



Índex

1 Introducció	2
1.1 Motivació.....	2
1.2 Objectius.....	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Problemes.....	2
2 Marc teòric.....	4
2.1 El violoncel.....	4
2.2 Estudi teòric del so.....	5
2.3 Què diferencia la qualitat dels violoncels?	13
3 Part experimental.....	16
3.1 Anàlisi física dels violoncels.....	16
3.2 Anàlisi física amb flautes.....	25
3.3 Conclusió general	30
4 Conclusions	32
5 Llistat de referències	33
6 Annexos.....	34
6.1 Glossari.....	34
6.2 Enregistraments i bandes d'harmònics	35



1 Introducció

1.1 Motivació

Aquest treball és per a mi una recerca que aprofundeix tant en aspectes musicals com físics. És per això que em resulta tan inspirador. Per una banda, la música sempre ha estat la meva afició més gran. Toco el violoncel des de que tenia sis anys i actualment estudio al Conservatori de Música Isaac Albéniz de la Diputació de Girona. Per altra banda, la física és una branca de les ciències que m'atrau en moltes de les seves cares. Poder-la utilitzar per ampliar els meus coneixements sobre la música i sobre el meu instrument és una motivació personal molt gran per a mi.

1.2 Objectius

Em proposo esbrinar si hi ha diferències científicament comprovables entre el so de violoncels de qualitats molt diferents. M'agradaria descobrir si els violoncels, a mesura que són més cars tenen diferències en les seves bandes d'harmònics¹ respecte als violoncels més barats.

1.3 Metodologia

Per tal d'assolir els objectius que m'he proposat, he utilitzat un ordinador portàtil amb el programa informàtic *Audacity* instal·lat i un micròfon, necessaris per realitzar els enregistraments i obtenir les bandes d'harmònics de cada instrument. He gravat tres notes diferents de quatre violoncels de preus molt variats i posteriorment, utilitzant l'*Audacity*, he analitzat diferents aspectes. També he enregistrat altres instruments com flautes, un ukelele i la veu humana.

1.4 Problemes

Malauradament, no puc dir que hagi estat un treball senzill de dur a terme. M'he trobat amb diverses dificultats al llarg de la seva realització, que han fet que em replantegés molts cops quin era el pròxim pas a fer.

El problema més important ha estat que no he pogut demostrar la meva hipòtesi utilitzant els violoncels. Els resultats obtinguts no m'han revelat cap dada rellevant



i he descobert que la recerca que em proposava fer és molt més complexa del que m'havia imaginat inicialment. Reconec que segurament m'han faltat mitjans tècnics per a poder aconseguir els resultats desitjats.

Tanmateix, he trobat un camí paral·lel per intentar aconseguir el meu objectiu. He reconduït la part pràctica utilitzant flautes, que m'han proporcionat un resultat millor.

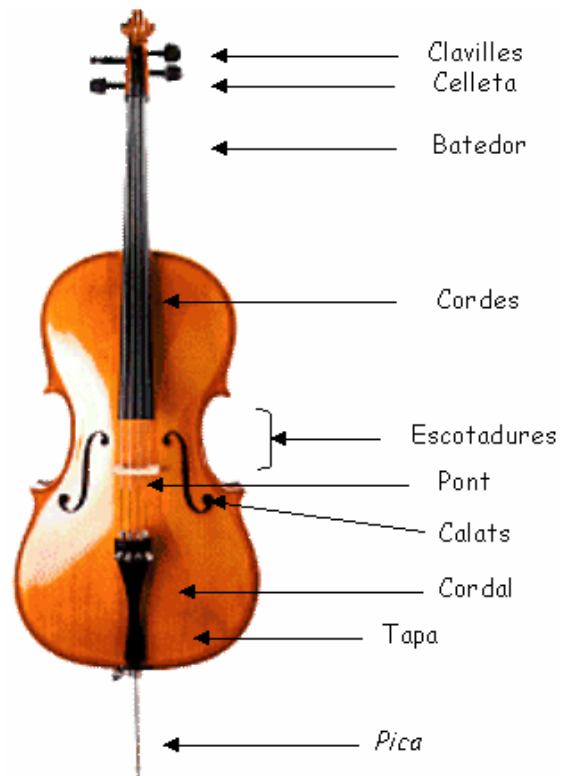


2 Marc teòric

2.1 El violoncel

El violoncel és un instrument que pertany a la família de la corda fregada, més gran que el violí i la viola i per tant més greu, però més petit que el contrabaix i per tant més agut que aquest. A causa de la seva mida i el pes, es toca des de la posició asseguda, col·locant-lo entre els genolls. També es coneix amb el nom de *cello*, diminutiu de la paraula italiana “*violonchelo*” i el músic que toca aquest instrument, rep el nom de violoncel·lista.

Consta de quatre cordes afinades per quintes justes², fixades per les clavilles al cap de l'instrument i pel cordal a la part inferior. Està format per una caixa de ressonància, que amplifica la vibració produïda per les cordes fent que el so surti pels dos calats, orificis situats als dos extrems de la tapa superior, més popularment coneguts com per les dues efes. Les quatre cordes estan subjectades pel pont, que evita que toquin la caixa de ressonància i ajuda a que es mantinguin tibades. El batedor és la part on el músic posa els dits de la mà esquerra per canviar de notes. La pica és



la part de l'instrument que entra en contacte amb el terra i serveix de suport al violoncel·lista. Finalment, amb la mà dreta se subjecta l'arquet, construït amb fusta i cerres, que procedeixen de les crineres dels cavalls i que són tensades fortament per poder lliscar sobre les cordes.

El violoncel va aparèixer a Itàlia a la segona meitat del segle XVII. Abans, existien instruments molt similars, que pertanyien a la mateixa família. A principis del segle



XVIII, els Stradivari (una família de luthiers italians, constructors d'instruments molt apreciats actualment) van modificar el violoncel normalitzant-ne les seves mides fins a convertir-lo en l'instrument que avui en dia coneixem.

Pel que fa al so, sempre s'ha dit que el seu timbre recorda a la veu humana. Cada corda té una extensió de tres octaves³ i mitja i tot el violoncel, des de la nota més greu a la corda **do** fins a les més agudes de la corda **la**, abasta quasi bé cinc octaves. El violoncel produeix so gràcies a la vibració de les seves cordes quan l'arquet entra en contacte amb elles o bé a través del pizzicato. Aquesta tècnica consisteix en pinçar les cordes amb la mà perquè vibrin d'una altra manera i així s'aconsegueix un so diferent que amb la utilització de l'arquet.

Tot i que als seus inicis no era més que un simple instrument per a l'acompanyament, poc a poc i gràcies al seu timbre nítid i potent s'ha guanyat la posició d'instrument solista, amb molts compositors dedicant-li el protagonisme de les seves obres.

2.2 Estudi teòric del so

2.2.1 El moviment ondulatori

En la natura hi ha un conjunt de moviments en els que no hi ha un transport net de matèria, sinó només de quantitat de moviment i d'energia. Aquests són els moviments ondulatoris. La quantitat de moviment i l'energia es transmeten per ones de propagació i provenen d'un punt o un conjunt de punts del medi, el focus emissor d'ones.

Com a exemples de fenòmens en els que hi ha moviments ondulatoris hi ha el so, la llum o les ones generades a la superfície d'un líquid.

Tipus d'ones segons les dimensions

- ◆ Ones unidimensionals: es propaguen en una única direcció (una dimensió).
Per exemple, les ones que es produeixen per la vibració d'una corda.



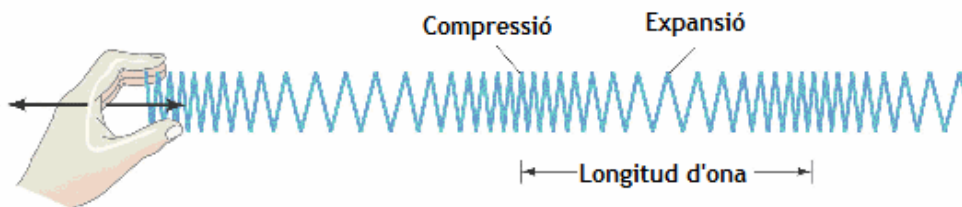
- ◆ Ones bidimensionals: es propaguen en un pla (dues dimensions). Per exemple, les ones que es produeixen sobre la superfície d'un líquid en repòs en llençar-hi una pedra.
- ◆ Ones tridimensionals: es propaguen en l'espai (tres dimensions). Per exemple el so, que se sent per tots els punts de l'espai que volten el focus emissor.

Tipus d'ones segons el medi de propagació

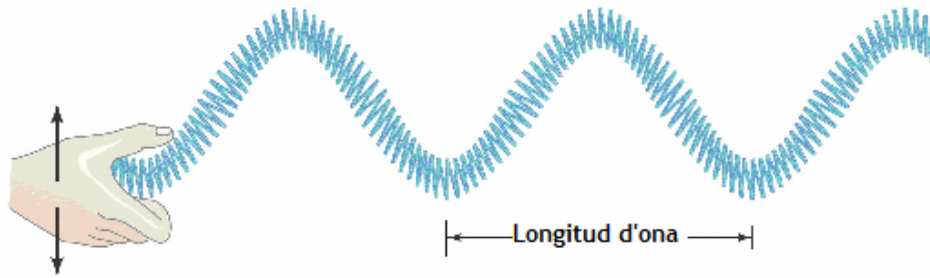
- ◆ Ones mecàniques: necessiten un medi per propagar-se i les partícules que formen part del medi són les que oscil·len al pas de l'ona. En són exemples les ones produïdes per la vibració d'una corda, les que es formen sobre la superfície d'un líquid i el so.
- ◆ Ones electromagnètiques: no necessiten un medi per transmetre's, per tant es poden propagar pel buit. Els camps elèctrics i els magnètics són els que oscil·len al pas de l'ona. En són exemples la llum, les ones de ràdio, les microones i els rajos infrarojos.

Tipus d'ones segons la direcció de propagació de l'ona i la direcció d'oscil·lació de les partícules del medi

- ◆ Ones longitudinals: la direcció de propagació de l'ona és la mateixa que la direcció d'oscil·lació de les partícules del medi. Un exemple molt clar l'obtenim si fixem una molla d'un extrem i estirem des de l'altre endavant i endarrere alternativament.



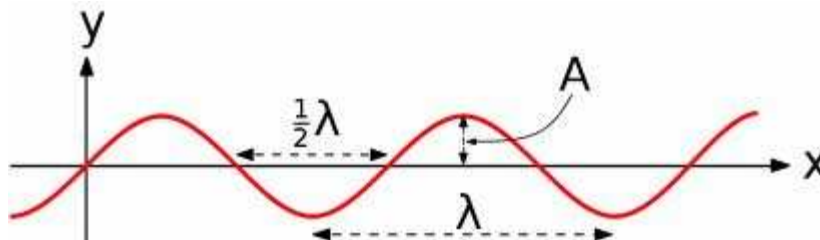
- ◆ Ones transversals: la direcció de propagació de l'ona és perpendicular a la direcció d'oscil·lació de les partícules del medi. Per exemple, si movem l'extrem d'una molla cap amunt i cap avall.



2.2.2 Característiques de les ones

Qualsevol ona, en transmetre's, presenta sempre unes magnituds determinades:

1. La freqüència (f): és el nombre d'oscil·lacions per unitat de temps. Es mesura en hertz (Hz), unitat que determina el nombre de cicles per segon.
2. El període (T): és el temps que tarda a produir-se tota una vibració completa. La seva unitat en el SI⁴ és el segon (s).
3. L'amplitud (A): és el valor de màxima elongació que pot arribar a adquirir l'ona i determina la quantitat d'energia que conté. En el cas del so, s'expressa normalment en decibels (dB).
4. Longitud d'ona (λ): és l'espai que recorre una ona en fer tota una oscil·lació completa. La unitat utilitzada per mesurar-la en el SI és el metre (m).
5. Velocitat de propagació (v): és la distància que recorre l'ona per unitat de temps determinada. La unitat emprada en el SI és el metre partit per segon (m/s).



2.2.3 El so

El so és una ona mecànica que es pot transmetre per diferents medis: a través dels sòlids, dels líquids i dels gasos. La velocitat amb què es transmet depèn de les característiques del medi. Si suposem que el so es propaga per l'aire i a una temperatura de 15°C, aleshores viatjarà a 340 m/s i per cada grau de temperatura que augmentem, la velocitat augmentarà 0,62 m/s.



També podem afirmar que és una ona tridimensional, ja que el so emès per qualsevol focus se sent per tots els punts de l'espai que es troben al seu voltant.

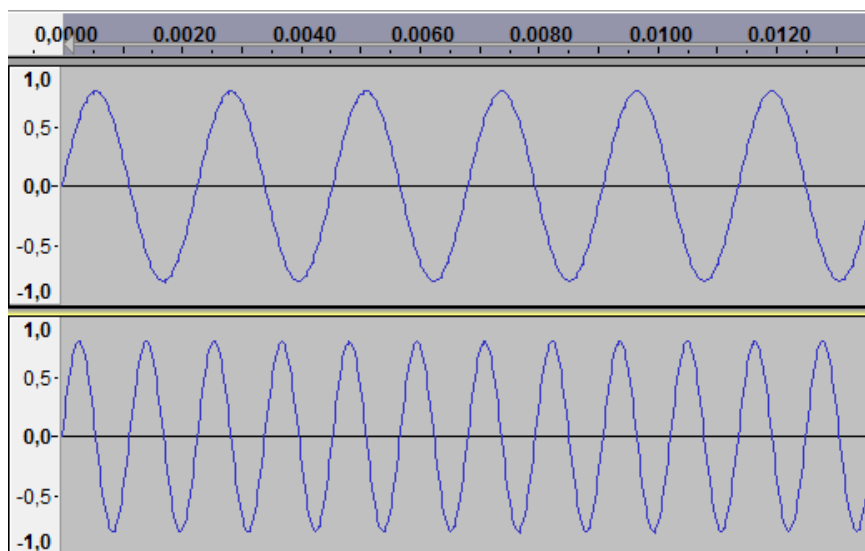
Per altra banda, el so és una ona longitudinal, perquè provocat a partir d'una vibració, és un seguit de compressions i dilatacions de pressió. Les ones sonores es propaguen a través de l'aire fins al timpà, que vibra i les transmet a les ramificacions del nervi auditiu a través d'uns petits ossets. Les cèl·lules ciliades, que es troben a l'orella interna, transformen les ones sonores en senyals elèctrics que arriben al nervi auditiu, des d'on passaran a l'òrgan encarregat d'interpretar els sons, la corfa auditiva.

El so té tres qualitats diferents: la freqüència, la intensitat i el timbre.

La freqüència

És el nombre de vibracions per segon, el que nosaltres entenem per notes greus i notes agudes. Els sons greus tenen una freqüència inferior que la dels sons aguts. Està relacionada amb la longitud d'ona, ja que quan la velocitat de propagació de l'ona és constant, la freqüència és inversament proporcional a la longitud d'ona. Aquesta relació s'expressa amb la següent fórmula: $f = v/\lambda$

El so no sempre és audible pels humans, sinó que la nostra oïda només és sensible als sons que es troben entre una freqüència de 20 Hz i 20000 Hz aproximadament.

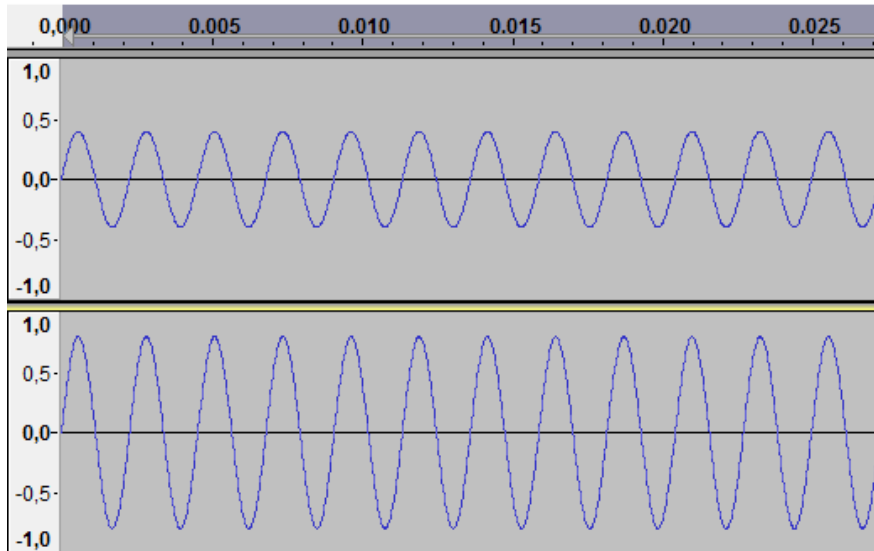


L'ona superior és de 440 Hz, la inferior té el doble de freqüència, 880 Hz.



La intensitat

Depèn de l'amplitud d'ona de la vibració i de l'energia que s'utilitza per emetre el so. Hi influeix la distància a la que es troba el focus sonor i la capacitat auditiva de l'oient. Permet distingir entre sons forts i sons dèbils.



La primera ona té una amplitud de 0,4 metres i la segona ona de 0,8. Per tant, la primera ona té la meitat d'intensitat que la segona.

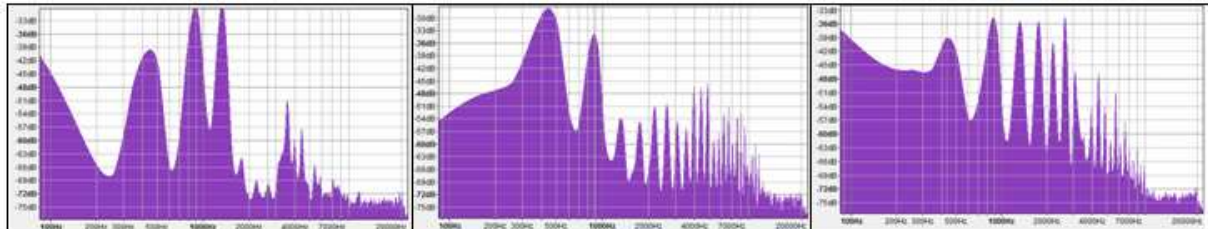
La unitat del nivell d'intensitat sonora és el decibel, que té una aplicació pràctica majoritàriament acústica, molt adequat a l'espectre auditiu de l'ésser humà. És una unitat logarítmica i per tant permet representar magnituds molt petites i molt grans amb nombres petits. Expressa la relació entre la magnitud que s'estudia i una magnitud de referència que ha de ser molt baixa, 0 dB, que se sol fer correspondre amb el nivell mínim de la pressió sonora que pot captar l'oïda humana.

El decibel té els seus orígens en el bel⁵ (B), que s'ha abandonat perquè proporcionava magnituds massa grans, per això s'utilitza aquest submúltiple que és deu vegades menor. Un bel, són 10 dB, que representa un augment 10 vegades major a la magnitud de referència. Així doncs, 2 bels representen un augment de 100 dB i 3 bels, un augment de 1000 dB. Per tant, les expressions mesurades en decibels són comparacions logarítmiques de base 10. Això significa que un augment de tres decibels suposa un doble increment de la intensitat del so. Per exemple, una conversa normal pot situar-se als 65 dB i en canvi un crit a 80 dB. La diferència és tant sols de 15 dB però el crit és 30 vegades més intens.



El timbre

Aquesta qualitat ens permet distingir un instrument d'un altre i els tipus de veus humanes diferents. Físicament aquesta qualitat s'anomena forma d'ona i ve determinada pels harmònics, que més endavant veurem què són.



Tres bandes d'harmònics de la nota *la* 3 emeses per tres instruments diferents, d'esquerra a dreta: la veu humana, un ukelele⁶ (corda pinçada) i un violoncel (corda fregada).

2.2.4 So o soroll?

Comunament s'entén que el soroll és fressa, dades sense sentit, que no s'utilitzen per transmetre cap senyal. Tot i així cal afirmar que el soroll també és un so, ja que es produeix fent vibrar objectes i ens arriba per mitjà d'ones que es propaguen a través d'un medi. Però quina diferència hi ha entre el so i el soroll? Moltes definicions diuen que el soroll és un tipus de so indesitjable. Però qui decideix què és indesitjable i què no? Sembla evident que la diferència entre aquests dos termes dependrà molt de l'oient i la situació en què es trobi.

Tot i així, actualment el soroll es relaciona molt amb la contaminació acústica i els problemes sobre la salut de les persones que pot arribar a causar. Per tant, el soroll es classifica com a un so d'alta intensitat i en ocasions també de llarga durada.

L'OMS (Organització Mundial de la Salut)⁷ ha posat uns límits establint els nivells màxims d'intensitat sonora que

Respiració tranquil·la	10 dB
Biblioteca	20 dB
Zones d'habitatges	40 dB
Conversa normal	50 dB
Ambient d'oficina	70 dB
Interior d'una indústria	80 dB
Tràfic vehicles	85 dB
Clàxon d'un automòbil	90 dB
Clàxon d'un autobús	100 dB
Interior d'una discoteca	110 dB
Motocicleta sense silenciador	115 dB
Trepant	120 dB
Banda de rock	130 dB
Llançament d'un coet a 45 km	180 dB



han de ser admesos als edificis públics. Segons aquesta organització, a partir de 85 dB tots els humans noten incomoditat i poden tenir alteracions a la salut.

El soroll, doncs, és el causant de diverses anomalies. Pot provocar problemes al sistema cardiovascular, modificacions del ritme respiratori, estrès, angoixa, actituds agressives... La majoria de les irregularitats que provoca desapareixen un cop cessa el soroll, però suportar de manera continuada nivells superiors als 90 dB pot provocar la pèrdua d'audició permanent.

És aconsellable, doncs, evitar de produir-lo i, si no es pot, reduir-lo al màxim.

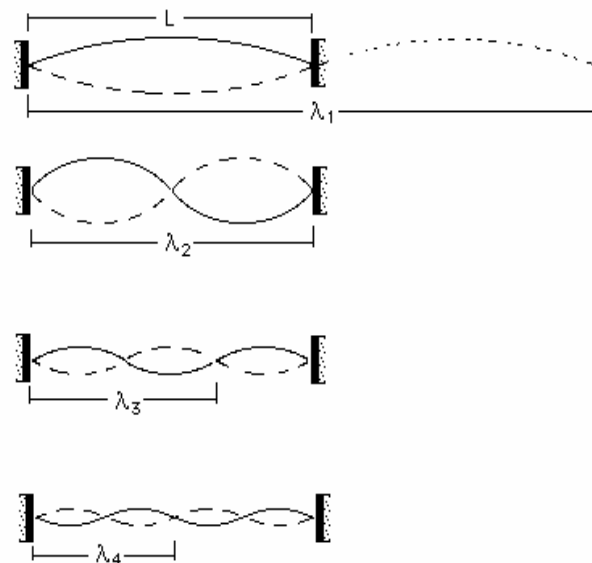
2.2.5 La vibració de les cordes: les ones estacionàries

En el violoncel i tots els altres instruments de la seva família, les cordes estan lligades pels dos extrems. Això fa que en passar l'arquet, les cordes entrin en oscil·lació. És així com es generen les ones estacionàries, amb la superposició de les ones transversals que recorren tota la corda i les ones reflectides als suports. D'aquesta manera se superposen dos moviments ondulatoris de mateixa amplitud, mateixa freqüència i que es propaguen a la mateixa velocitat, però en sentits contraris.

En aquestes ones hi ha punts on l'amplitud és màxima (ventres) i d'altres on és nul·la i que per tant no hi ha oscil·lació (nodes).

L'ona pot adoptar diferents formes, és a dir, diferents modes de vibració, que s'anomenen harmònics.

En la següent imatge es mostren els quatre primers harmònics d'una corda quan es troba en estat de vibració. La longitud de la corda és L , la longitud d'ona és λ i el número de l'harmònic és n . A partir del primer harmònic, que és l'harmònic fonamental ($n=1$), es pot deduir que: $\lambda = 2L / n$. Aquesta fórmula, podrà ser aplicada en la resta dels harmònics.





Tanmateix, també podem expressar els diferents harmònics en funció de la freqüència utilitzant la següent fórmula: $f_n = f_0 \cdot n$. On f_0 és la freqüència fonamental i f_n és la freqüència d'un harmònic determinat ($n=a$ un nombre).

2.2.6 Els harmònics

Quan toquem el violoncel o qualsevol altre instrument de corda, podem notar que les cordes oscil·len. Quan això passa es produeix un so que és en realitat una barreja d'harmònics.

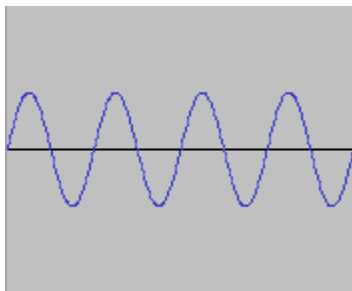
Un harmònic és un múltiple enter de la freqüència fonamental d'una ona. Els harmònics sempre es desenvolupen per una relació aritmètica. Per exemple, si el primer harmònic d'una nota o altrament anomenat harmònic fonamental té una freqüència de 12 Hz, el segon harmònic la tindrà de 24 Hz, el tercer de 36 Hz i així successivament.

La freqüència de l'harmònic fonamental és la responsable del to i, en canvi, els altres harmònics i la intensitat en la que es troben són els responsables del timbre. El diapasó⁸ és l'únic instrument que pot produir un so amb una única freqüència, qualsevol altre instrument musical té la seva pròpia gamma d'harmònics que defineix el seu timbre.

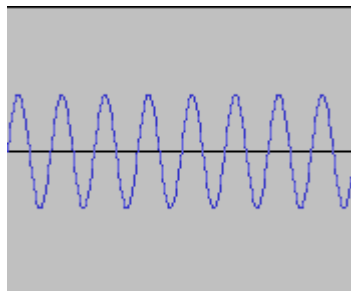
S'anomena espectre d'harmònics o espectre de freqüències d'un instrument a tot el conjunt de freqüències dels harmònics amb els que vibra.

En l'exemple següent, mostro com el segon harmònic de la nota **la** de freqüència 440 Hz s'afegeix a aquesta ona, produint una nova ona que té igualment la mateixa freqüència que la fonamental. Per tant, la primera ona i la tercera són la mateixa nota, però amb timbres diferents.

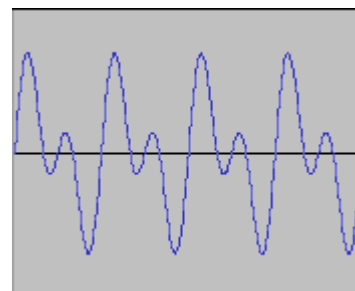
La 440 (harmònic fonamental)



La 880 (primer harmònic)



La 440 amb el primer harmònic





Així doncs, hem vist que el que caracteritza el so d'un instrument són els harmònics.

2.3 Què diferencia la qualitat dels violoncels?

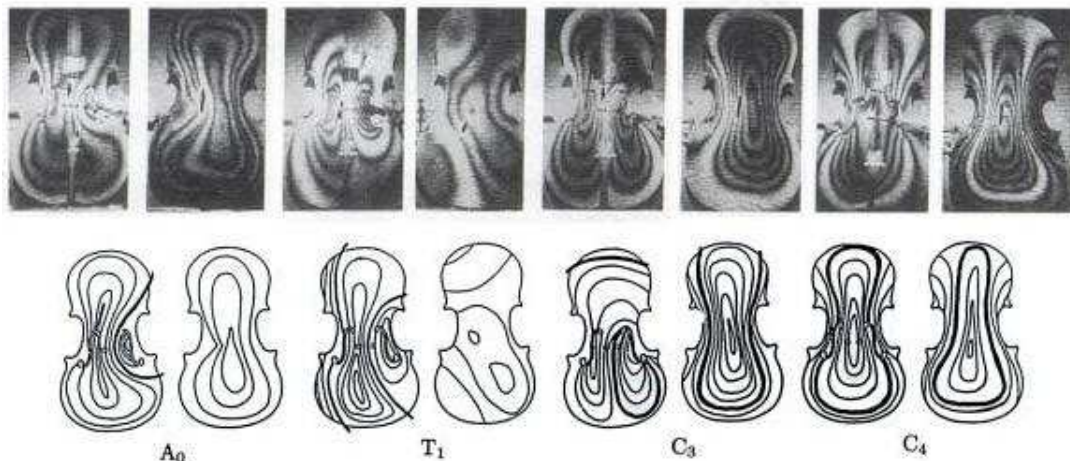
Existeixen violoncels de molts tipus. D'èpoques diferents, de parts del món diferents, construïts per luthiers diferents, fabricats amb materials diferents, de preus diferents i tanmateix, tots són el mateix instrument.

Però quins són els factors que fan que la qualitat d'un violoncel sigui diferent que la d'un altre? Jo m'he fixat en dos aspectes diferents.

2.3.1 Aspectes físics

El cos del violoncel està format per dues tapes, la del davant i la del darrere, que estan unides entre sí. La característica més important per determinar la qualitat del so d'un violoncel és la forma amb què vibren. Durant els últims vint anys, gràcies als avenços tecnològics, se n'ha pogut fer un estudi molt acurat.

Segons la nota que es toca, és a dir, la freqüència que s'emet, les tapes vibren de forma diferent. La tapa superior i la inferior es comporten independentment una de l'altra.



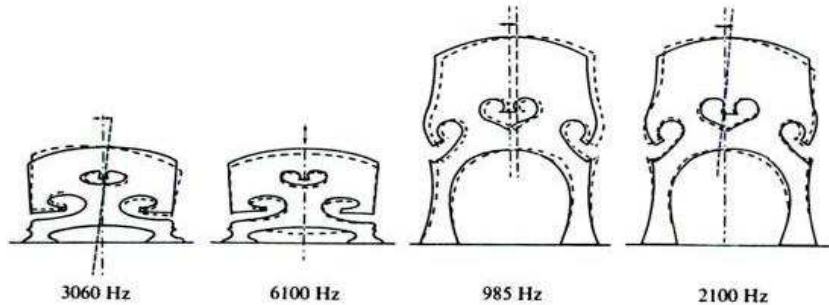
A₀ (275 Hz): l'aire entra i surt dels forats f.

T₁ (460 Hz): vibració principalment a la tapa superior

C₃ (530 Hz) i C₄ (700 Hz): vibració bidimensional



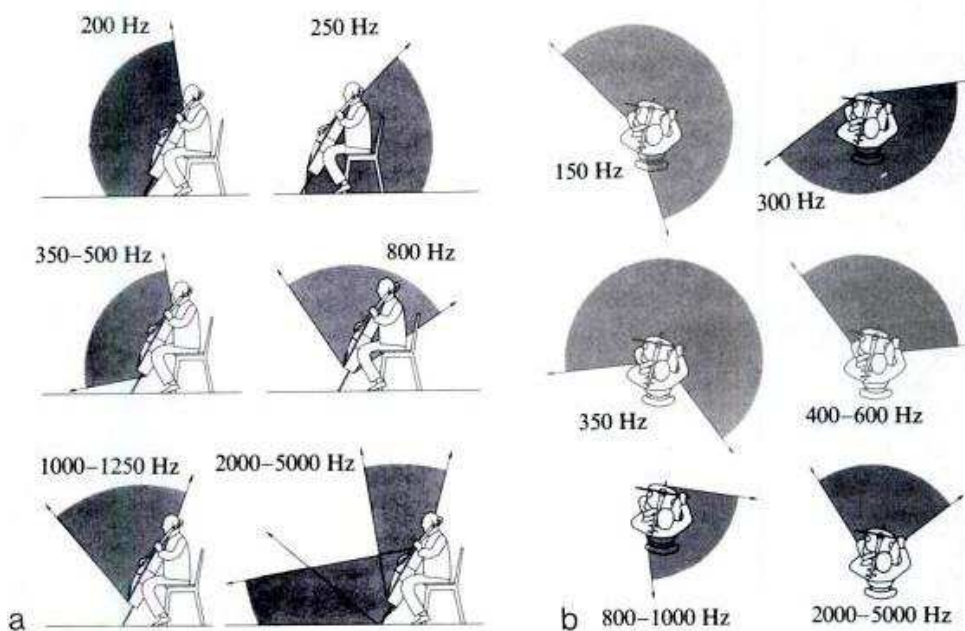
Però quan toquem el violoncel no sols vibren les tapes, hi ha altres factors: l'aire que passa per les efes, el coll, el batedor, el pont...



Vibració de dues freqüències diferents en un pont de violí (esquerra) i en un pont de violoncel (dreta)

I també hi ha l'arquet, que pot variar moltíssim el so d'un violoncel. En depèn la seva qualitat, el grau de tensió que tenen les seves cerres o bé el tipus i la quantitat de resina⁹ que s'hi posa, que permet que l'arc s'enganxi més o menys a la corda i que soni més o menys.

A més a més, cada freqüència té una direcció d'irradiació diferent. Això pot fer que, segons des d'on estiguem escoltant el violoncel i també segons quina freqüència estigui tocant l'intèrpret, ho sentim de maneres diferents.



Principals direccions de diferents freqüències pel violoncel en plans verticals (esquerra) i horitzontals (dreta)



2.3.2 Els espectres d'harmònics

Com hem vist, el so d'un instrument ve determinat pels seus harmònics. El que diferencia els violoncels de més qualitat, ja que el seu objectiu és fer música, són característiques auditives, és el so que emeten. Així doncs, els espectres d'harmònics són els que han de fer que un violoncel emeti millor so que un altre.

Amb aquest aspecte de valoració de la qualitat d'un violoncel és amb el que em basaré per dur a terme la meva part pràctica i intentar demostrar així la meva hipòtesi.



3 Part experimental

3.1 Anàlisi física dels violoncels

3.1.1 Procés

Per començar la meua investigació pràctica, he reunit quatre violoncels de preus molt diferents. Per cada violoncel he tocat tres notes: **la 3**, **sol 3** i **do 3**. A l'hora de fer els enregistraments he estat sempre jo la que he tocat els instruments, procurant fer-ho de la mateixa manera, amb la mateixa intensitat i passant l'arc pel mateix punt de la corda, per tal de minimitzar la influència d'aquestes variables en el resultat de la investigació.

A més, sempre he utilitzat el mateix micròfon col·locat a una distància d'un pam de la efa esquerra i subjectat per un trípod. El programa d'enregistrament que he utilitzat ha estat l'*Audacity*¹⁰, instal·lat en un ordinador portàtil per tal de poder moure'm fàcilment pels diferents espais.



El programa informàtic *Audacity* m'ha permès obtenir les bandes d'harmònics de cada nota en cada violoncel diferent. També he pogut obtenir la forma d'ona de cada nota.



3.1.2 Informació sobre els violoncels

Violoncel 1

Pertany a l'Escola Municipal de Música de Girona. És un instrument vell i sense gairebé cap valor. Té unes proporcions impròpies d'un violoncel, la seva construcció és molt dolenta. S'utilitza en poquíssimes ocasions, ja que la seva qualitat és pèssima. Se'ls hi deixa a persones que volen provar un violoncel.

Violoncel 2

Aquest violoncel és el meu. El vaig comprar l'any 2005 a la botiga del luthier Xavier Vidal i Roca, a Barcelona. És un violoncel Milan amb un valor d'uns 2000 euros. Va ser fabricat l'any 2004 a la Xina i està construït tot amb fustes xineses.

Violoncel 3

Aquest violoncel pertany a Basile Orth, un jove violoncel·lista de 16 anys que estudia al Conservatori Emanuel Feuermann, l'escola privada de violoncel de l'Acadèmia Kronberg a Alemanya. L'estudiant va adquirir el violoncel fa quatre anys. Va ser construït a Praga l'any 1931 i té un valor d'uns 20000 euros.

Violoncel 4

Aquest violoncel, el de més qualitat d'entre els quatre, pertany a Josep Bassal i Riera. Aquest músic és considerat un continuador de la millor tradició catalana i espanyola del violoncel i és reconegut internacionalment. És un instrument de gran valor, fabricat pels germans luthiers Giuseppe i Antonio Gagliano a Nàpols a finals del segle XVIII. Està valorat en uns 100000 euros.

3.1.3 Interpretació

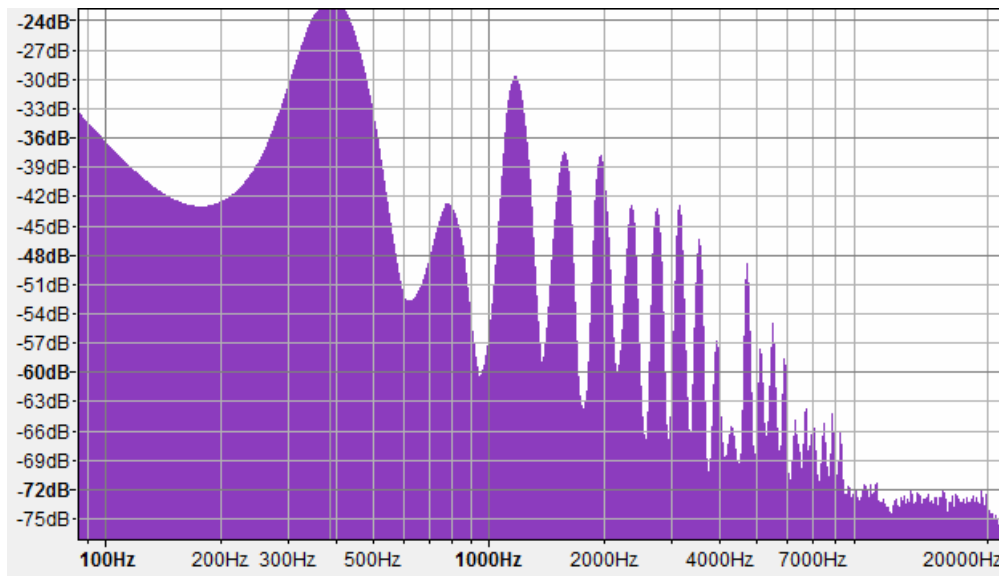
La gràfica següent ens mostra una banda d'harmònics d'un dels violoncels, concretament es correspon a la nota **sol** del violoncel 3. Per analitzar-la m'he fixat en diversos factors.

A l'eix d'abscisses s'hi troba la freqüència, expressada en hertz, i a l'eix d'ordenades s'hi troba la intensitat, expressada en decibels.



Els pics són els harmònics, ordenats començant pel fonamental, seguit pel segon harmònic, el tercer i així consecutivament. El gràfic està en escala logarítmica, que com hem vist no reflecteix exactament la realitat. Si ens fixem en la repartició de la freqüència en l'eix d'abscisses, el concepte és més clar.

Sempre hem de tenir present aquest factor, ja que per exemple, que un harmònic tingui la meitat de decibels que un altre no vol dir que tingui la meitat d'intensitat, sinó que en tindrà molta menys.



En el meu estudi he considerat que el primer harmònic sempre té el 100% de la intensitat i a partir d'aquí he establert el percentatge d'intensitat que tenen els altres harmònics. D'aquesta manera, espero trobar alguna tendència en la distribució dels harmònics de cada violoncel que em permeti definir un perfil per a cada instrument.



3.1.4 Taules de dades: violoncel per violoncel

Violoncel 1

LA 3			SOL 3			DO 3		
Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)	Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)	Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)
453	-22,9	100,00%	390	-12,4	100,00%	256	-28,3	100,00%
891	-33,3	68,77%	796	-24	51,67%	507	-44	64,32%
1324	-57,0	40,18%	1171	-40,2	30,85%	758	-55,5	50,99%
1770	-31,0	73,87%	1578	-34,5	35,94%	1036	-42,3	66,90%
2208	-46,8	48,93%	1965	-34,4	36,05%	1289	-52,9	53,50%
2658	-41,4	55,31%	2361	-36,2	34,25%	1553	-53,5	52,90%

Violoncel 2

LA 3			SOL 3			DO 3		
Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)	Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)	Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)
452	-20,3	100,00%	388	-24,8	100,00%	255	-22,7	100,00%
887	-32,3	62,85%	795	-19,6	126,53%	544	-19,8	114,65%
1325	-18,7	108,56%	1169	-29,9	82,94%	812	-33,1	68,58%
1763	-21,3	95,31%	1573	-28,1	88,26%	1075	-40,8	55,64%
2199	-23	88,26%	1954	-25,9	95,75%	1340	-23,9	94,98%
2639	-25,9	78,38%	2351	-41,5	59,76%	1605	-34,2	66,37%

Violoncel 3

LA 3			SOL 3			DO 3		
Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)	Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)	Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)
450	-24	100,00%	389	-21,7	100,00%	522	-30,5	100,00%
884	-41,3	58,11%	783	-42,3	51,30%	773	-42,3	72,10%
1326	-32	75,00%	1175	-30,3	71,62%	1311	-36,4	83,79%
1765	-40,2	59,70%	1577	-38,9	55,78%	1563	-42,2	72,27%
2198	-49,1	48,88%	1958	-38,8	55,93%	1839	-34,8	87,64%
2637	-46,2	51,95%	2361	-41,2	52,67%	2095	-45,7	66,74%

Violoncel 4

LA 3			SOL 3			DO 3		
Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)	Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)	Freqüència (Hz)	Volum (dB)	Percentatges (%)
438	-36,9	100,00%	390	-21,6	100,00%	260	-22,6	100,00%
884	-34,9	105,73%	795	-31,7	68,14%	492	-38,4	58,85%
1326	-35,9	102,79%	1175	-34,1	63,34%	776	-23,7	95,36%
1765	-35,9	102,79%	1580	-30,3	71,29%	1026	-33,9	66,67%
2199	-40	92,25%	1968	-27,9	77,42%	1283	-33,6	67,26%
2643	-34,7	106,34%	2365	-22,6	95,58%	1541	-28,6	79,02%



Taula de dades nota per nota

LA 3

Harmònics	Teòrica	VIOLONCEL 1			VIOLONCEL 2			VIOLONCEL 3			VIOLONCEL 4		
		Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge
1	440	453	-22,9	100,00%	452	-20,3	100,00%	450	-24	100,00%	438	-36,9	100,00%
2	880	891	-33,3	68,77%	887	-32,3	62,85%	884	-41,3	58,11%	884	-34,9	105,73%
3	1320	1324	-57,0	40,18%	1325	-18,7	108,56%	1326	-32	75,00%	1326	-35,9	102,79%
4	1760	1770	-31,0	73,87%	1763	-21,3	95,31%	1765	-40,2	59,70%	1765	-35,9	102,79%
5	2200	2208	-46,8	48,93%	2199	-23	88,26%	2198	-49,1	48,88%	2199	-40	92,25%
6	2640	2658	-41,4	55,31%	2639	-25,9	78,38%	2637	-46,2	51,95%	2643	-34,7	106,34%

SOL 3

Harmònics	Teòrica	VIOLONCEL 1			VIOLONCEL 2			VIOLONCEL 3			VIOLONCEL 4		
		Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge
1	392	390	-12,4	100,00%	388	-24,8	100,00%	389	-21,7	100,00%	390	-21,6	100,00%
2	784	796	-24	51,67%	795	-19,6	126,53%	783	-42,3	51,30%	795	-31,7	68,14%
3	1176	1171	-40,2	30,85%	1169	-29,9	82,94%	1175	-30,3	71,62%	1175	-34,1	63,34%
4	1568	1578	-34,5	35,94%	1573	-28,1	88,26%	1577	-38,9	55,78%	1580	-30,3	71,29%
5	1960	1965	-34,4	36,05%	1954	-25,9	95,75%	1958	-38,8	55,93%	1968	-27,9	77,42%
6	2352	2361	-36,2	34,25%	2351	-41,5	59,76%	2361	-41,2	52,67%	2365	-22,6	95,58%

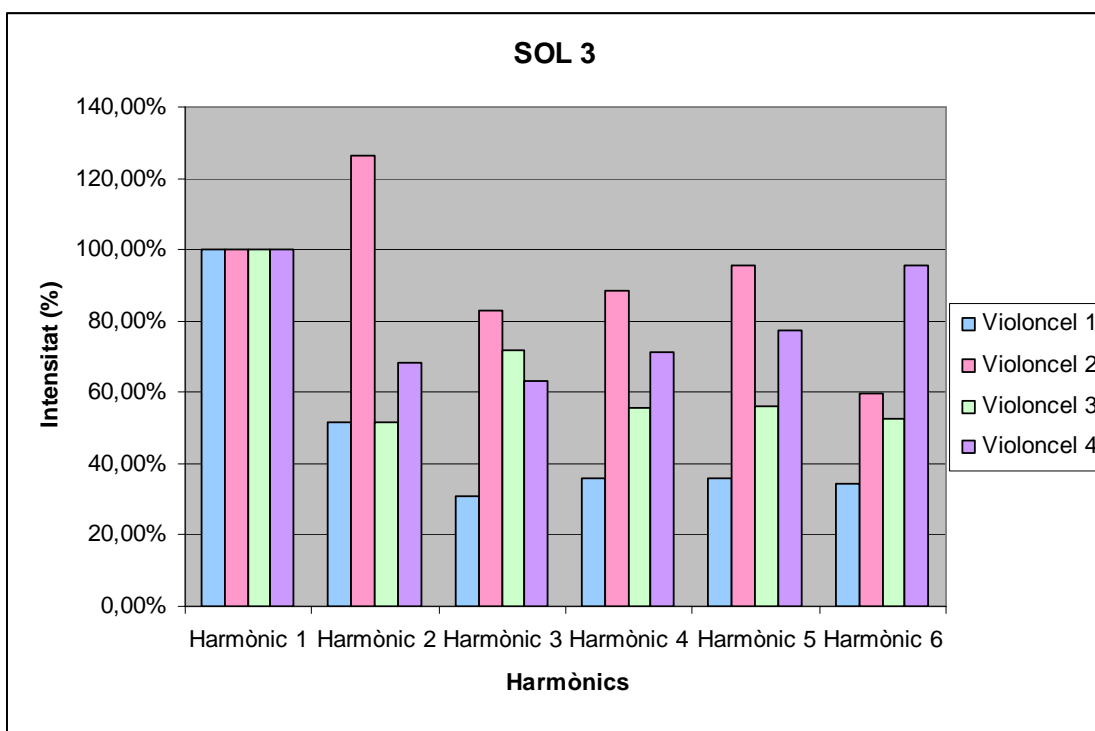
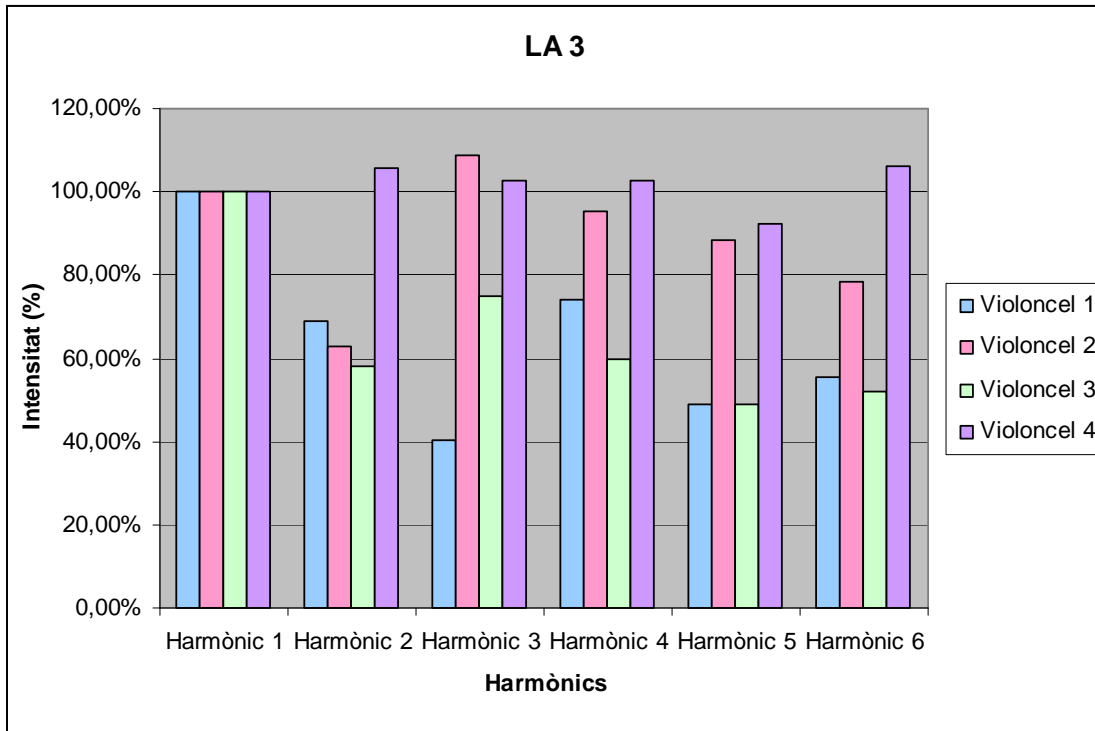
DO 3

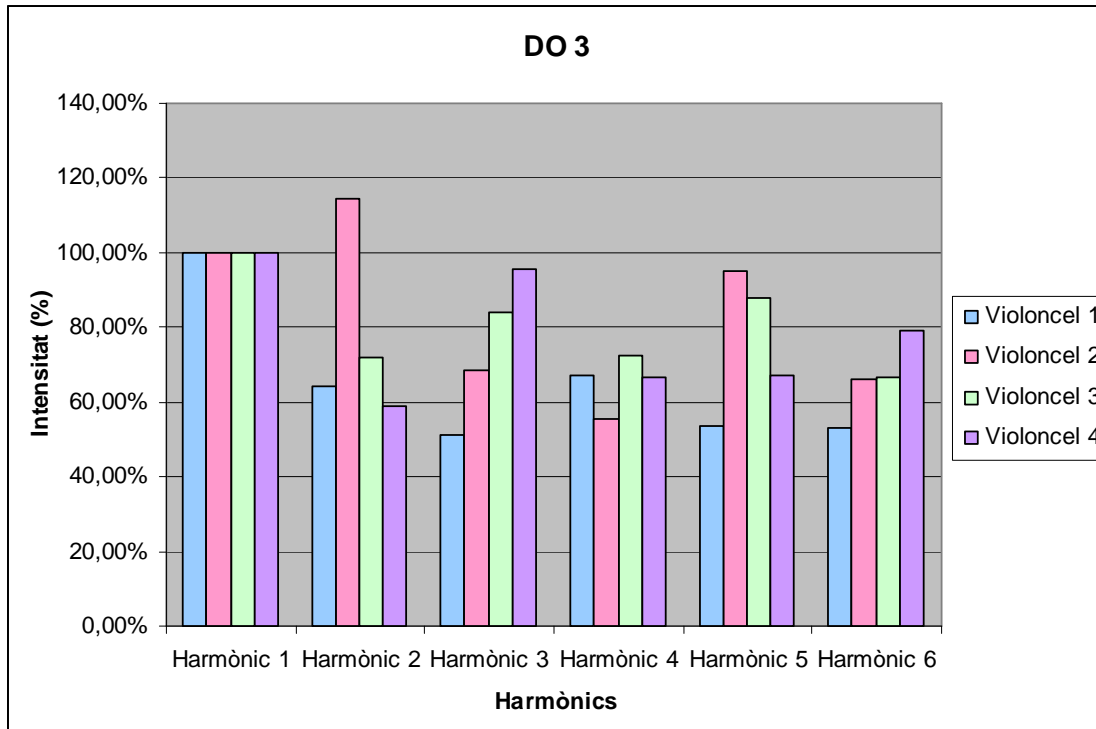
Harmònics	Teòrica	VIOLONCEL 1			VIOLONCEL 2			VIOLONCEL 3			VIOLONCEL 4		
		Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge
1	261	256	-28,3	100,00%	255	-22,7	100,00%	522	-30,5	100,00%	260	-22,6	100,00%
2	522	507	-44	64,32%	544	-19,8	114,65%	773	-42,3	72,10%	492	-38,4	58,85%
3	783	758	-55,5	50,99%	812	-33,1	68,58%	1311	-36,4	83,79%	776	-23,7	95,36%
4	1044	1036	-42,3	66,90%	1075	-40,8	55,64%	1563	-42,2	72,27%	1026	-33,9	66,67%
5	1305	1289	-52,9	53,50%	1340	-23,9	94,98%	1839	-34,8	87,64%	1283	-33,6	67,26%
6	1566	1553	-53,5	52,90%	1605	-34,2	66,37%	2095	-45,7	66,74%	1541	-28,6	79,02%



Conclusió de l'apartat

Les taules representen el recull de totes les dades organitzades per facilitar-ne la comprensió. Però a més a més, he elaborat tres gràfics per tal que els resultats siguin més visuals.





En la taula anomenada “violoncel per violoncel”, comparo els harmònics d’un mateix violoncel, però tal i com es pot veure en els gràfics si ens fixem en les columnes d’un mateix color, cada un té percentatges diferents en cada una de les tres notes, que moltes vegades ni s’assemblen. Així doncs, no aconseguixo trobar una línia comuna en la intensitat dels harmònics d’un mateix instrument.

La segona taula, anomenada “nota per nota”, conté les mateixes dades que la primera, però organitzades de manera que puguem fixar-nos en el comportament dels harmònics de tots els violoncels en cada nota en particular. Si a més a més, ens centrem en els gràfics, es comprova fàcilment que no puc afirmar que cada nota segueix una pauta en la intensitat dels seus harmònics. Totes les columnes són diferents. En resum, també trec una altra conclusió poc aclaridora d’aquest apartat.

També he observat quelcom que m’ha sobtat. En les tres notes, sempre hi ha un o més d’un harmònic d’algun violoncel que supera en intensitat a l’harmònic fonamental. Per exemple, en la nota **la 3** que és on més es pot apreciar aquest fenomen, el segon harmònic, el tercer, el quart i el sisè del violoncel 4 superen el 100% d’intensitat, que és la del seu harmònic fonamental, amb valors entre el 102% i el 106%. No entenc perquè això passa, ja que si de veritat aquests



harmònics tinguessin una intensitat major, quan es toqués la nota desitjada amb el violoncel (l'harmònic fonamental) no sonaria aquesta nota, sinó que sonaria per sobre seu un harmònic de freqüència major. Això, evidentment, quan es van tocar les diferents notes amb els diferents violoncels mai no va passar. Sempre sona la nota que coincideix amb l'harmònic fonamental. Cal fer notar però, que hi ha una petita coincidència de la qual tampoc se'n pot treure cap conclusió. Els únics instruments que tenen aquest comportament són el violoncel 2 i el 4, el primer d'una qualitat baixa-mitjana i el segon d'una qualitat altíssima. El de més qualitat només ho manifesta amb la nota **la 3**, però en quatre dels seus harmònics. En canvi, el violoncel 2 ho manifesta en les tres notes, però només en un harmònic cada vegada, el segon o el tercer.

A més a més, la freqüència de les notes tocades mai no es correspon amb la freqüència teòrica, que és la que hauria de tenir exactament. Tot i que els violoncels estaven tots afinats dins la mateixa freqüència, sempre hi ha variacions. Això demostra la dificultat d'aconseguir una afinació absoluta amb els instruments.

3.1.5 La forma d'ona

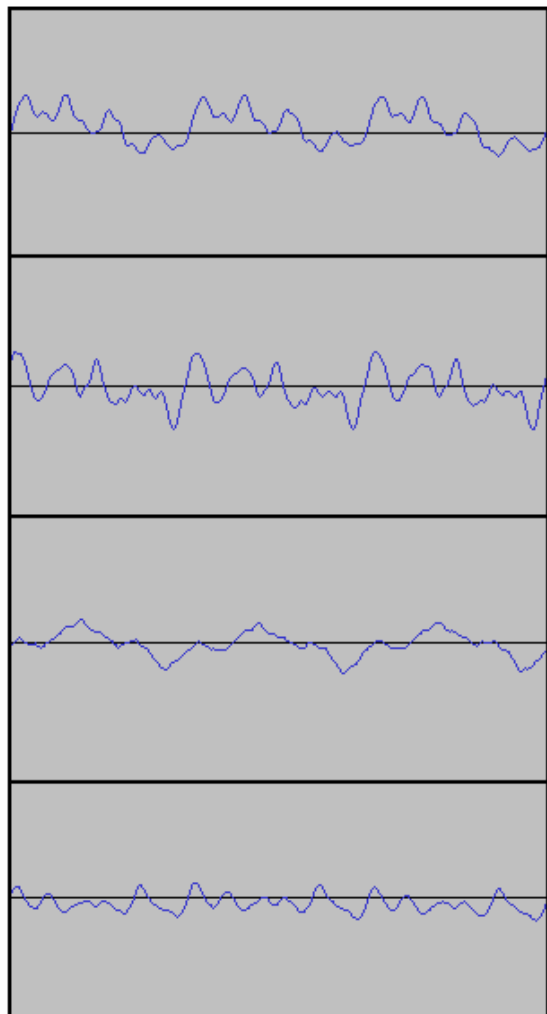
Tot i que jo creia que en trauria resultats lògics, l'anàlisi de les bandes d'harmònics no m'ha portat a cap conclusió. Per això analitzaré la relació entre qualitat i so dels violoncels des d'un altre punt de vista. En aquest apartat, em proposo comparar la forma de l'ona de les notes enregistrades per mirar d'establir-hi alguna connexió amb la qualitat de cada violoncel.

He seguit utilitzant el programa *Audacity* i he fet servir l'opció d'ampliar les pistes gravades. D'aquesta manera he obtingut el perfil d'una ona que es va repetint per cada nota tocada i en cada violoncel.

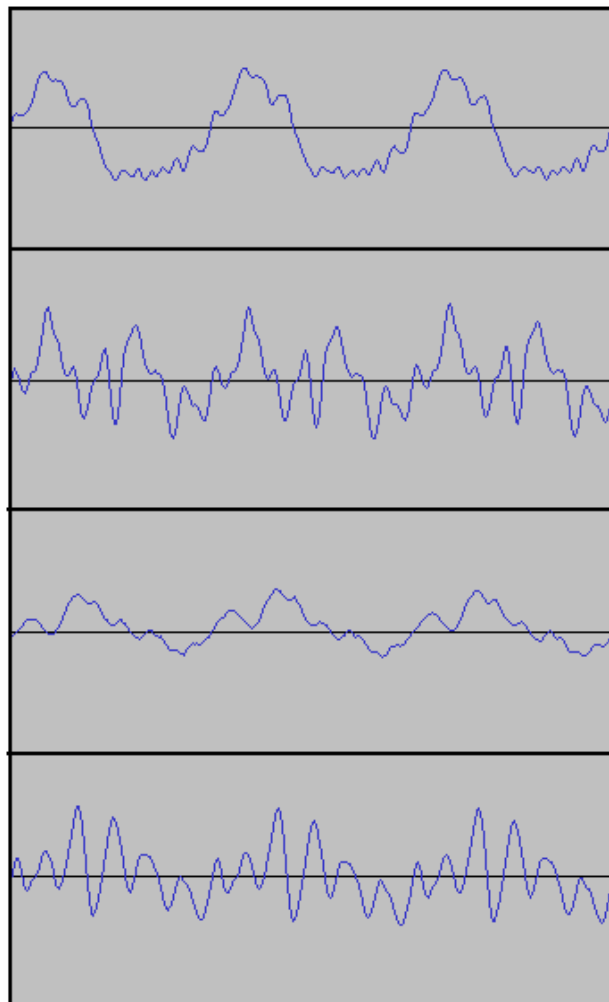
En la pàgina següent s'hi poden veure les ones que es repeteixen tres vegades, de cada una de les notes enregistrades. Les de la primera fila es corresponen a les del violoncel 1 (el de més baixa qualitat) i estan ordenades de manera que la qualitat dels violoncels augmenta.



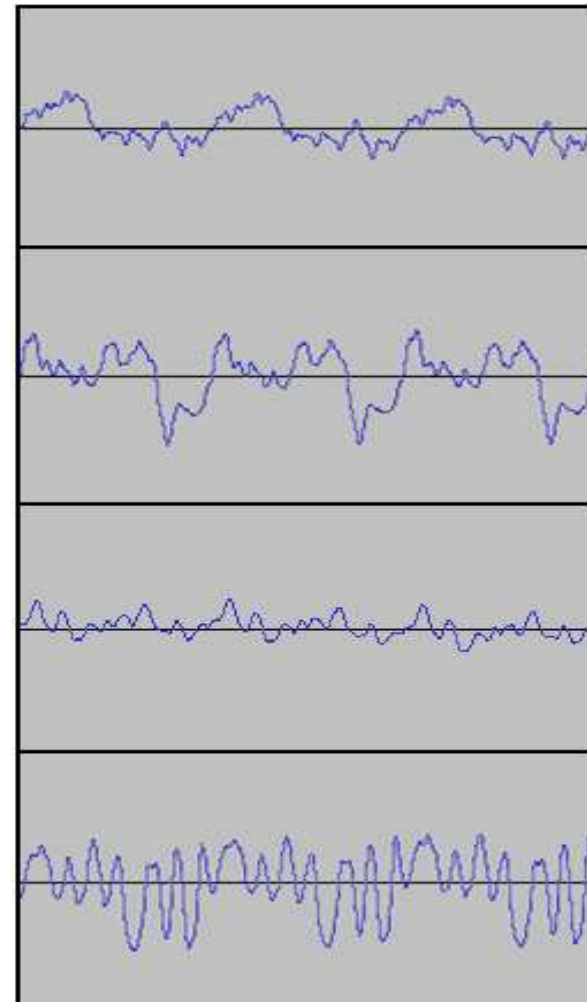
LA 3:



SOL 3:



DO 3:





3.1.6 Conclusió

Tal i com fàcilment es pot observar, les ones que emeten els violoncels són poc clares i complicades d'interpretar. No podem accedir a cap relació visual comprensible entre la forma d'ona i la qualitat de l'instrument.

Hem arribat al final de l'apartat en el qual volia demostrar físicament si era possible determinar les diferències sonores entre els violoncels de qualitats variades. Tanmateix, valorant dades contrastades de maneres diverses no he aconseguit cap resposta concreta. Així doncs, basant-me en la meva hipòtesi que crec encertada, penso que hi ha factors que han condicionat que el meu experiment no m'hagi proporcionat els resultats esperats.

Tal i com he explicat en la part teòrica, el violoncel és un instrument molt complex, ja que el seu so depèn de moltes variables. La intensitat amb la que es frega l'arquet a la corda, la zona de la corda per on es passa l'arquet, el tipus de resina utilitzada per les cerres, la posició del violoncel, el tipus de cordes, la persona que toca l'instrument...

Però a més a més, cal tenir en compte les condicions de gravació. La qualitat del micròfon potser no és prou alta per realitzar un estudi d'aquestes dimensions. Un altre factor pot ser la distància i la posició del micròfon. Tot i que en tots els enregistraments es va tenir en compte que fos la mateixa, potser no era l'adequada.

I finalment, també hi ha la possibilitat que sigui un problema del programa informàtic, que potser no té una capacitat d'anàlisi prou acurada i per tant em pot haver proporcionat uns resultats no gaire fiables.

3.2 Anàlisi física amb flautes

Com que amb el violoncel no he estat capaç de demostrar la meva hipòtesi ho intentaré amb un instrument més senzill, la flauta dolça. Aquest instrument, també anomenat flauta de bec, pot ser de plàstic o de fusta. El seu so es caracteritza per ser suau i clar, principalment a causa de la manca d'harmònics superiors i el predomini d'harmònics imparells, ja que es tracta d'un tub obert per un costat.



El procediment que faré servir serà el mateix que he fet amb els violoncel·ls, però en aquest cas ho simplifico analitzant només dues flautes diferents, ja que l'estudi amb flautes no era el meu objectiu inicial i en aquest apartat només em proposo demostrar que la meua hipòtesi no és errònia. Una és de plàstic que serà la de menys qualitat (flauta 1) i l'altra és de fusta, de més qualitat (flauta 2). N'analitzaré la banda d'harmònics i n'observaré la forma d'ona, per tal d'intentar treure conclusions que puguin verificar la meua hipòtesi.

3.2.1 Les bandes d'harmònics

LA 4

Harmònics	Teòrica	FLAUTA 1			FLAUTA 2		
		Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge
1	858	891	-13,7	100,00%	883	-14,1	100,00%
2	1716	1767	-28,0	48,93%	1750	-26,3	53,61%
3	2574	2662	-37,1	36,93%	2619	-40,2	35,07%
4	3432	3547	-52,3	26,20%	3487	-45	31,33%
5	4290	4433	-37,8	36,24%	4356	-54,1	26,06%
6	5148	5310	-49,5	27,68%	5238	-52	27,12%

SOL 4

Harmònics	Teòrica	FLAUTA 1			FLAUTA 2		
		Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge
1	792	797	-19,5	100,00%	793	-24,6	100,00%
2	1584	1578	-31,8	61,32%	1562	-37,1	66,31%
3	2376	2364	-33,5	58,21%	2345	-32,5	75,69%
4	3168	3143	-59,7	32,66%	3120	-40,8	60,29%
5	3960	3928	-45,2	43,14%	3892	-55,4	44,40%
6	4752	4719	-41,2	47,33%	4669	-43,9	56,04%

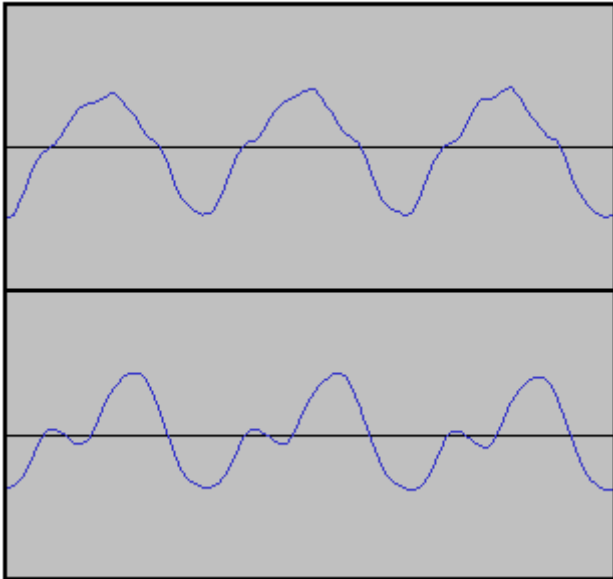
DO 5

Harmònics	Teòrica	FLAUTA 1			FLAUTA 2		
		Freqüència	Volum	Percentatge	Freqüència	Volum	Percentatge
1	528	536	-25,6	100,00%	535	-24,8	100,00%
2	1056	1061	-45,2	56,64%	1057	-36,6	67,76%
3	1584	1587	-30,4	84,21%	1579	-42,8	57,94%
4	2112	2110	-51,6	49,61%	2102	-46,5	53,33%
5	2640	2636	-54	47,41%	2625	-60	41,33%
6	3168	3158	-57,2	44,76%	3143	-62,2	39,87%

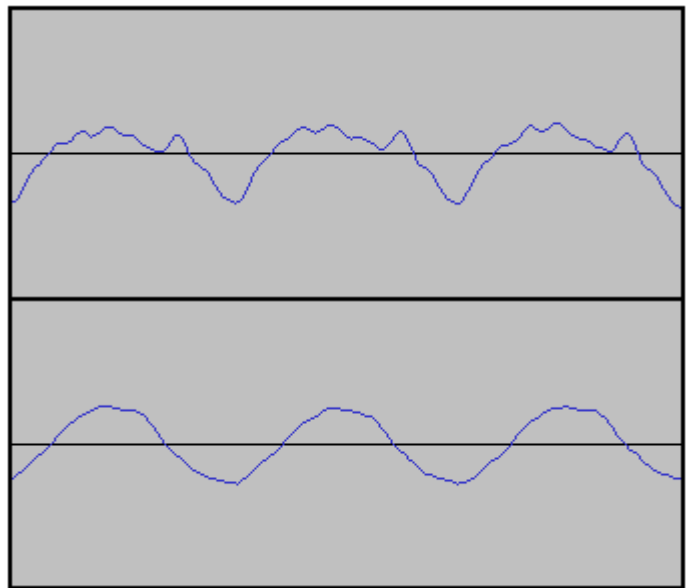


3.2.2 La forma d'ona

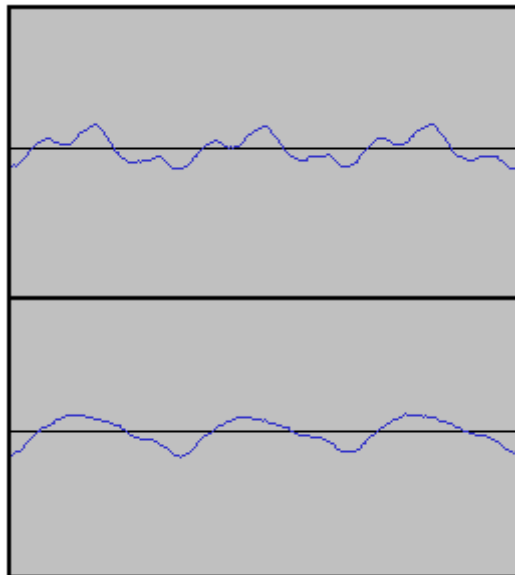
LA 4:



SOL 4:



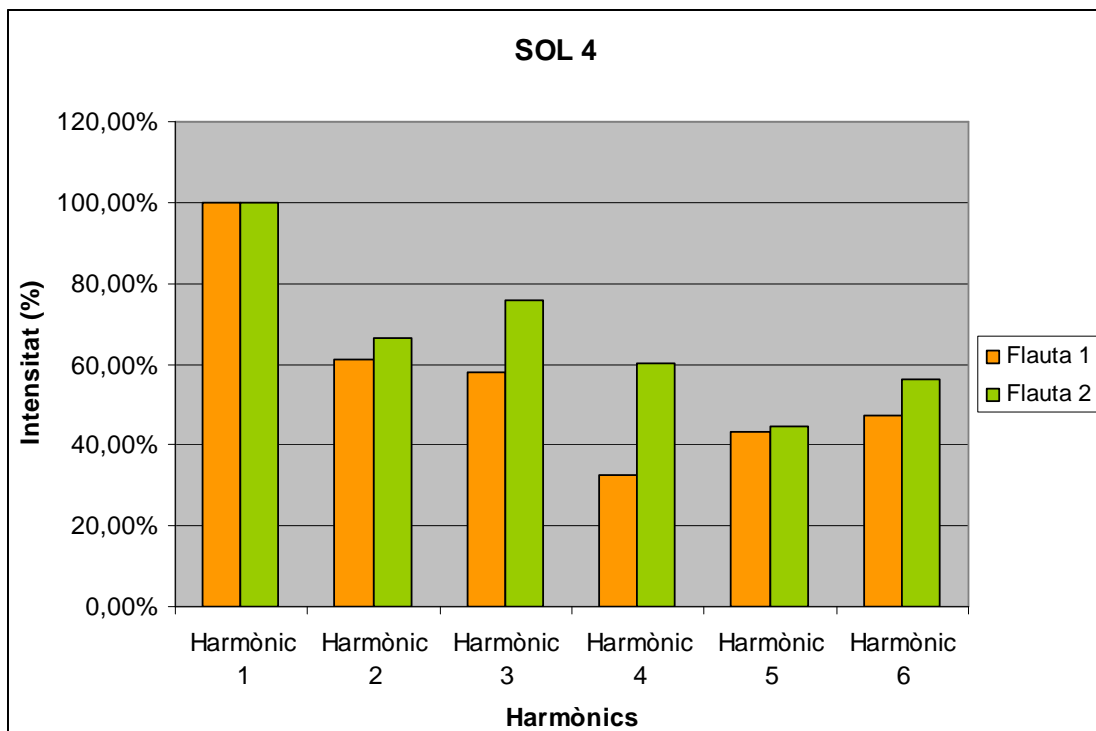
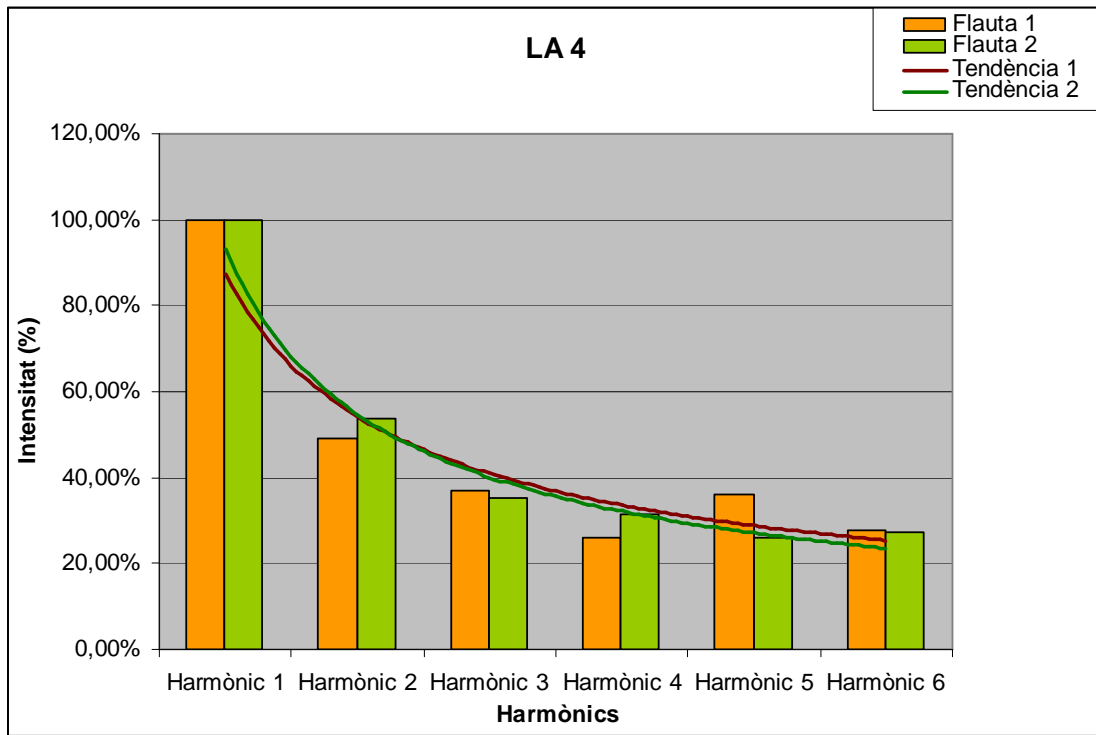
DO 5:

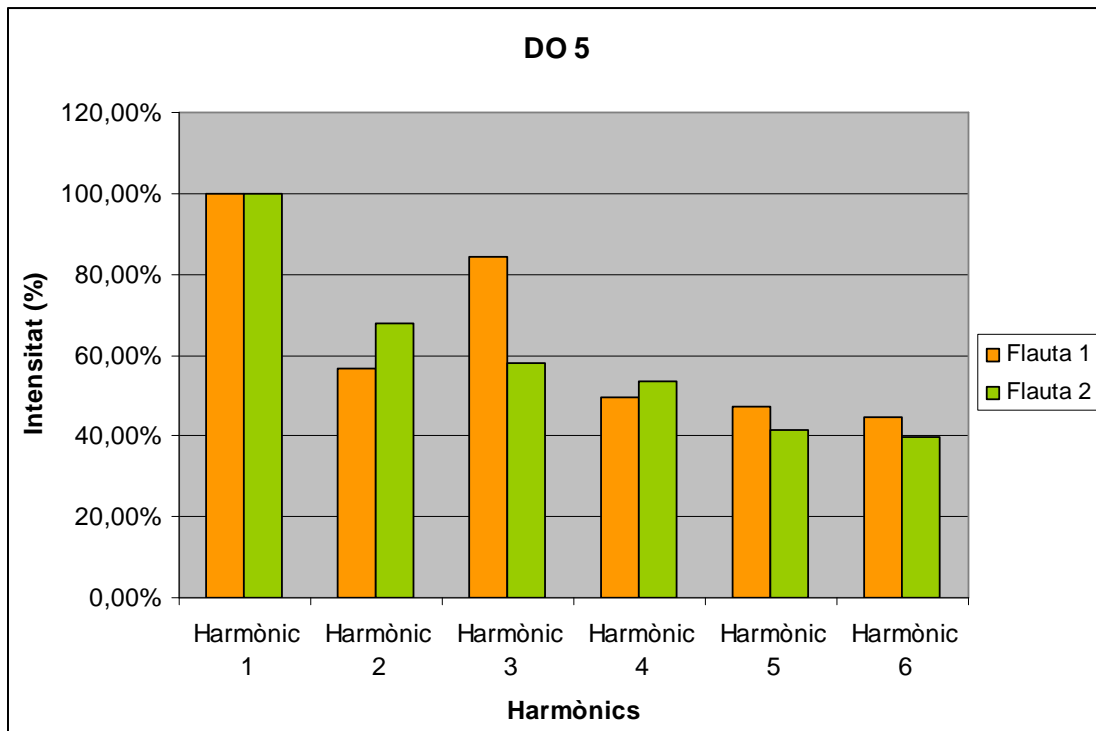




3.2.3 Conclusió

Igual que a la secció dels violoncel·ls, he elaborat tres gràfics per visualitzar millor els resultats.





En el primer apartat de l'anàlisi amb flautes, el de les bandes d'harmònics, podem treure diverses conclusions. Cap dels harmònics supera mai en volum l'harmònic fonamental i els harmònics següents normalment són bastant més petits, al voltant del 50% o menys, amb alguna excepció. Aquesta nova característica es pot distingir molt bé amb el primer gràfic, el de la nota **la 4**, on a més a més he marcat les línies de tendència de les dues flautes perquè es vegi el decreixement potencial. Tot i que les dues línies de tendència marquen molt bé aquest comportament, la línia verda que és la de la flauta 2 (de més qualitat) descendeix més a mesura que els harmònics són més aguts, per tant té un repartiment dels seus harmònics més lògic i equitatiu.

Pel que fa a altres diferències que puguin indicar que la flauta 2 és de més qualitat que la flauta 1, són més complicades d'analitzar. Per una banda, obtenim que en la nota **sol 4**, els harmònics de la flauta 2 sempre tenen una mica més d'intensitat que els de la flauta 1, indicador de més riquesa en harmònics. A més, en la nota **do 5**, el decreixement d'harmònics és molt progressiu en la flauta de més qualitat, això no passa mai en la de plàstic, que segueix una línia més irregular. Però per altra banda, això no ens dóna cap resultat conclusiu ja que en les notes **la 4** i **do 5** la intensitat major en cada un dels harmònics algunes vegades és de la flauta 1 i d'altres de la 2.



Pel que fa a les formes d'ones, són clares, definides i les ones d'una mateixa nota tenen sempre un dibuix similar amb algunes diferències. Podem observar que les de la primera flauta sempre tenen més irregularitats que no pas les de la segona, que segueixen un perfil més senzill. Aquest fet sembla una mica contradictori amb la meua hipòtesi. Els instruments de més qualitat són més rics amb harmònics i els sons que contenen més harmònics, tenen una forma d'ona més complexa a causa del seu espectre harmònic. En aquest cas però, passa el contrari.

Igual que en el cas dels violoncels, la freqüència enregistrada mai coincideix exactament amb la teòrica. L'explicació d'aquest fet és la mateixa, l'afinació perfecta és quasi impossible en els instruments tocats per persones, tanmateix aquests petits canvis de freqüència no són perceptibles per l'oïda humana, que sentirà la mateixa nota.

3.3 Conclusió general

L'anàlisi amb flautes ens proporciona resultats més lògics que amb els violoncels. Veiem que el so característic de la flauta queda reflectit amb el comportament dels seus harmònics i les formes de les seves ones sonores.

Amb els violoncels no hem obtingut resultats vàlids per treure conclusions de cap tipus. No hem aconseguit emmarcar el so del violoncel dins d'un comportament dels seus harmònics, ni tampoc de la seva forma d'ona. Encara ens ha estat menys possible establir relacions entre la qualitat dels instruments i les característiques que n'he estudiat.

Tot i així entre el primer experiment amb els violoncels i el segon experiment amb les flautes s'aprecien diferències importants. Els tres gràfics on es comparen les bandes d'harmònics de cada nota amb cada instrument segueixen una forma més clara en el cas de les flautes, on s'hi mig dibuixa una línia de tendència descendent progressiva de la intensitat a mesura que els harmònics són més aguts. L'explicació d'aquest fenomen amb les flautes, que amb els violoncels no es compleix de cap manera, és que, com he explicat anteriorment, la flauta és un instrument més senzill, amb menys harmònics (sobretot superiors) i amb manca d'harmònics imparells. En canvi, el violoncel es caracteritza per emetre una quantitat d'harmònics molt més gran, ja que es tracta d'una corda que vibra i a on



a més, hi intervenen molts altres factors. Són aquestes característiques les que fan que les formes d'ona de la flauta per les diferents notes tinguin també un dibuix més sinusoïdal, no pas com en els violoncels, on apareixen molts de pics.

Com a conclusió final, haig d'admetre que no he pogut demostrar la meua hipòtesi, tot i que encara continuo creient que pot ser correcta, ja que es basa en coneixements físics lògics. Crec que m'han faltat mitjans tècnics per corroborar-la. Tanmateix, fent un estudi més simplificat amb flautes he pogut mig entreveure que el plantejament podria ser bo i que amb més recursos potser podria arribar a uns resultats més semblants als que jo esperava.



4 Conclusions

Durant aquest treball crec que he dut a terme una verdadera recerca científica. M'he documentat, he formulat una hipòtesi i mitjançant un estudi pràctic he intentat demostrar que era certa.

A més, m'he adonat que en el procés científic hi poden haver obstacles, però s'han d'intentar trobar altres camins per demostrar el que hom es proposa i llavors, potser sí o potser no, es pot arribar allà on s'esperava. Durant el treball, he notat que mai resulta tan fàcil com quan es planteja al començament. M'han sortit nombrosos entrebancs deguts a variables que jo no havia considerat prèviament i la influència de les quals no he pogut aïllar en fer els meus experiments. Per tant, he hagut d'anar adaptant-me i modificant la pauta a seguir.

També he aconseguit trobar una relació molt estreta entre la música, que sembla quelcom molt abstracte, amb la ciència pura de la física. He intentat demostrar que la qualitat dels violoncel·ls sí que depèn de factors que es poden estudiar, tot i que es necessiten més mitjans tècnics i recursos dels que jo tenia.

Per acabar, vull subratllar que ha estat un treball distret, estimulante i amb elements inesperats, ja que a part dels resultats del meu estudi, m'ha proporcionat proves del que significa la recerca científica en el seu sentit més ampli: investigar, analitzar, equivocar-se, buscar altres sortides i potser, no haver fet grans descobriments, però continuar tenint la certesa de que el que en un principi es pensava és veritat i s'ha de poder demostrar.



5 Llistat de referències

Webs

DANIEL SANZ NAVAS. *Los instrumentos musicales* [en línia]. Accessible a :
<http://www.corazonistas.edurioja.org/haro/recursos/instrumentos/CUERDA/FROTA/VIOLONCELLO/VIOLONCELLO.htm> Consulta: 5-12-2011

XTEC.CAT. *La caixa de música* [en línia]. Accessible a:
<http://xtec.cat/iesbellvitge/caixa/qui.htm> Consulta: 15-8-2011.

ALBERT VILA. *Harmònics i timbre* [en línia]. Accessible a
<http://www.albertvila.cat/mus/08.htm> Consulta: 17-8-2011.

XTEC.CAT. *El so* [en línia]. Accessible a:
http://www.xtec.es/~sgirones/elso/el_so.htm Consulta: 20-8-2011

UNIVERSITY OF NEW SOUTH WALES. *Music Acoustics (strings, standing waves and harmonics)* [en línia]. Accessible a:
<http://www.phys.unsw.edu.au/jw/strings.html> Consulta: 16-12-2011

EL ATRIL. *El violonchelo* [en línia]. Accessible a:
<http://www.elatril.com/orquesta/Instrumentos/Cello.htm> Consulta: 7-9-11

WIKIPEDIA. *El violonchelo* [en línia]. Accessible a:
<http://es.wikipedia.org/wiki/Violonchelo> Consulta: 7-9-2011

LA CHAMELA. *Josep Bassal* [en línia]. Accessible a:
<http://lachamela.com/josep.htm> Consulta: 10-9-2011

Llibres

MERCADÉ, Joan; SERRA, Salvador; ARMENGOL, Montserrat. *Física 2. Batxillerat*. Aravaca (Madrid): McGraw-Hill, 2003.

CASELLAS, Tavi; ENRECH, Montserrat; FELIU, et al. *Física en context. Batxillerat 2n curs*. Barcelona: Cesire cdec, 2011

FLETCHER, Neville H; ROSSING, Thomas D. *The Physics of Musical Instruments*. New York: Springer-Verlag, 1991.



6 Annexos

6.1 Glossari

1. Banda d'harmònics: Espectre de freqüències on es mostren les diferents freqüències i amplituds relatives dels components harmònics d'una ona sonora. Aquesta anàlisi s'anomena anàlisi harmònica o anàlisi de Fourier (matemàtic que va desenvolupar les matemàtiques per a l'anàlisi de funcions periòdiques).

2. Quintes justes: En el camp musical, és un interval (diferència d'altura entre dues notes musicals) de tres tons i mig de diferència.

3. Octava: diferència de freqüències entre dues notes que estan separades una distància de relació 2:1. El **la 4** (880 Hz) és una octava superior que el **la 3** (440 Hz).

4. SI: Abreviació de Sistema Internacional de les Unitats, el sistema d'unitats més utilitzat a tot el món tant en ciència com en el dia a dia. És l'evolució del sistema mètric decimal.

5. Bel (símbol: B): Logaritme de la relació entre dues potències, la magnitud d'interès i la de referència, que mesura la intensitat del so i no té unitats. En la pràctica ja no s'utilitza perquè és massa gran i ha estat reemplaçat pel decibel. Va rebre aquest nom en honor al científic inventor del telèfon, Alexander Graham Bell.

6. Ukelele: Instrument de corda, semblant a una guitarra petita, amb quatre cordes pinçades i tradicional de l'illa de Hawaii. Va ser creat a finals del segle XIX gràcies a portuguesos que van immigrar cap aquella zona. És una adaptació del *cavaquinho* portuguès.

7. OMS (Organització Mundial de la Salut): agència de l'Organització de les Nacions Unides amb seu a Ginebra que actua com a autoritat coordinadora en temes de salut pública internacional. Especialment gestiona polítiques de prevenció, promoció i intervenció en salut a nivell mundial.



8. Diapasó: Instrument utilitzat per fixar l'altura del so. N'hi ha de diversos tipus: de forquilla, de boca, electrònic... El de forquilla, que és el més tradicional, va ser inventat l'any 1782. És una peça metàl·lica en forma de U. Per utilitzar-lo se li dóna un cop suau o es pincen els dos braços de la U perquè es posi a vibrar. Quasi no genera so, per tant és necessari algun element amplificador, n'hi ha prou en recolzar la part que no vibra del diapasó sobre una superfície rígida. El més utilitzat és el que emet una freqüència d'un **la 4**, és a dir, una freqüència de 440 Hz. L'ona sinusoidal que emet aquest instrument és sempre afinada, per això s'utilitza per afinar els altres instruments. A més, no emet harmònics i per tant només queda la freqüència fonamental.

9. Resina: Substància provinent de la secreció de les plantes que ha sofert un procés d'assecat donant lloc a un producte sòlid a partir d'un líquid. És dura, trencadissa i exteriorment s'assembla a la goma, però és insoluble i no es reblaneix amb aigua. Té un color semitransparent que pot anar des del negre fins al groc clar, depenent del tipus. S'utilitzen les seves propietats d'adherència per fregar-la sobre les cerres de l'arc dels instruments de corda (fetes a partir de crineres de cavalls) per tal d'aconseguir el so desitjat posteriorment, quan les cordes de l'instrument i les cerres de l'arc entren en contacte.

10. Audacity: Programa informàtic gratuït de gravació i edició d'àudio. Permet gravar, reproduir, importar i exportar dades en diversos formats. Inclou un editor i permet l'anàlisi del so a partir de diferents aspectes.

6.2 Enregistraments i bandes d'harmònics

En aquest apartat mostraré com he obtingut les dades que he utilitzat en la meua part pràctica i explicaré un dels casos en concret, el de la nota **la 3** del violoncel 1. Seguidament, de cada un dels quatre violoncels exposaré les bandes d'harmònics i les gravacions de cada una de les tres notes.



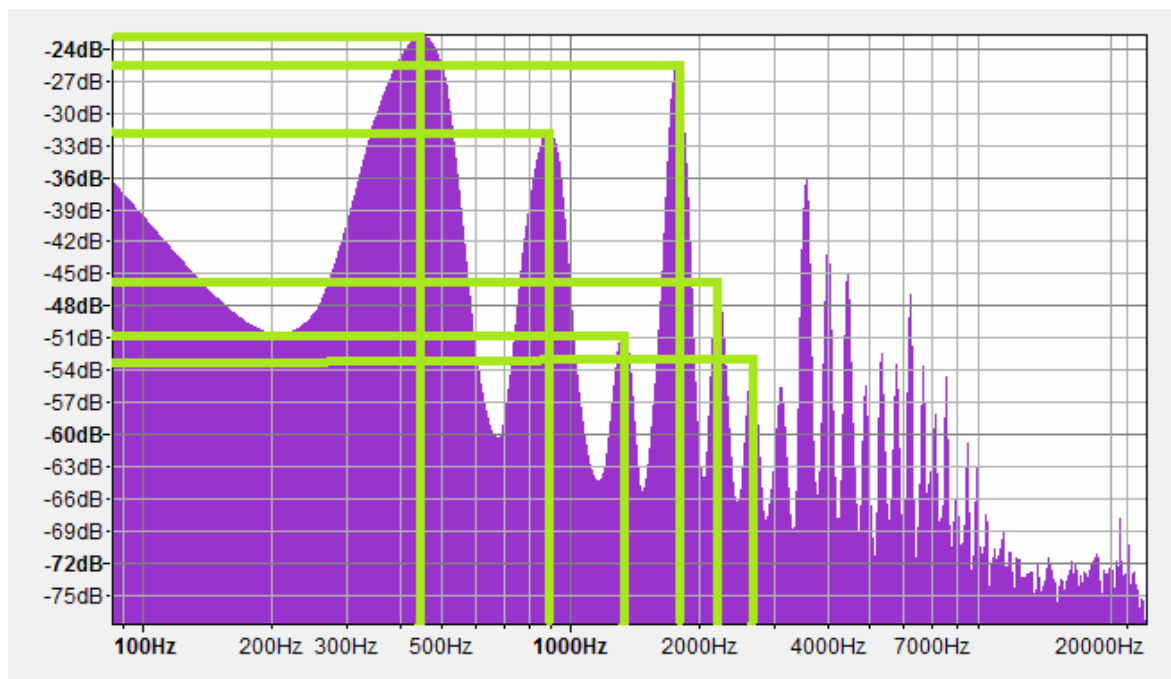
6.2.1 Violoncel 1

La 3

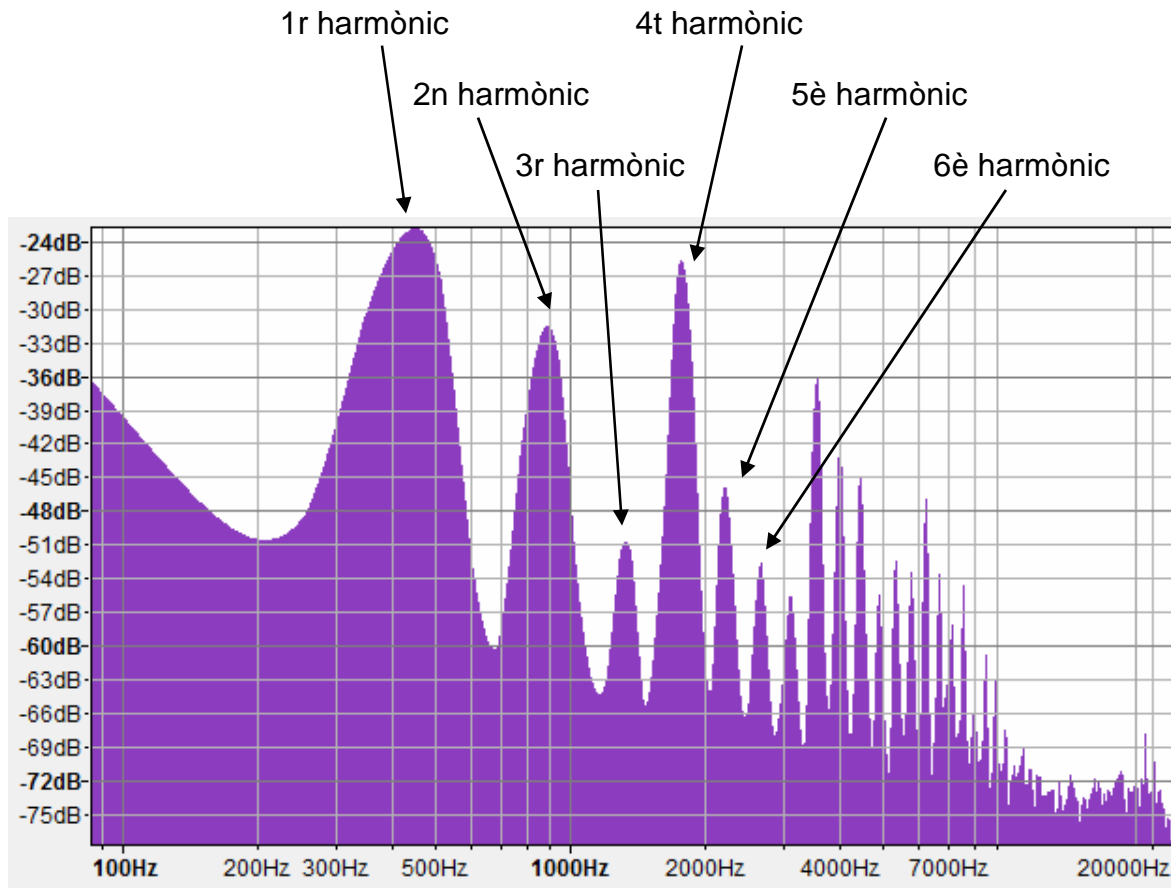
A continuació, hi ha un espectre de freqüències o altrament dit un gràfic amb les bandes d'harmònics expressat de forma logarítmica que ja he mostrat i he explicat superficialment en la part experimental del treball.

Cada un dels pics es correspon a un harmònic (freqüències de l'eix d'abscisses) i l'altura de cadascun és la intensitat que assoleix (decibels de l'eix d'ordenades). Els pics estan ordenats de manera que el primer es correspon a l'harmònic fonamental, el segon al segon harmònic, el tercer al tercer harmònic i així consecutivament.

El programa *Audacity* detecta aquests pics i en facilita la freqüència i la intensitat exacte de cadascun, de manera que les dades que he obtingut són completament concretes tot i que en el gràfic no es poden expressar en el màxim detall.

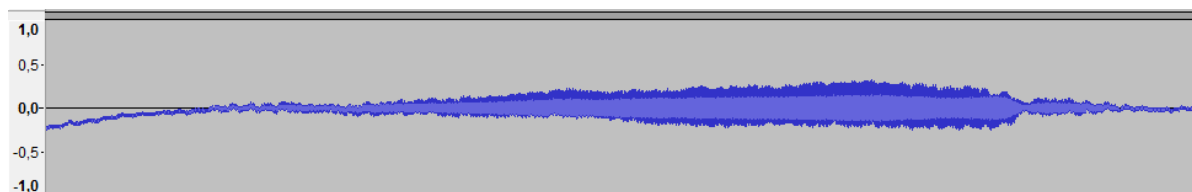


A cada pic li correspon una freqüència i una intensitat determinades que configuren l'harmònic del que es tracta i el volum que té.

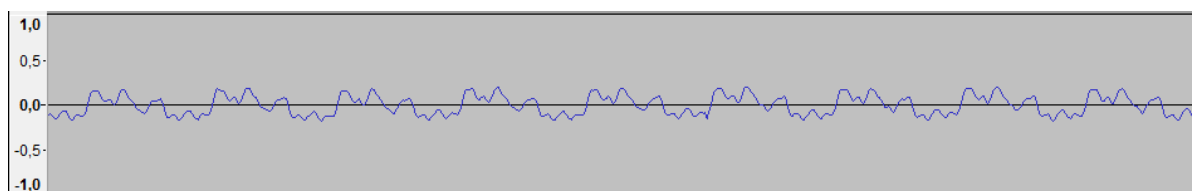


Cada un dels pics és un harmònic i estan ordenats d'esquerra a dreta des de l'harmònic fonamental fins als seus múltiples més grans.

Tot seguit hi ha una captura de la gravació d'aquesta nota. Aquesta forma és la que apareix quan es fa l'enregistrament i a la dreta s'hi poden observar les unitats d'amplitud, que es corresponen amb la intensitat que té el so

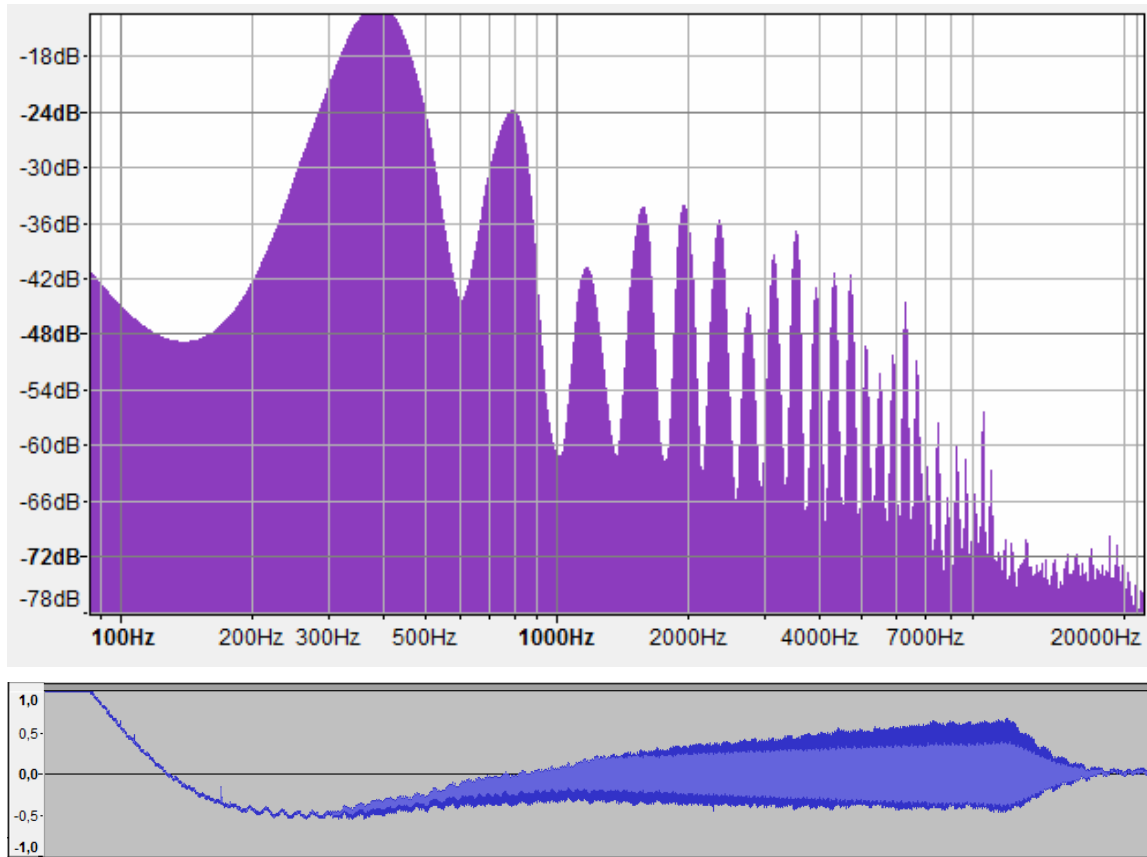


Quan apliquem l'opció del programa d'ampliar el dibuix de l'enregistrament, ens apareix la forma d'ona, que també he utilitzat en la part experimental:

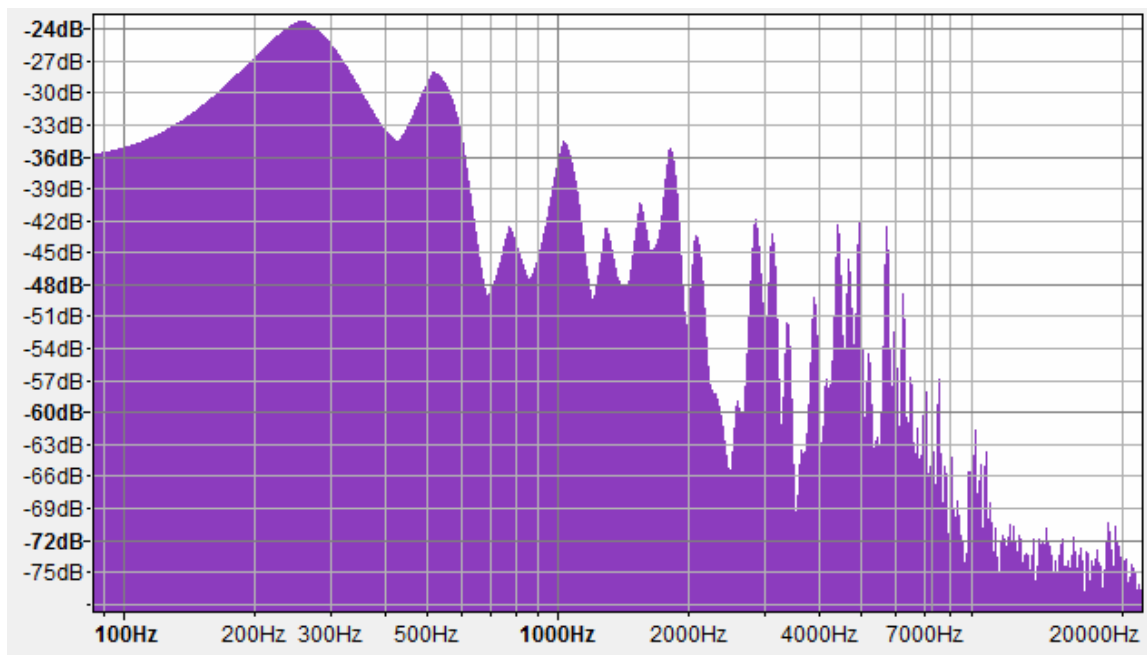


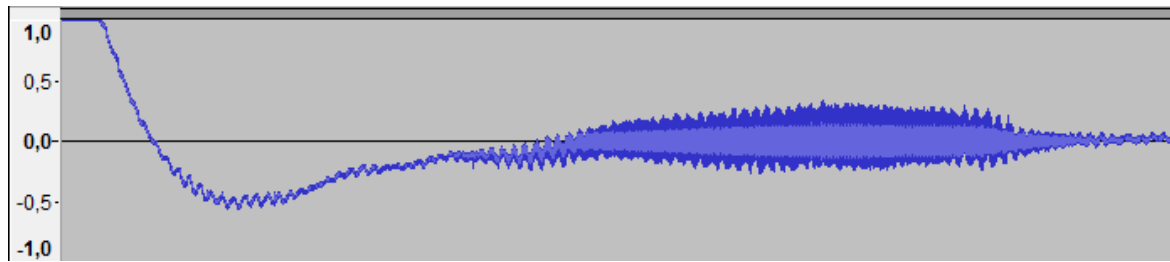


Sol 3



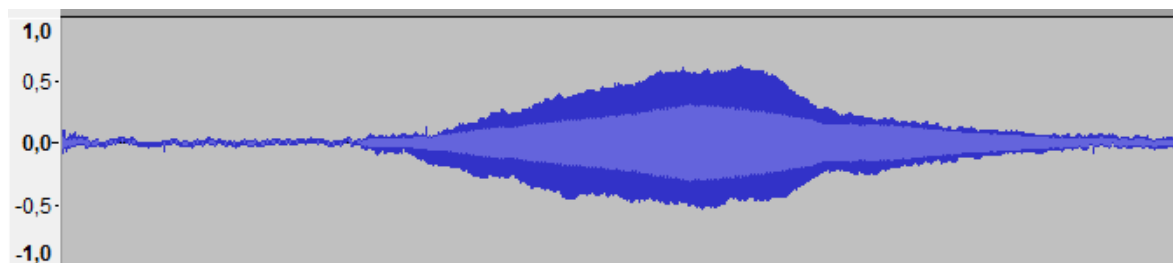
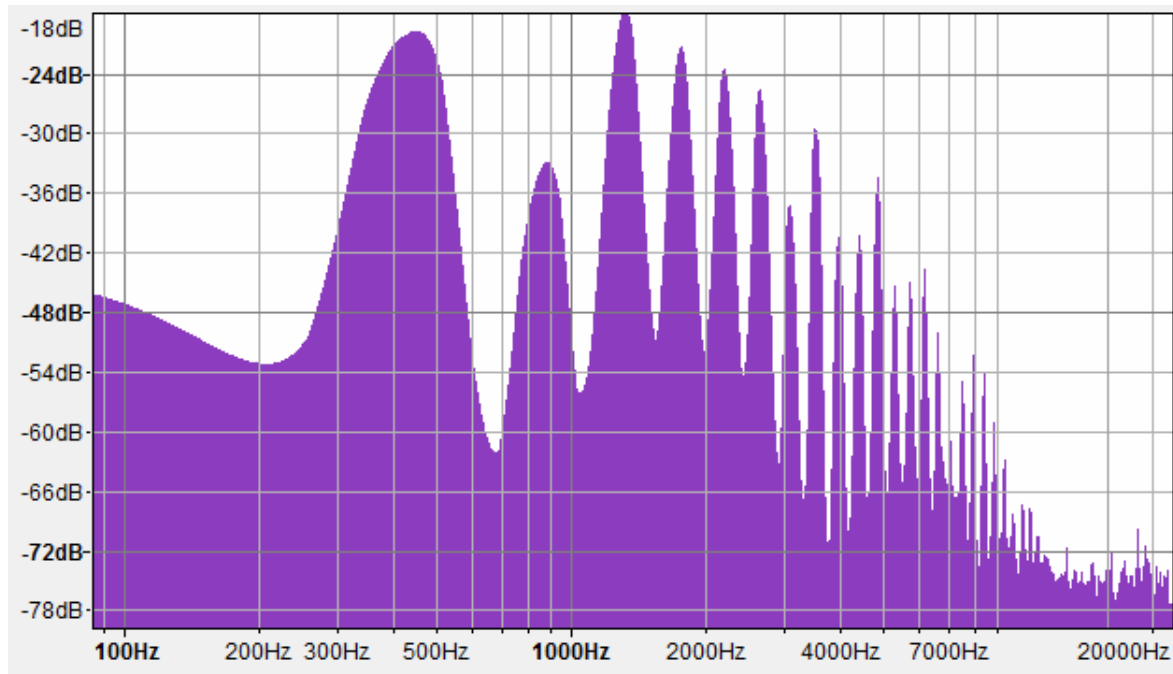
Do 3





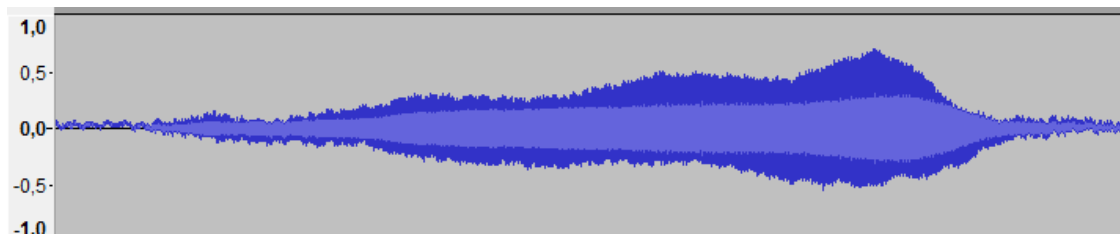
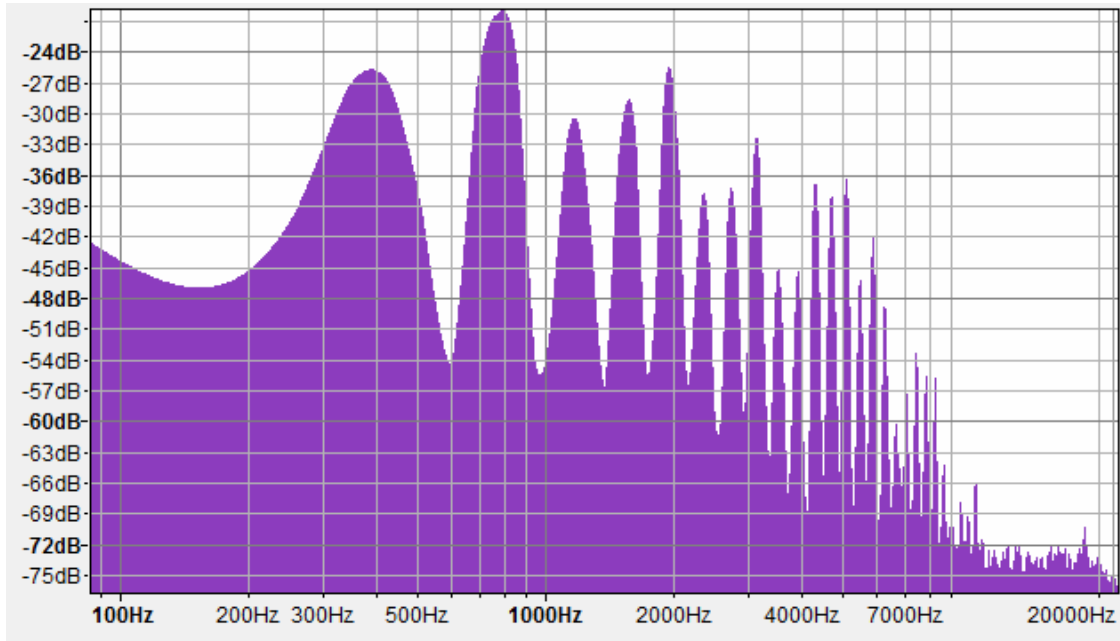
6.2.2 Violoncel 2

La 3

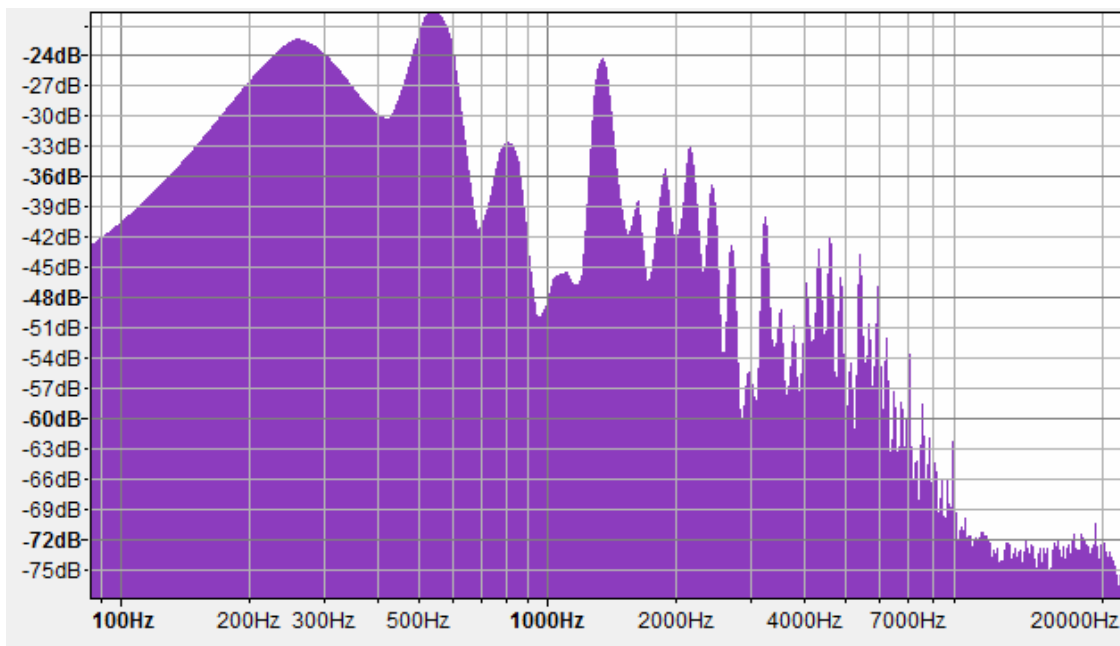


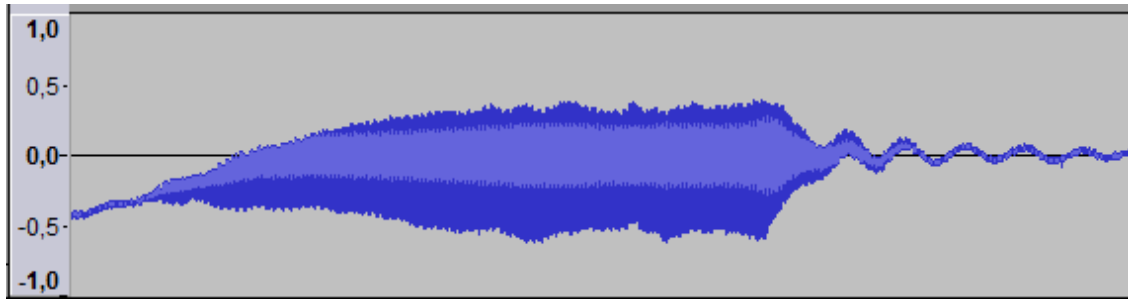


Sol 3



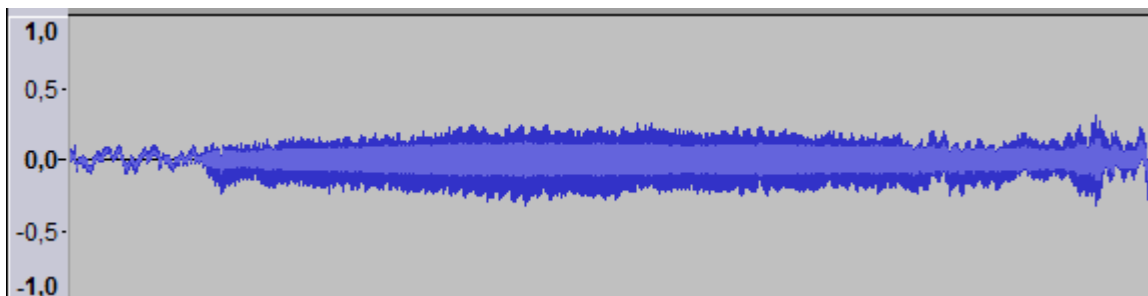
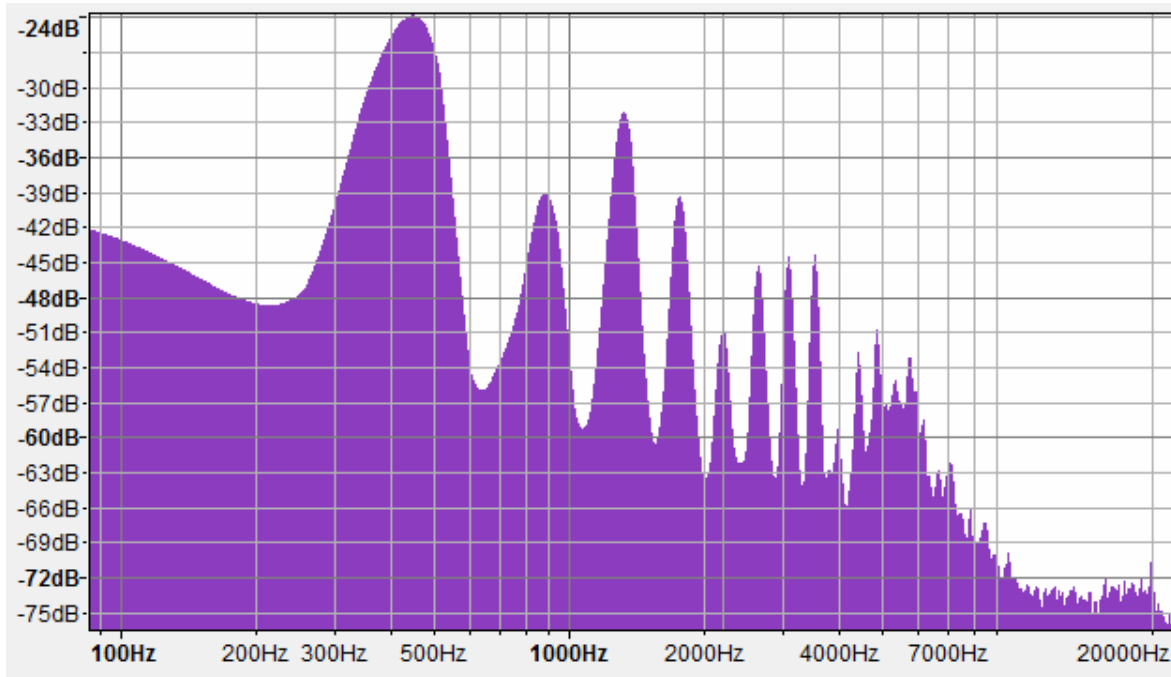
Do 3





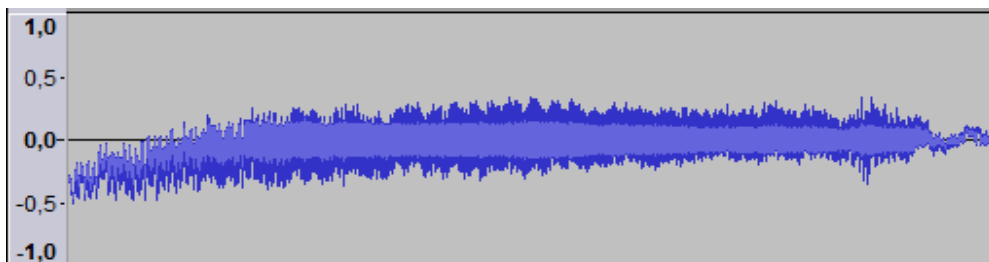
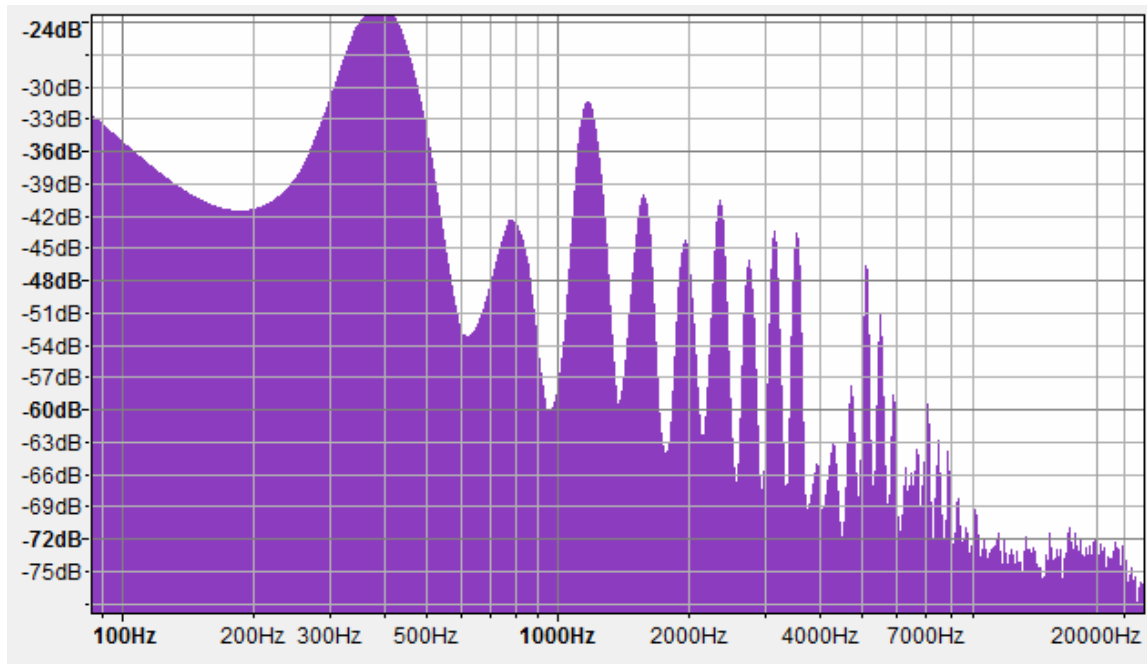
6.2.3 Violoncel 3

La 3

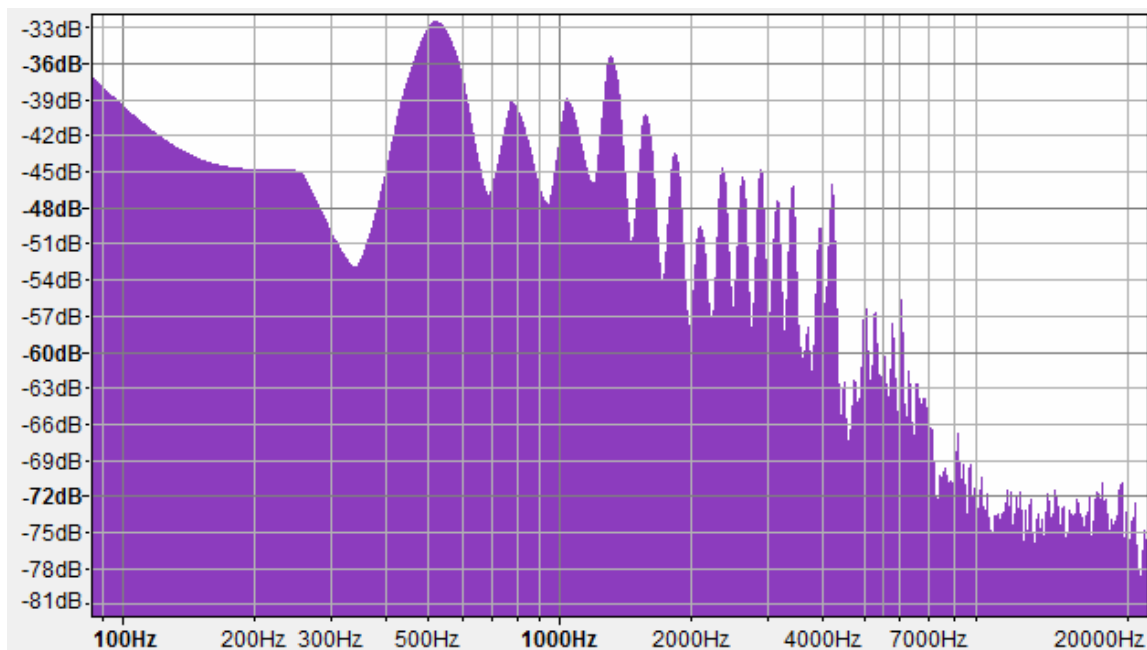


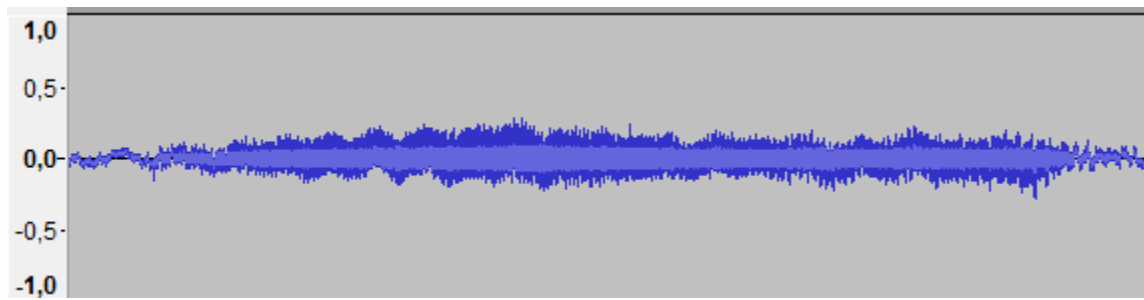


Sol 3



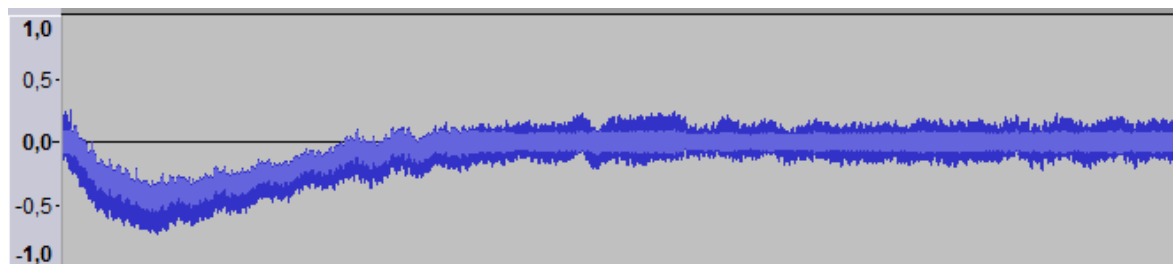
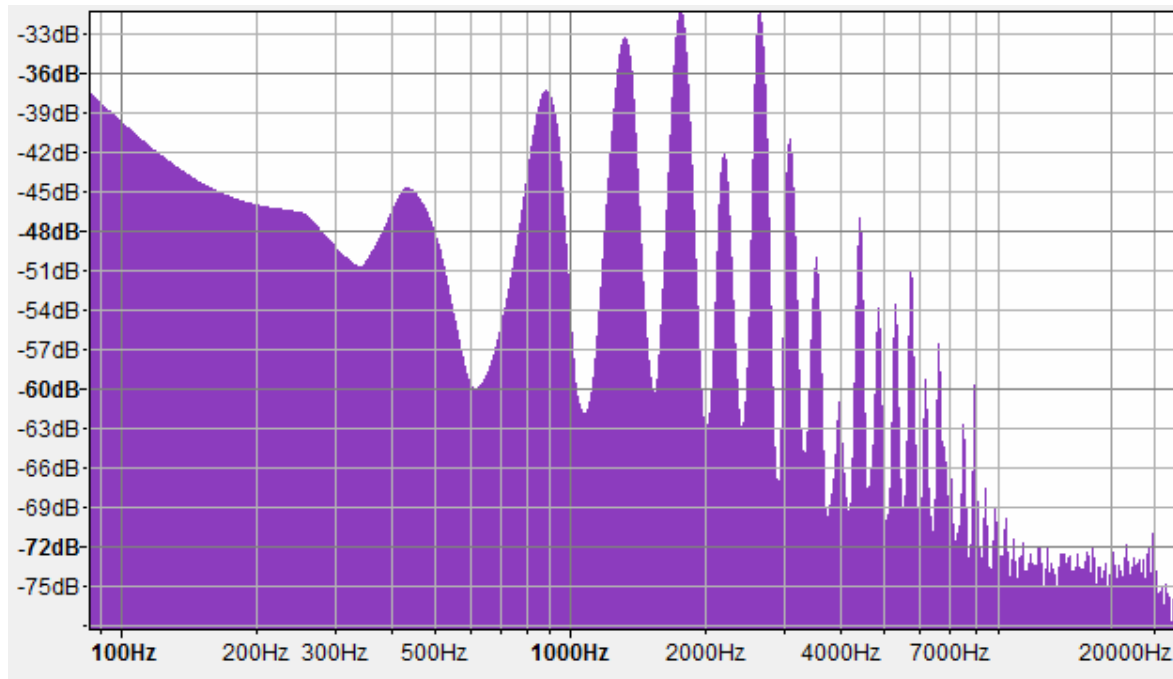
Do 3





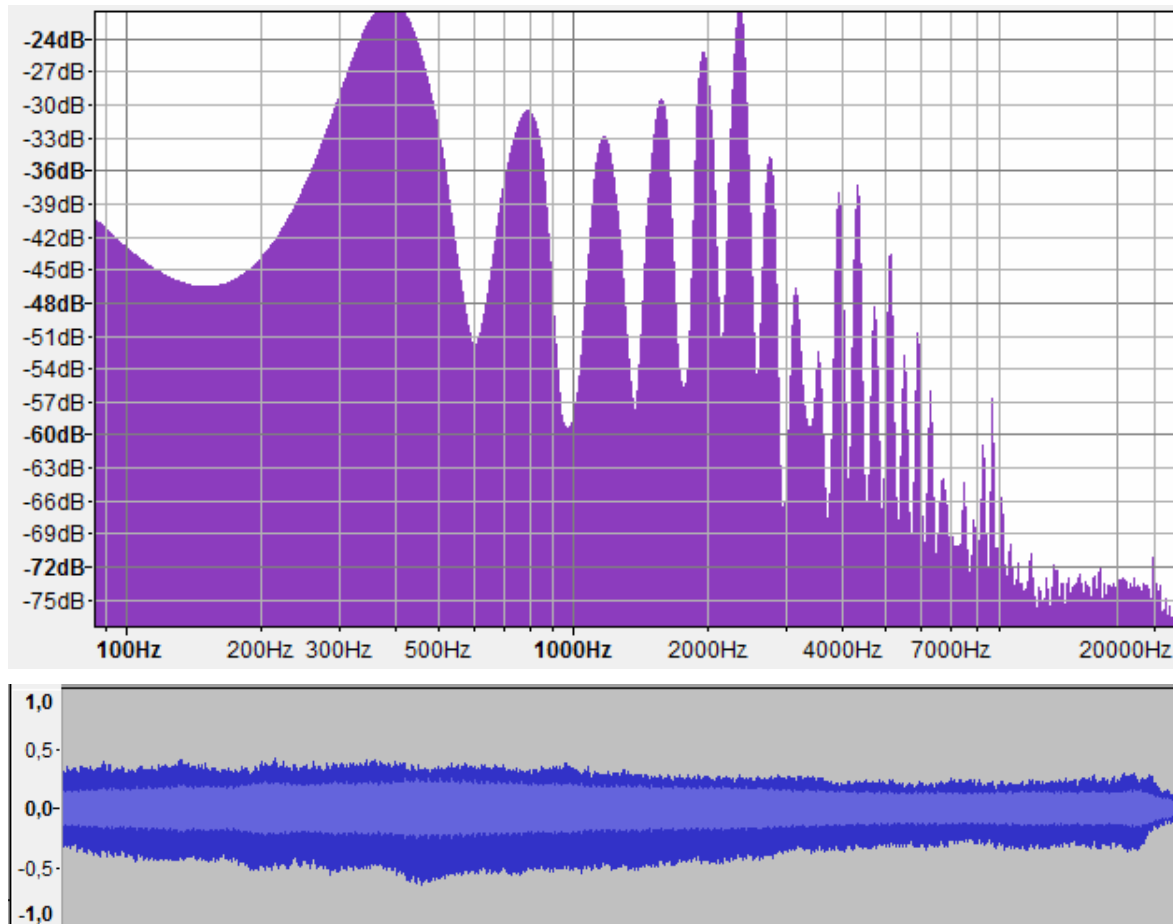
6.2.4 Violoncel 4

La 3





Sol 3



Do 3

