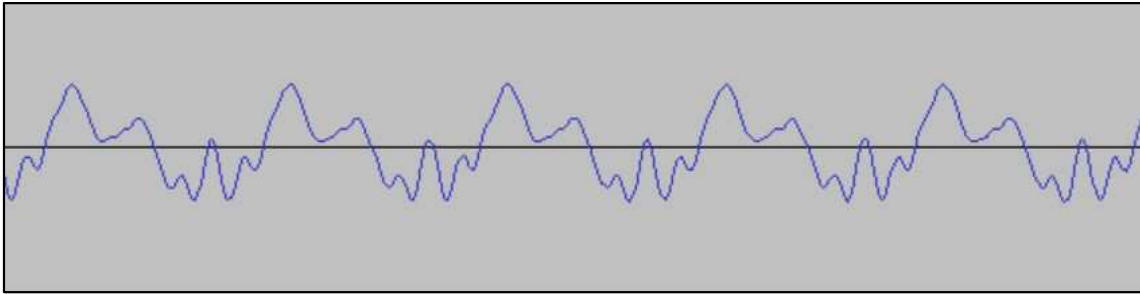
El meu violí (violí I)

Tots els violins tenen enganxada una etiqueta dins de la caixa de ressonància que es pot veure mirant a través de les efes de violí. Aquesta etiqueta té informació de l'origen del violí. En alguns casos pot dir el nom del luthier que el va construir, el lloc, l'any i a vegades un distintiu. O bé l'etiqueta pot dir el nom del model del violí en el cas que sigui un violí basat en un altre construït anteriorment.



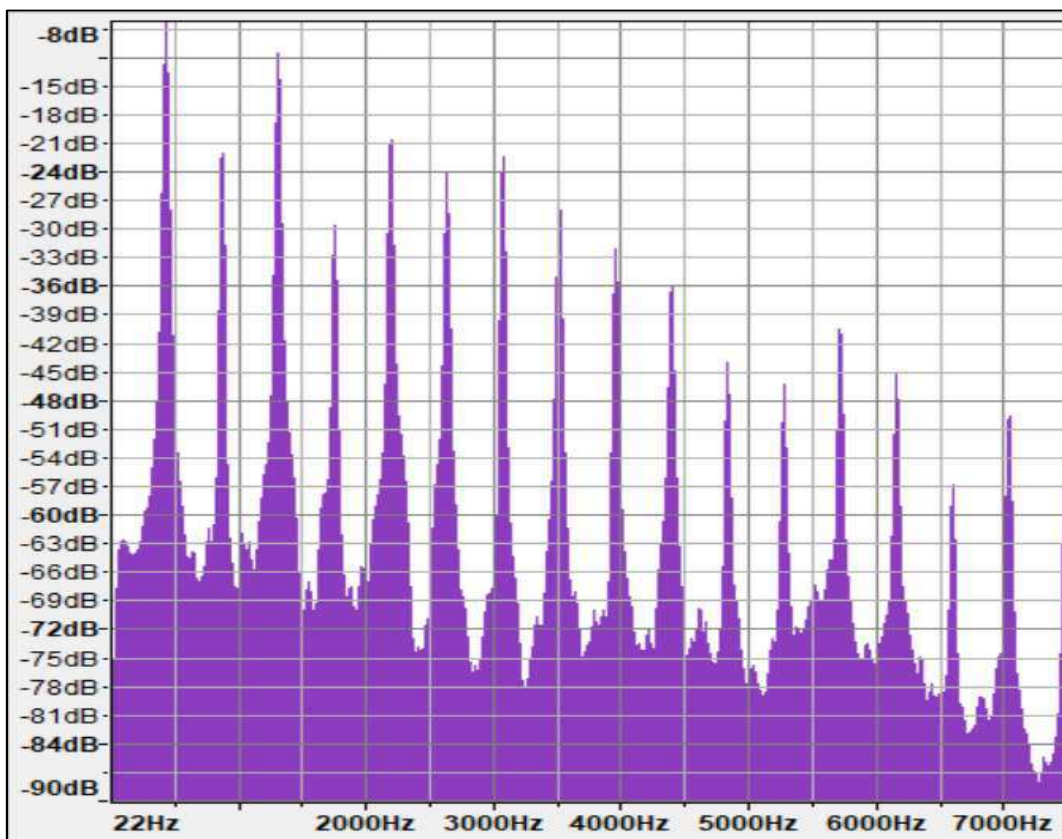
Etiqueta de l'interior del meu violí (violí I)

El meu violí és francès, construït pel luthier Jérôme Thibouville-Lamy a l'escola de luthieria de Virtuose Mirecourt, de Mirecourt, França, durant els anys 1900-1910, basat en els dissenys estructurals d'un violí de Francesco Ruggieri fet a Cremona el 1671.



Ona violí I, La 440 Hz (corda oberta)

Amb l'Audacity he fet la transformada de Fourier i en la següent gràfica es pot veure la quantitat de freqüències i la intensitat de cadascuna d'elles, que es troben a l'ona composta del La:



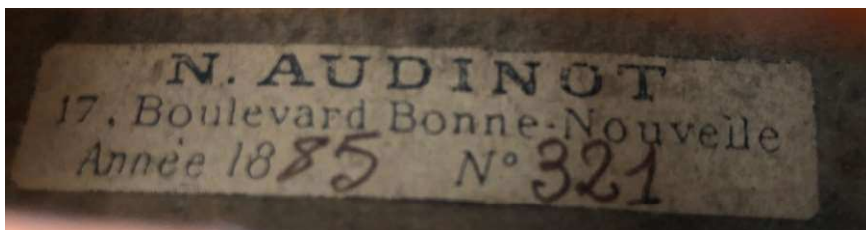
Espectre de freqüències: La 440 Hz (corda oberta) tocat amb el violí I

11.1.2 La 440 Hz amb el violí II (del meu pare)

He gravat la nota La 440 Hz amb el violí del meu pare per comparar-ho.

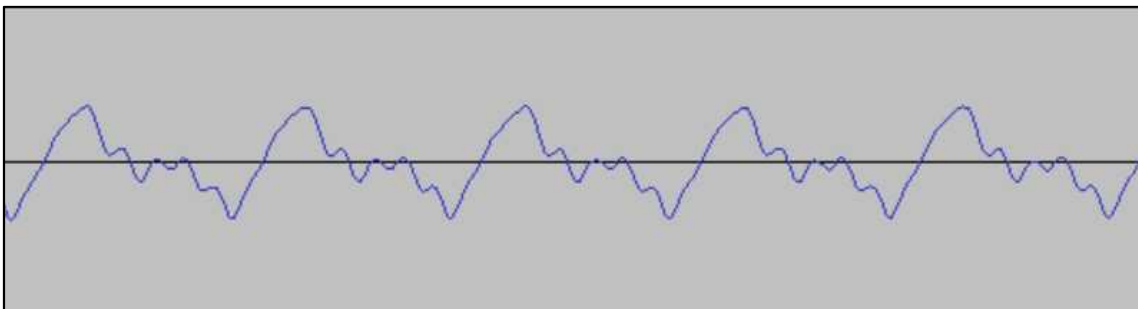


Violí del meu pare (violí II)

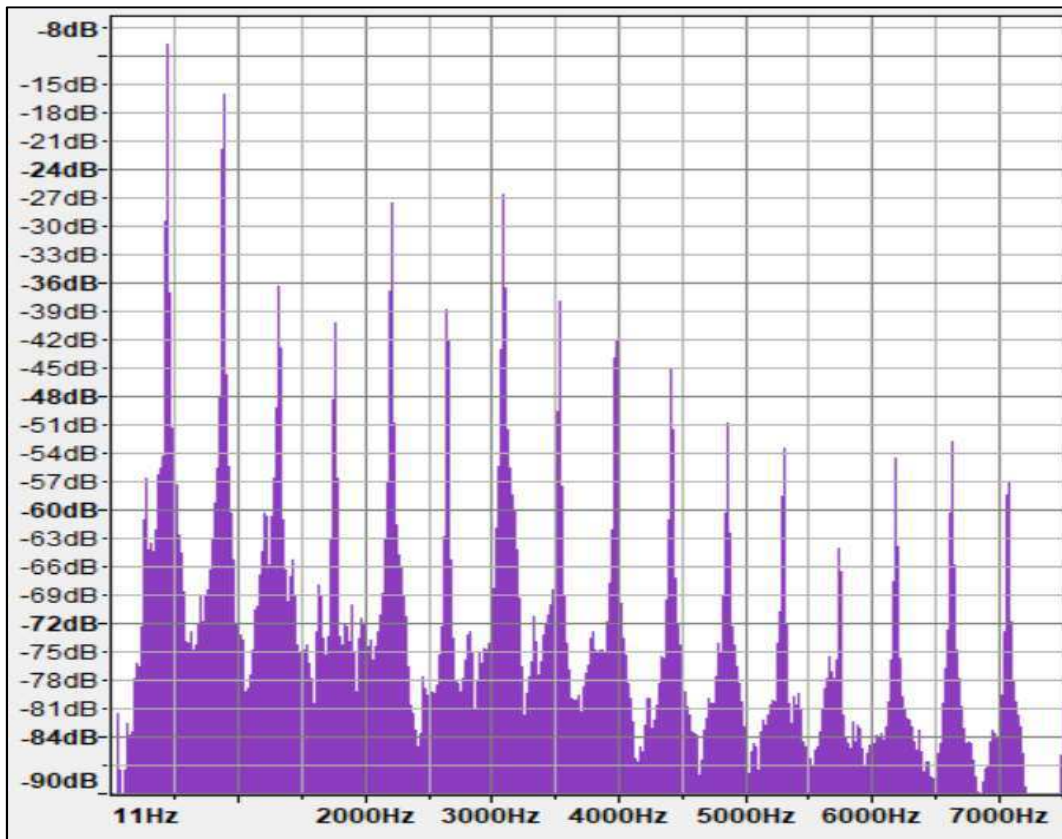


Etiqueta de l'interior del violí II

El violí del meu pare va ser construït l'any 1885 pel luthier N. Audinot al carrer Boulevard Bonne-Nouvelle núm. 17 de París, França. L'etiqueta pertany al mateix violí.



Ona del violí del violí II, La 440 Hz (corda oberta)



Harmònics La 440 Hz (corda oberta) tocat amb el violí II

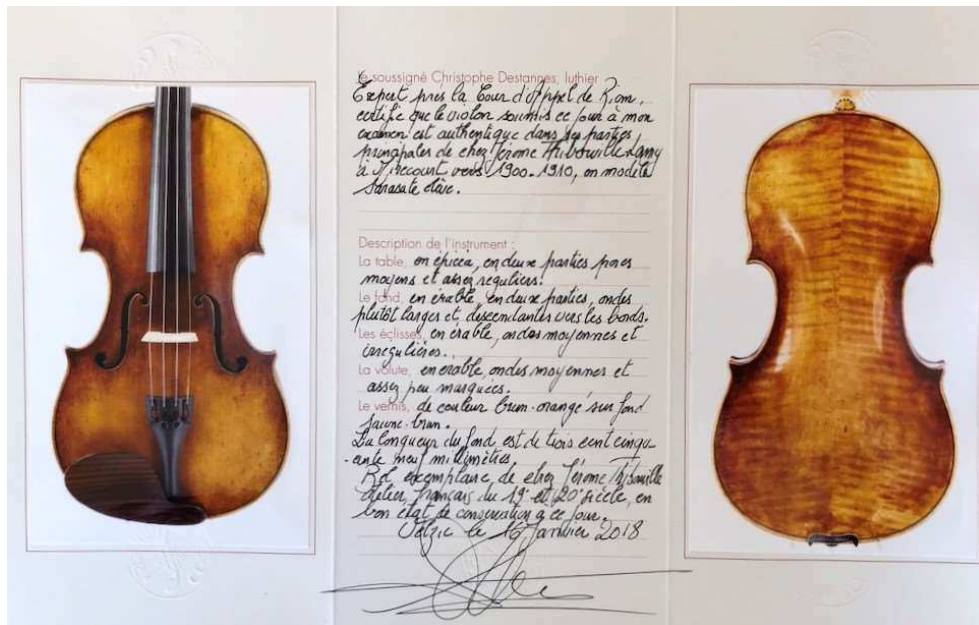
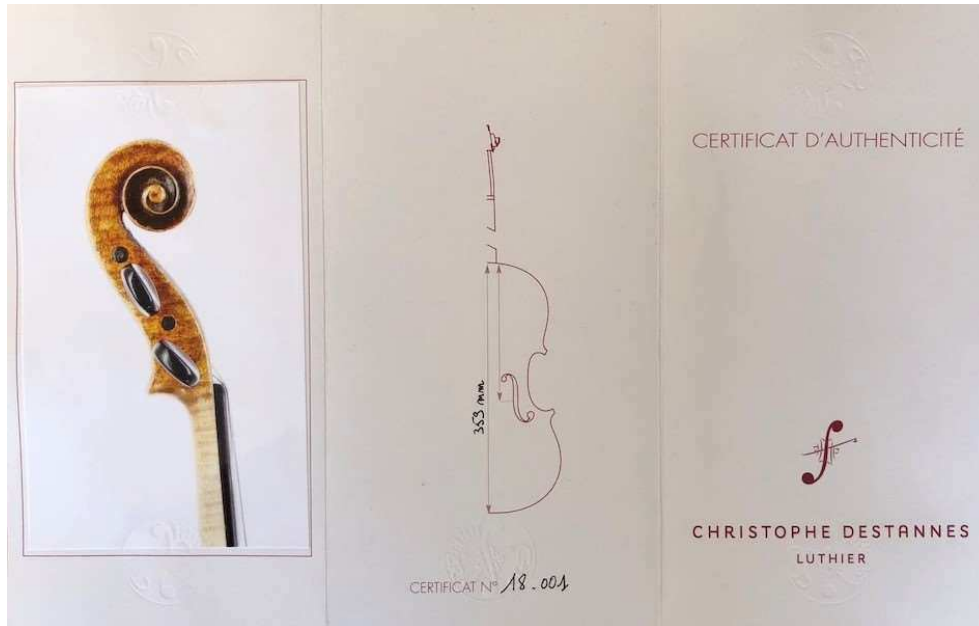
11.1.3 La 440 Hz amb el violí III (de la meva germana)



Violí de la meva germana (violí III)

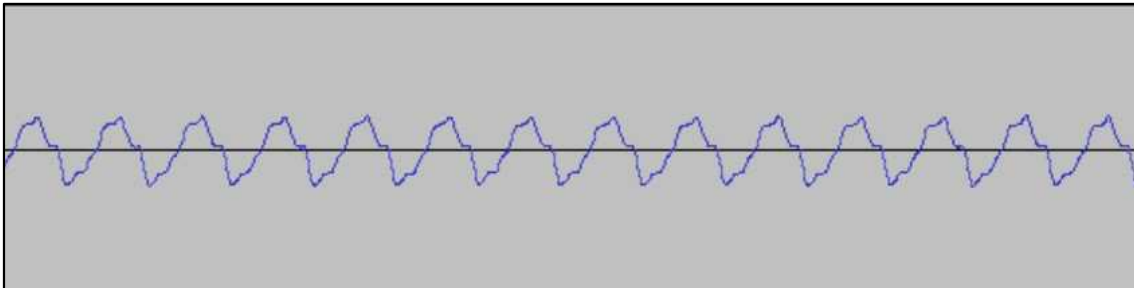


Etiqueta de l'interior del violí III



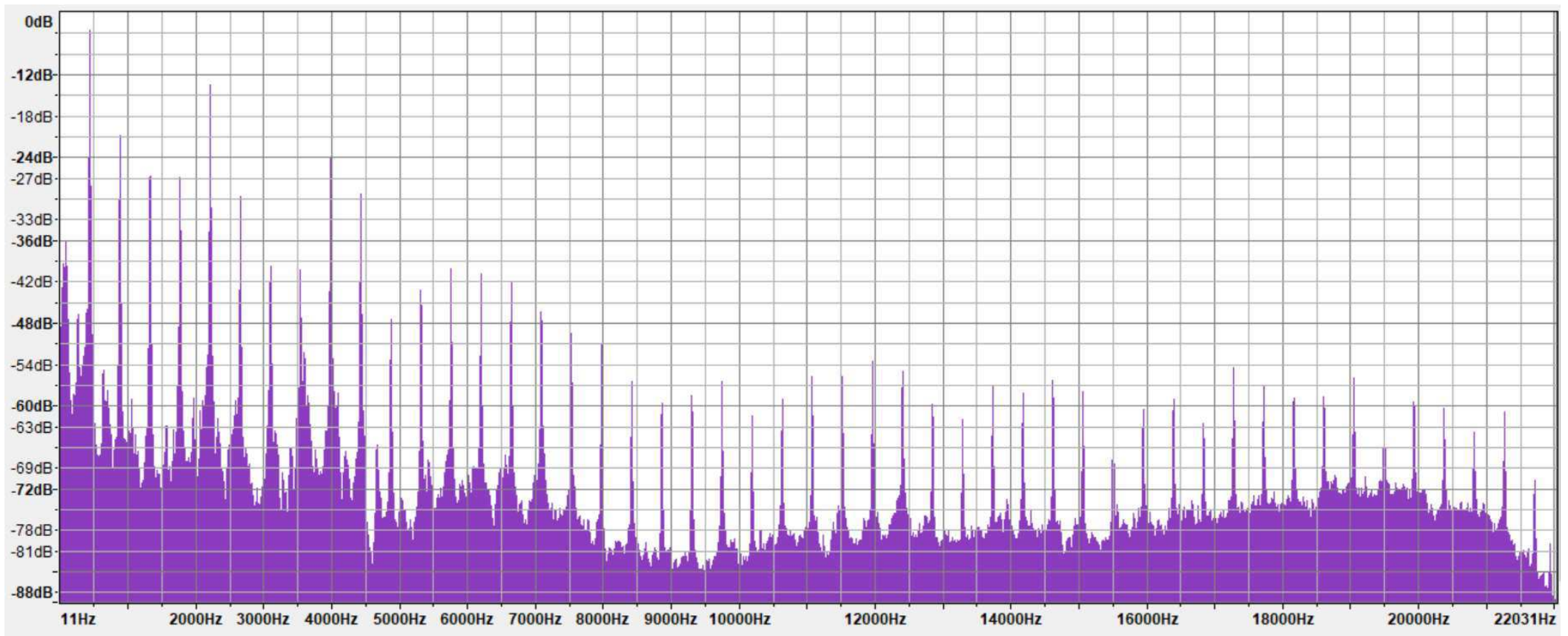
Certificat d'autenticitat del violí III

El violí III, el de la meva germana, prové del mateix lloc del meu violí, el violí I. És model Sarasate i va ser construït per Jérôme Thibouville-Lamy a l'escola de luthieria de Virtuose Mirecourt, de Mirecourt, França, l'any 1909.



Ona del violí III, La 440 Hz (corda oberta)

En el cas del violí III, he posat el gràfic de l'espectre de freqüències més ampliat perquè es puguin veure més harmònics.



Espectre de freqüències: La 440 Hz (corda oberta) amb el violí III

11.1.4 Anàlisi

En aquest experiment podem concloure que hi ha una fonamental o primer harmònic que és el La 440 Hz i després hi ha ple d'harmònics al darrere que complementen la nota composta. Podem trobar mínim 50 harmònics en aquesta nota. Els harmònics superiors als 20000 Hz la nostra oïda ja no és capaç de sentir-los. La intensitat d'aquests harmònics és característica del so del violí.

Podem observar, comparant, que els harmònics del violí II estan més ben definits que els altres dos. Tots els violins comencen amb la fonamental amb la màxima intensitat del so. Després, el segon harmònic de tots els violins té menys intensitat que el primer. En el violí II i el violí III, el tercer harmònic baixa la seva intensitat juntament amb el quart, que es queda més o menys a la mateixa intensitat. En canvi, en el violí I, el tercer harmònic és més potent que el segon. Després, en el violí I, es veu com fa una "muntanya" amb la resta d'harmònics que van baixant lentament fent una altra petita muntanya al tretzè harmònic. En el violí II, els harmònics que tenen més intensitat són el primer, el segon, el cinquè i el setè. Mentre que al primer violí són els mateixos però en lloc del segon, el tercer. En el violí III, els que destaquen són el primer, el cinquè, el novè i el desè. La resta de la gràfica III acaba fent "muntanyes" ben definides d'intensitat d'harmònics.

11.1.5 Conclusió

Mirat per sobre, en general, les tres gràfiques d'espectre de freqüències segueixen la mateixa estructura decreixent. Però, les ones són ben diferents entre els violins. Els tres violins són bons, de luthieria, per això té sentit que s'assemblin una mica les gràfiques. El violí II és més bo que els altres dos i el que veig és que el violí II té els harmònics més ben definits. Les petites diferències entre els diferents violins que he anomenat a l'apartat d'anàlisi, són característics de cada violí.

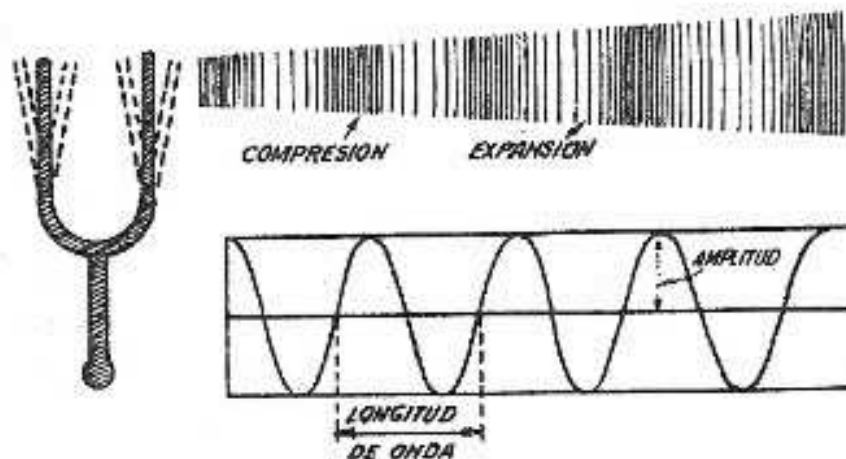
Amb el violí III, el de la meva germana, he fet una prova i he analitzat amb l'Audacity la transformada de Fourier per aconseguir un espectre de freqüències més ampli, fins a 22000 Hz. Tot i que a partir dels 20000 Hz ja no els podem sentir. Però, analitzant la

relació de la intensitat dels primers harmònics, és a dir, els harmònics fins a 8000 Hz, ja podem determinar les característiques bàsiques de l'espectre de freqüències obtingut per a cada instrument.

11.2 Experiment 2. Demostració: La pur només té una freqüència, la fonamental

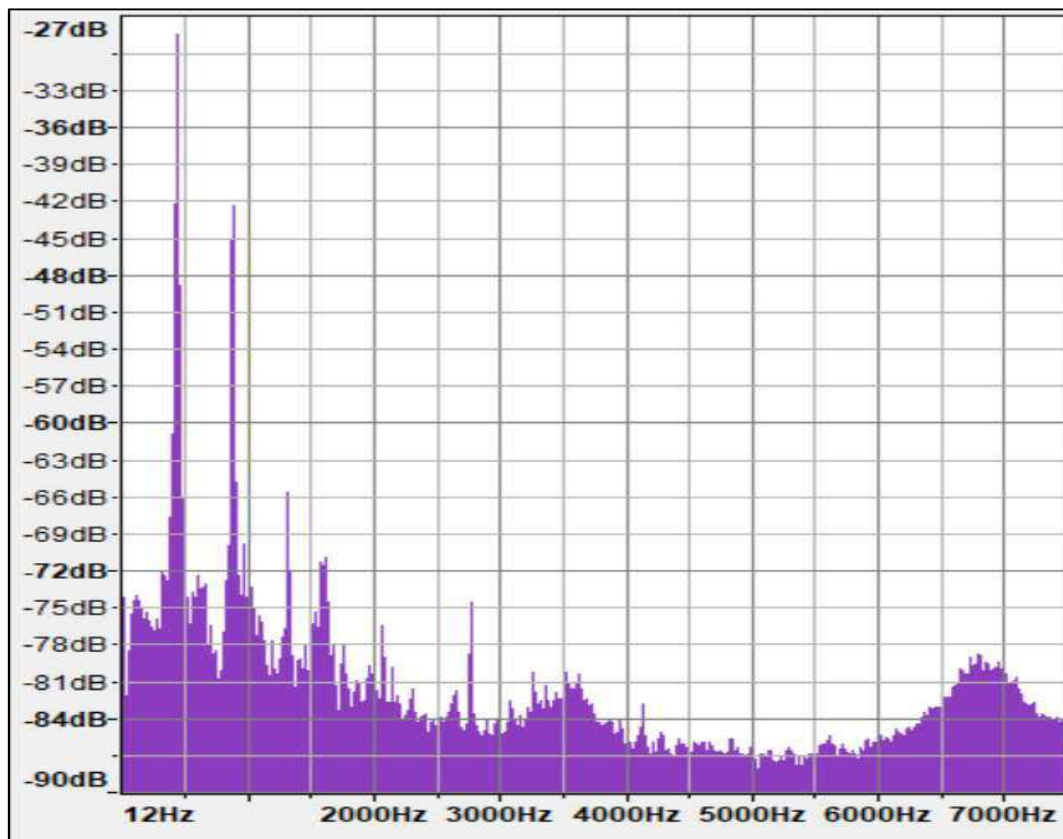
11.2.1 La 440 Hz amb el diapasó

En aquest experiment demostro que un La pur només té una freqüència, la freqüència fonamental. Primer vaig intentar gravar un La pur 440 Hz amb un diapasó, però després de varies proves vaig veure que no quedava bé. Perquè per fer sonar un diapasó, primer li has de donar un cop a les dues "forquilles" que vibren i creen l'ona perfecta, que si fas silenci, pots sentir-la, però normalment es recolza sobre un objecte (com per exemple fusta o un material que sigui caixa de ressonància) per fer que soni més.

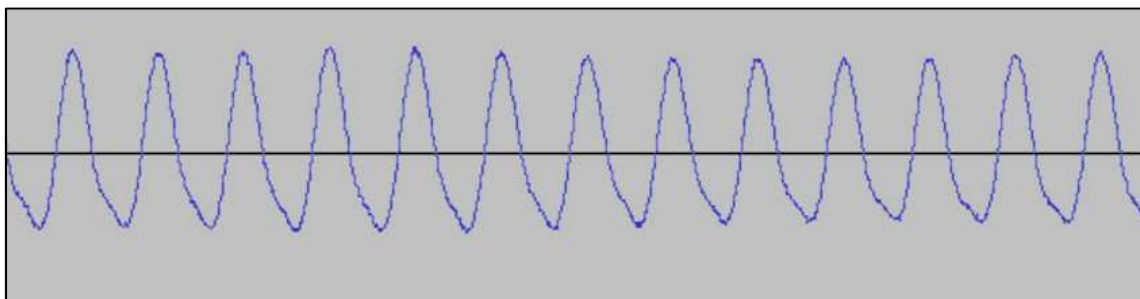


Ona i vibració d'un diapasó ideal

Ho vaig provar amb un diapasó que produïa un La 440 Hz. Si ho feia sense recolzar, el micròfon no captava el so; i si ho feia recolzant, en transmetre's la vibració sobre la taula, el so canviava i apareixien altres freqüències.



Harmònics La pur 440 Hz realitzat amb un diapasó recolzat sobre una taula de fusta

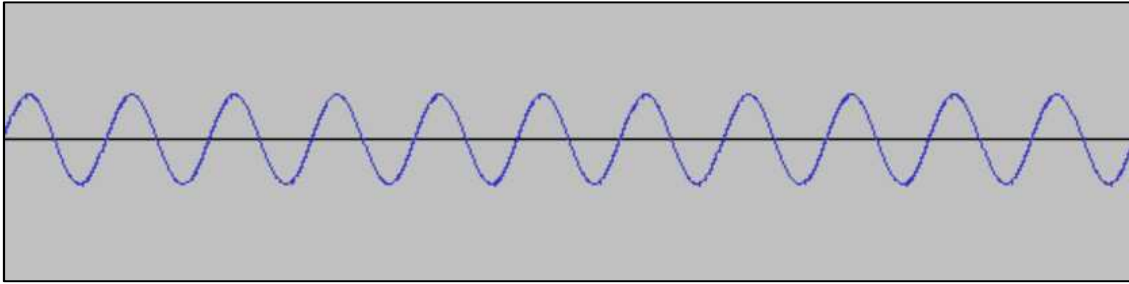


Ona diapasó, La 440 Hz ampliat perquè la intensitat del so era baixa

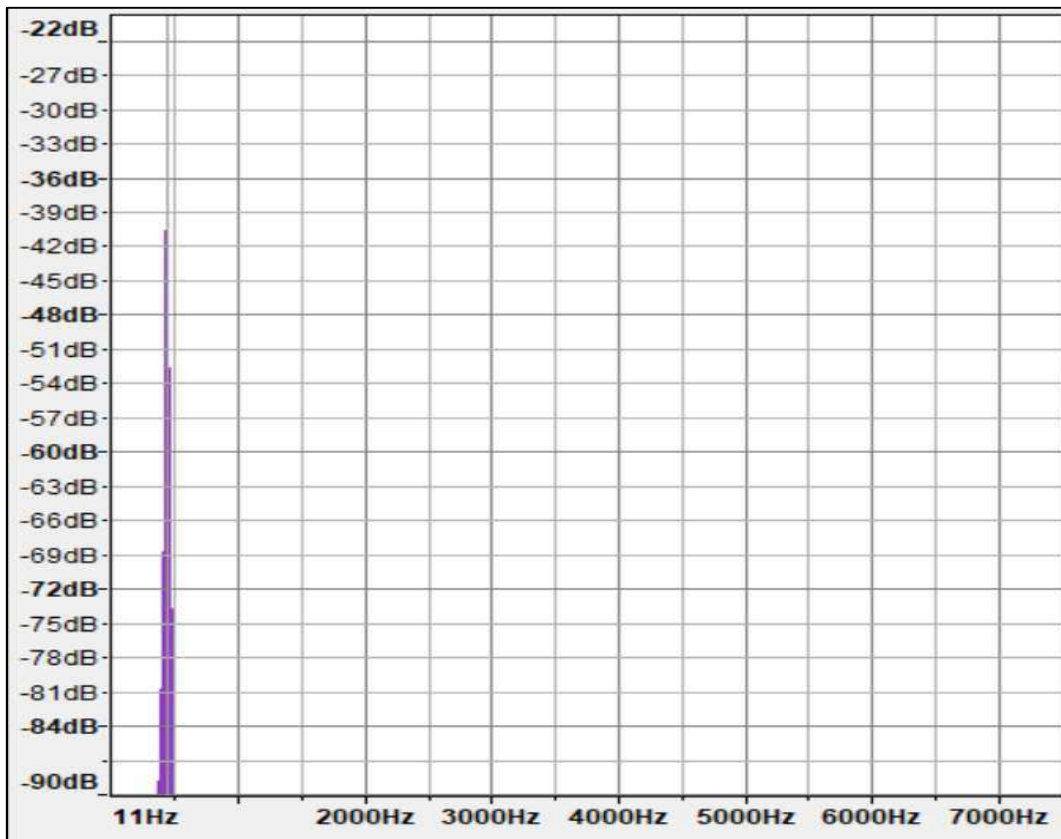
Si ens hi fixem bé, podem veure que no acaba de ser una ona perfecta sinó que la part inferior de l'ona està desplaçada i una mica deformada.

11.2.2 La pur 441 Hz amb ordinador

Per tant, per demostrar que el La pur només té una freqüència, la fonamental, vaig crear un so artificial a través de l'ordinador: un La pur 441 Hz.



Ona pura, La 441 Hz ampliat perquè la intensitat del so era baixa



Harmònic fonamental La pur 441 Hz realitzat artificialment amb l'ordinador

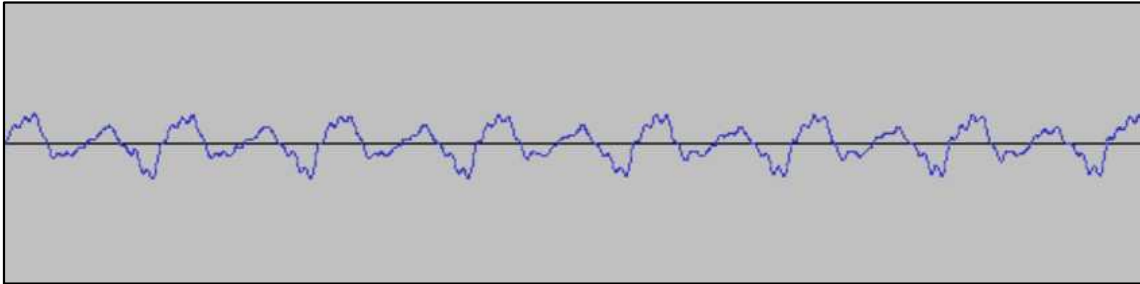
11.2.3 Conclusió

Es veu clarament a la gràfica que el La creat per mi amb l'ordinador només té una sola freqüència, el La 441 Hz, ja que és una ona simple. L'experiment ha estat un èxit.

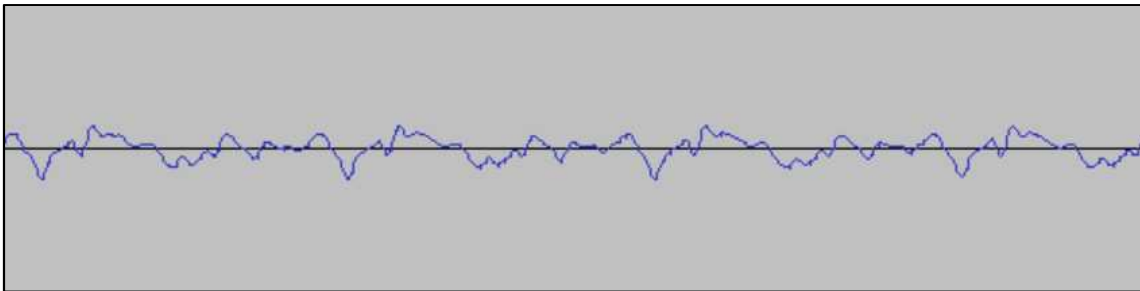
11.3 Experiment 3: Comparació del La 221 Hz entre el violí I i el violí II

11.3.1 Desenvolupament i resultats

He gravat el La més greu que podem tocar amb el violí: el 221 Hz. Consisteix a posar el dit índex a la corda Sol, i el resultat és el següent:



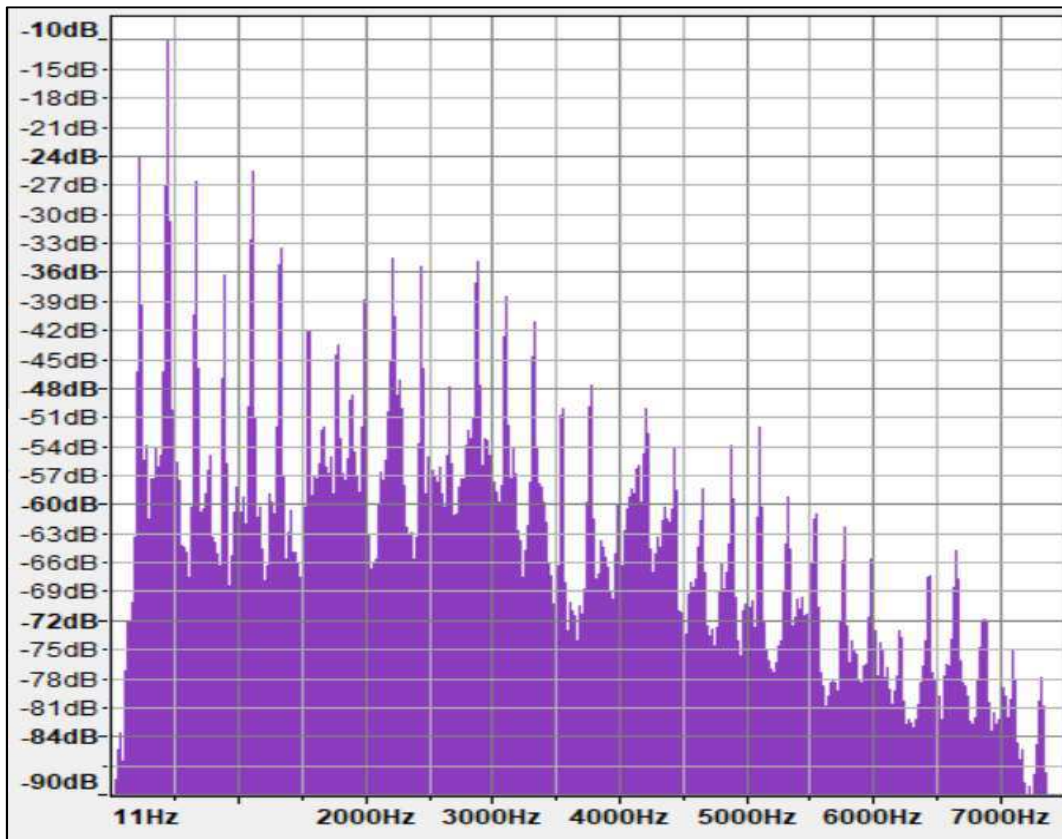
Ona del violí I, La 221 Hz



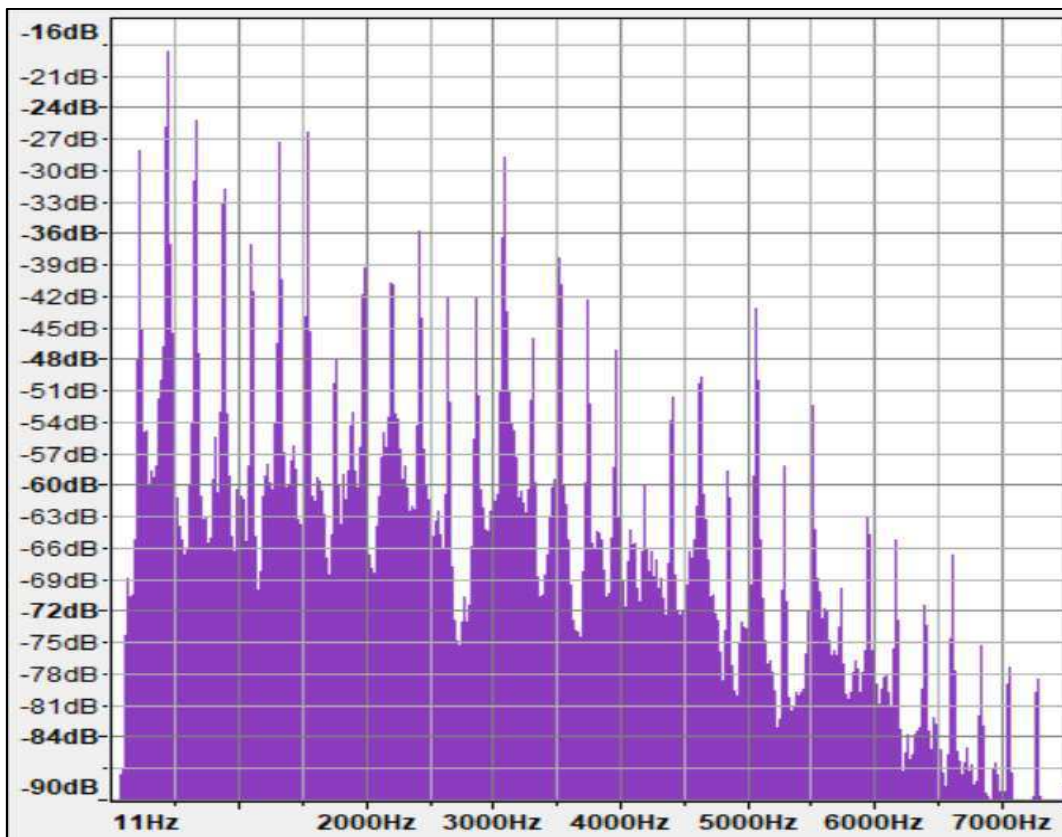
Ona del violí II, La 221 Hz



Posició dels dits de la ma esquerra per realitzar la nota La 221 Hz a la corda Sol



Harmònics La 221 Hz violí I



Harmònics La 221 Hz violí II

11.3.2 Anàlisi i conclusions

Les ones tenen una forma peculiar i complexa. Comparant aquest experiment amb l'experiment 1, els dos anàlisis de Fourier de l'experiment 3 presenten les freqüències molt juntes entre elles. Això és degut a raons físiques que demostren que com més greu és una nota, les freqüències estan més juntes i com més aguda és, més separades estan les freqüències entre si.

En les dues gràfiques d'aquest experiment, curiosament el segon harmònic, el 442 Hz, té més intensitat que el fonamental. Senyal que deu ser una peculiaritat dels violins.

En el violí II ressalten els harmònics 1, 2, 3, 6, 7, 14 i 23. En el violí I, en canvi, la intensitat dels harmònics després dels primers, estan més anivellats. I en tots dos casos, els harmònics van decreixent.

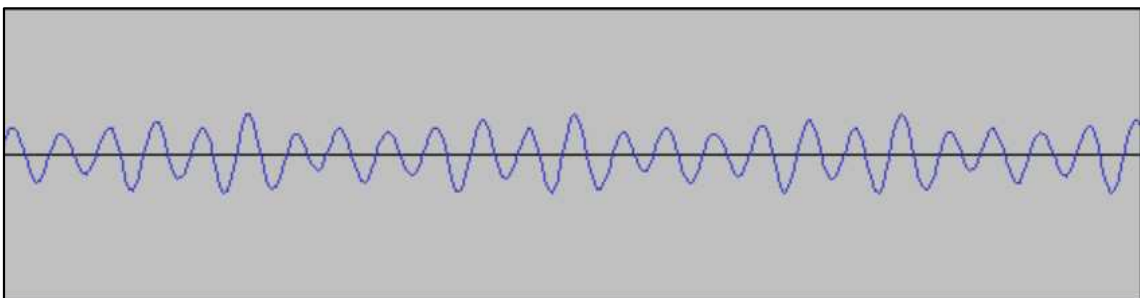
Hi ha molt de volum a sota dels pics dels harmònics que també decreix. Això m'hi fixaré en els pròxims experiments.

Vaig fer diverses gravacions vibrant el La i no vibrant-lo. Després d'haver gravat, vaig veure que no hi havia diferència en els harmònics d'un La vibrat i un La no vibrat. Per tant, és indiferent si es vibra la nota o no; no influencia amb els harmònics.

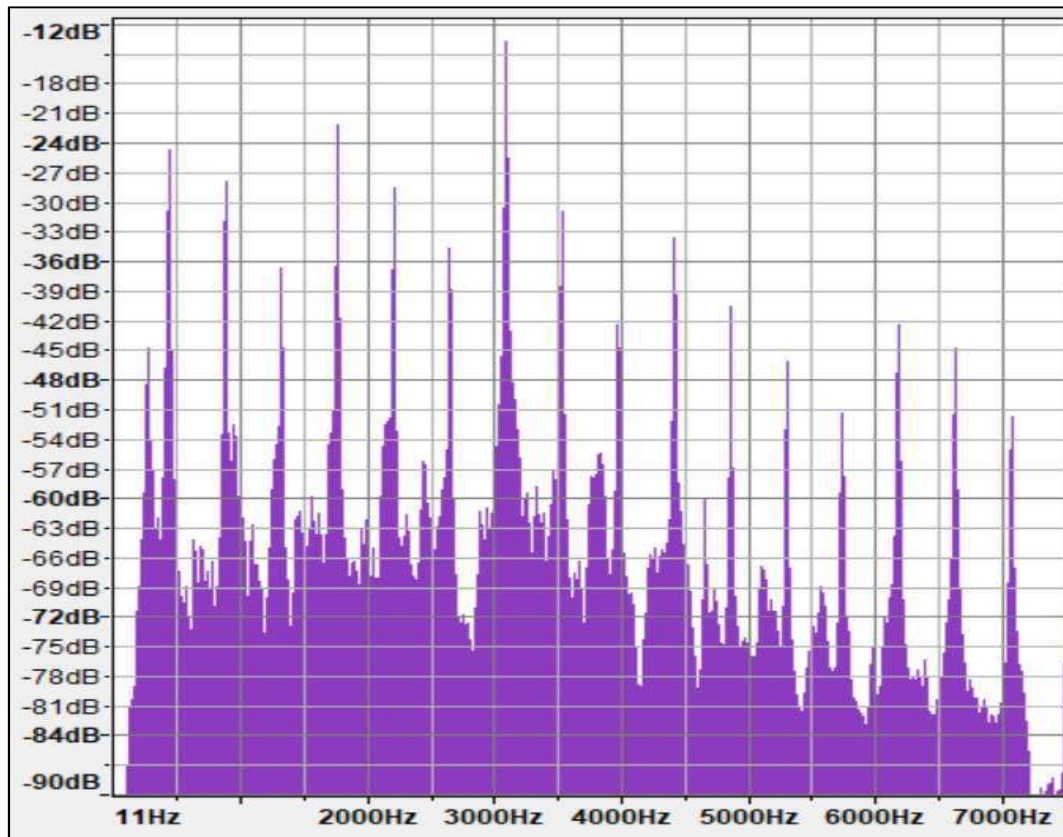
11.4 Experiment 4: La 441 Hz tocat amb el violí II a prop del pont (ponticello)

11.4.1 Desenvolupament i resultats

En aquest experiment he gravat un La 441 Hz amb el violí II fent ponticello, és a dir, tocant el La corda oberta apropant l'arc al pont. Tocant així el so és diferent.



Ona del violí II, La 441 Hz (corda oberta) ponticello (a prop del pont)



Harmònics La 441 Hz ponticello tocat amb el violí II

11.4.2 Anàlisi

En aquest cas també he vist que els harmònics de freqüència més alta tenen més intensitat que la fonamental.

El 7è harmònic té una intensitat més alta que la fonamental juntament amb el 4t que el supera per poc. Una cosa curiosa és que abans del 1r harmònic hi ha una freqüència de 307 Hz, que equivaldria aproximadament a un Re#₃.

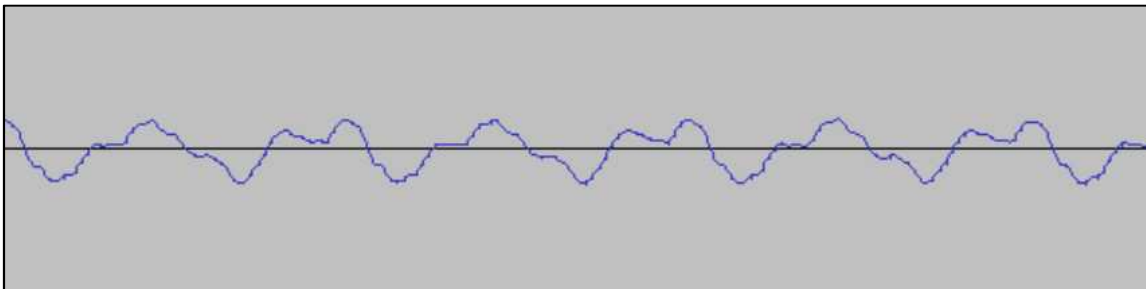
11.4.3 Conclusions

En el ponticello ideal el 1r harmònic s'anul·la, sent molt difícil de controlar els altres harmònics que destaquen. En aquest experiment ha destacat el 7è harmònic i potser no s'ha tocat prou a prop del pont, ja que la fonamental no s'ha acabat d'anul·lar del tot.

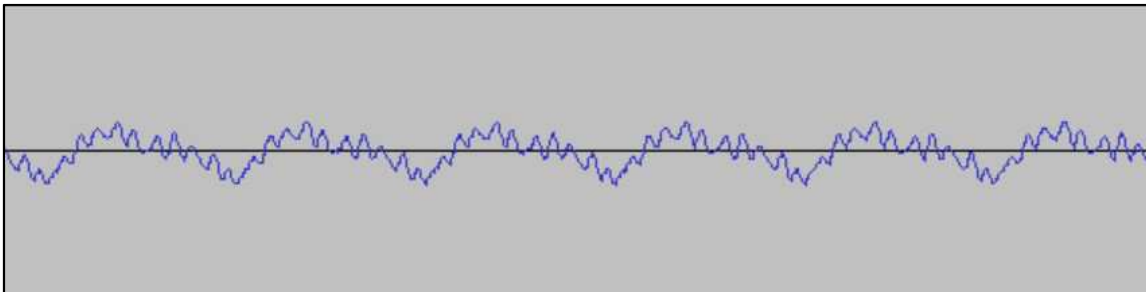
11.5 Experiment 5: Altres cordes obertes: Sol 197 Hz, Re 296 Hz i Mi 660 Hz amb el violí I

11.5.1 Desenvolupament i resultats

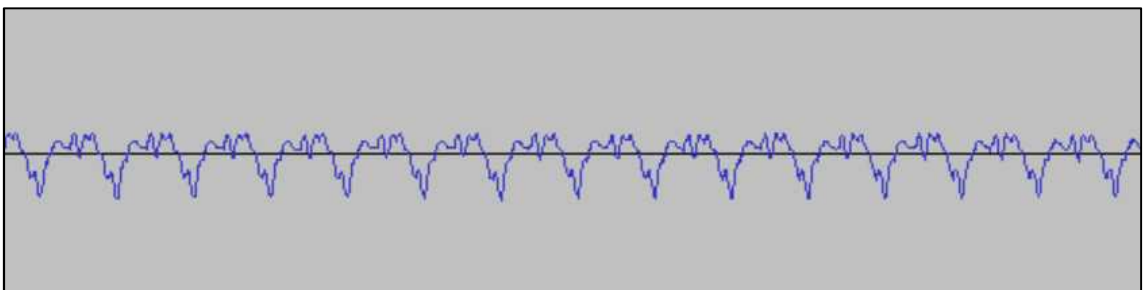
A l'experiment 1 ja vaig analitzar la corda oberta La 440 Hz. En aquest experiment he analitzat aquestes tres notes que són Sol 197 Hz, Re 296 Hz i Mi 660 Hz que corresponen a les altres cordes del violí (cordes obertes). Tenen una forma d'ona bastant diferent:



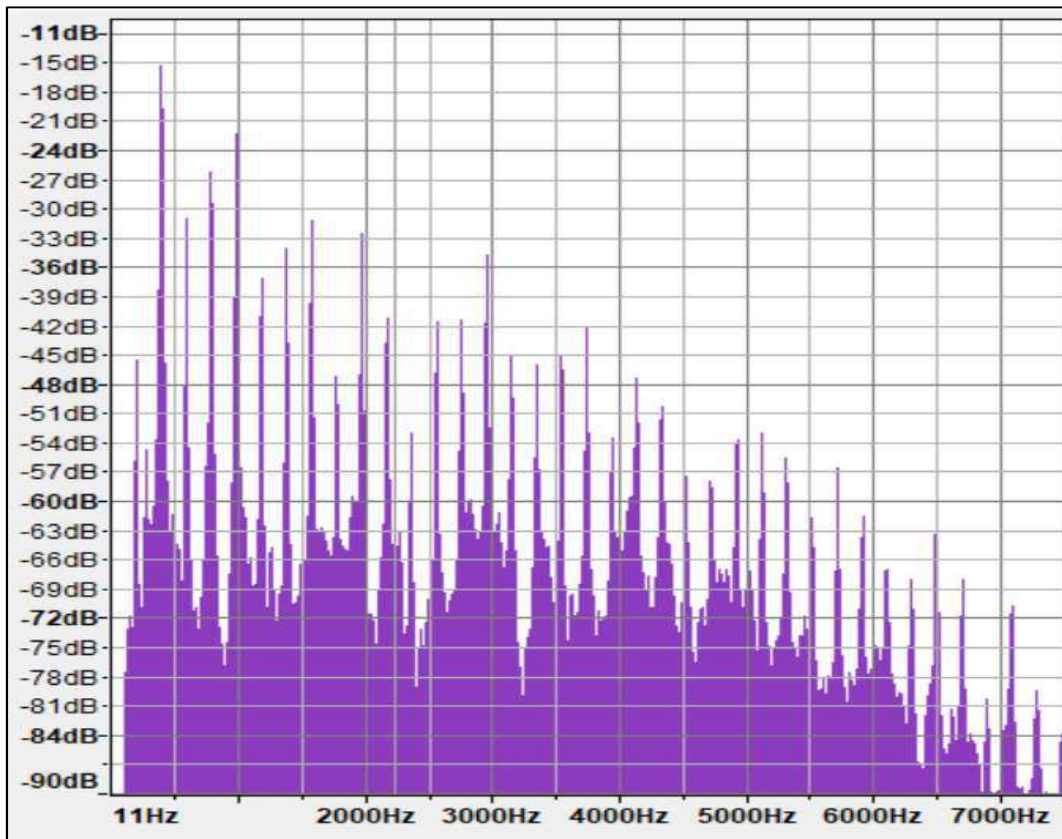
Ona Sol 197 Hz



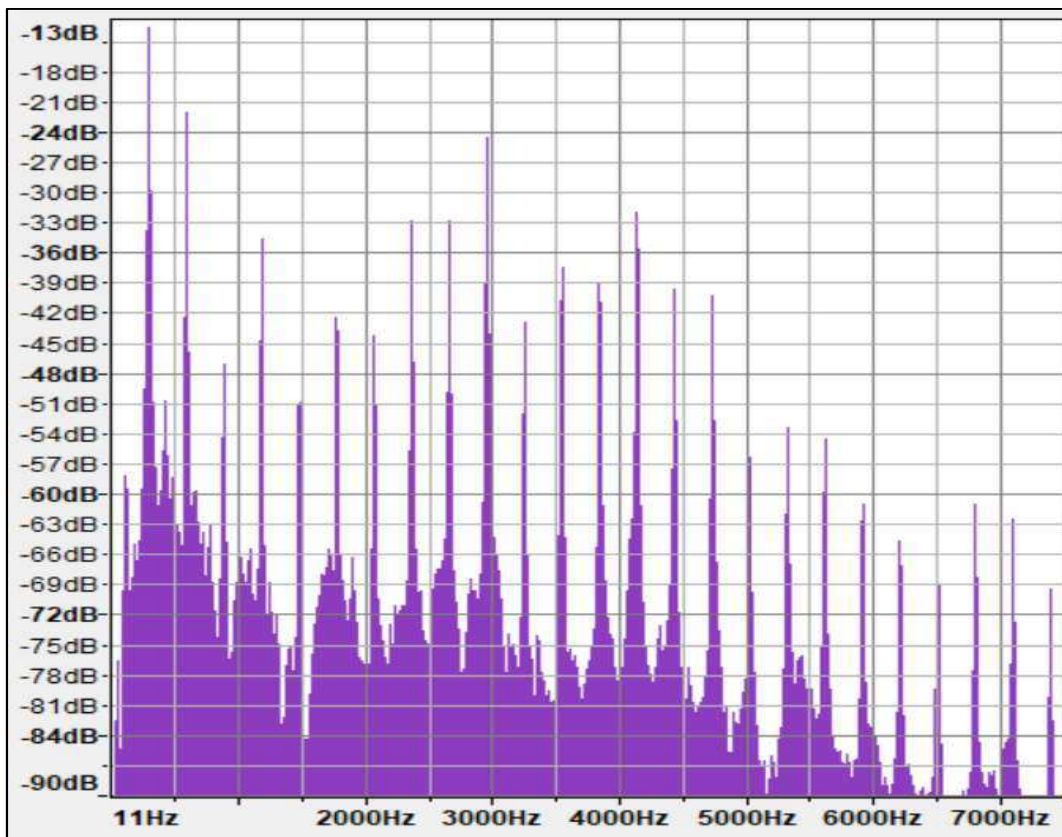
Ona Re 296 Hz



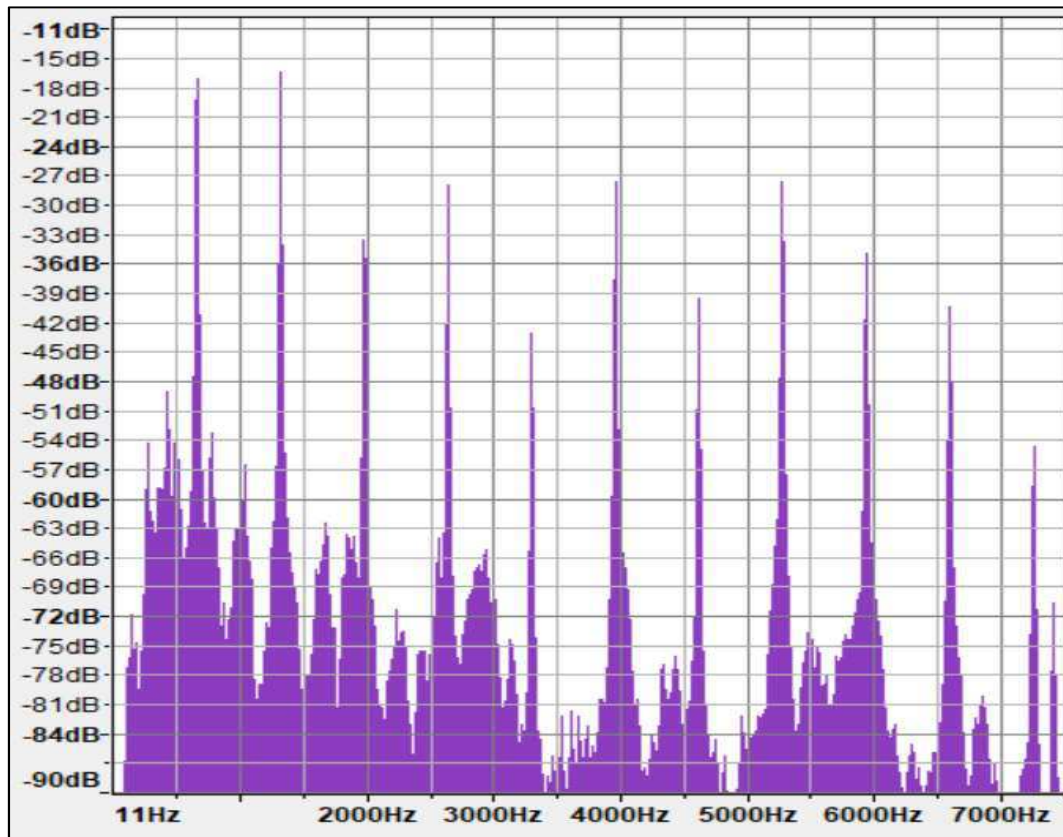
Ona Mi 660 Hz



Harmonics Sol 197 Hz



Harmonics Re 296 Hz



Harmònics Mi 660 Hz

11.5.2 Anàlisi i conclusions

Les tres ones són molt diferents entre elles i curioses. Podem afirmar que com més aguda és la nota, la diferència de freqüències entre els diferents harmònics és més gran; els harmònics estan més separats entre ells.

En el cas del Sol, després de la fonamental, hi ha tres harmònics ordenats de menys a més intensitat i aquesta estructura es repeteix just després.

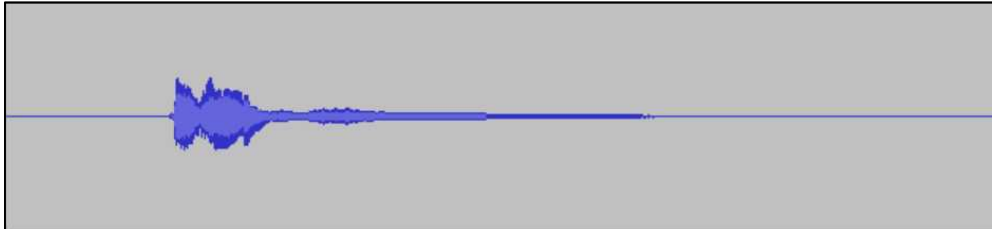
Sota els pics dels harmònics hi ha com un volum que disminueix a mesura que la nota és més aguda: el Sol té més "volum" que el Mi. La forma d'aquest volum és característica de cada instrument.

Sempre abans del primer harmònic hi ha unes freqüències amb poca intensitat. Això és degut a la ressonància de l'aire que una de les coses que provoca és que abans de la fonamental hi hagi alguna freqüència. La ressonància de l'aire s'origina a través dels dos forats que tenen els violins en forma d'efes. Aquesta forma característica és la que permet treure el màxim rendiment a la tapa del violí. Una de les coses que es valora més d'un violí és la ressonància de l'aire i la ressonància de la fusta.

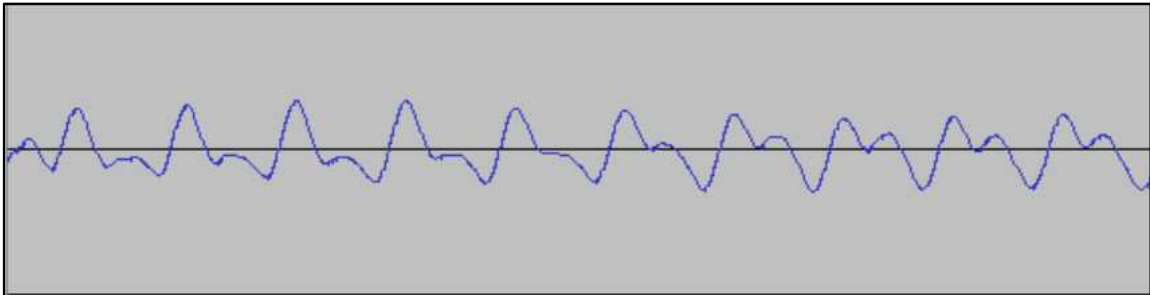
11.6 Experiment 6: La 440 Hz pizzicato amb el violí I

11.6.1 Desenvolupament i resultats

Analitzo el so obtingut amb el meu violí, sense fer servir l'arc, fent un pizzicato que consisteix a pinçar amb la punta dels dits la corda.



Ona comprimida per veure la intensitat respecte el temps del pizzicato

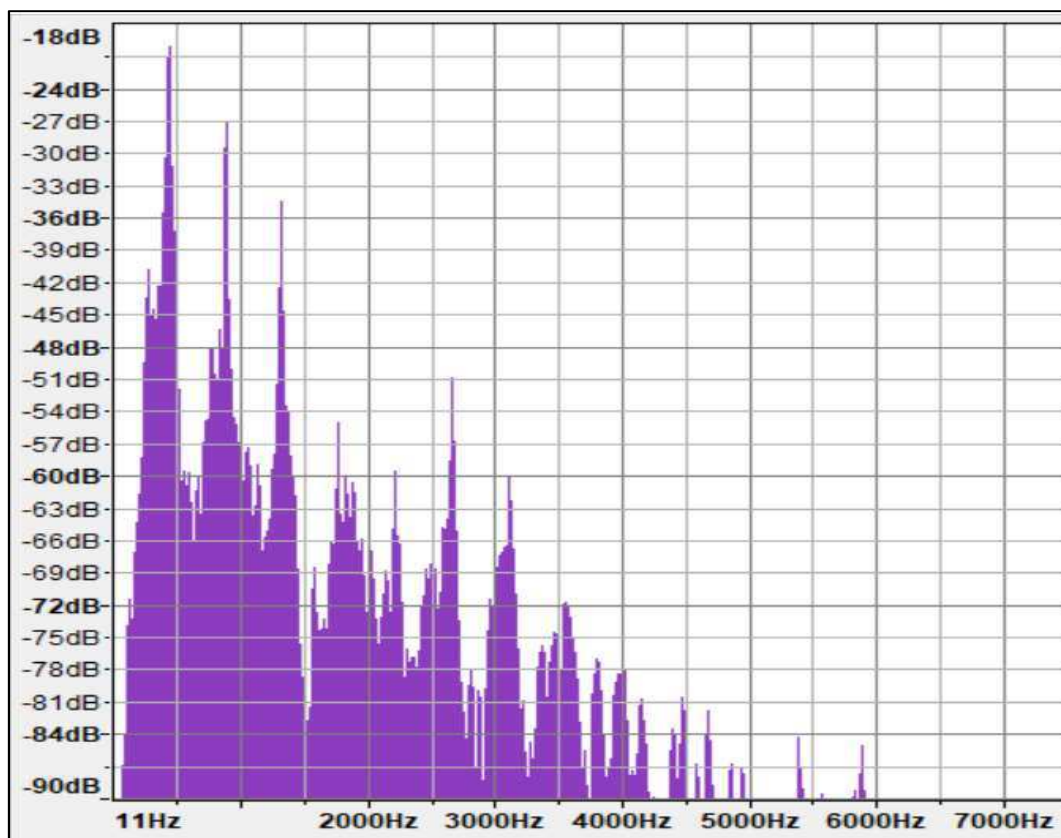


Ona pizzicato La 440 Hz violí I



Realitzant el pizzicato¹ de la nota La 440 Hz

¹ Per veure el vídeo on surto jo fent un pizzicato amb el meu violí aneu a l'Annex del final de treball per escanejar el codi QR



Harmònics pizzicato La 440 Hz violí I

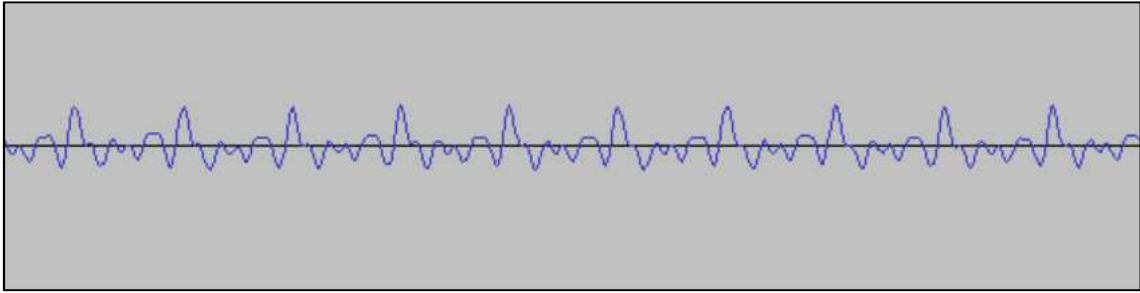
11.6.2 Anàlisi i conclusions

L'ona del pizzicato és curta respecte al temps, dura poc perquè no es pot mantenir. Durant el pizzicato, la forma de l'ona va canviant. Els harmònics són molt clars i tenen una estructura d'intensitat de més a menys i la fonamental és la que té més intensitat. Té pocs harmònics, no arriben als 6000 Hz.

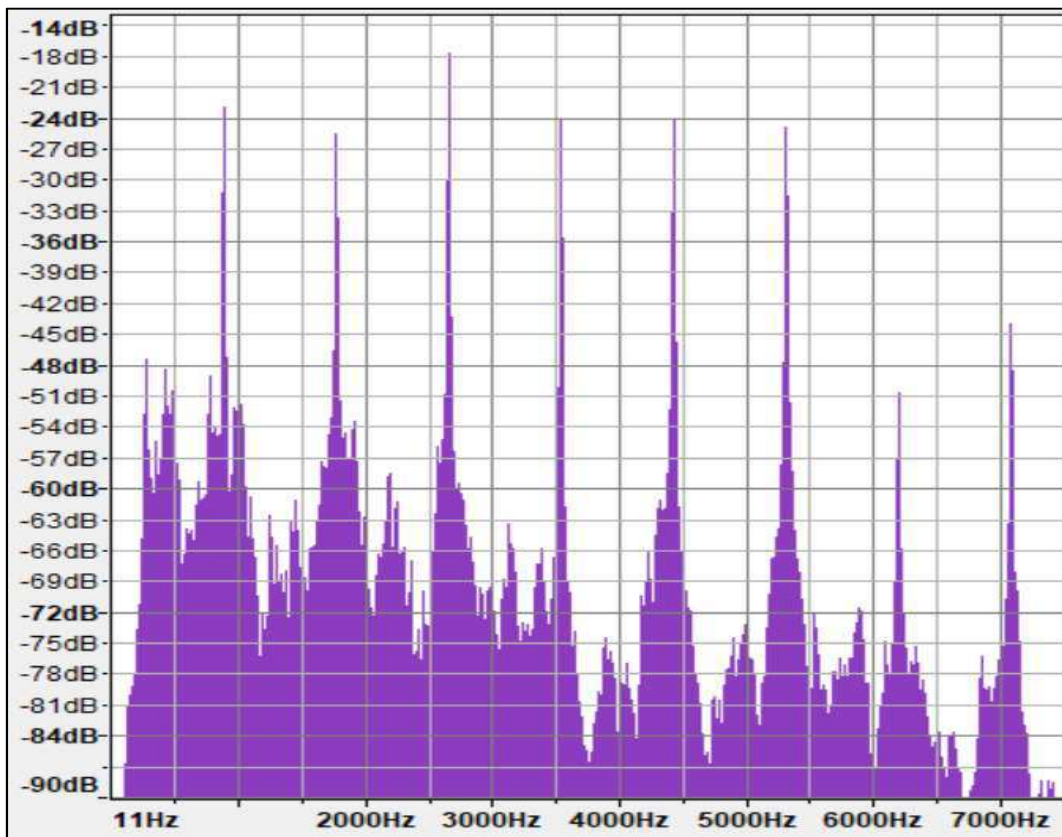
11.7 Experiment 7: La 886Hz amb el violí I

11.7.1 Desenvolupament i resultats

Aquesta nota La es toca posant tres dits a la corda Mi amb la mà esquerra. És l'octava del La 443Hz.



Ona La 886Hz violí I



Harmònics La 886Hz violí I

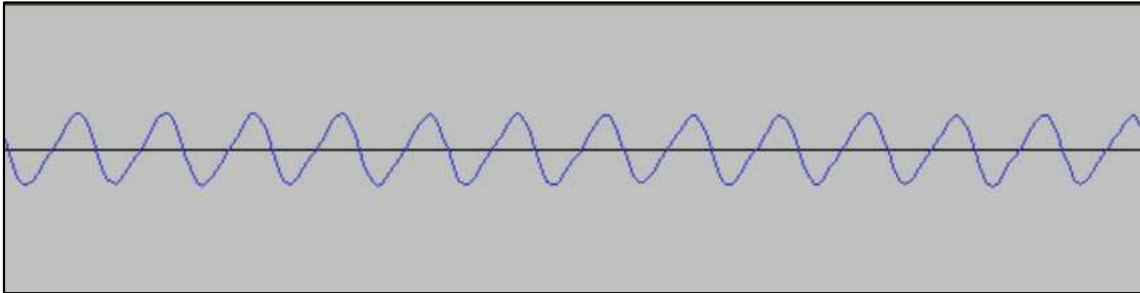
11.7.2 Anàlisi i conclusions

Al principi hi ha menys harmònics i molt més ben definits. Podem veure la ressonància de l'aire abans de cada harmònic. Curiosament, el tercer harmònic té més intensitat que el primer, però estan força anivellats fins al vuitè.

11.8 Experiment 8: Notes molt agudes: Do#₆ 2179Hz i Re#₆ 2511Hz

11.8.1 Desenvolupament i resultats

Aquest Do i Re sostinguts els he realitzat posant el dit més amunt de la meitat de la corda Mi amb el violí I. Són notes molt agudes.



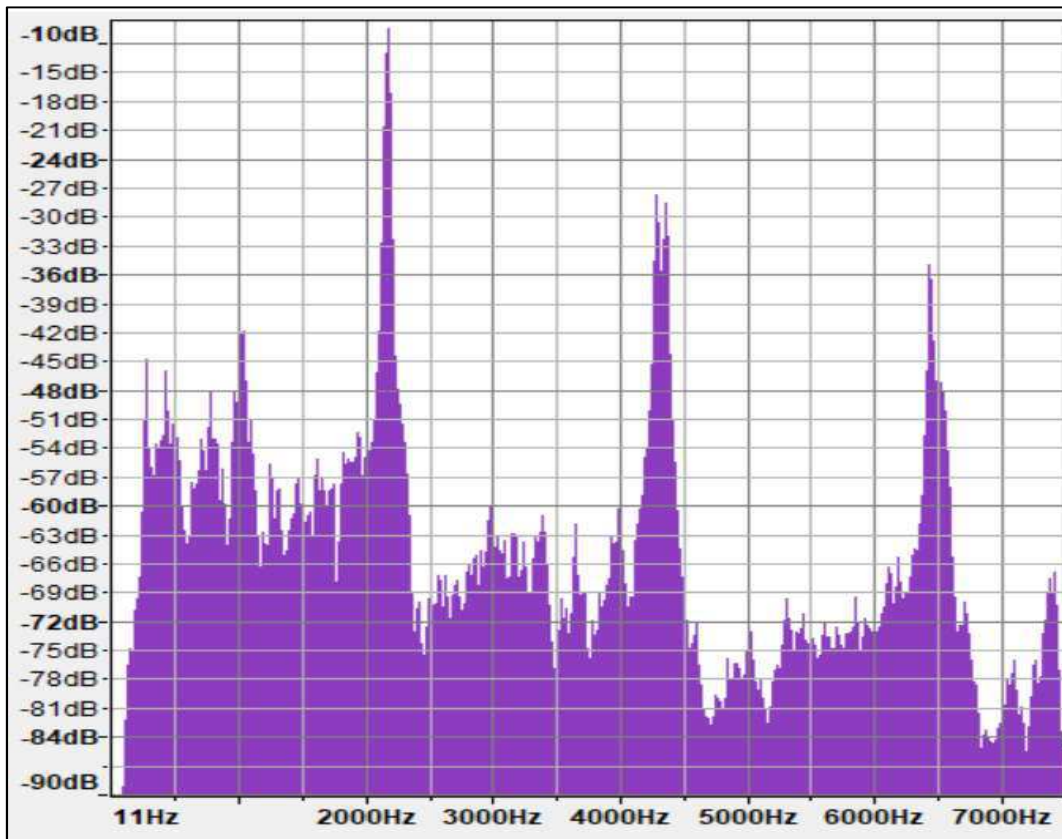
Ona Do# 2179Hz



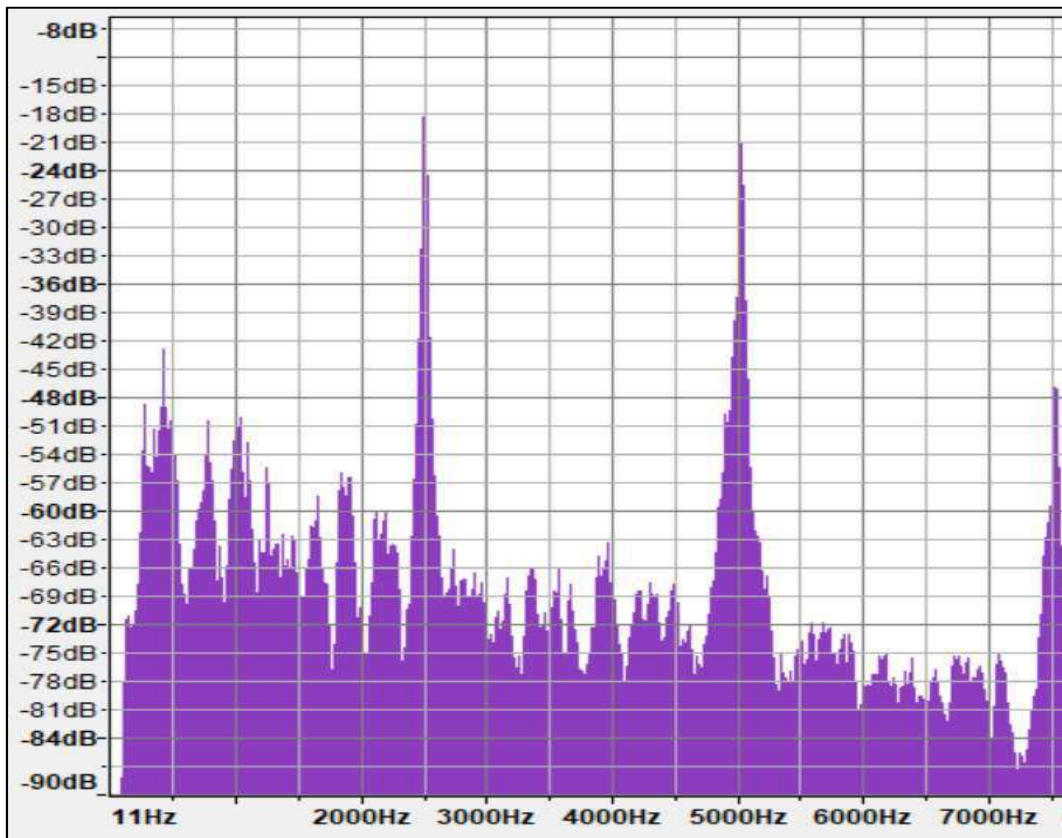
Ona Re# 2511Hz



Realització del Do# 2179Hz



Harmonics Do# 2179Hz



Harmonics Re# 2511Hz

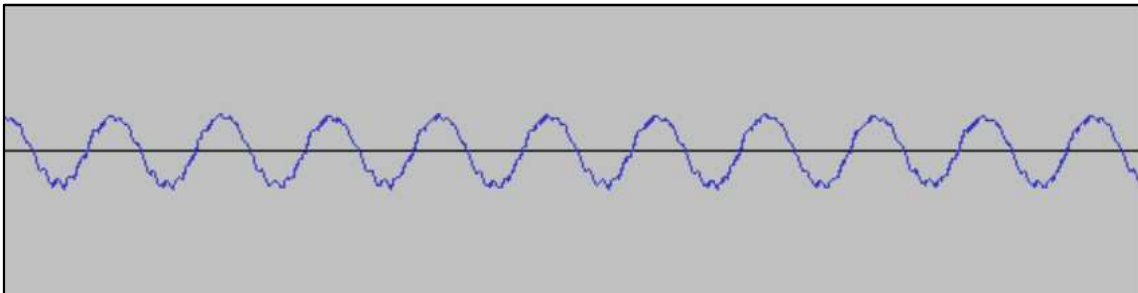
11.8.2 Anàlisi i conclusions

En ser notes tan agudes, els tres harmònics que podem trobar estan més separats entre ells. Més o menys, les ones i l'espectre de freqüències són bastant idèntics: els harmònics van de més intensitat a menys. Curiosament abans dels harmònics hi ha ple de freqüències que corresponen a la ressonància de l'aire.

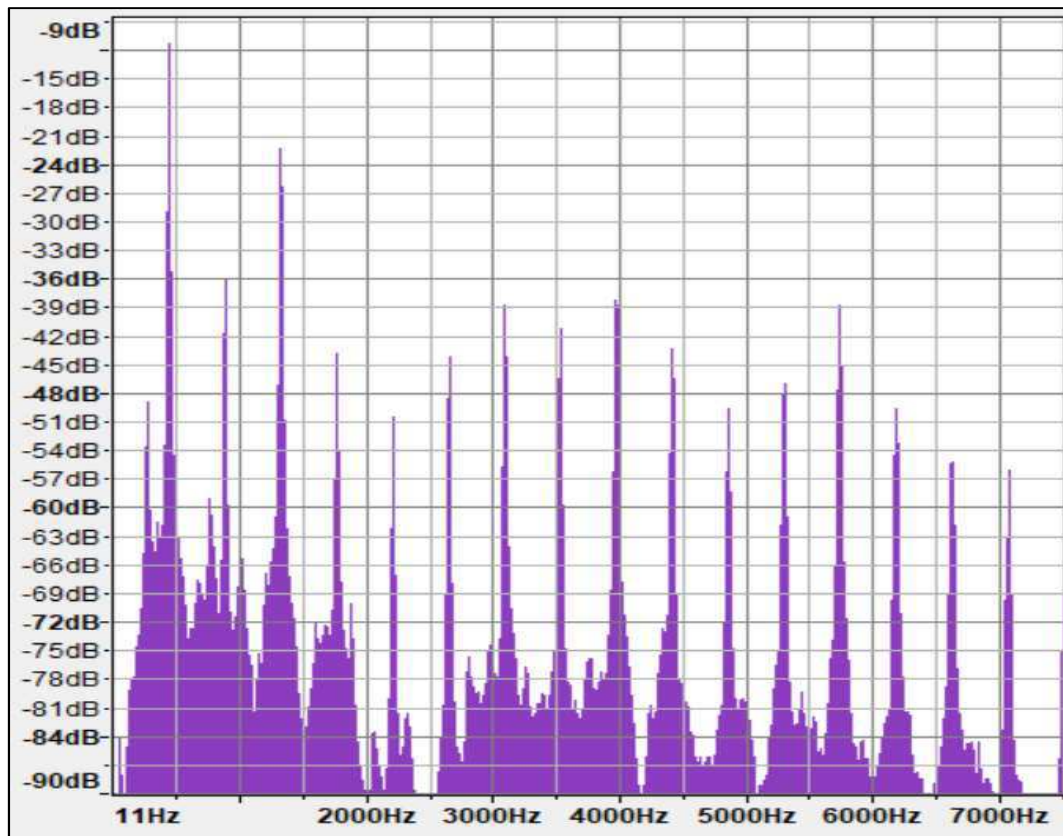
11.9 Experiment 9: La 442 Hz amb el violí I amb sordina

11.9.1 Desenvolupament i resultats

He gravat el La 442 Hz amb la sordina. Quan es posa la sordina sobre el pont, el que fa és sobretot baixar la intensitat del so i llavors varia una mica el timbre.



Ona La 442 Hz amb sordina



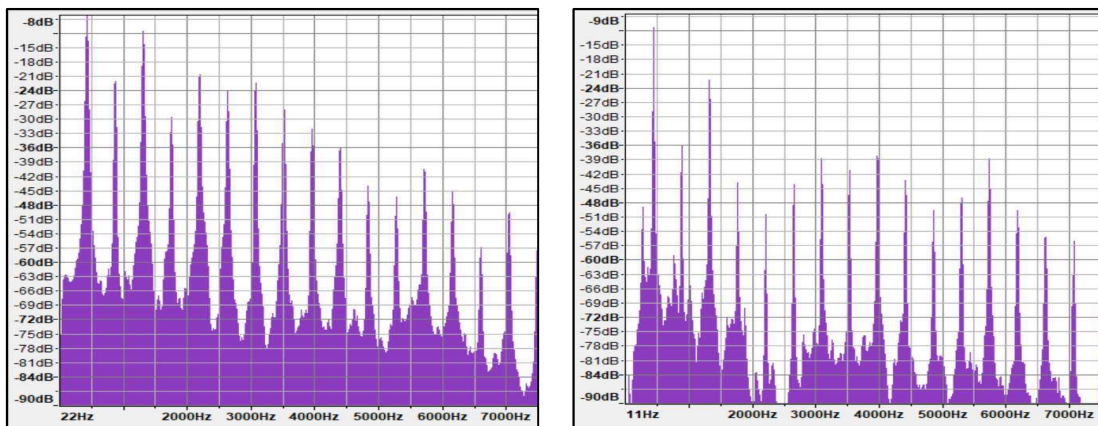
Harmònics La 442 Hz amb sordina

11.9.2 Anàlisi i conclusió

Els harmònics són molt semblants al La sense sordina, l'únic que es nota és que hi ha una mica menys d'intensitat en general. Els petits canvis de timbre es veuen poc. Més que el timbre, la diferència que es nota és que hi ha menys "volum" entre els harmònics.

L'ona del La amb sordina és més sinusoidal que el La sense sordina.

Comparant amb el La sense sordina de l'experiment 1, els quatre primers harmònics presenten la mateixa estructura d'intensitat. A partir del cinquè harmònic, apareixen varies "muntanyes" a diferència de la gràfica d'espectre de freqüències del La sense sordina en el qual va decreixent.



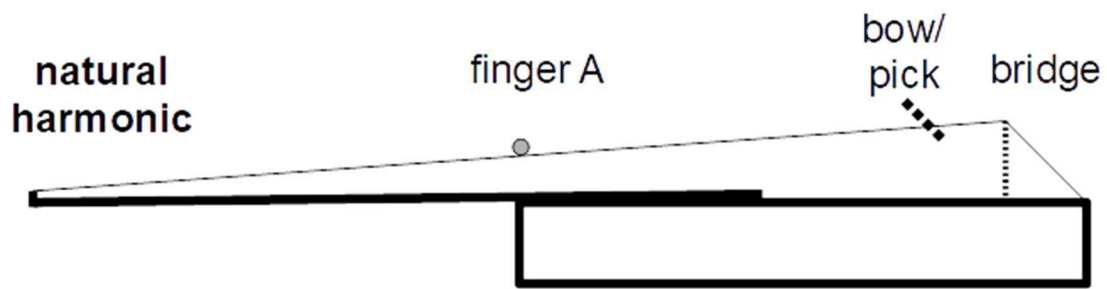
Espectre de freqüències: La 442 Hz (corda oberta) el violí sense sordina (dreta) i amb sordina (esquerra)

11.10 Experiment 10: La 884 Hz mitjançant un harmònic natural (terme musical)

11.10.1 Harmònics naturals i harmònics artificials

Els músics de vegades ens trobem a les partitures una escriptura que senyala que hem de fer harmònics. Aquest terme "harmònic" significa que hem de ressaltar (augmentar la intensitat perquè soni més) un harmònic concret d'entre tots els harmònics que componen la nota.

Aquests harmònics poden ser naturals o artificials. En els harmònics naturals el que fem és posar un dit suau a la meitat de la corda, o a 1/3 o 1/4 o 1/5, etc., depèn de l'harmònic que volem ressaltar. El que aconseguim és que vibri la fonamental i alhora ressaltem l'harmònic.



Nota que sona o so que se sent



El lloc on s'ha de posar el dit lleugerament per realitzar l'harmònic

Corda on es realitza l'harmònic

Exemple d'harmònic natural en un pentagrama

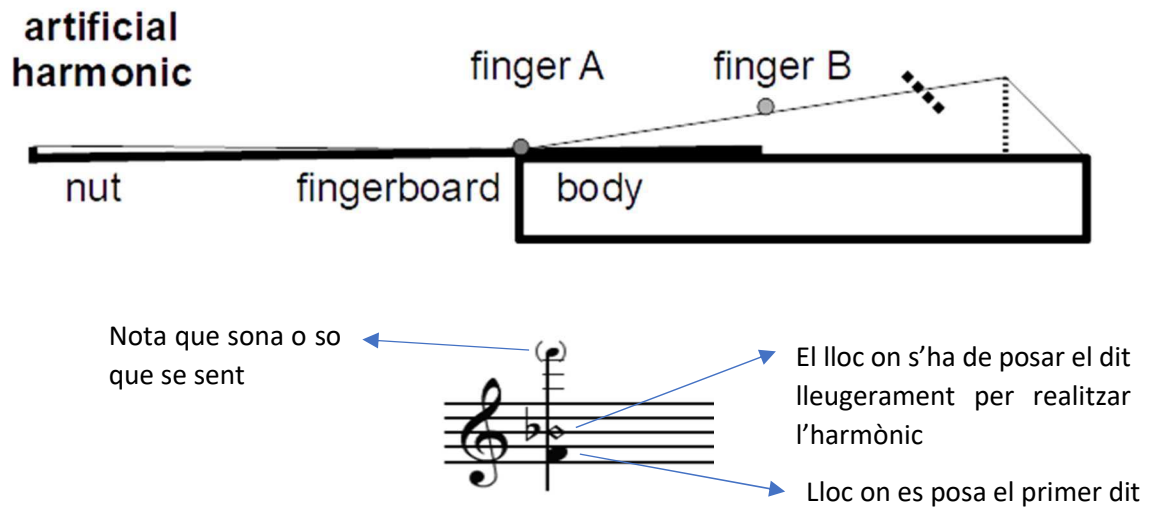
Quan toquem una nota, l'oïda humana la reconeix bàsicament la fonamental malgrat sonen tots els harmònics. Quan toquem un harmònic (terme dit en música), el que l'oïda reconeix és l'harmònic ressaltat, i no la fonamental.



Els punts vermells són alguns llocs on es poden posar els dits per fer descomposicions d'harmònics

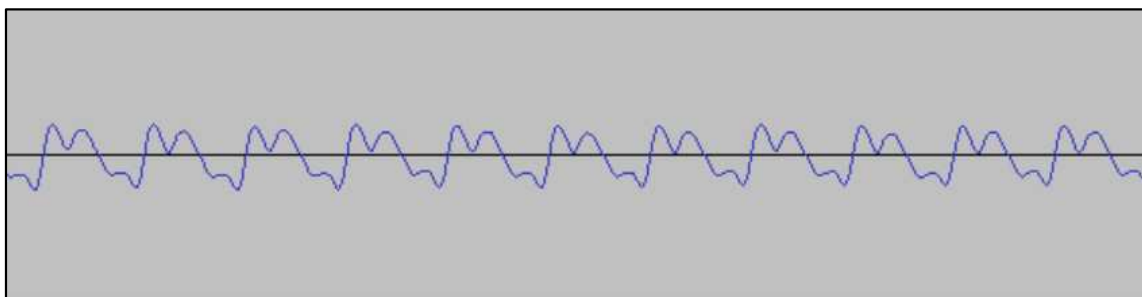
Per exemple, toquem un La i volem ressaltar el segon harmònic. Posem un dit suau a la meitat de la corda i sonarà una 8ª, és a dir, un La més agut. Aquest és el següent experiment.

En el cas dels harmònics artificials el que fem és posar un dit a la corda mentre que al mateix temps un altre dit frega la mateixa corda, provocant així que el so es descompongui en harmònics (si el dit frega massa la corda, s'apaga el so).

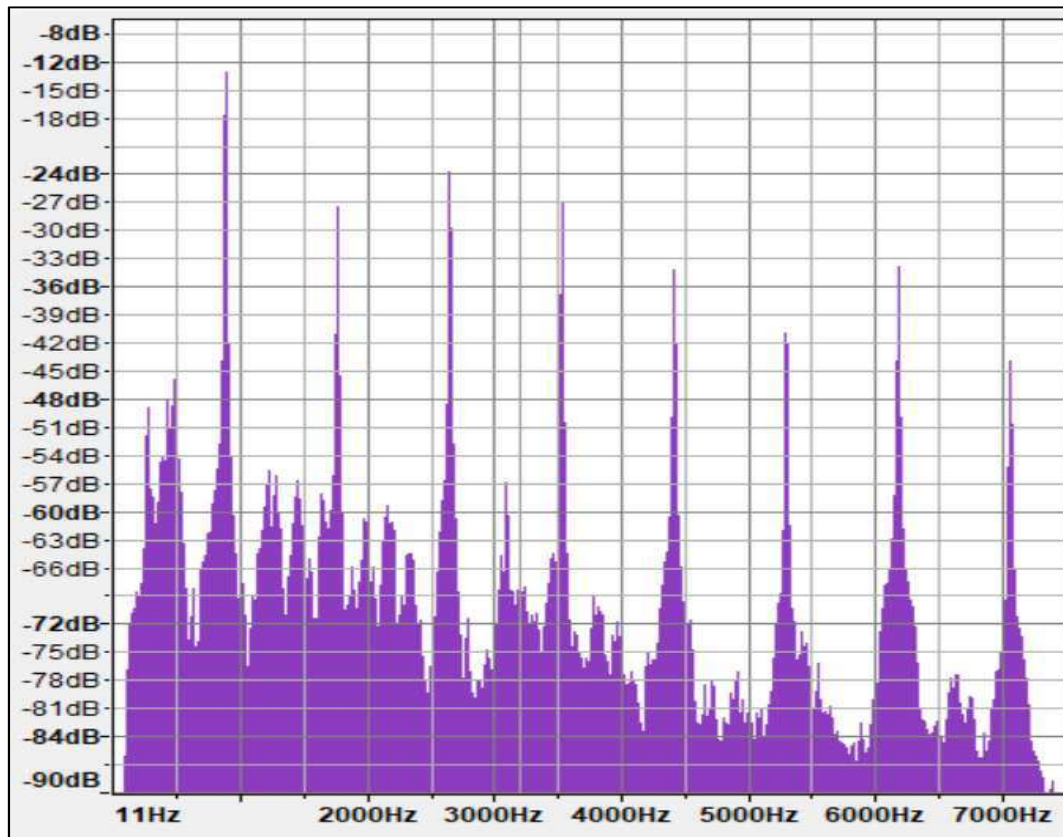


11.10.2 La 884 Hz violí del meu pare realitzat mitjançant un harmònic natural (terme musical)

Tocant a la corda La 442 Hz he posat el dit lleugerament a la meitat de la corda per realitzar un harmònic natural. És a dir, he ressaltat el segon harmònic del La 442 Hz. Per tant principalment s'ha de sentir el La 884 Hz.



Ona Harmònic La 884 Hz



Harmònics del La (harmònic) 884 Hz

11.10.3 Anàlisi i conclusions

Podem veure perfectament que el primer harmònic és el La 442 Hz i sona a baixa intensitat, només a -46 dB. Just després hi ha el pic més alt que és el segon harmònic, el 884 Hz. Nosaltres sentim aquest so i no el del primer harmònic.

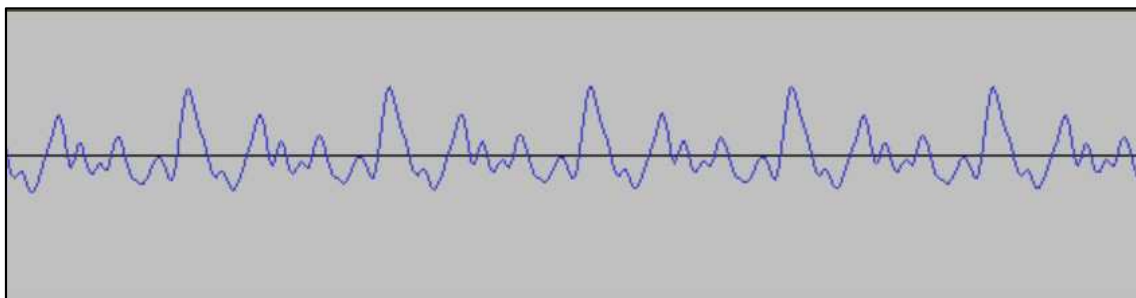
11.11 Experiment 11: La 442 Hz. Comparació de l'espectre de freqüències entre els violins més petits: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i $\frac{3}{4}$

He volgut investigar si la mida del violí influïa en els harmònics. Per això, gràcies al meu pare que és professor de violí de l'Escola Municipal de Música de Mollet del Vallès, he pogut comparar els harmònics d'un violí de mida: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i $\frac{3}{4}$. En la gravació tocaven tres alumnes petites amb el seu corresponent violí. Aquests violins són manufacturats i no de lutheria, és a dir, fabricats en sèrie en l'actualitat.

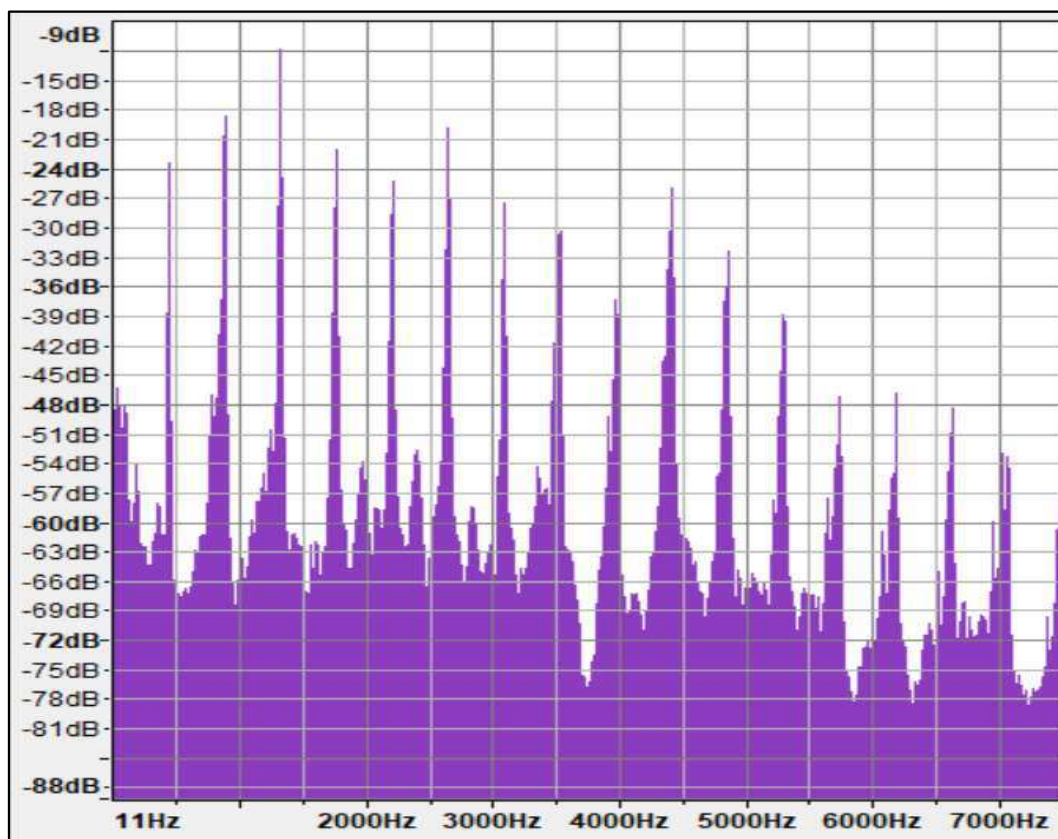
11.11.1 Violí 1/4



Gravació violí ¼



Ona La 442 Hz violí ¼

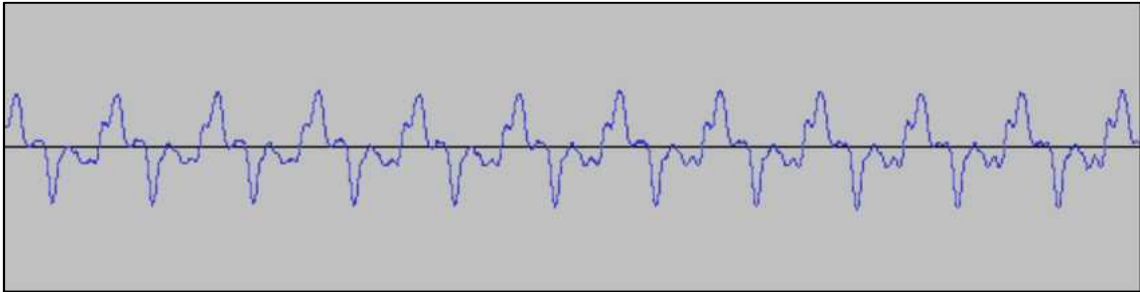


Espectre de freqüències: La 442 Hz violí ¼

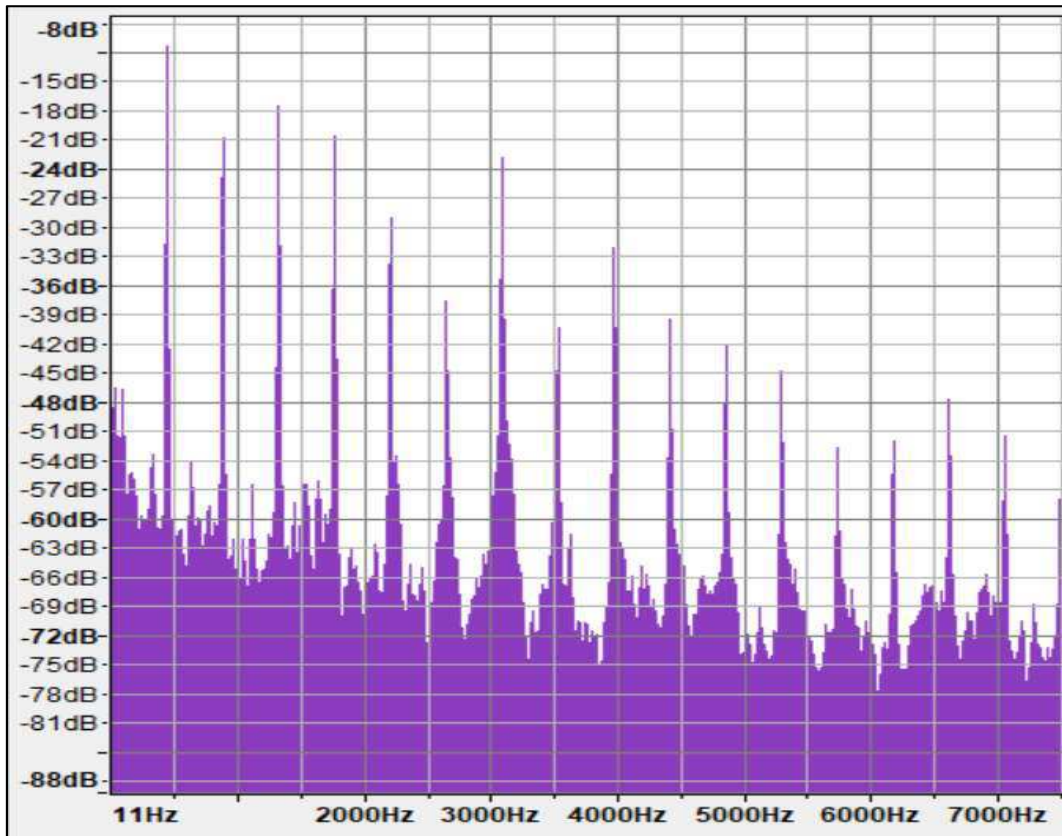
11.11.2 Violí 1/2



Gravació violí 1/2



Ona La 442 Hz violí 1/2

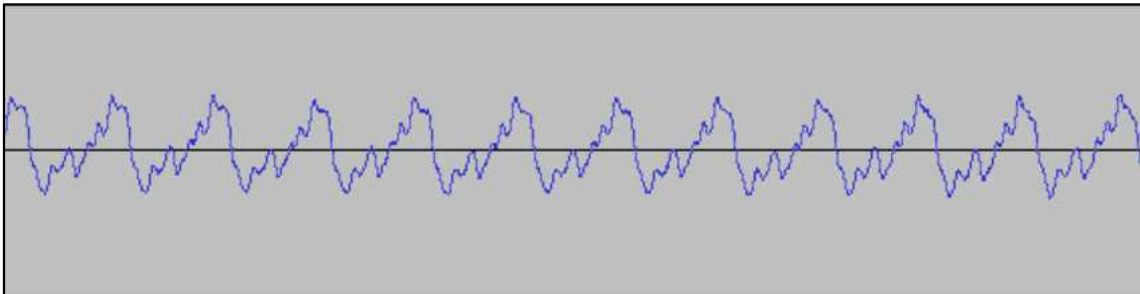


Espectre de freqüències: La 442 Hz violí 1/2

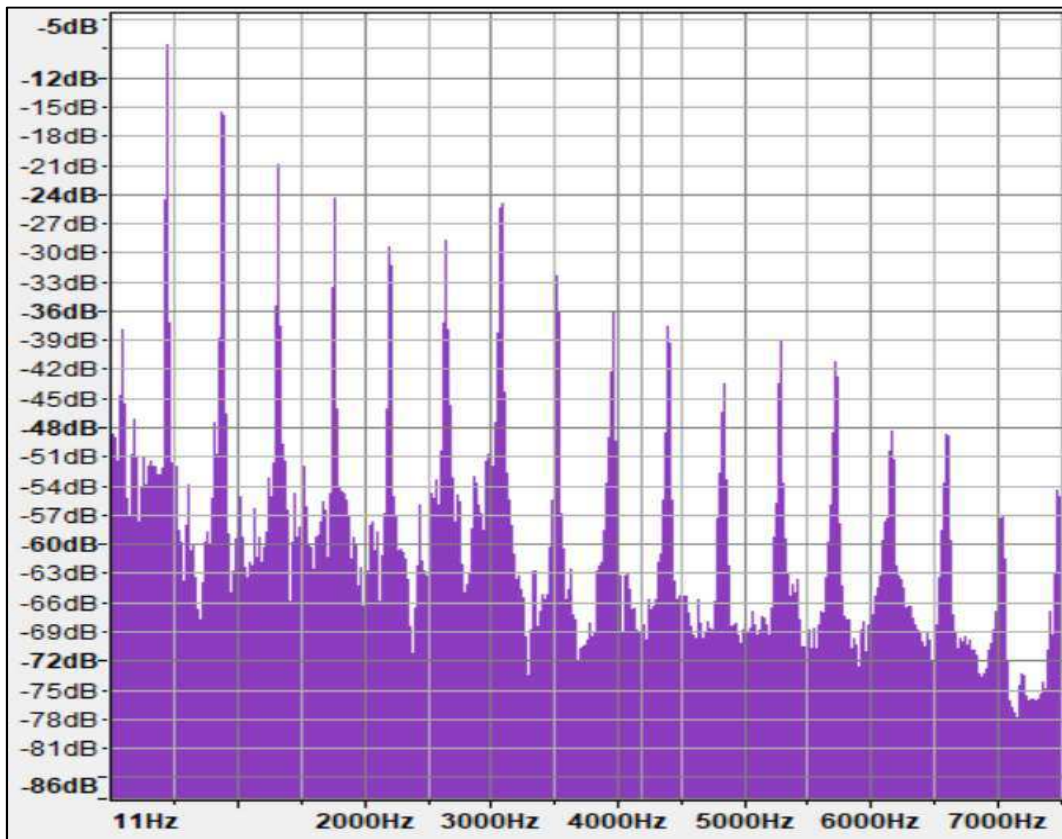
11.11.3 Violí 3/4



Gravació violí ¼



Ona La 442 Hz violí ¼



Espectre de freqüències: La 442 Hz violí ¼

11.11.4 Anàlisi i conclusions

Pel que podem observar, les ones són molt diferents entre elles, i en canvi els harmònics són molt semblants entre ells. En el violí d'1/4 el segon i el tercer harmònic sonen més que el primer; potser és degut al fet que la nena va tocar massa a prop del pont i li va quedar una mica ponticello. En el violí 3/4 la fonamental és la que té més decibels i els següents harmònics cada cop tenen menys intensitat, excepte dos pics que hi ha més endavant.

Com a conclusió podem dir que totes les gràfiques són molt semblants entre els violins petits. Per sota de -75 dB no es distingeixen els harmònics i en canvi al violí II, el de lutheria sí. No ens podem refiar de les petites variacions entre les gràfiques dels violins petits perquè és molt complicat saber fer sempre un mateix so.

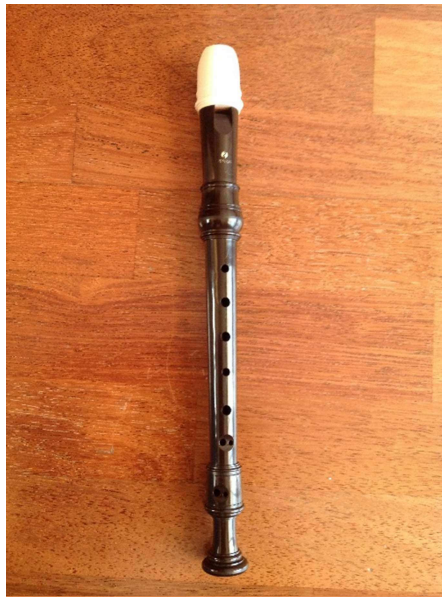
El so o nota que s'emet d'un violí depèn de la qualitat del violí i la qualitat de l'arc, la quantitat de resina que li hàgim posat abans a l'arc, la humitat, la temperatura, les condicions de ressonància de la sala, la zona de l'arc on es toca, la zona de la corda on es toca, la pressió i el contacte de l'arc sobre les cordes... Per tant és pràcticament impossible reproduir un so exacte.

Durant els experiments vaig intentar gravar d'una altra manera per aconseguir un so més estable que no depengués de l'arc. Vaig provar d'emetre un La 440 Hz a molta intensitat amb uns altaveus. Llavors vaig apagar-los i volia que en el meu violí, afinat respecte el La 440 Hz, vibrés la corda La per poder prendre les mostres d'allà mitjançant la ressonància. Però la corda vibrava a baixa intensitat i la ressonància era molt baixa i com a conseqüència el micròfon no ho captava. Així que no va funcionar.

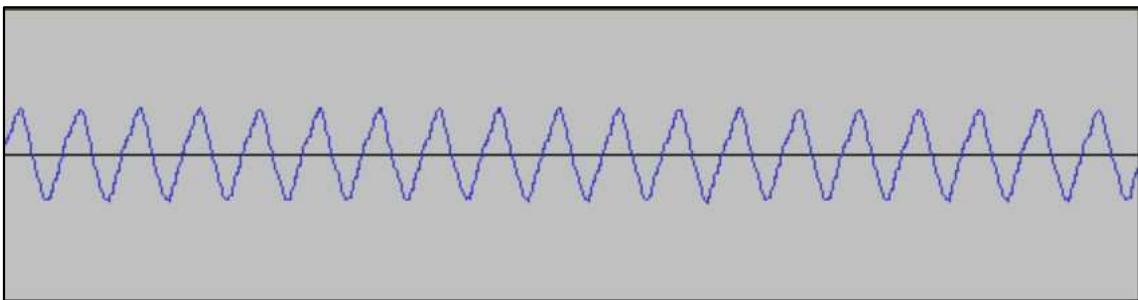
11.12 Experiment 12: La-Si_b 900 Hz amb la flauta dolça de l'escola

11.12.1 Desenvolupament i resultats

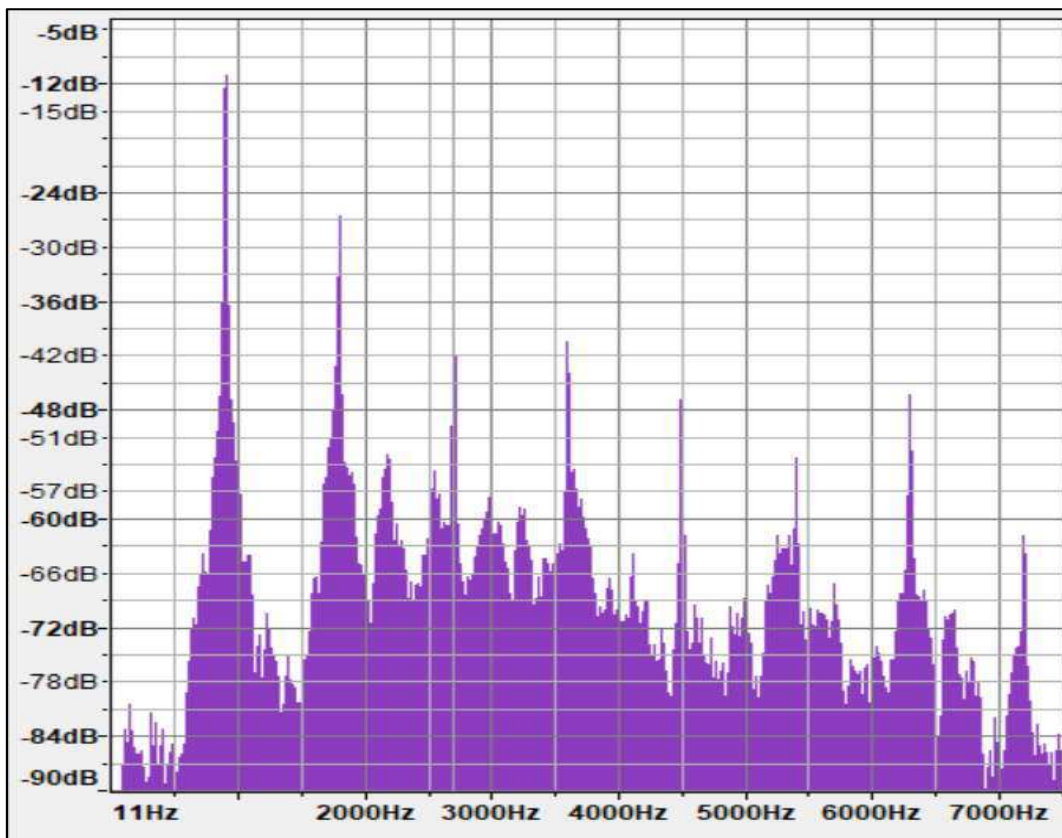
He gravat el que en teoria hauria d'haver sigut un La₄ amb la flauta (de plàstic) que hem utilitzat a l'ESO i a primària a les assignatures de música. Però al final analitzant m'he adonat que aquest so de 900 Hz està entre un La i un Si_b.



Flauta dolça de l'ESO



Ona La-Sib 900 Hz amb la flauta de l'escola



Espectre de freqüències: La-Sib 900 Hz amb la flauta de l'escola

11.12.2 Anàlisi i conclusions

El gràfic és una mica desastre perquè en un principi es veuen bé els harmònics però si mirem tota la part lila de baix, és una mica caos, apareixen freqüències que distorsionen. Una cosa que en els violins no ens ha sortit és que hi ha molt poques freqüències abans de la fonamental i just després. La fonamental té bastant intensitat i la part lila de baix està poc definida. En canvi l'ona que es genera no acaba de ser arrodonida. El que fa que l'ona sigui més sinusoidal, és a dir, més simple i més arrodonida, és que l'ona té menys harmònics o hi són amb menys intensitat. Referent al volum de ressonància de l'instrument, comença quasi sense i després apareix dels 15000 als 65000, podem dir que aquest volum és característic de la flauta de bec.

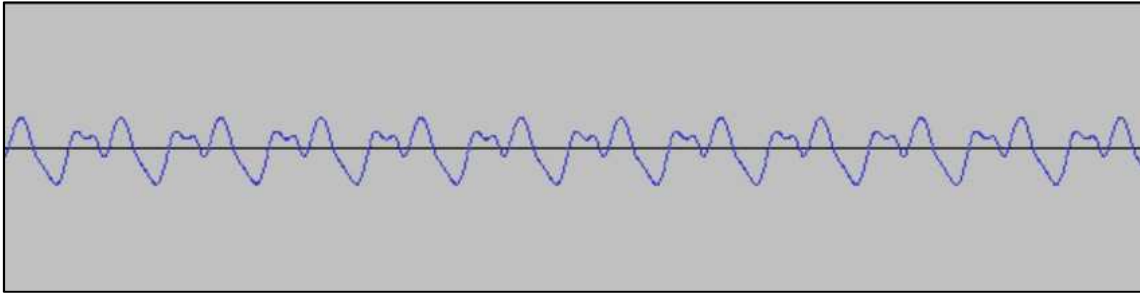
11.13 Experiment 13: La 440 Hz vent: Flauta travessera, saxo alto, saxo tenor i clarinet

He pogut analitzar els sons de diferents instruments de vent. He gravat diferents La 440 Hz realitzats per alumnes estudiants de música de l'Escola de Música de Mollet i he pogut gravar i analitzar una flauta travessera, un saxofon alto, saxo tenor i un clarinet.

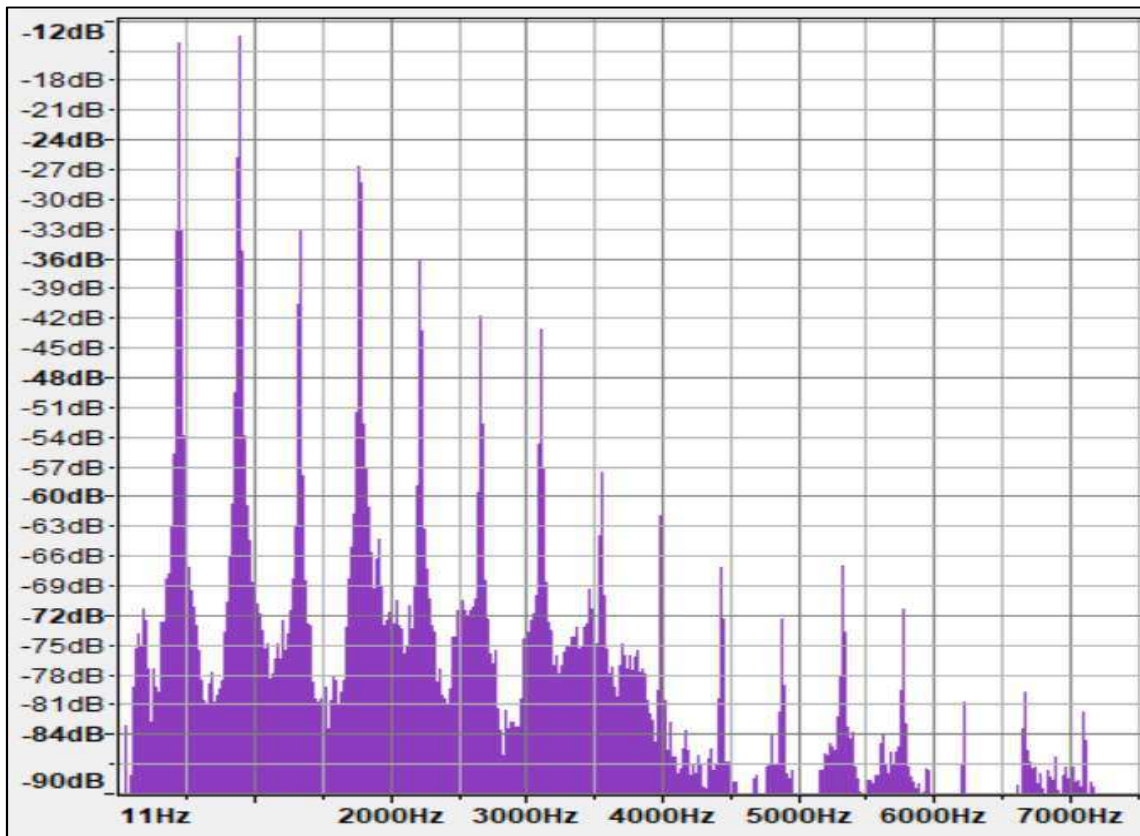
11.13.1 Flauta travessera



Gravació flauta travessera



Ona La 440 Hz flauta travessera



Espectre de freqüències: La 440 Hz flauta travessera

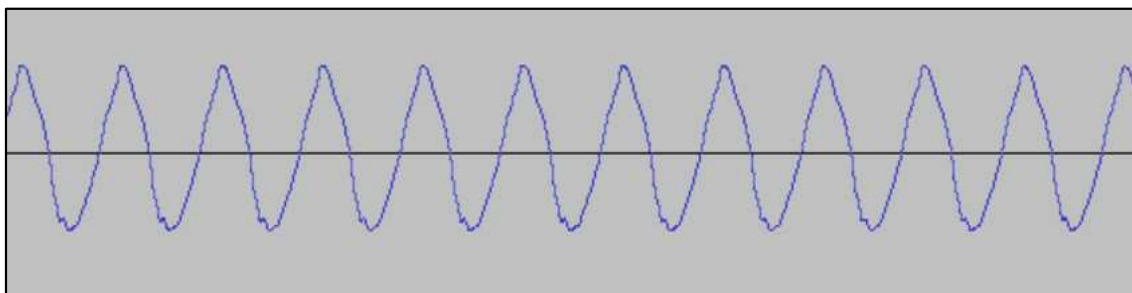
La flauta travessera té els dos primers harmònics amb molta intensitat i després el tercer més baix, el quart amb més intensitat que el tercer i la resta van baixant tots. En els espais en blanc pot ser que sí que hi hagi alguna freqüència però amb una intensitat tan baixa que no es mostra a la gràfica. La flauta travessera té ressonància en els primers harmònics perquè hi ha zona lila i després no perquè s'acaba. Els harmònics a partir del 4000 Hz fins al 7000 Hz són de més baixa intensitat. La gràfica resultant d'espectre de freqüències és característica de la flauta travessera.

11.13.2 Saxo alto

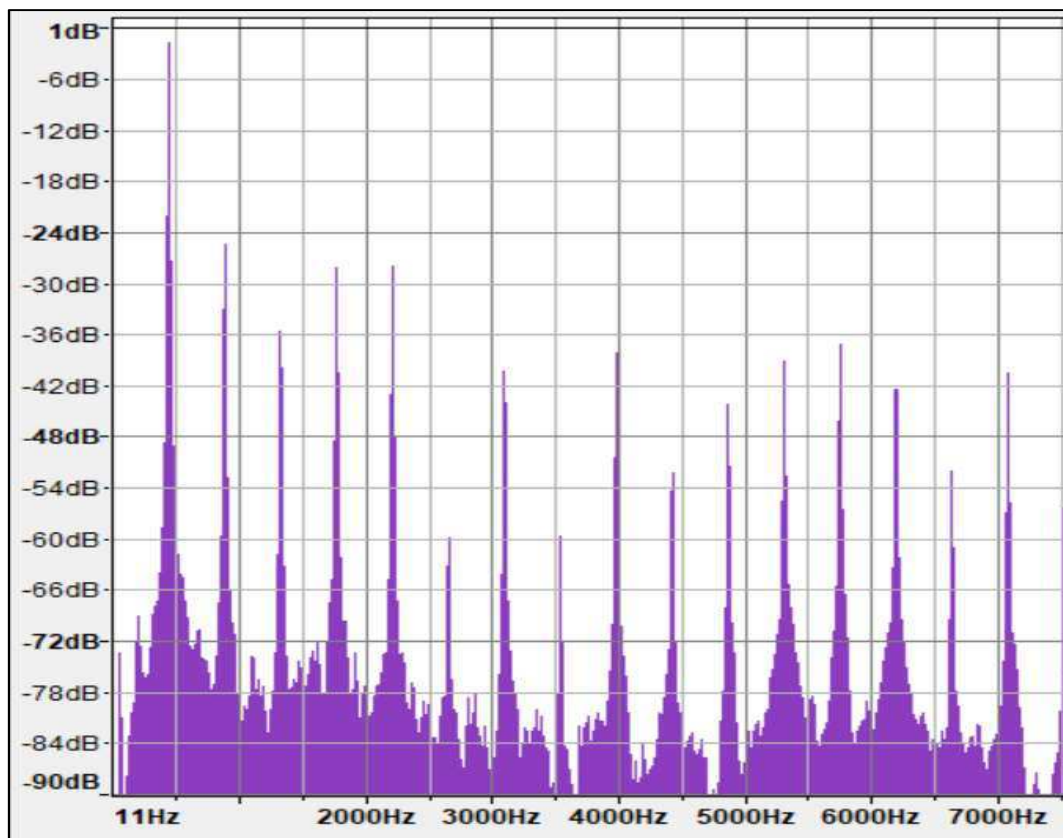
El saxo alto té una ona bastant perfecta. En l'espectre de freqüències, els harmònics són definits. Destaca que els harmònics 6 i 8 tenen una intensitat més molt més baixa. Si comparem l'espectre amb el de la flauta travessera, veiem que el saxo alto, té harmònics de força intensitat fins a més de 7000 Hz i en canvi a la flauta travessera, els harmònics pel voltant dels 7000 Hz tenen molta menys intensitat.



Gravació saxo alto



Ona La 440 Hz saxo alto



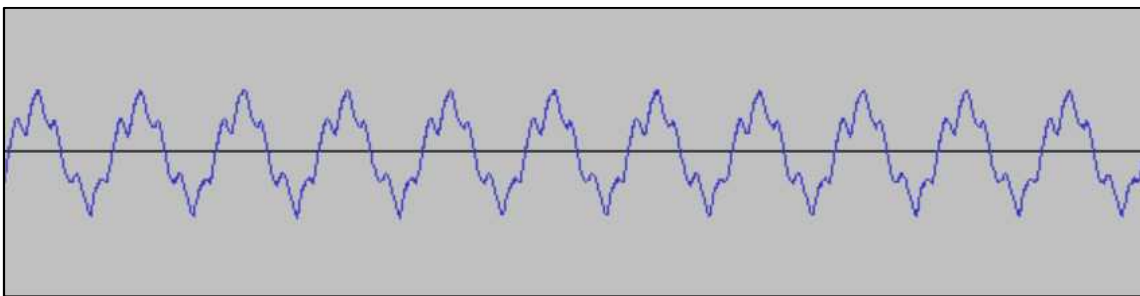
Espectre de freqüències: La 440 Hz saxo alto

11.13.3 Saxo tenor

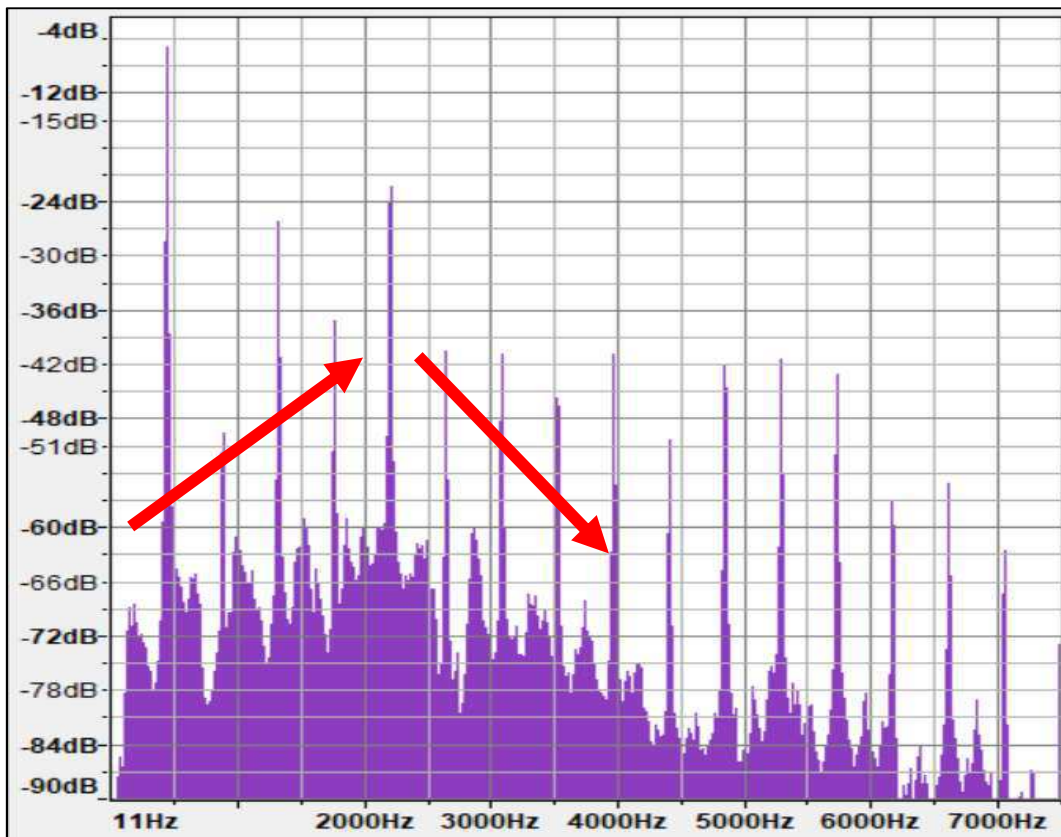
L'ona del saxo tenor té forma de muntanya. En l'espectre de freqüències, el segon harmònic té una intensitat molt petita. Com a instrument de vent, va seguint la mateixa estructura de "volum" o ressonància que els altres instruments de vent. La ressonància primer creix fins als 2000 Hz aproximadament i després decreix. Ho he marcat amb les fletxes vermelles.



Gravació saxo tenor



Ona saxo La 440 Hz saxo tenor



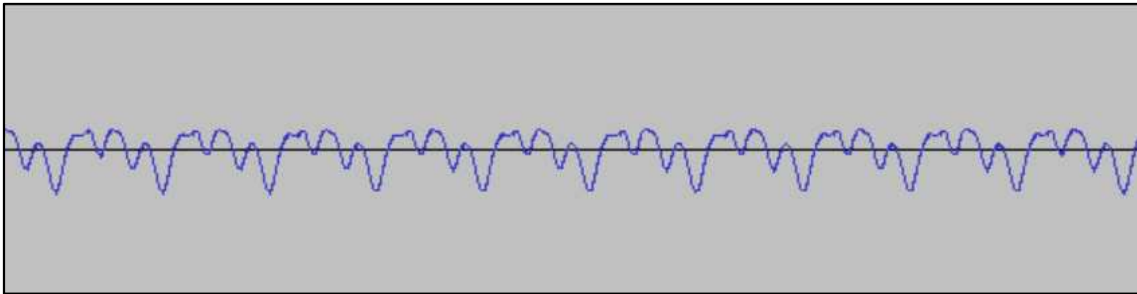
Espectre de freqüències: La 440 Hz saxo tenor

11.13.4 Clarinet

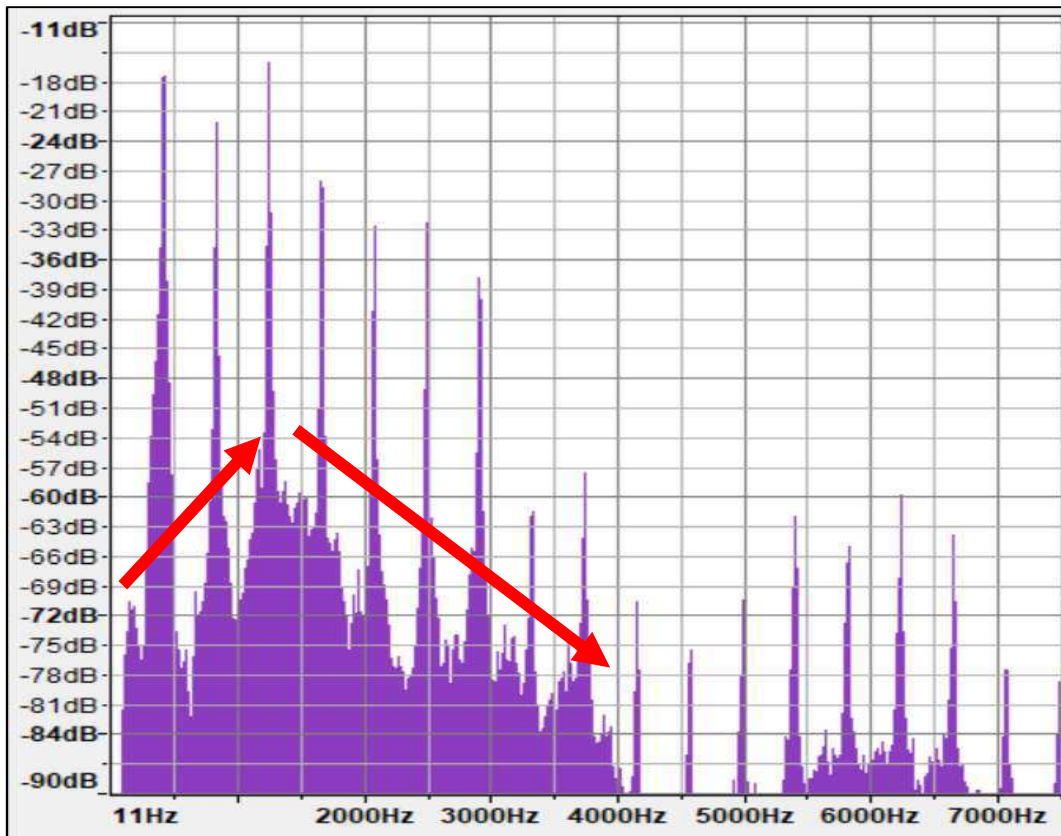
El tercer harmònic té més intensitat que el primer. I la forma és curiosa, ja que principalment va en decreixent fins al 4500 Hz i després va lleugerament en creixent. Com a conclusió dels instruments de vent que he analitzat, les freqüències que hi ha entre els harmònics que corresponen a la ressonància de l'instrument, primer creixen i en un punt proper decreixen fent com una muntanya. Ho he marcat amb les fletxes. En canvi en el violí comença amb intensitat i després va decreixent de mica en mica.



Gravació clarinet



Ona La 440 Hz clarinet



Espectre de freqüències: La 440 Hz clarinet

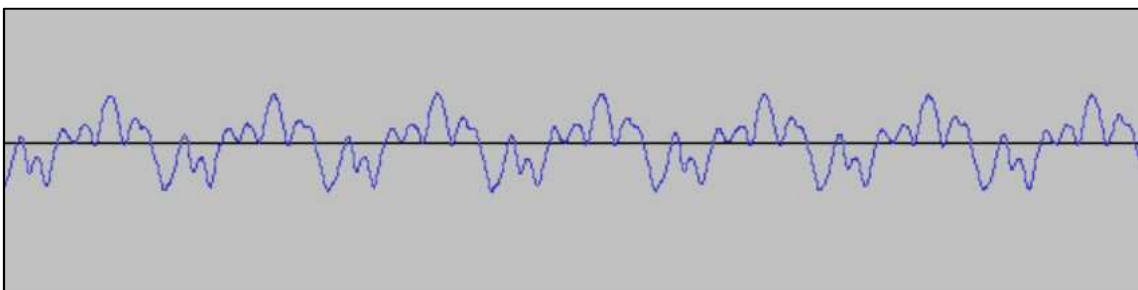
11.14 Experiment 14: La 216 Hz Violoncel

11.14.1 Desenvolupament i resultats

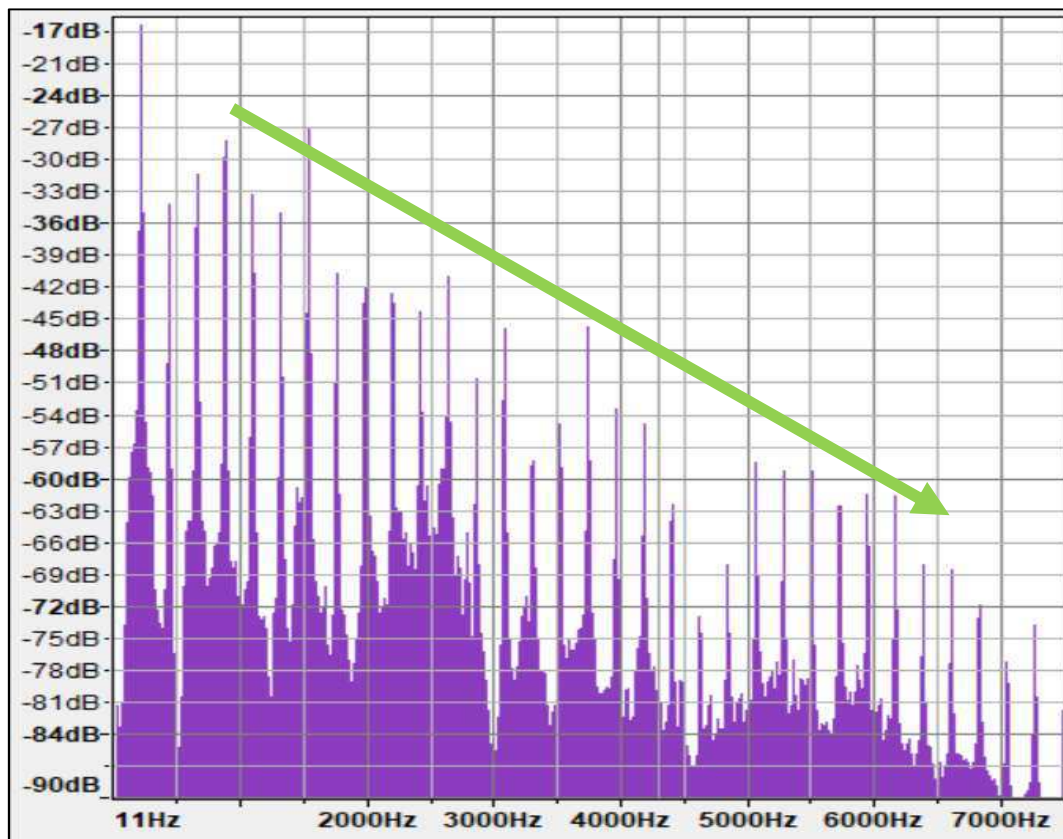
He gravat un La 216 Hz d'un violoncel en la mateixa aula de Mollet on vaig gravar el vent. L'objectiu d'aquest experiment és mirar si la ressonància que he trobat característica del violí i que es veu en les gràfiques d'espectre de freqüències dels experiments anteriors és exclusivament del violí o si també tenen aquesta característica altres instruments de corda com el violoncel.



Gravació violoncel



Ona La 216 Hz violoncel



Espectre de freqüències: La 216 Hz violoncel

11.14.2 Anàlisi i conclusions

Efectivament, comparant les gràfiques es veu que la ressonància característica del violí també es veu en l'espectre de freqüències del violoncel, per tant segurament també en la resta dels instruments de corda és així. La intensitat i l'estructura dels harmònics del violoncel és molt semblant a la del violí. Els harmònics decreixen a mesura que augmenta la freqüència com assenyalo amb la fletxa verda.

11.15 Experiment 15: Instruments de percussió: vibràfon, marimba i xilòfon

11.15.1 Vibràfon

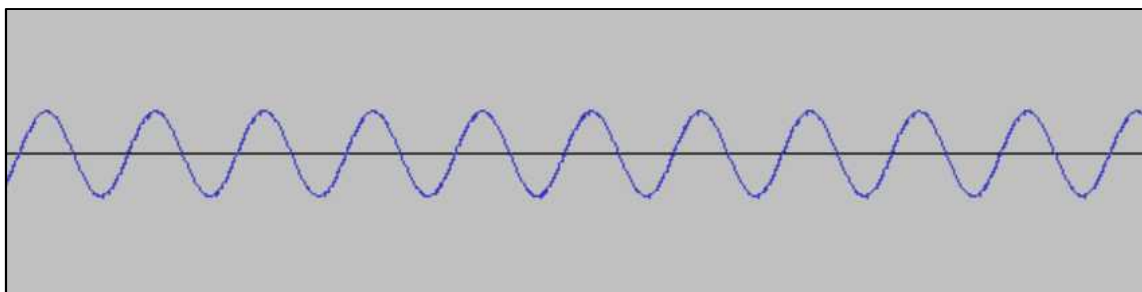
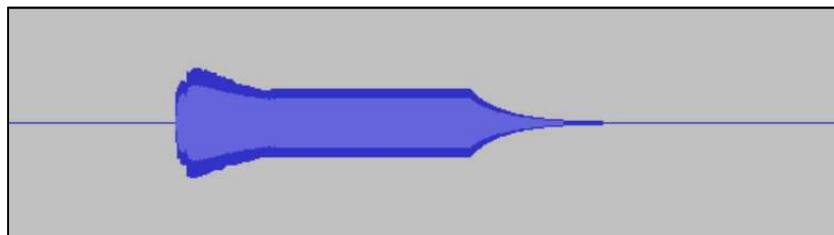
El vibràfon és un instrument format per làmines d'un aliatge de metalls, les quals poden compondre tres o quatre octaves i mitja.

Les làmines de metall estant subjectades per una estructura (normalment de fusta) per un costat. Això fa que les làmines estiguin lliures i no puguin parar de vibrar, per tant el so no serà interromput.

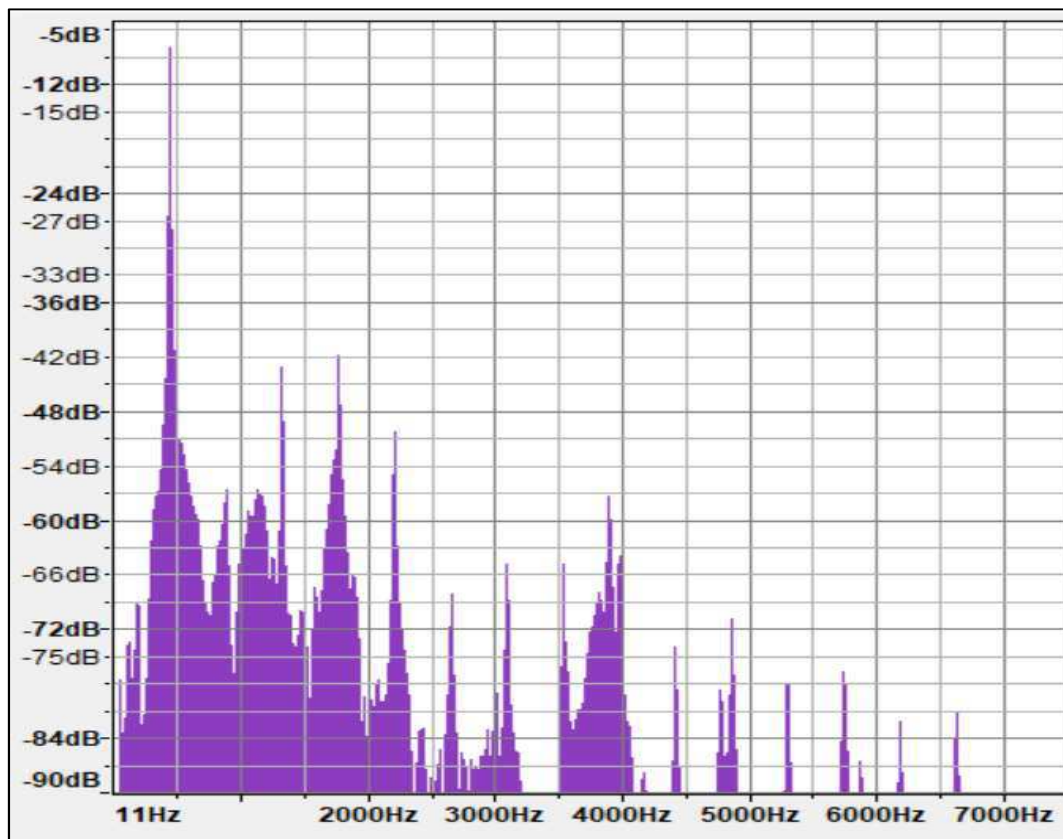
Una cosa característica del vibràfon és que té un pedal de tal manera que l'instrumentista pot controlar la durada del temps de les notes fent aturar la vibració, deixant anar el pedal, sinó el so s'acabarà quan la vibració de les làmines s'aturi.



Gravació de la nota amb el vibràfon apretant el pedal per aguantar la nota un cert temps



Ona La 440 Hz vibràfon



Espectre de freqüències: La 440 Hz vibràfon

El segon harmònic té una intensitat molt baixa, com si no existís. La resta d'harmònics es veuen clars i definits. L'ona és quasi perfecta, quasi com una ona simple d'un so pur, tot i que no ho és perquè ens ho indiquen els harmònics i perquè si ens hi fixem bé té minúscules deformacions al llarg de la seva corba. Té una fonamental amb molta intensitat i pràcticament no té harmònics a partir dels 4000 Hz.

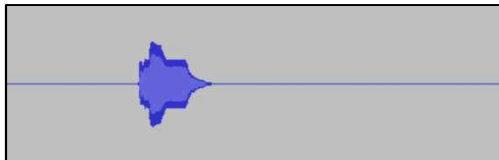
11.15.2 Marimba

La marimba té una estructura semblant al vibràfon però les làmines no són de metall sinó de fusta.

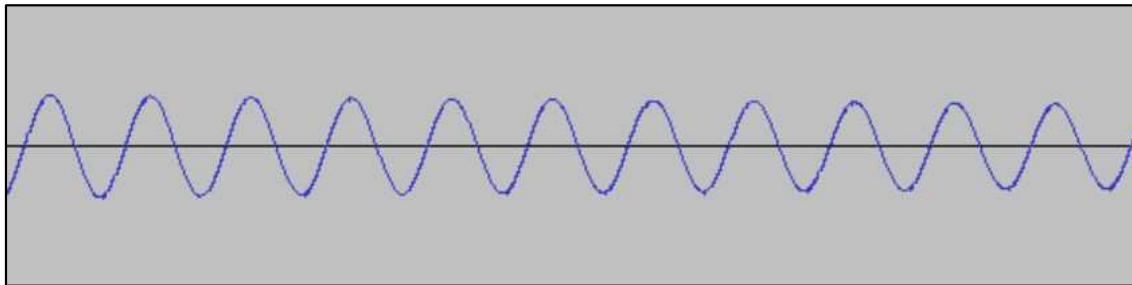
També com el vibràfon, posseeix uns tubs metàl·lics a sota de cada una de les làmines per amplificar el seu so de forma natural i l'estructura de les notes és la mateixa disposició tonal que les del piano (notes negres i notes blanques).

La marimba no disposa de pedal, per tant, la duració de les notes és extremadament curta.

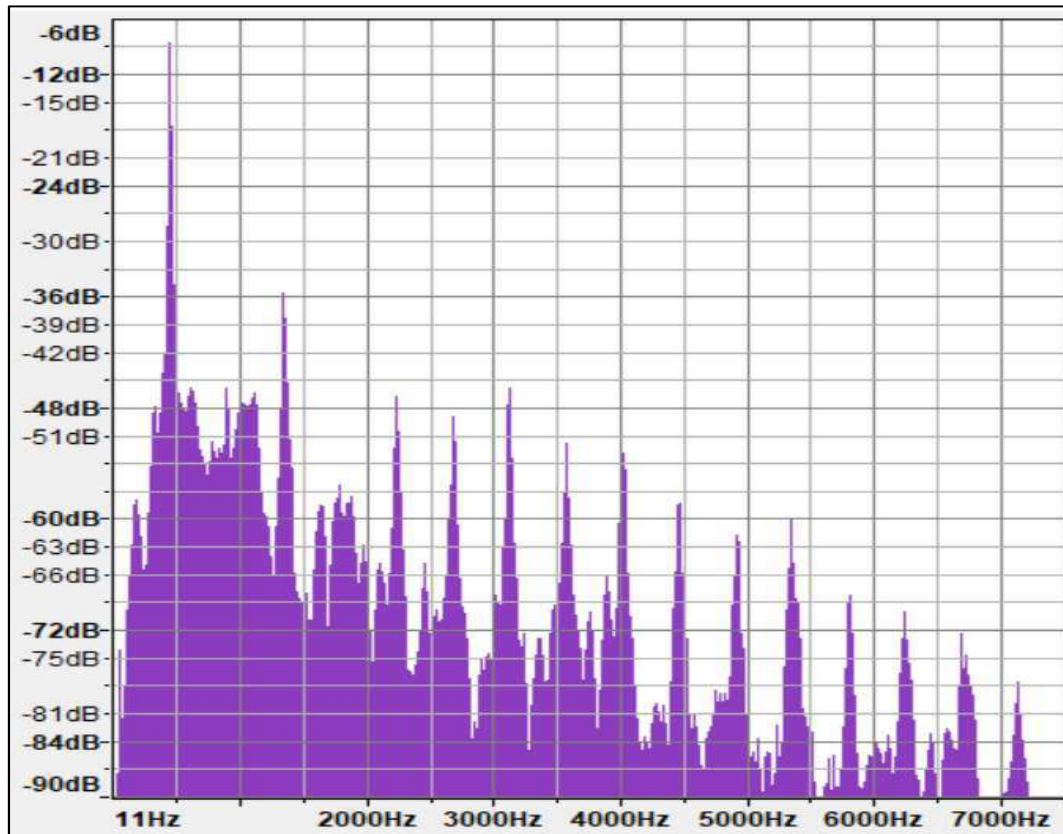
La marimba té més harmònics i són més estables en intensitat respecte al vibràfon. També el segon harmònic és nul, si hi és, es camufla amb la ressonància del mateix instrument. L'ona és també bastant perfecte. Com que és un instrument de fusta i no de metall, la marimba té més harmònics que el vibràfon.



Gravació del La 440 Hz amb la marimba



Ona marimba La 440 Hz



Espectre de freqüències: La 440 Hz marimba

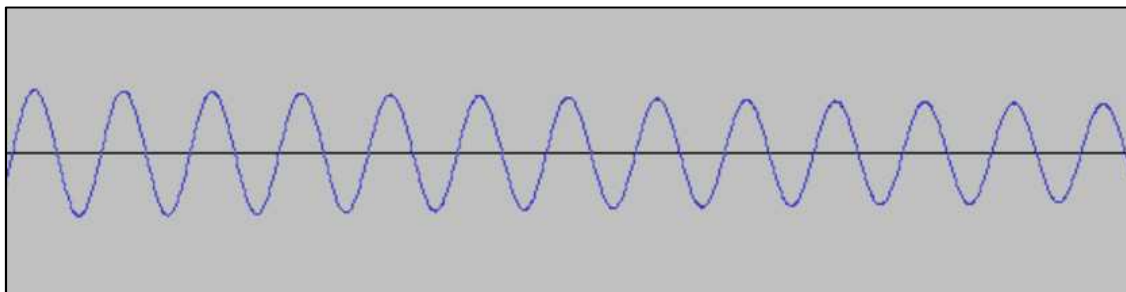
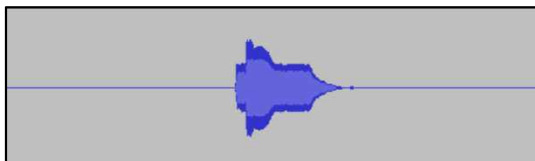
11.15.3 Xilòfon

El xilòfon és molt semblant a la marimba, també és de fusta, però té els tubs de ressonància més curts i l'instrument en si és més petit.

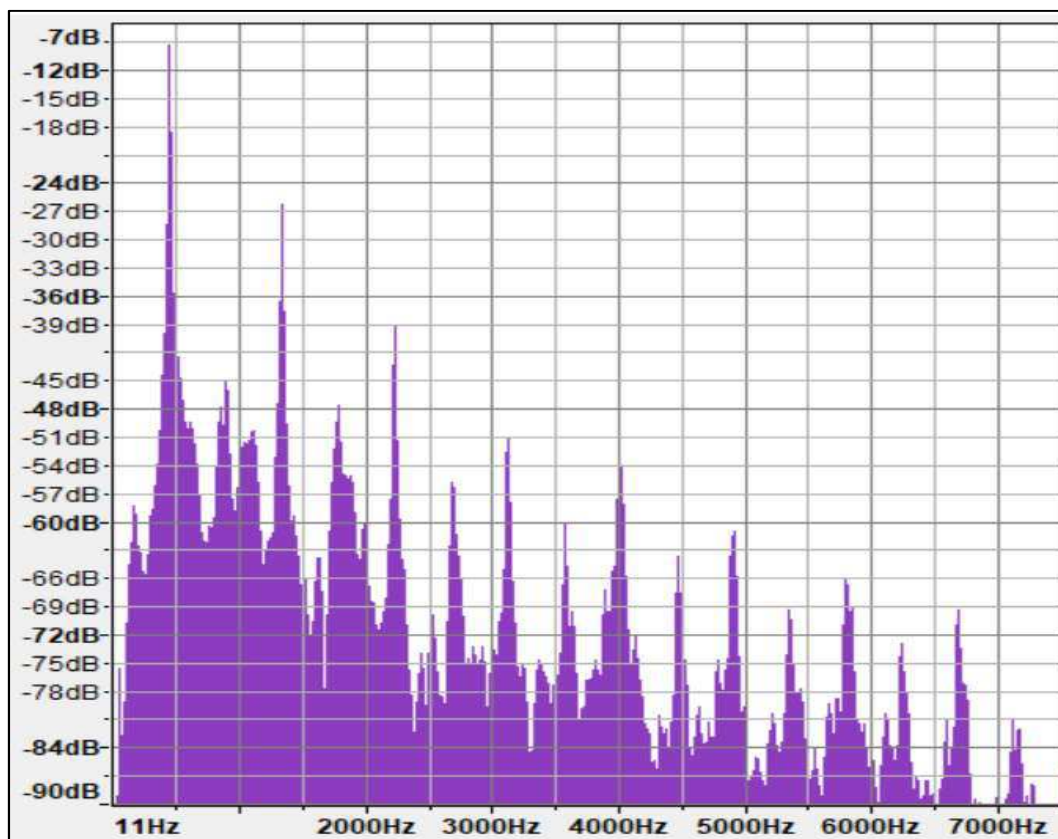
Com ja m'esperava, l'espectre de freqüències és molt semblant a la marimba, ja que els instruments en si són molt semblants. Desapareix el segon harmònic també i l'ona és bastant perfecte.



Gravació del La 440 Hz amb el xilòfon



Ona La 440 Hz xilòfon



Espectre de freqüències: La 440 Hz xilòfon

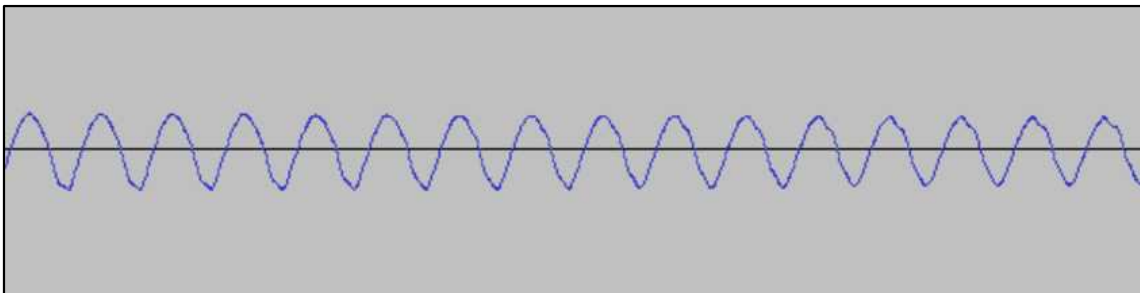
11.16 Experiment 16: La 440 Hz piano (teclat)

He gravat un La 440 Hz amb un teclat posant el so del piano. Recordem que el teclat no deixa de ser un aparell que reproduïx sons electrònicament, sense cap vibració que s'origini del mateix instrument en si.

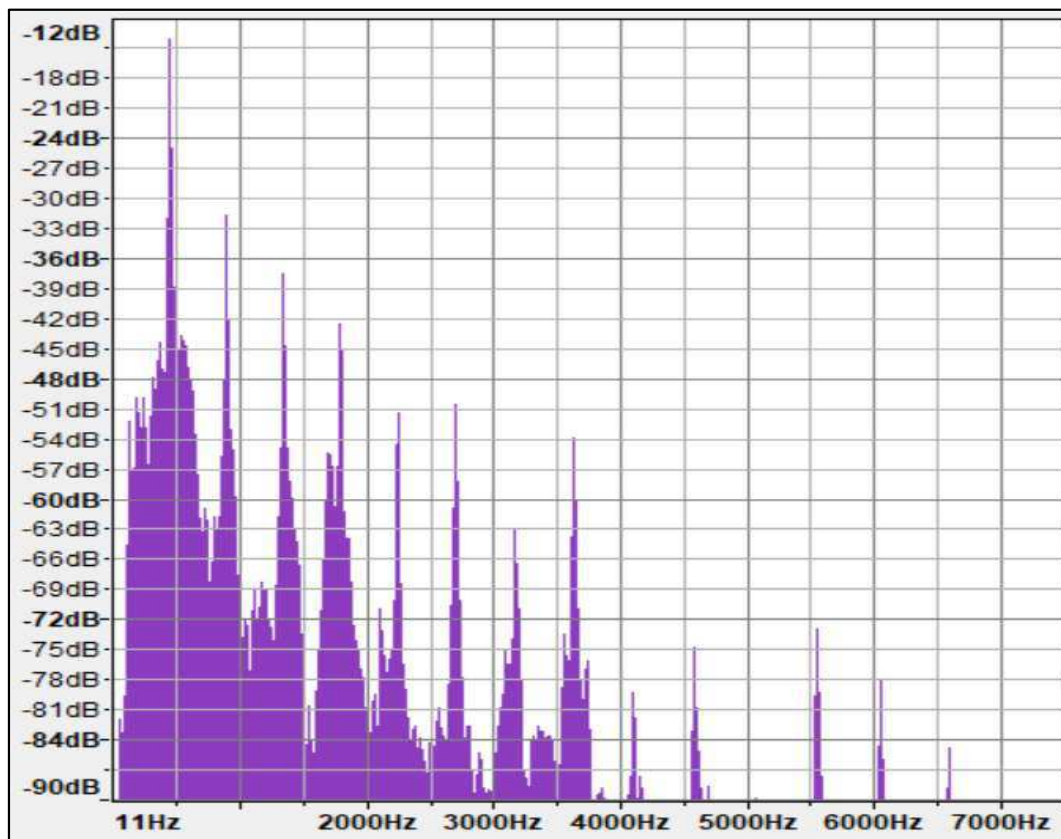
Com a conclusió crec que al ser un so artificial, ha estat programat anteriorment la intensitat dels harmònics a través d'un ordinador i no té gaire riquesa d'harmònics, que s'acaben 6500 Hz.



Gravació del La 440 Hz amb el teclat



Ona La 440 Hz piano teclat



Espectre de freqüències La 440 Hz amb el teclat

12 Conclusions

He complert els meus objectius principals del treball. En primer lloc, he descobert com es produeix el so d'un violí, en segon lloc he trobat les diferències entre violins de variades qualitats i mides i finalment he detectat les diferències d'harmònics que té el violí respecte a altres instruments.

He vist que el violí sona perquè en passar l'arc, la corda crea una ona que gràcies al pont es transmet a la caixa de ressonància. L'ànima i la barra harmònica, que estan dins de la caixa, vibren, i aquesta ona amb força intensitat s'escapa cap a l'exterior a través de les efes. No obstant, la meva recerca m'ha permès determinar que el violí té un disseny característic que provoca que totes les peces que formen el violí influeixen en el so.

Pel que fa a la comparació d'harmònics de diferents violins, he pogut veure que com més bo és el violí, més ordenat i definit té els harmònics. En el violí II, de luthieria i el de més qualitat, les notes són més nítides i els harmònics estan més ben definits que en els violins de mides més petites i de manufactura, $1/4$, $1/3$ i $1/2$, que com que són de menys qualitat, tota la part de l'espectre de freqüències inferior a -75 dB els harmònics ja no es diferencien i queden camuflats amb altres freqüències. Respecte als violins I i III de categoria intermèdia, només passa el que he dit anteriorment en els primers harmònics.

Com a conclusió de la comparació dels violins amb altres instruments puc afirmar que la intensitat dels harmònics dels instruments de corda i de percussió va en decreixent tota l'estona: comença amb la fonamental amb màxima intensitat i després va disminuint la intensitat dels següents harmònics. En el cas del vent, la intensitat de les primeres freqüències és creixent i després és decreixent destacant l'espectre de freqüències del clarinet i el saxo tenor on es veu amb més claredat. En relació als instruments de percussió, cal destacar que tenen una fonamental amb molta intensitat que és degut al fet que normalment els sons de la percussió són impactes, un cop, mentre que en el vent i a la corda l'emissor de so és constant. El meu estudi revela que els instruments de corda són molt més rics en harmònics. Curiosament, d'entre els instruments de percussió que he estudiat, la marimba i el xilòfon, que són de fusta, tenen més harmònics que el vibràfon que és de metall. Per tant, verifico que la fusta és més rica en

harmònics que el metall, de tal manera que és per això que el violí té tants harmònics, gràcies al fet que és un instrument de fusta. Si ens fixem en les ones dels instruments, podem afirmar que el material del qual està fet un instrument (metall, fusta, etc.) afecta directament a com són les seves ones i harmònics.

Aquest treball ha estat una gran experiència per mi, ja que he pogut investigar sobre preguntes que sempre m'havia fet. He pogut entendre l'essència del sistema musical que tenim avui en dia i he pogut veure les relacions que hi ha entre els harmònics i els diferents instruments o diferents maneres de tocar-los. Durant la recerca del treball m'he anat formant amb ple de conceptes que no sabia anteriorment i m'han fet veure i entendre les coses d'una altra manera, més científicament.

13 Bibliografia

Llibres i revistes

ARBONÉS, J. and MILRUD, P. (2018). *Música y matemáticas*. [Barcelona]: RBA Libros.

Coromina i Pou, E., Casacuberta, X. i Quintana, D. (2012). *El Treball de recerca*. Vic: Eumo.

MALEY HUTCHINS, C. (1981). Acústica de las tablas del violín. Revista *Investigación y Ciencia*, (63), pp.55-64. Barcelona: Scientific American.

MERCADÉ i CAPELLADES, J., ARMENGOL i SOLÉ, M., OLIVERAS ROIG, A. and SERRA i ESTRADA, S. (2009). *Física 2*. Barcelona: McGraw Hill.

ROUSSEL, A. and KOENIG, A. (1974). *Traité de lutherie: à l'usage des luthiers, des amateurs de lutherie, des violonistes, altistes et des violoncellistes*. Francfort-sur-le-Main: Das Musikinstrument.

Exposicions

MUSEU DE LA CIÈNCIA I DE LA TÈCNICA DE CATALUNYA (2018). *Exposició matemàtiques en el nostre entorn*. Terrassa, Espanya. [Abril 2018]

Pàgines web

ABC. (2018). *El secreto mejor guardado de los violines Stradivarius*. [en línia] https://www.abc.es/ciencia/abci-secreto-mejor-guardado-violines-stradivarius-201803122031_noticia.html [consulta: Octubre 2018].

Blocs.xtec.cat. (2018). [en línia] <http://blocs.xtec.cat/aulavirtual4teso/files/2011/02/tema-5-el-so-d1-d14.pdf> [consulta: Abril 2018].

Ca.wikipedia.org. (2018). *Freqüències del piano*. [en línia] https://ca.wikipedia.org/wiki/Freq%C3%BC%C3%A8ncies_del_piano [consulta: Novembre 2018].

Ca.wikipedia.org. (2018). *Jean-Baptiste-Joseph Fourier*. [en línia] https://ca.wikipedia.org/wiki/Jean-Baptiste-Joseph_Fourier [consulta: Març 2018].

Ca.wikipedia.org. (2018). *Propagació del so*. [en línia] https://ca.wikipedia.org/wiki/Propagaci%C3%B3_del_so [consulta: Juny 2018].

Ca.wikipedia.org. (2018). *Transformada de Fourier*. [en línia] https://ca.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier [consulta: Març 2018].

Diccionari.cat. (2018). *GDLC - harmònic*. [en línia] <http://www.diccionari.cat/lexicx.jsp?GECART=0072495> [consulta: Juny 2018].

Edu365.cat. (2018). *Física | Batxillerat | edu365*. [en línea] http://www.edu365.cat/batxillerat/ciencias_tecnologia/fisica.htm [consulta: Setembre 2018].

E-educativa.catedu.es. (2018). *2.1 Ondas estacionarias en cuerdas*. [en línea] http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3212/html/21_ondas_estacionarias_en_cuerdas.html [consulta: Abril 2018].

Ehu.eus. (2018). *Características del sonido: Intensidad, tono, timbre y duración*. [en línea] <http://www.ehu.eus/acustica/bachillerato/casoes/casoes.html> [consulta: Abril 2018].

Ehu.eus. (2018). *Sonidos musicales*. [en línea] <http://www.ehu.eus/acustica/espanol/musica/somues/somues.html> [consulta: Abril 2018].

Electrónica analógica y digital. (2018). *ONDAS SONORAS - CARACTERÍSTICAS TIMBRE Y TONO*. [en línea] <http://www.electrontools.com/Home/WP/2016/09/11/ondas-sonoras-caracteristicas/> [consulta: Setembre 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Coma (música)*. [en línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Coma_\(m%C3%BAmica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Coma_(m%C3%BAmica)) [consulta: Noviembre 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Coma pitagórica*. [en línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Coma_pitag%C3%B3rica [consulta: Noviembre 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Cuerda vibrante*. [en línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerda_vibrante [consulta: Juliol 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Enarmonía*. [en línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/Enarmon%C3%ADa> [consulta: Noviembre 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Frecuencias de afinación del piano*. [en línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencias_de_afinaci%C3%B3n_del_piano [consulta: Noviembre 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Índice acústico científico*. [en línea] https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice_ac%C3%BAstico_cient%C3%ADfico [consulta: Juny 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Índice acústico franco-belga*. [en línea] https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice_ac%C3%BAstico_franco-belga [consulta: Maig 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Raíz duodécima de dos*. [en línea] https://es.wikipedia.org/wiki/Ra%C3%ADz_duod%C3%A9cima_de_dos [consulta: Juny 2018].

Es.wikipedia.org. (2018). *Serie armónica (música)*. [en línea] [https://es.wikipedia.org/wiki/Serie_arm%C3%B3nica_\(m%C3%BAsica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Serie_arm%C3%B3nica_(m%C3%BAsica)) [consulta: Maig 2018].

FERNÁNDEZ, J. (2018). *Técnicas alternativas de violín | Deviolines*. [en línea] Deviolines.com. <https://www.deviolines.com/tecnicas-alternativas-de-violin/> [consulta: Novembre 2018].

FERNÁNDEZ, J. (2018). *Armónicos: qué son y cómo se tocan en el violín. | Deviolines*. [en línea] Deviolines.com. <https://www.deviolines.com/armonicos-que-son-y-como-se-tocan-en-el-violin/> [consulta: Maig 2018].

GENIOLANDIA. (2018). *¿Cómo funciona un violín?*. [en línea] <https://www.geniolandia.com/13121816/como-funciona-un-violin> [consulta: Setembre 2018].

GENIOLANDIA. (2018). *¿Cuáles son las razones por las que un violín produce chillidos?*. [en línea] <https://www.geniolandia.com/13093039/cuales-son-las-razones-por-las-que-un-violin-produce-chillidos> [consulta: Octubre 2018].

Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. (2018). *Standing Waves on a String*. [en línea] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Waves/string.html> [consulta: Juliol 2018].

Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. (2018). *Violin Resonances*. [en línea] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Music/viores.html#c2> [consulta: Novembre 2018].

Lpi.tel.uva.es. (2018). *Acústica Musical: Instrumentos de cuerda --> Principios de funcionamiento*. [en línea] https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/cuerda/principios_cuerda.html [consulta: Setembre 2018].

M. CASTRO, A. (2009). *Música y matemáticas. La afinación pitagórica. El origen de la escala cromática*. [en línea] Enchufa2. <https://www.enchufa2.es/archives/musica-y-matematicas-la-afinacion-pitagorica-el-origen-de-la-escala-cromatica.html> [consulta: Desembre 2018].

Mat-web.upc.edu. (2018). [en línea] <https://mat-web.upc.edu/people/xavier.gracia/musmat/treballs/Navarro.violi.pdf> [consulta: Agost 2018].

Mat-web.upc.edu. (2018). [en línea] <https://mat-web.upc.edu/people/xavier.gracia/musmat/treballs/Navarro.violi.pdf> [consulta: Gener2018].

MuyHistoria.es. (2018). *¿Por qué los violines Stradivarius suenan de un modo único?*. [en línea] <https://www.muyhistoria.es/curiosidades/preguntas-respuestas/ipor-que-los-violines-stradivarius-suenan-de-un-modo-unico> [consulta: Octubre 2018].

Oa.upm.es. (2018). [en línea] <http://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf> [consulta: Abril 2018].

Página logosalut. (2018). *Transmissió del so i fenòmens sonors*. [en línea] <https://www.logosalut.com/fonaments-d-audiologia/f%C3%ADsica-ac%C3%B4stica/transmissi%C3%B3-del-so-i-fen%C3%B2mens-sonors/> [consulta: Febrer 2018]

VALEVA, Paloma. (2018). *Diferencias entre un violín de estudio y uno profesional*. [en línea] <https://palomavaleva.com/es/diferencias-violin-estudio-y-uno-profesional/> [consulta: Noviembre 2018].

VALEVA, Paloma. (2018). *La física y el violín, nociones elementales | Paloma Valeva*. [en línea] <https://palomavaleva.com/es/fisica-y-el-violin-nociones-elementales/> [consulta: Juliol 2018].

Pinterest. (2018). *Pin by Jesús Fernández on Violin | Pinterest | Violin, Instruments and Cello*. [en línea] <https://www.pinterest.es/pin/44191640073709924/> [consulta: Noviembre 2018].

Profes De Ciències. (2018). *Tema 8: El so – Profes De Ciències*. [en línea] <http://profesdeciencias.net/material/eso/2n-eso-ciencias-de-la-natura/tema-8-el-so/> [consulta: Abril 2018].

Sonidosbinaurales.com. (2018). *Generador de tonos binaurales en línea | Sonidos Binaurales - Música Binaural - Descubre el beneficio de las ondas cerebrales en las personas*. [en línea] <http://www.sonidosbinaurales.com/generador-de-tonos-binaurales-en-línea/> [consulta: Juny 2018].

Teoria.com. (2018). *Referencia : semitonos cromáticos y diatónicos*. [en línea] <http://www.teoria.com/es/referencia/c/crom-diat.php> [consulta: Noviembre 2018].

Vedrunacatalunya.cat. (2018). [en línea] https://www.vedrunacatalunya.cat/recerques/treballs/2017/vall_terrassa/TR_emma_serrasolses.pdf [consulta: Agost 2018].

VILLATORO, F., MARÍN, D., RAYADO, E., MULET, J., BELLIDO, P., QUIRANTES, A., MANUEL, E., RODRÍGUEZ, P., FRÍAS, F., LÓPEZ, C., GRIMA, C., PÉREZ, J., SEVILLA, J. i VILLATORO, F. (2018). *La física del cuarto armónico de Sibelius | Ciencia | La Ciencia de la Mula Francis*. [en línea] La Ciencia de la Mula Francis. <http://francis.naukas.com/2014/03/14/el-fisica-del-cuarto-armonico-de-sibelius/> [consulta: Juliol 2018].

Vps280516.ovh.net. (2018). 1. (2004-2005) *Afinación - Justa entonación*. [en línea] http://vps280516.ovh.net/divulgamat15/index.php?option=com_content&view=article&id=8747&directory=67&limitstart=5 [consulta: Novembre 2018].

Web, A. (2018). *Teoria de les escales musicals: Harmònics i timbre*. [en línea] Albertvila.cat. <https://albertvila.cat/teoria-escales-musicals/teoria-escales-musicals-harmonics-timbre.htm> [consulta: Agost 2018].

Ysjournal.com. (2018). *Artificial Harmonics on the Violin – Young Scientists Journal*. [en línea] <https://ysjournal.com/artificial-harmonics-on-the-violin/> [consulta: Març 2018].

14 Annex

Escanegeu els següents codis QR per trobar:

- 1- Vídeo on surto jo fent un pizzicato amb el meu violí (violí I):



- 2- Vídeo en càmera lenta de la vibració d'una corda d'un violí:



- 3- Animació de la imatge del procés de la transformada de Fourier (és un GIF, pot ser que no tots els mitjans ho puguin llegir):

