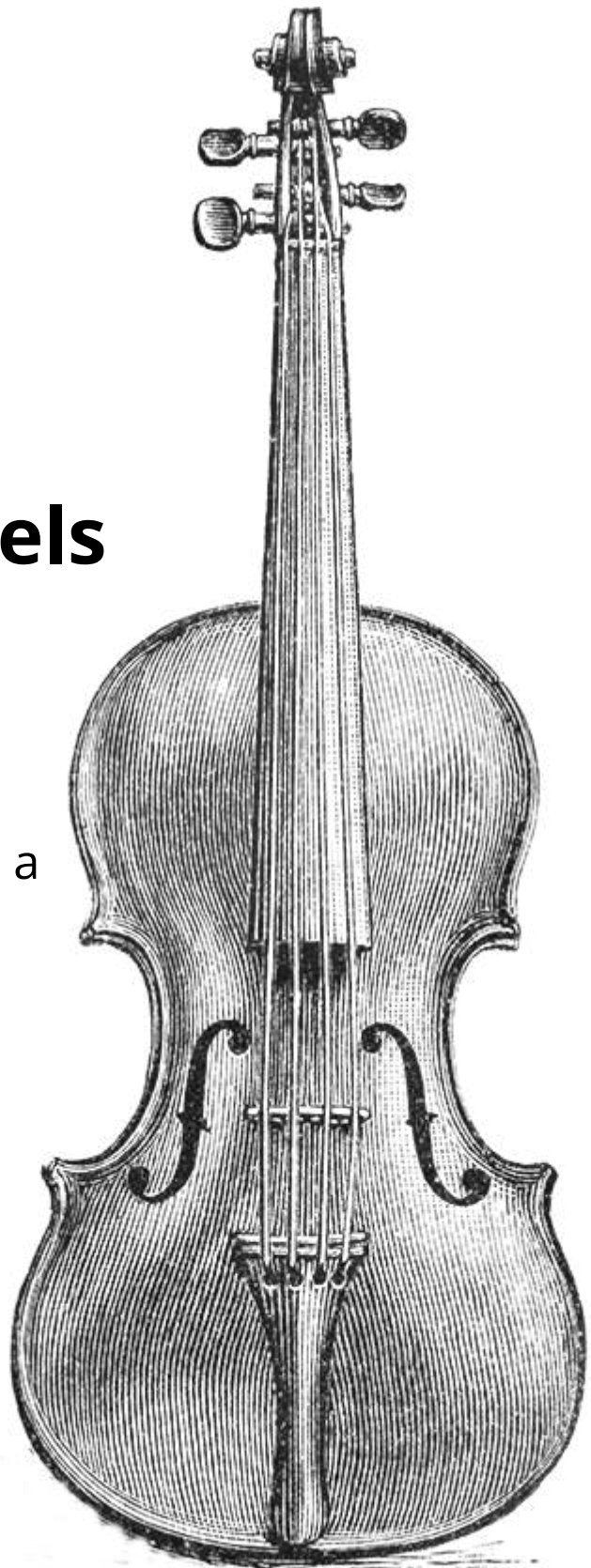


# Entre els 196 i els 2349 Hertz

Estudi del violí com a  
instrument musical i com a  
objecte acústic.

Isolda Fita Matas  
2n BAT B

Treball de Recerca  
Tutora: Elena Ramos  
Institut Vallvera de Salt,  
curs 2021 - 2022



## Agraïments:

Vull agrair aquest treball de recerca a tota la gent que m'ha escoltat i aconsellat durant el procés d'investigació.

A la meva tutora, Elena Ramos, pels suggeriments, per ser-hi i dedicar-s'hi, i per donar-me l'empenta necessària en els moments de bloqueig.

A la Patrícia, per tocar per mi.

A tota la meva família, pel suport i els ànims: a la iaia, per obrir-me les portes al taller i ensenyar-me a treballar la fusta amb tant d'afecte. A l'avi, per viure en segona persona el procés complet. Al papa, per ajudar-me quan m'he desesperat i quan no. A l'Oriol, pels consells que, erròniament, no m'aplico, i a la mama, per donar-me tota la pau que he necessitat.

També a les meves amigues amb qui he compartit el procés.

# Abstract

The following research emerges from the wanting of understanding the role of mathematics in music. This large thematic has been approached from an investigation on the violins and their sound, not only from an acoustical perspective but also from a historical and technological point of view.

The memory consists of a bibliographic research on violin history and the meticulous overview of all of its parts and pieces, followed by a vision of the physics of waves and sound, and the mathematical features of the musical scale. The next section is dedicated to analyze some aspects of the behavior of acoustics in violins.

This theoretical research has been put into practice with the construction of a monochord, a single-stringed musical instrument that was used by the Pythagoreans for scientific purposes, and the subsequent analysis of the sound of the violin by way of comparison with that of the monochord in the parameters of dynamic envelope, waveform and acoustic spectrum. The required data for that has been obtained via a homemade recording of the sounds and their entrance to the free software *Audacity*.

All the work summed up has led to a large conclusions list related to a radiography of some of the violin's sound mechanisms -such as standing waves, interactions and resonance modes- and their consequences on the final soundwave, besides the resolution of the primary purposes related to the construction of the monochord, the historical violin value, the physical understanding of sound and music, and the technological methods to analyze them.

**Keywords:** violin, music, sound, soundwaves, waveform, standing waves, monochord, musical scale, musical instrument, soundwave spectra, Audacity, acoustics, wood.

# Resumen

Esta investigación surge de la curiosidad por comprender el papel de las matemáticas en la música. Se centra en el estudio y comprensión de los violines y su sonido, no solo desde una perspectiva acústica sino también desde un punto de vista histórico y tecnológico.

Para desarrollar una idea sólida del violín como instrumento, se ha llevado a cabo una investigación bibliográfica sobre su historia y un repaso minucioso de todas sus partes y piezas, seguido de una primera inmersión en la física de las ondas y el sonido y las características matemáticas de la escala musical. La siguiente sección está dedicada a analizar algunos aspectos del comportamiento del sonido en los violines.

La investigación teórica se ha puesto en práctica con la construcción de un monocordio, un instrumento musical de una sola cuerda que fue usado por los Pitagóricos con fines científicos, y la consiguiente análisis del sonido del violín a modo de comparación con el del monocordio en los parámetros de la envolvente dinámica, la forma de onda y el espectro acústico. Los datos necesarios para ello se han obtenido mediante el enregistramiento y el análisis de sus sonidos vía el software libre *Audacity*.

Las conclusiones derivadas de este trabajo dan una primera radiografía de algunos de los mecanismos de sonido en el violín, como las ondas estacionarias, las interacciones y los modos de vibración, y su reflexión en la onda sonora final. También resuelven los objetivos primarios relacionados con la construcción del monocordio, el entendimiento físico del sonido y la música y los métodos tecnológicos para su análisis.

**Palabras clave:** violín, música, acústica, instrumento musical, onda sonora, onda estacionaria, forma de onda, timbre, monocordio, escala musical, espectro de onda, Audacity, madera.

# ÍNDEX

<b>Agraïments:</b>	<b>2</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Resumen</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDEX</b>	<b>5</b>
<b>0. Introducció</b>	<b>9</b>
<b>1. Història i introducció als violins</b>	<b>12</b>
<b>1.1 La història dels violins</b>	<b>12</b>
1.1.1 Naixement de la corda fregada	12
1.1.2 Violins medievals	12
1.1.2.1 La família del Rabel	13
1.1.2.2 Família de la fidula o fedyll, fidel, viella, viola	14
1.1.3 La tasca dels Amati	16
<b>1.2 El violí com a instrument musical</b>	<b>17</b>
1.2.1 Característiques generals del violí	17
1.2.2 Les parts del violí	17
1.2.2.1 Esquema i llegenda de les parts del violí	18
1.2.2.2 La caixa de ressonància: exterior	19
1.2.2.2.1 Les tapes	19
1.2.2.2.2 Els aros o riscles	20
1.2.2.2.3 Les efes	21
1.2.2.2.4 El pont	22
1.2.2.2.5 El cordal	23
1.2.2.2.6 La barbada o barbada	24
1.2.2.3 La caixa de ressonància: interior	25
1.2.2.3.1 L'ànima	25
1.2.3.2 La barra harmònica	26
1.2.2.4 Part superior	27
	5

1.2.2.4.1 El diapasó	27
1.2.2.4.2 El claviller i la voluta	28
1.2.2.5 Les cordes	28
1.2.2.6 L'arc	28
1.2.3 La construcció del violí	29
1.2.4 El disseny del violí	30
<b>2. El funcionament i el so del violí</b>	<b>32</b>
<b>2.1 Què és el so?</b>	<b>32</b>
2.1.1 Característiques generals de les ones	32
2.1.1.1 Longitud	33
2.1.1.2 Freqüència	34
2.1.1.3 Període	34
2.1.1.4 Amplitud	34
2.1.1.5 La fase	35
2.1.2 La superposició d'ones	36
2.1.3 L'ona sonora	38
2.1.4 La percepció humana del so	39
2.1.4.1 L'espectre audible	39
2.1.4.2 Explicació breu del funcionament de l'oïda humana	40
<b>2.2 La música i el so</b>	<b>41</b>
2.2.1 L'escala tonal occidental	42
2.2.1.1 L'octava	42
2.2.1.2 La relació entre les notes de l'escala	43
2.2.1.3 Nomenclatura de les notes de l'escala musical occidental	43
2.2.1.4 Taula general de freqüències en afinació temperada igual	44
2.2.2 El secret dels instruments musicals: el timbre	45
<b>2.3 El comportament del so en els violins</b>	<b>48</b>
2.3.1 La vibració de les cordes	48
2.3.1.1 Les ones estacionàries	48

2.3.1.2 Càlcul de les freqüències d'una corda.	50
2.3.1.3 So de l'ona estacionària	50
2.3.2 La vibració del cos del violí	51
2.3.2.1 Mode A0	52
2.3.2.2 Mode T1	53
2.3.3.3 Mode C3	53
2.3.2.4 Mode C4	54
2.3.2.5 Identificació dels pics dels modes principals	54
2.3.3 El moviment del pont	55
2.3.4 El moviment de les tapes del violí	56
<b>3. Part pràctica: l'anàlisi sonor del violí i del meu instrument</b>	<b>59</b>
<b>3.1 Elaboració pròpia d'un monocordi</b>	<b>59</b>
3.1.1 Motivació	59
3.1.2 Construcció del monocordi	59
3.1.2.1 Plantejament i obtenció de materials	60
3.1.2.2 Material i estris	61
3.1.2.3 Elaboració de les peces i muntatge	62
<b>3.2 Proporcions i escala musical en el monocordi</b>	<b>66</b>
3.2.1 Proporcions bàsiques	67
3.2.2 Divisió en subterços	69
3.2.3 Funcionament del monocordi	72
<b>3.3 Comparació de les ones sonores del violí i del monocordi</b>	<b>72</b>
3.3.1 Metodologia	72
3.3.2 Semblances i diferències entre el monocordi i el violí	74
3.3.3 So del violí, el monocordi i l'ona pura	75
3.3.4 Comparació de les envolvents dinàmiques	75
3.3.4.1 Definició breu d'envolvent dinàmica	75
3.3.4.2 Comparació qualitativa de les envolvents del violí i del monocordi	76
3.3.4.3 Conclusions	80

3.3.5 Comparació dels perfils d'ona	80
3.3.5.1 Definició breu de perfil d'ona	80
3.3.5.2 Comparació dels perfils d'ona del monocordi i del violí	81
3.3.5.3 Conclusions	83
3.3.6 Comparació dels espectres sonors	84
3.3.6.1 Definició breu d'espectre sonor	84
3.3.6.2 Comparació de l'espectre sonor del monocordi i del violí	84
3.3.6.3 Conclusions	91
<b>4. Conclusions</b>	<b>93</b>
<b>5. Bibliografia</b>	<b>96</b>
5.1 Llibres	96
5.2 Articles i documents consultats per la xarxa	96
5.3 Pàgines web	97
5.4 Fonts de les imatges	98
5.4 Fonts de les taules	100



# 0. Introducció

Veig la música com a un fenomen transversal en la vida de tots. Potser és cert que se'ns fa complicat explicar per què, però és difícilment negable la importància i el pes que té en nosaltres com a humans.

He crescut en una casa on la majoria de coses es fan amb banda sonora, i des dels vuit anys fins ara mateix he estat tocant i aprenent música. Durant tot aquest temps se m'ha repetit mil i una vegades que estudiar música em faria millor a l'escola, que la música, en el fons, és pura matemàtica.

Començar el batxillerat científic em va fer adonar que entendre el perquè de qualsevol cosa del món és possible, i a més en soc capaç; que tots aquells fets que sempre he considerat fets i punt també passen per algun motiu. L'oportunitat de dur a terme el treball de recerca i investigar sobre la raó d'alguna cosa em va evocar a la meva passió per la música. Vaig pensar que era el moment d'entendre, per fi, com funciona la música, i per què la música són matemàtiques.

Per encarar l'estudi del fenomen físic de la música, vaig decidir focalitzar-me en un instrument musical concret. Això m'ha permès abastar, a banda del més bàsic sobre el so i la matemàtica de l'escala musical, un conjunt de vessants més heterogeni sobre el tema, com la història o la tecnologia.

L'elecció de l'instrument que seria el fil conductor del meu treball va ser ràpida, per no dir premeditada inconscientment. Vaig elegir el violí intuïtivament, perquè el trobo bell al mateix temps que desconegut; perquè sento que el distingeix un romanticisme especial.

Considero el violí, en conjunt, una peça artística, i per tant estudiar-lo en termes físics s'adequa d'una manera encara més personal a la meva finalitat principal: la cerca de la ciència en l'art de la música.

Els objectius que em plantejo per aquest treball són els següents:

1. Comprendre els violins com a objecte acústic i instrument musical.
2. Entendre l'evolució i valor històric dels violins.
3. Conèixer les nocions bàsiques de la física acústica tant de manera general com específicament aplicada al violí.
4. Construir un instrument musical senzill, un monocordi.
5. Aprendre l'ús de l'espectrògraf i l'anàlisi de l'espectre d'un so.
6. Analitzar i comparar el so i timbre del violí amb el del propi monocordi amb l'ajuda d'un espectrògraf.

Realitzaré aquesta recerca seguint la següent hipòtesi o pregunta:

*Partint de l'anàlisi i l'estudi teòric del violí i les seves característiques acústiques, puc construir el meu propi instrument senzill i realitzar un correcte estudi del seu so?*

Per assolir aquests objectius i respondre a la hipòtesi de treball seguiré la següent metodologia:

En primer lloc faré una recerca bibliogràfica per tal d'obtenir un coneixement integral del violí. Buscaré informació sobre diferents aspectes de l'instrument i els seus *perquè*s: la història del violí, les peces que el construeixen i la fusta de cadascuna d'elles, el procés de construcció i la seva forma.

En segon lloc, m'endinsaré en el camp de la física acústica per tal de comprendre'n les nocions bàsiques. Això em permetrà posteriorment aplicar tots aquests coneixements a l'anàlisi del violí com a instrument musical, i a la caracterització del seu so.

Per posar en pràctica la recerca teòrica, duré a terme la construcció del meu propi instrument de corda, un monocordi, a partir del qual podré experimentar els coneixements

adquirits amb el marc teòric partint d'un instrument senzill que podré comparar amb la complexitat del violí.

Per analitzar i comparar el so del meu monocordi i el violí empraré el software lliure Audacity, fent prèviament un treball d'aprendre'n el funcionament.

# 1. Història i introducció als violins

El que diferencia un instrument musical d'un objecte sonor és el seu valor social. Abans d'intentar entendre el funcionament del violí cal que fer una petita immersió en l'instrument. Cal entendre la seva història, conèixer les parts que el formen.

## 1.1 La història dels violins

### 1.1.1 Naixement de la corda fregada

Podem partir del fet que la música, com tota disciplina artística, ha existit des que han existit els humans, i que la construcció dels primers instruments musicals no es troba gaire lluny de la de les primeres eines. Però si una pedra contra un tronc ja fa música, què entenem llavors per a instrument musical? Per trobar el naixement dels violins em centraré en l'origen documentat dels instruments de corda polsada i arc, encara que aquests tinguin ja els seus propis avantpassats.

Mentre que els instruments de corda puntejada -avantpassats de la guitarra- tenen un origen incert, de tan antic, sembla que els instruments de corda fregada van sorgir en una època comparativament molt recent, probablement fruit del descobriment que fregant les cordes dels instruments de corda pinçada amb un arc de caça aquests produïen un so diferent. Les evidències més antigues d'aquest descobriment daten del segle IX dC i es troben a l'Àsia Central. Les primeres fonts amb instruments d'aquest tipus a Espanya i Itàlia són del segle X i les del nord d'Europa de principis de l'XI.

### 1.1.2 *Violins* medievals

A l'Europa medieval trobem una gran varietat d'instruments de corda fregada de formes, mides i característiques molt diverses, absent d'una afinació estandarditzada. Els

instruments de corda fregada medievals sonaven a les corts, tocats per joglars o trobadors, però també a les festes populars, entre la gent i els balls.

Les fonts històriques han permès fer una classificació de tots aquests instruments en famílies segons les seves semblances. Vegem-ne alguns exemples:

### 1.1.2.1 La família del Rabel



Imatge 1: La Virgen y el Niño con ángeles músicos, h. 1500, Mestre del Tríptic de Morrison, Musées Royaux des Beaux-Arts, Brusel·les.

Imatge 2: Ampliació del quadre anterior, mostra el Rabel.

A la pintura de les imatges 1 i 2 (2 ampliada) s’hi pot veure un instrument de la família del Rabel. El so del Rabel ha estat definit com a brusc o fins i tot “semblant a la veu d’una anciana”. Les diferències més notables respecte al violí són les següents:

- El pont que subjecta les cordes és pla, i per tant l’instrument devia permetre de tocar més d’una corda alhora i donar un so polifònic.
- Els forats tenen una forma diferent.
- El cos de l’instrument no presenta les corbes del violí.
- Té tan sols tres cordes
- No presenta ànima

- Té trasts (semblança a instruments de corda pinçada com el llaüt a la mateixa pintura)

### 1.1.2.2 Família de la fidula o *fedyll, fidel, viella, viola*

La fidula va ser un desenvolupament de la viola medieval que va permetre tocar dempeus i en moviment. La seva forma plenament desenvolupada va arribar mitjà de l'art anglès als voltants del 1200, i el seu ús i popularitat es va estendre al llarg de molts segles. És un tipus d'instrument que es va estendre molt i que trobem de manera molt freqüent en diferents tipus de fonts. Aquesta popularitat també provoca que la família de les Fídules sigui nombrosa, i entre els seus membres es puguin trobar moltes disparitats.

A diferència del Rabel, algunes fídules tenen ja cinc cordes, i aquestes es poden afinar de tres maneres diferents. El pont era corbat de manera que produïa un so monofònic. Alguns instruments presentaven trasts i fins i tot ànima.

Tot plegat proporcionava a la fidula una gran versatilitat pel que fa a tessitures i estils, sent això últim un motor per la introducció a la tècnica d'execució de l'arc.



Imatge 3: En aquest gravat construït abans del 1280 a la catedral de Lincoln es pot observar clarament una fidula medieval amb cinc cordes.

En la imatge 4, a continuació, es pot veure una representació d'instruments medievals de corda fregada de diferents famílies. D'esquerra a dreta, un baix de viola de gamba, una viola

da braccio, una viola de mà, un rabel i un baix de viola de gamba, tocats per un grup d'àngels músics.



Imatge 4: Diversitat d'instruments de corda fregada medievals en un detall de les pintures de l'absis de La coronació de la verge, atribuïdes a Ludovico Mazzolino o a Michele Coltellini, h. 1510.

Els violins com els coneixem van sorgir d'un llarg procés d'evolució, on els instruments existents anaven patint variacions per tal d'adequar-se a les necessitats musicals de cada ocasió. Partint de famílies com les acabades d'explicar, s'empetitia la mida de l'instrument si es buscava un so més agut, es corbava el pont si la tendència era la música monòfona... Totes aquestes adequacions, doncs, eren definides per les característiques de la composició del moment.

La imatge 5 és una de les primeres il·lustracions d'un violí, i data entre el 1505 i 1508:



Imatge 5: Detall d'un mural de Garofalo, 1505-1508, Palazzo di Ludovico il Moro, Ferrara.

Tanmateix, la feina del constructor de violins Andrea Amati va ser crucial per establir definitivament el model estàndard del violí i els seus parents (viola, violoncel).

### 1.1.3 La tasca dels Amati

Andrea Amati va ser un luthier<sup>1</sup> de Cremona, nascut el 1505. L'any 1560 el rei Carles IX de França li va encarregar una orquestra sencera de 38 instruments, on hi figuraven violins de dues mides diferents, violes de dues mides diferents i violoncels grossos. Aquests instruments ja representen la forma madurada del violí, amb quatre cordes. L'ofici de luthier va perdurar en la família al llarg dels seus fills Antonio i Girolamo (Gerónimo) i el seu nét, Nicola Amati, que és el membre de la família amb més renom. Tots ells van fer alguna millora en el model anterior.

Nicola Amati va ser mestre de Stradivari i Guarneri, considerats els dos millors constructors de violins de la història. Stradivari i Guarneri, cadascun per la seva banda van portar el violí Amati al grau màxim de perfecció, i els seus instruments han servit ençà de la seva mort com a model per a la construcció de violins fins l'actualitat.

Actualment els violins originals de les tres famílies tenen un valor elevadíssim. S'estima que encara existeixen uns 800 exemplars d'Stradivarius, 250 Guarnerius i 6 Amatis.

---

<sup>1</sup> Constructor d'instruments





Imatge 6: Violí Stradivarius anomenat "Greffhule", 1709. Propietat de l'institut Smithsonian.

## 1.2 El violí com a instrument musical

### 1.2.1 Característiques generals del violí

El violí és un instrument d'uns 400 grams de massa. La llargada de l'instrument per a adults (4/4) és d'entre 60 i 65 cm i l'amplada en els màxims és de 20 cm, tot i que existeixen violins més petits ideats per a músics joves, com n'és exemple el violí 1/16, pensat per a estudiants d'entre 3 i 4 anys. Aquest últim medeix, de llargada, entre 36 i 38 cm.

És el més petit i el més agut de la seva família d'instruments de corda fregada; el violí, la viola, el violoncel i el contrabaix. Ha tingut sempre un paper molt important en la composició de música clàssica i sol destacar en els conjunts instrumentals grans i petits.

El registre del violí és d'unes quatre octaves i mitja. Les cordes lliures van del sol<sub>4</sub> al mi<sub>6</sub>, però en la interpretació pot arribar a assolir fins un re<sub>7</sub> d'agut. La música per a violí està escrita i es llegeix usualment en clau de sol. Està construït amb unes setanta peces fetes de fusta de diferents arbres, cadascuna amb una funció específica.

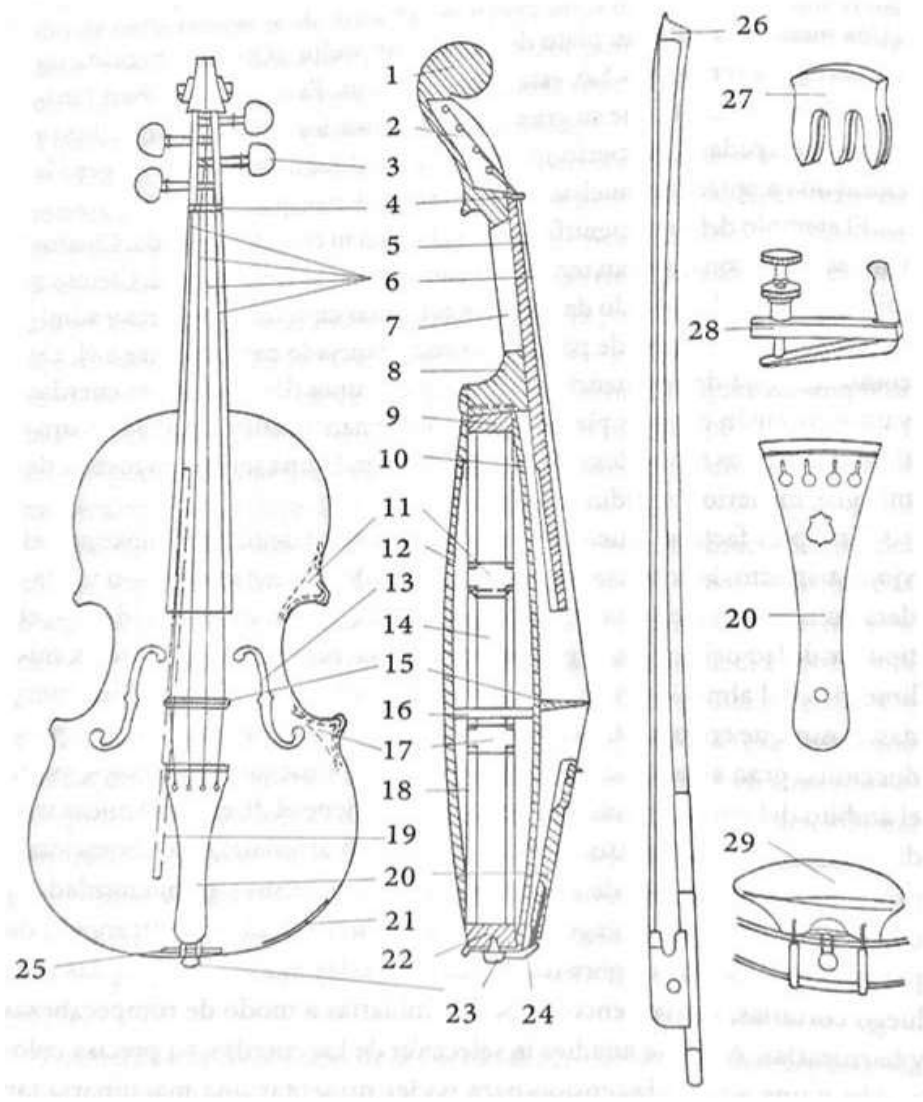
A continuació, una explicació detallada de totes elles.

### 1.2.2 Les parts del violí

Un violí és un acoblament de tres grans blocs: una part inferior amb el cos - la caixa de ressonància -, una part interna mitja amb el diapasó i el mànec i la part superior que conté el diapasó i les clavilles. Sobre aquesta estructura se sostenen les cordes.

Tanmateix, el so complex i bell del violí requereix d'un muntatge igualment complex i bell. A continuació, un esquema del violí amb l'explicació de cadascuna de les seves parts.

### 1.2.2.1 Esquema i llegenda de les parts del violí



Imatge 7: Les parts del violí.

- |              |                    |                           |
|--------------|--------------------|---------------------------|
| 1. Voluta    | 6. Corda           | 11. Taló angular superior |
| 2. Claviller | 7. Mànec           | 12. Fons                  |
| 3. Clavilla  | 8. Retaló          | 13. Efa                   |
| 4. Celleta   | 9. Retaló superior | 14. Aro                   |
| 5. Diapasó   | 10. Tapa           | 15. Pont                  |

16. Ànima	21. Filet	26. Arc
17. Taló angular inferior	22. Retaló inferior	27. Sordina
18. Contraaro	23. Botó	28. Afinador
19. Barra harmònica	24. Corda de cordal	29. Mentonera
20. Cordal	25. Celleta inferior	

### 1.2.2.2 La caixa de ressonància: exterior

La caixa de ressonància es pot visualitzar des de dues perspectives, la frontal i la de perfil. Des de la perspectiva frontal en és possible veure la denominada “taula harmònica”, formada per la tapa superior amb el *pont*, les *efes*, el final del *diapasó*, la part inferior del *cordal* i la *mentonera*.

#### 1.2.2.2.1 Les tapes

Les tapes són les peces més grosses del violí. Lluny de ser peces de gruix uniforme, presenten diferents gruixos en cada zona, essent-ne l’elaboració una de les tasques especialitzades dels luthiers. La tapa superior s’anomena **tapa harmònica**, la inferior s’anomena **fons** i tenen curvatures diferents.

La **tapa superior** o **taula harmònica** presenta una curvatura convexa cap al centre, on la fusta té més gruix, en motiu de l’òptim encaix de la tapa amb el pont i de la conseqüent pressió a la que és sotmesa la zona mentre sona el violí: la pressió efectuada pel violinista a través de les cordes i el pont assoleix l’equivalent a uns 12 quilograms. La part central de la tapa harmònica té un gruix aproximat de 4.5 mm, mentre que les zones més primes, que es localitzen prop de les vores, tenen un gruix aproximat de 2.5 mm.

La convexitat del **fons**, és a dir la tapa inferior, és diferent. En aquest cas la zona més elevada és la línia que travessa la peça per la meitat de manera vertical.

Les propietats de la fusta amb la què estan construïdes les tapes són un dels elements amb més incidència en el so final, ja que la seva vibració és la que trobem al final de la cadena i ens arriba directament. Al contrari del que podria semblar, la fusta que constitueix la tapa harmònica té poc a veure amb la del fons. La fusta més habitual per la tapa harmònica és la fusta d’avet o d’altres que pertanyin al gènere *picea* (pins), en canvi, per el fons se sol usar fusta d’auró.

Vegem les propietats mecàniques generalitzades de les dues fustes:

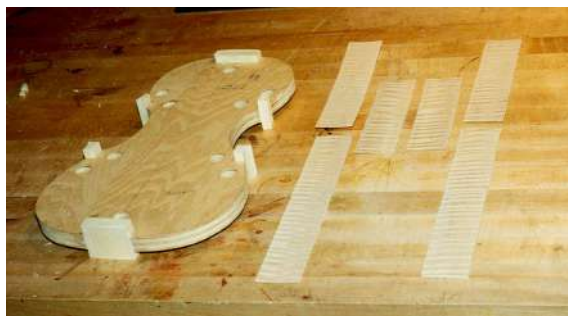
Propietat mecànica	Fusta d'abet roig (tapa)	Fusta d'auró (fons)
Resistència a la flexió estàtica	710 Kg/cm <sup>2</sup>	1100 Kg/cm <sup>2</sup>
Mòdul d'elasticitat	110.000 Kg/cm <sup>2</sup>	105.000 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistència a la compressió	450 Kg/cm <sup>2</sup>	540 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistència a la tracció paral·lela		1150 Kg/cm <sup>2</sup>

Taula 1: propietats mecàniques generalitzades de les fustes d'abet i d'auró

Altres propietats mecàniques amb incidència destacable en el so són el fregament intern - es tradueix en el temps d'amortiment o la dissipació d'energia - , la densitat i la velocitat del so en la fusta. Una velocitat del so elevada es dona per un quocient elevat entre la rigidesa i la densitat del material.

#### 1.2.2.2.2 Els aros o riscles

La unió exterior de les dues tapes es fa mitjançant els **aros**: tres parells de tires fetes de fusta d'auró, molt flexibles i d'un mil·límetre de gruix, que s'encaixen i ressegueixen la característica silueta de les tapes tot tancant la caixa de ressonància.



Imatge 8: Aros preparats per ser col·locats.



Imatge 9: Fons d'un violí amb els aros col·locats i fixats.

Als extrems superior i inferior de l'interior de la caixa hi trobem el **taló superior** i el **taló inferior**, que ajuden a la subjecció dels **aros**.

#### 1.2.2.2.3 Les efes

Un dels elements més identificatius dels instruments de la família del violí és sens dubte la forma d'**efa**<sub>13</sub> de les ranures sobre la tapa harmònica. Aquests forats són imprescindibles per transmetre les vibracions de l'interior de la caixa de ressonància al medi exterior, i la seva forma i, sobretot, la seva mida, incideixen directament sobre el volum del so que llança l'instrument.



Imatge 10: Augment en la zona central d'un violí amb vista clara de les efes.

Aquesta forma i mida ha anat evolucionant al llarg del temps a manera de modificacions tant arbitràries com accidentals. En el cas de les modificacions accidentals, s'ha vist com al llarg de la història de la construcció d'instruments alguns errors en la rèplica de violins deguts a limitacions tècniques han provocat un augment de la llargada de les efes i per tant de la potència del so, mutació que ha acabat perdurant en el temps per sobre dels models construïts amb les proporcions establertes, d'una manera que recorda a la teoria de l'evolució de Darwin.

#### 1.2.2.2.4 El pont

El **pont** és l'últim element visible de la taula harmònica. Es tracta d'una peça de fusta d'auró o faig que sosté i tensa les cordes en un punt intermedi del seu recorregut. Per una banda és l'intermediari entre el **diapasó** i el **cordal** en la davallada de les cordes, per l'altra el responsable de la seva igual separació i correcta altura i per l'altra fa del mitjà de transmissió de la seva vibració a la tapa harmònica.



Imatge 11: Pont d'un violí manufacturat per Parramon-Barcelona.



Imatge 12: Pont d'un violí en la seva correcta col·locació.

Això fa del pont i la seva posició un afer molt precís i delicat, en el qual s'ha de procurar la seva col·locació vertical, amb les dues potes perfectament ajustades a la curvatura de la taula, enmig de les dues efes, alineat amb les seves petites incisions i en línia amb l'ànima i la taula harmònica de l'interior de la caixa. A més, se n'ha de tenir en compte l'altura, el gruix

i la rigidesa per tal de mantenir la tensió correcta de les cordes que influirà notablement en el timbre de l'instrument. La part més rebaixada sosté la corda més aguda - el mi - i la més greu - el sol - passa pel peralt del pont.

A sobre del pont és on es col·loca eventualment la **sordina**, una mena de pinça que permet la reducció del volum de l'instrument - útil quan es tracta d'evitar molèsties durant l'assaig - o bé la creació de nous timbres concrets jugant amb la massa del pont.

Existeix una gran varietat de sordines de diferents mides, materials i finalitats.



Imatge 13: Varietat de sordines de cautxú, silicona, metall, o metall recobert de plàstic.



Imatge 14: Sordina de metall col·locada en un violí.

#### 1.2.2.2.5 El cordal

Després de passar pel pont, les quatre cordes del violí desemboquen al **cordal**, una peça de fusta de banús negre que s'estén fins als peus de l'instrument. La seva funció és subjectar-les. Sobresortint del cordal hi solen haver quatre peces en forma de clau, cadascuna corresponent a una corda. S'anomenen afinadors o **tensors**, i tot i que la tasca de tensar i destensar les cordes per a afinar-les correspon a les **clavilles** que trobem al cap del violí, els **tensors** serveixen per fer micro correccions del to.

El cordal queda fixat al violí mitjançant un suport anomenat celleta interior i un llaç sintètic que s'uneix al **botó**, una peça petita al capdavant de l'instrument.



Imatge 15: Cordal d'un violí.

#### 1.2.2.2.6 La barbada o barbada

La **barbada** es troba a la part baixa del violí, pràcticament sobreposada amb el cordal. Està feta igualment de fusta de banús negre. La seva funció és facilitar la subjecció del violí per a l'instrumentista, que hi ha de col·locar la barbata mentre la caixa reposa sobre l'espatlla de manera lleugerament inclinada cap amunt, de manera que els dos braços queden totalment alliberats.

La barbada es va incorporar el 1820 gràcies a Louis Spohr, i facilita la posició corporal òptima dels violinistes tenint una afectació mínima en el so de l'instrument. El bon ús de la barbada juntament amb la correcta postura corporal evita problemes de salut, sobretot relacionats amb la columna vertebral.



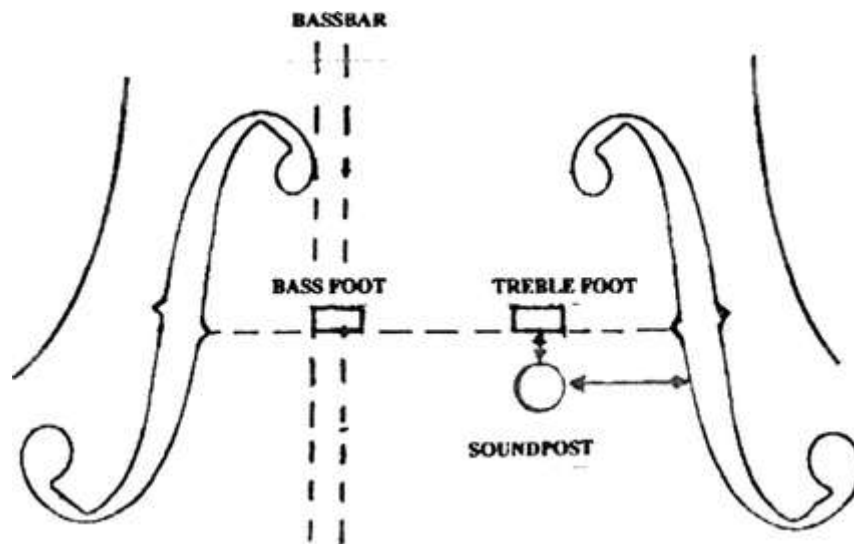
Imatge 16: Instrumentista fent ús de la barbada.



La superfície del violí es complementa amb una línia en forma de cornisa que corona el perímetre del violí, servint tant d'element decoratiu com una protecció contra els possibles cops i esquerdaments de la fusta. Està compost de 24 peces més petites anomenades **filets**.

### 1.2.2.3 La caixa de ressonància: interior

L'interior de la caixa de ressonància és el lloc on el so s'amplifica i per tant agafa caràcter. Així doncs, a banda de la seva forma, les dues peces que s'hi troben a l'interior són claus pel so final del violí. La col·locació de l'**ànima** i la **barra harmònica**, que es du a terme respecte a la posició del pont, és una de les tasques més minucioses del luthier, ja que cada mil·límetre que disti de la correcta posició té grans incidències en el so final.



Imatge 17: Col·locació de la barra harmònica i l'ànima respecte del pont del violí. Traducció de la nomenclatura anglesa: *bassbar* correspon a barra harmònica, el *bass foot* i el *treble foot* són les dues potes del pont i *soundpost* és ànima.

#### 1.2.2.3.1 L'ànima

L'**ànima** és una petita peça cilíndrica de fusta de pi que connecta la tapa harmònica amb el fons del violí. El més habitual és trobar-la col·locada sense cola, de manera que se subjecta sola per la mateixa pressió de l'instrument. De fet és l'ànima el que manté el violí ferm i evita que la caixa es deformi per la pressió de l'arc sobre les cordes, que pot arribar a fer una força equivalent a 10 kg.

No obstant això, el seu paper més important és distribuir les vibracions provinents de la tapa harmònica per tot l'interior de la caixa de ressonància, incloent-hi el fons. En molta part, la bellesa del so final del violí rau en l'ànima acomplint aquesta tasca, la qual depèn quasi exclusivament de la col·locació de la peça. La posició ideal de l'ànima és uns cinc mil·límetres per sota de la pota dreta del pont, de manera vertical i perfectament perpendicular a la corda mi, la més aguda. L'ànima es col·loca un cop enllestida la caixa de ressonància, introduïda amb unes pinces per l'efa dreta.



Imatge 18: Ànima d'un violí vista a través d'una efa.

#### 1.2.3.2 La barra harmònica

La **barra harmònica** és una barra de fusta d'abet realçada en la part central, que s'enganxa longitudinalment a la tapa harmònica per sota del peu esquerre del pont. Complementa al pont per aguantar la pressió i reforça tota l'estructura de la tapa.



Imatge 19: Barra harmònica col·locada a la caixa oberta d'un violí.

#### 1.2.2.4 Part superior



Imatge 20: Part superior d'un violí.

##### 1.2.2.4.1 El diapasó

El **diapasó** és una làmina de fusta de banús, sense trasts (a diferència de la de guitarra). Les quatre cordes la recorren, i és la zona per on l'interpret mou els dits per donar llum a les diferents notes.

Darrere el **diapasó**, subjectant-lo, s'hi troba el màstil o mànec, encaixat amb el taló, una peça semicircular que el connecta amb la part de darrere de la caixa. D'aquestes dues peces dependrà el grau d'inclinació del diapasó, important pel que fa a la tensió de les quatre cordes. És un aspecte que ha anat variant en la història de la construcció de violins.

A la part superior del diapasó s'hi col·loca la **celleta**, un petit llistó de banús amb quatre ranures que subjecten les cordes.

#### 1.2.2.4.2 El claviller i la voluta

Just després de la celleta s'hi troba el **claviller** amb les quatre **claus**, de banús negre, que marquen el final o el principi del recorregut de les cordes. Cada clau sosté una de les cordes, de manera que enroscant-la o desenroscant-la se'n provoca la tensió o la destensió. A través de les claus els intèrprets afinen el seu instrument, tensant la corda per apujar-ne el to i destensant-la per baixar-lo.

La **voluta** és un element decoratiu que corona l'instrument. Té forma de cargol, de manera semblant a les volutes de les columnes jòniques clàssiques.

#### 1.2.2.5 Les cordes

Una gran part de les peces del violí tenen com a funció ser el llit o suport de les cordes, primeres receptores de la vibració que farà que l'instrument soni.

Són quatre, i s'afinen respectivament al Sol<sub>3</sub>, Re<sub>4</sub>, La<sub>4</sub> i Mi<sub>5</sub><sup>2</sup>, és a dir, mantenen un interval de quinta de diferència. La corda més greu (el Sol<sub>3</sub>) és la més gruixuda i el Mi<sub>5</sub> la més estreta.

Solen estar fetes d'acer o bé de niló recobert amb plata, alumini o acer. En l'antiguitat es feien amb budell.

#### 1.2.2.6 L'arc

L'arc és l'element complementari al violí que s'usa per fer-ne vibrar les cordes. Consisteix en una vara de fusta de banús amb unes cerres, pèls de cua de cavall, tenses subjectades als extrems. A la part inferior hi té el taló amb la nou, una peça que inclou un mecanisme de tensió de les cerres. L'extrem oposat de l'arquet acaba amb una punxa corbada que compensa el sobrepès del taló.

Els pèls de cua de cavall són el material òptim per provocar el so dels instruments de corda fregada, ja que presenten l'adherència addient per fer vibrar les cordes, encara que sigui necessari passar una peça de resina per les cerres per afavorir un lliscament còmode: les cerres amb massa adherència dificulten la interpretació.

---

<sup>2</sup> Seguint l'índex acústic científic, que anomena La<sub>0</sub> al La més greu del piano. Aquesta és la nomenclatura que s'usarà al llarg de tot el treball.

L'ús de l'arquet requereix tècnica. Un bon intèrpret és capaç d'aprofitar la tècnica de l'arc per produir matisos i subtiletes en l'expressió.

### 1.2.3 La construcció del violí

La persona amb l'ofici de construir instruments de corda té el nom de luthier. Construir un instrument no és una tasca fàcil i requereix una bona tècnica, instint i sensibilitat artesanal.

La tria del tronc del qual sortirà l'instrument és el primer pas que requereix coneixement en la tasca: cada zona de cada arbre té unes característiques diferents, i l'elecció de l'arbre d'on sortirà la fusta per fer un violí rau en uns paràmetres tant específics com complexos. Aquesta és una tasca que no sempre du a terme el luthier que construeix el violí, però sí que sol ser el responsable de triar quin és el bosc d'on prefereix que provingui.

La tapa del violí es construeix adossant dos blocs d'abet amb vetes longitudinals, mentre que el fons amb un sol bloc d'auró de vetes transversals.

De la fusta elegida se'n fan el que es denomina com a "fulles", que són unes peces allargades i laminades en seccions quarterades del tronc. És indispensable que aquestes fulles hagin passat per un procés d'assecat i maduració llarg: les *fulles* de fusta d'abet, han de descansar entre cinc i deu anys apilades en un cobert a l'aire lliure, tot i que hi ha mestres luthiers que sostenen que la fusta hauria de madurar, com a mínim, durant 50 anys. La repercussió quantitativa que té la maduració de la fusta és l'augment de la proporció de zones cristal·lines respecte a les zones amorfes en la seva estructura cel·lular.

A l'hora de tallar les tapes, no n'hi ha prou amb seguir els patrons establerts. La fusta varia tant, d'arbre a arbre, i fins i tot entre diferents zones del mateix tronc, que encara que es repliqui amb exactitud mil·limètrica cada peça d'un violí amb un so i qualitat òptima, aquest serà impossible de reproduir. Així doncs, la producció d'unes bones tapes de violí requereix de més especificitats a banda del patró i el tallatge, com la intuïció i la bona oïda: les vibracions de la tapa i el fons s'acoblen dins el violí, i aquest acoblament té unes conseqüències determinades en el so final. Així doncs, la tasca del luthier passa per l'afinació relativa de les dues tapes del violí, que han de tenir freqüències complementàries en els seus diferents modes de vibració.

Una altra de les tasques del luthier que requereix d'una bona experiència és la bona col·locació de les peces centrals: l'ànima, la barra harmònica i el pont. La posició d'aquestes tres peces ha de ser acurada al mil·límetre, i té una forta influència en la qualitat del so final.

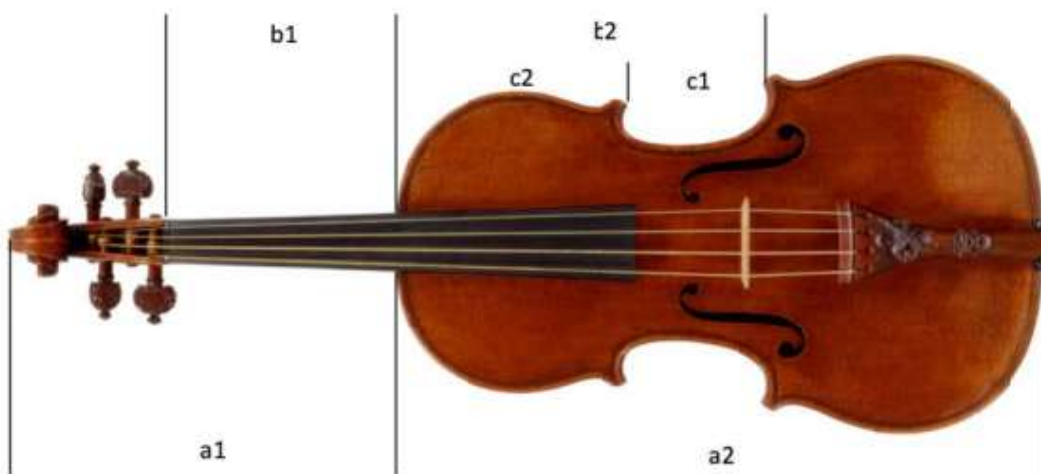
Es pot observar, doncs, que la tasca del luthier va més enllà de les habilitats fusteres, i que requereix d'una gran sensibilitat i personalitat, que provoca que el resultat final d'un instrument mai sigui el mateix. La construcció de violins i instruments de corda és una tasca humana i complexa que no es pot assumir per màquines sense sensibilitat.

### 1.2.4 El disseny del violí

El disseny del violí, és a dir, la seva forma, té certa influència en la seva acústica. Tot i això, l'evolució de la seva forma, independentment del seu origen, s'ha donat al llarg del temps obeïnt més als criteris estètics que no pas als físics. Al cap i a la fi, a partir del moment en què el disseny dels violins es va estandaritzar a Cremona (veure apartat 1.1.3) la caixa de ressonància ha adquirit la mateixa forma i per tant la sonoritat s'ha definit; les millores en la forma del violí que han partit dels estudis científics contemporanis són imperceptibles a la vista, i la forma original dels instruments no se n'ha vist afectada.

El disseny del violí és part del seu carisma, i del conjunt d'elements que el fan bell. La seva forma segueix les proporcions del nombre auri de la manera que es pot observar a la imatge 21.

$$\frac{a1 + a2}{a2} = \frac{a2}{a1} = \frac{b2}{b1} = \frac{c2}{c1} = \phi$$



Imatge 21.1: Proporció àuria en la forma del violí “Lady Blunt”, Stradivarius.

Aquesta proporció, la raó de la qual és un nombre irracional començat per 1,618033 anomenat nombre auri, és ben coneguda per considerar-se estèticament molt agradable en la cultura occidental, fins al punt que a les cultures antigues es considerava “la proporció divina”. Aquesta proporció es pot trobar a la natura i s’ha usat sovint, al llarg dels segles, en àmbits com l’art, l’arquitectura i el disseny.

Un altre component artístic del disseny del violí és la forma de la voluta, al capdamunt de l’instrument. És un element que no té afectació en l’acústica del violí, i per tant és purament decoratiu, i la seva forma recorda a la d’una columna jònica.



Imatges 21.2 i 21.3: Voluta d’un violí i capitell d’una columna jònica. Es pot observar com la forma de la voluta del violí està inspirada en els capitells de les columnes jòniques de l’art clàssic.

## 2. El funcionament i el so del violí

### 2.1 Què és el so?

La percepció humana del so no és més que un altre mecanisme d'anàlisi de l'entorn. A la superfície terrestre, cada cos que es mou provoca un desplaçament de les partícules d'aire que l'envolten, una empenta que aquestes primeres partícules comuniquen a les seves contigües, i així consecutivament. D'aquesta manera, de cada moviment que es dona en un medi airós en resulta una pertorbació mecànica de les partícules de l'entorn que s'estén, si no troba cap obstacle, fins a ser debilitada i perduda. Si es té l'oportunitat d'interposar l'oïda en el camí d'aquesta pertorbació, el sistema auditiu tradueix la pressió comunicada per les últimes partícules d'aire en el que nosaltres coneixem com a so, fent possible certa identificació de quina mena de moviment, de fenomen, ha tingut lloc prop o lluny.

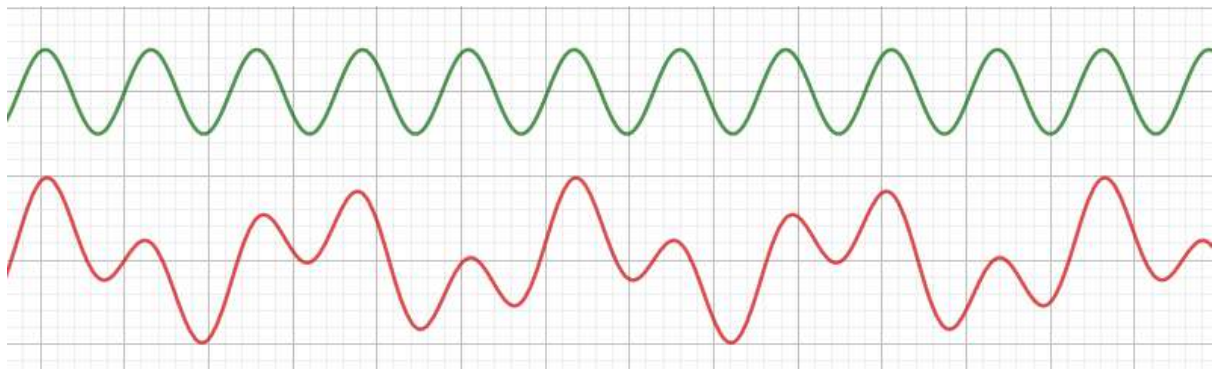
S'anomena "cos sonor" el cos font del fenomen, i "ona sonora" la pertorbació en les partícules del medi. L'ona sonora provoca zones de major i menor pressió sonora en el medi respecte a la seva pressió estàtica, que en alguns casos la nostra oïda és capaç de percebre: en efecte, aquest és el fenomen que es defineix com a so.

#### 2.1.1 Característiques generals de les ones

En la física, el mot "ona" designa la transmissió d'energia a través d'un medi sense que hi hagi desplaçament de matèria. Existeixen diferents tipus d'ona, de la mateixa manera que la natura està farcida d'elements amb un moviment ondulatori. El que caracteritza les ones o el moviment ondulatori és la seva periodicitat.

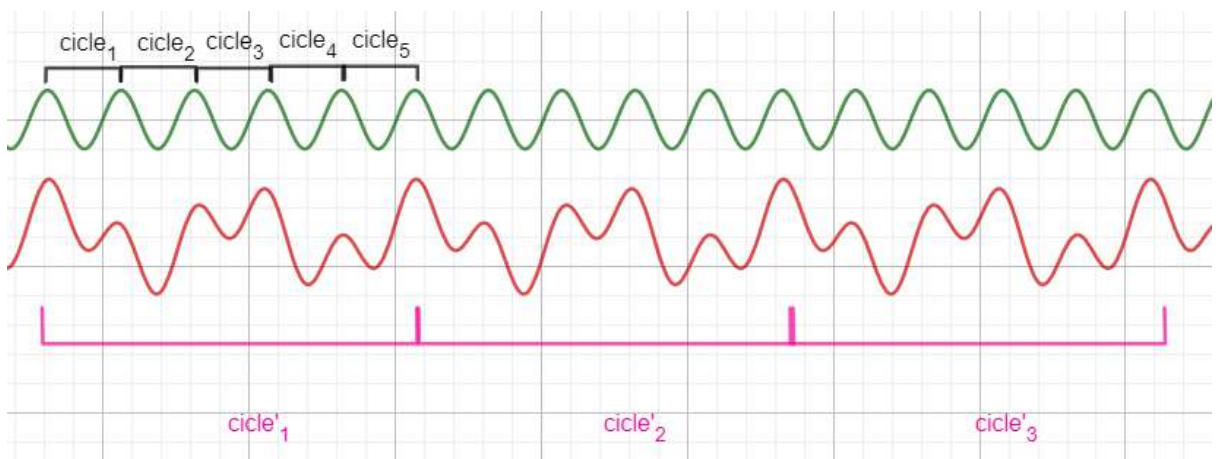
Per entendre les propietats de les ones exemplifiquem amb una ona senzilla (ona pura) de forma sinusoidal i una altra de més complexa, formada a partir de la superposició de diferents ones pures.





Imatge 21: Ona sinusoidal i ona complexa.

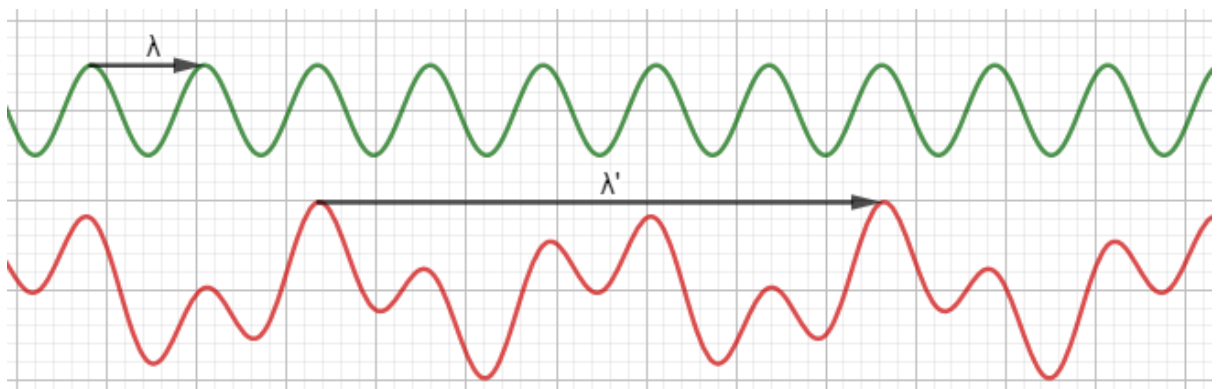
La periodicitat d'aquestes ones s'identifica fàcilment amb la repetició consecutiva d'un mateix "dibuix". Cada "dibuix" s'anomena cicle.



Imatge 22: Exemple gràfic del cicle

### 2.1.1.1 Longitud

La longitud d'ona ( $\lambda$ ) és la distància entre l'inici i el final d'un període sencer, és a dir, l'espai que separa dos punts amb un moviment idèntic. La seva unitat és el metre (m).



Imatge 23: Exemple gràfic de la longitud d'ona.

### 2.1.1.2 Freqüència

La freqüència d'ona ( $f$ ) és el nombre de cicles complets que succeeixen per unitat de temps (el segon). Aquesta unitat són els Hertz (Hz).

Està relacionada de manera inversament proporcional amb la longitud d'ona de la següent manera:

$$v = f * \lambda$$

Així doncs, la longitud d'ona i la freqüència donen en moltes ocasions el mateix tipus d'informació, que es pot transformar coneixent la velocitat del medi en qüestió. En l'aire, la velocitat de les ones sonores és de 343 m/s. En els sòlids, depèn de l'elasticitat i la densitat del medi, així com de la temperatura.

### 2.1.1.3 Període

En tot moviment periòdic, s'anomena període ( $T$ ) al temps que dura un cicle ( $n$ ). El període és la magnitud inversa de la freqüència.

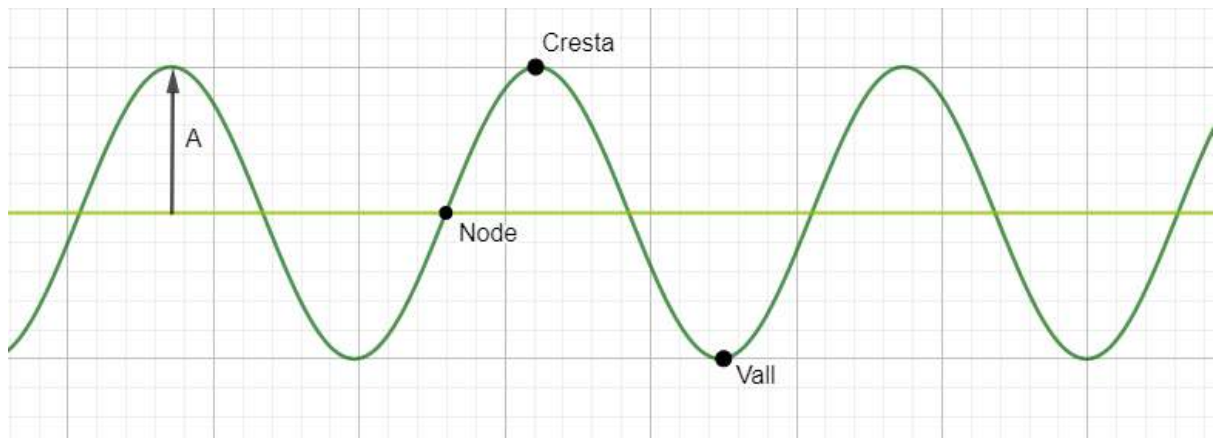
$$f = n / \Delta t ; T = \Delta t / n$$

$$f = 1 / T ; T = 1 / f$$

### 2.1.1.4 Amplitud

L'amplitud d'una ona ( $A$ ) mesura el canvi que es produeix a cada oscil·lació respecte el valor mitjà.

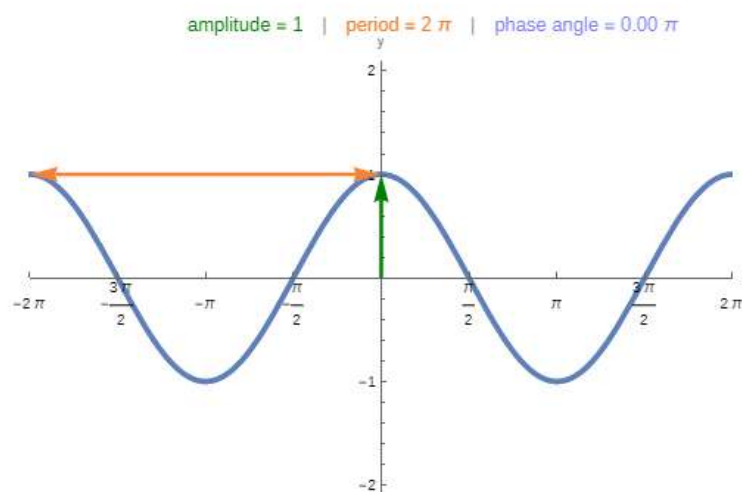
El punt de màxima amplitud positiva s'anomena cresta, el punt de màxima amplitud negativa s'anomena vall, i el punt on l'ona s'anul·la per passar del valor positiu al negatiu s'anomena node.



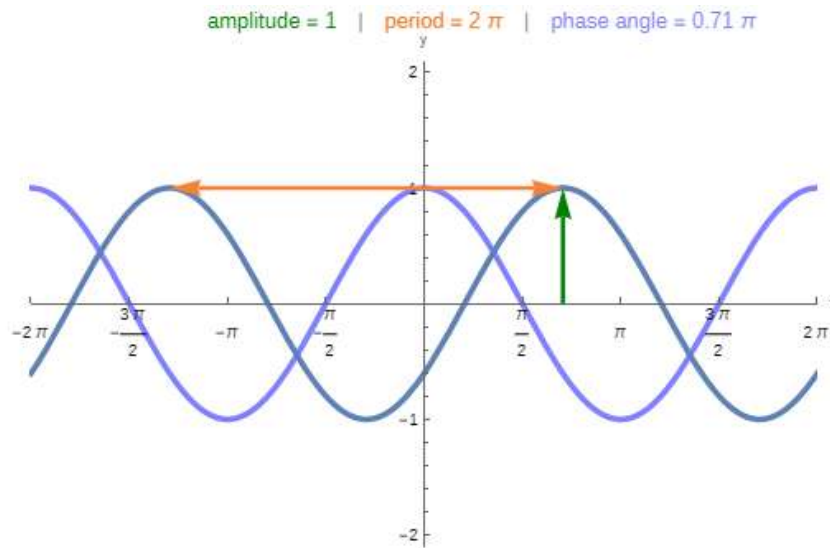
Imatge 24: Exemple gràfic de l'amplitud d'ona, la cresta, el node i la vall.

### 2.1.1.5 La fase

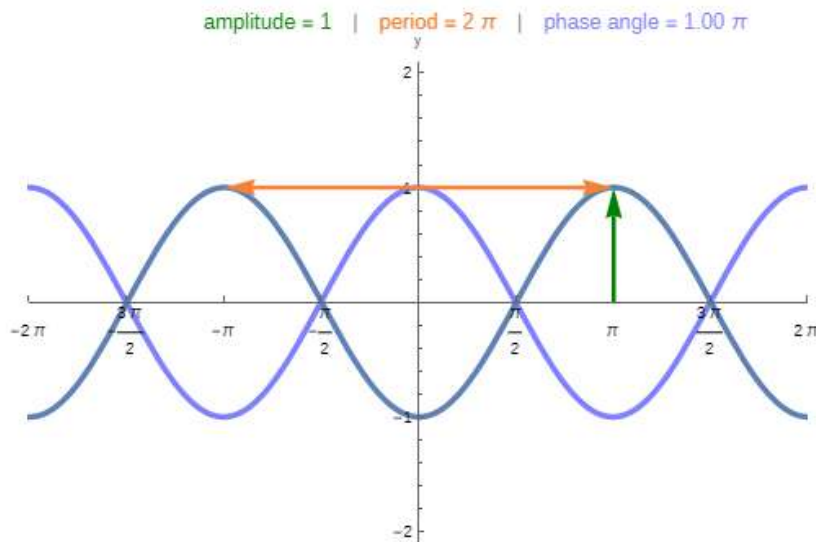
La fase és l'estat d'oscil·lació en què es troba l'ona en un cicle. Pren importància quan es consideren dues o més ones. Dues oscil·lacions idèntiques estan en fase quan els seus estats coincideixen exactament per a cada instant de temps. Si les oscil·lacions no coincideixen exactament, llavors estan desfasades. Les fases se solen expressar com a angle, en graus o radians: en les gràfiques sinusoidals, un cicle complet correspon a  $360^\circ$  o  $2\pi$  rad. En el cas en què dues oscil·lacions es troben en desfasades mig cicle ( $180^\circ$ , o bé  $\pi$  rad), es diu que estan en oposició de fase.



Imatge 25: Dues ones idèntiques en fase.



Imatge 26: Dues ones idèntiques desfasades  $0.71\pi$  rad.



Imatge 27: Dues ones idèntiques en oposició de fase.

Alguns desfasaments es mantenen constants al llarg del temps, d'altres no.

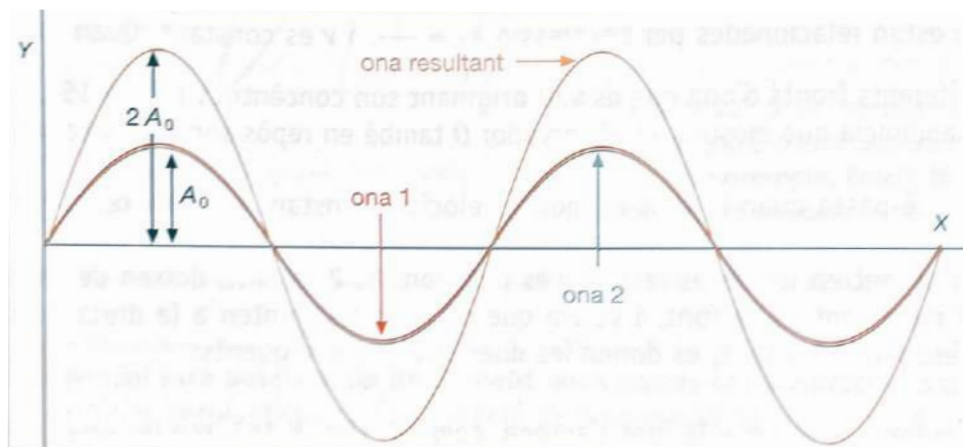
## 2.1.2 La superposició d'ones

En la física acústica és molt important la superposició d'ones. És una característica del moviment ondulatori que es dona quan dues ones coincideixen en l'espai i el temps. Això genera una ona resultant diferent de les inicials.

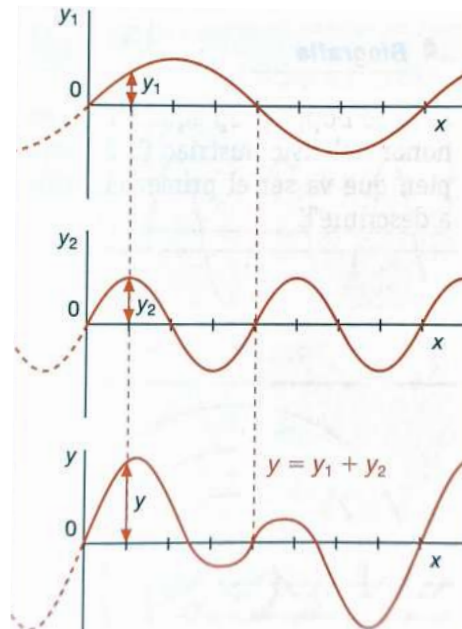
Es regeix pel **principi de superposició**:

Quan dues o més ones arriben a un mateix punt i al mateix temps, la perturbació resultant és igual a la suma de les perturbacions individuals (de cada una de les ones) en aquest punt.

És a dir, l'amplada ( $y$ ) de l'ona resultant en un punt determinat, és la suma de les amplades  $y_1$  i  $y_2$  en el mateix punt.



Imatge 28: Superposició de dues ones idèntiques en fase.



Imatge 29: Superposició de dues ones d'amplituds i freqüències diferents.

El principi de superposició és el fonament de diferents fenòmens. N'és un exemple la interferència d'ones, que es dona quan dues ones provinents d'un focus diferent coincideixen en un punt.

La suma de les amplituds de les ones que interfereixen dona lloc a tres casos diferents d'interferència:

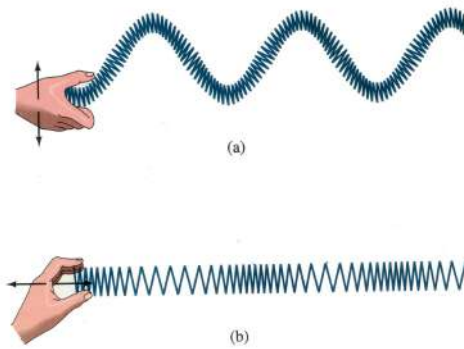
- **Interferència constructiva.** Es dona en els punts en què l'amplitud resultant és un màxim en valor absolut.
- **Interferència destructiva.** Es dona en els punts en què l'amplitud resultant és nul·la.
- **Interferència parcialment constructiva.** Es donarà en la resta de casos, quan la interferència estigui en la gradació entre constructiva i destructiva.

Encara que generin una pertorbació resultant durant l'instant en què es troben, un cop deixen de coincidir en l'espai i el temps cada ona segueix propagant-se per separat segons la seva naturalesa.

### 2.1.3 L'ona sonora

L'ona sonora és una ona mecànica, és a dir, a diferència de les ones electromagnètiques, necessita un medi per desplaçar-se; per molt que vibri un cos, si no està envoltat de partícules físiques a les que empènyer és impossible que origini cap so.

A banda de mecànica, l'ona sonora també es pot classificar com a ona longitudinal. Existeixen ones longitudinals i ones transversals, en funció de la direcció del desplaçament del medi en relació amb el desplaçament de l'ona. Si les partícules transmissores de l'ona oscil·len en direcció perpendicular a la direcció en la qual es propaga l'ona, es parla d'ones transversals. Si ho fan en la mateixa direcció, com passa en les ones sonores, es tracta d'ones longitudinals.



Imatge 30: Exemple gràfic d'ona transversal (a) i d'ona longitudinal (b).

En l'ona sonora, la freqüència es tradueix en el to del so. Quanta més freqüència té, més agut és.

L'amplitud es tradueix en la intensitat del so, és a dir, en el volum. Per expressar la intensitat del so s'empren els decibels (dB), una unitat logarítmica que expressa la magnitud d'alteració d'alguna quantitat física respecte a un nivell de referència. En acústica, expressen el nivell de pressió acústica, i se'n situa el nivell de referència (0 dB) al llindar de la percepció humana.

La intensitat sonora es redueix amb la distància a la font: disminueix 6 decibels cada vegada que es duplica la distància a què es troba la font sonora. Un so també pot augmentar la intensitat al travessar cossos que en provoquen la ressonància. Així doncs, mentre la freqüència d'una ona sonora és constant en tot el seu recorregut, l'amplitud d'ona és variable.

La forma de l'ona sonora també influeix en el seu so, i ho fa a través del timbre. El timbre és explicat de manera detallada a l'apartat 2.2.2 d'aquest treball.

## 2.1.4 La percepció humana del so

### 2.1.4.1 L'espectre audible

L'oïda humana sana permet detectar un gran rang de freqüències: totes les compreses entre 20 i 20.000 Hertz. Això correspon aproximadament a 10 octaves musicals. L'ésser humà, doncs, és capaç de percebre les vibracions dins aquest rang.

Aquest rang s'anomena l'espectre audible, encara que amb els anys l'oïda es desgasta i per tant no tots els humans són capaços de percebre'n totes les freqüències.

Les vibracions que s'escapen de l'espectre audible s'anomenen ultrasons (freqüències majors a 20.000 Hz) i infrasons (freqüències menors a 20 Hz). Són molt freqüents a la natura i, últimament, en la tecnologia. L'exemple més conegut d'ultrasò en la natura és el que usen alguns mamífers com el rat-penat, el ratolí o el dofí com a eina de localització i orientació. Aquests animals són capaços de generar i captar ultrasons (el límit d'audició del rat-penat és superior als 110.000 Hz), de manera que capten els obstacles del seu voltant quan el so generat per ells mateixos hi rebotja. Pel que fa a la tecnologia, els ultrasons són molt usats en medicina: per exemple en ecografies, o en amplituds més amples i utilitzant l'energia més elevada donada per l'alta freqüència, per trencar o desfer pedres en el ronyó. Els infrasons, per la seva banda, s'originen en molts casos en fenòmens geològics com ara allaus, terratrèmols o erupcions volcàniques. Es poden detectar mitjançant la tecnologia.

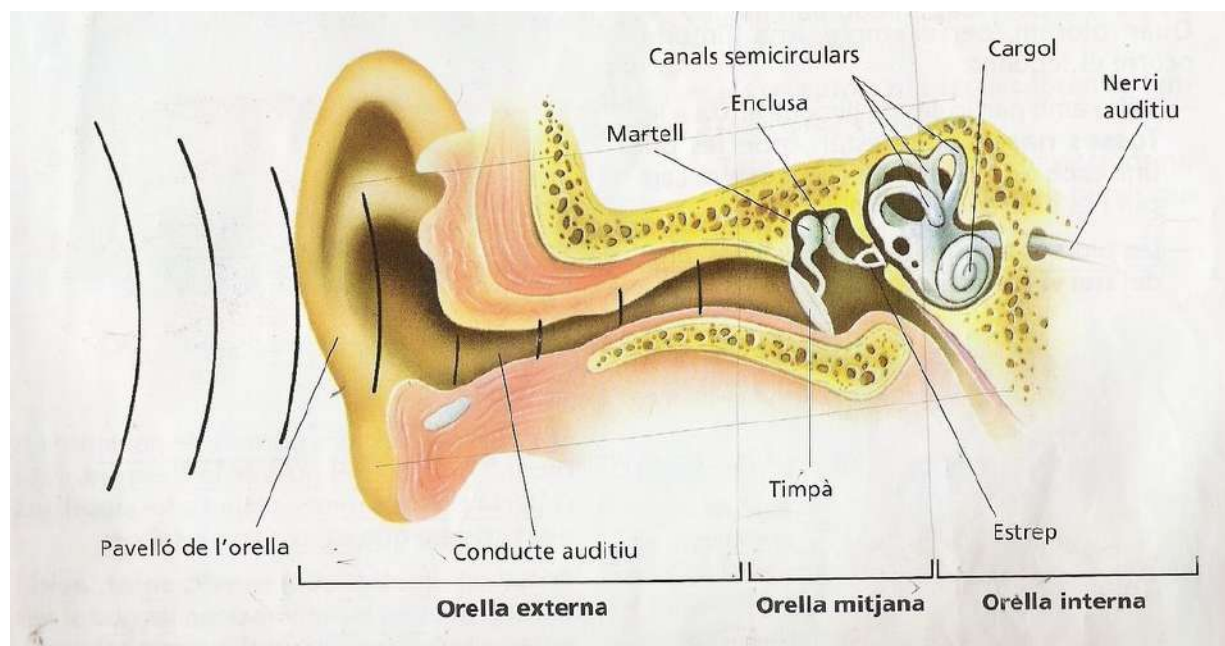
#### **2.1.4.2 Explicació breu del funcionament de l'oïda humana**

L'òrgan de l'orella té la funció d'analitzar les freqüències i intensitats de les ones mecàniques sonores que detecta. Aquesta informació es transmet al cervell, on s'interpreten els sons rebuts a l'orella.

Es pot dividir l'orella en tres parts:

1. L'orella externa: el pavelló auditiu, el conducte auditiu i la membrana timpànica.
2. L'orella mitjana: el martell, l'enclusa i l'estrep (cadena dels tres ossets)
3. L'orella interna: la còclea (indicada a la imatge 31 com a cargol) i els conductes semicirculars.





Imatge 31: Esquema amb les parts de l'orella humana

Les ones sonores arriben a l'orella pel pavelló auditiu, que té una forma que ajuda a que rebotin i es dirigeixin al conducte auditiu. Allà el so arriba a la membrana timpànica, que està connectada als tres ossets: el martell, l'enclusa i l'estrep. Aquests transmeten les vibracions inferiors a 20.000 Hz a la finestra coclear, a la base de la còclea. La còclea és com un espiral ple de líquid amb una membrana anomenada membrana basiliar disposada longitudinalment, amb un gran nombre de fibres. Les fibres de la membrana basiliar tenen una longitud major a mesura que s'endinsen en la còclea, de manera que cadascuna té una freqüència fonamental concreta. L'impuls mecànic que arriba a la còclea fa entrar en ressonància diferents fibres segons les seves freqüències. La còclea transforma aquests impulsos mecànics en impulsos elèctrics que es traslladen pel nervi coclear fins al cervell.

## 2.2 La música i el so

La música és l'art acústic, que resulta d'ordenar i jugar amb els sons per provocar el plaer humà. El que permet transformar el so en música és l'ordre, l'estandardització d'un llenguatge musical unificat que permet escriure la música, i així, immortalitzar-la.

La música occidental parteix d'una escala musical amb dotze tons, amb uns fonaments matemàtics i físics, feta a mida pel plaer auditiu humà.

## 2.2.1 L'escala tonal occidental

La llegenda diu que Pitàgores va ser el primer en racionalitzar el so. Ho va fer amb un monocordi, un instrument primari que consisteix en un segment de corda tensat pels dos extrems sobre una fusta. La vibració de la corda donada pel pinçament, el fregament o el pulsament origina un so, i la disminució de la longitud d'aquesta corda provoca freqüències més agudes. Les notes de l'escala musical s'obtenen fent vibrar una sèrie de proporcions exactes de la corda inicial, de manera que es crea una seqüència de freqüències amb un sentit coherent tant per la nostra percepció del so com matemàticament.

Al tercer capítol d'aquest treball (apartat 3.1) he recreat el monocordi i he pogut trobar les notes seguint les proporcions pitagòriques de l'escala musical.

L'escala musical ideada pels Pitagòrics té vuit notes i comença a partir del do, s'anomena l'escala natural. Les relacions entre les notes són d'un to, excepte en el cas del mi→fa i el si→do, que es diferencien només en un semitò. Més endavant es van afegir les alteracions a les notes musicals, aconseguint que es pogués reproduir el so de l'escala natural en tots els tons.

El fonament de l'escala musical rau en els intervals entre dos sons, el que és el mateix que les relacions de proporció freqüencial entre les notes.

### 2.2.1.1 L'octava

L'octava és el fonament de l'escala occidental. Entre dos sons en interval d'octava (inclosos) s'hi comprenen les vuit notes de l'escala musical. L'oïda humana reconeix l'octava d'un to com a la mateixa nota en una versió més aguda, de manera que entre dues notes octavades s'hi comprèn tota la resta de notes de l'escala.

Les freqüències de dos sons separats per un interval d'octava mantenen una relació de 2:1. Per exemple, si el  $La_4$  té una freqüència de 440 Hz, el  $La_3$ , just una octava per sota, té una freqüència de 220 Hz, i el  $La_5$ , just per sobre, 880 Hz. Això és el mateix que dir que les octaves addicionals d'una nota es troben a un múltiple  $2^n$  de la freqüència original.

Es pot observar, doncs, que l'interval més bàsic, intuïtivament, entre dues notes (el del mateix so amb una altura diferent) es dona justament amb el quocient més senzill possible entre les dues freqüències (1:2).

### 2.2.1.2 La relació entre les notes de l'escala

Per donar lloc a l'escala musical, l'interval d'una octava s'ha dividit en dotze notes de freqüència fixa, que mantenen entre elles una relació anomenada "semitò". Si dues freqüències en interval d'octava mantenen una relació de  $2^n$ , la relació de freqüència entre dues notes en interval de semitò (o dues notes consecutives) és de  $\sqrt[12]{2}$ .

Això vol dir que, prenent com a referència la freqüència de qualsevol nota, podem trobar la freqüència de qualsevol altra nota separada  $n$  semitons de l'inicial:

$$f = f_o \cdot \sqrt[12]{2^n}$$

Per exemple, si partim de  $C_4 = 261,63$  Hz, i volem trobar  $F_4$ :

$$n_{C_4 \rightarrow F_4} = +5$$

$$f(F_4) = f(C_4) \cdot \sqrt[12]{2^5}$$

$$f(F_4) = 261,63 \cdot \sqrt[12]{2^5}$$

$$f(F_4) = 349,23 \text{ Hz}$$

La nota de referència que es pren internacionalment és el  $La_4$ , també conegut com a  $La_{440}$  degut a la seva freqüència de 440 Hz. El  $La_{440}$  és la nota central del piano, la nota que donen tots els diapasons, la nota que toca el violí primer amb la que la resta d'orquestra afina... L'existència d'aquesta referència permet el sistema d'afinació temperada igual, i establir una fórmula general de la freqüència d'una nota  $a$  qualsevol:

$$n = \text{nombre de semitons que separen } a \text{ del } La_4$$

$$f(a) = 440 \cdot \sqrt[12]{2^n}$$

### 2.2.1.3 Nomenclatura de les notes de l'escala musical occidental

Hi ha dues nomenclatures actives per a les dotze notes de l'escala musical.

<b>nomenclatura llatina</b>	do	do# o re b	re	re# o mi b	mi	fa	fa# o sol b	sol	sol# o la b	la	la# o si b	si
<b>nomenclatura anglosaxona</b>	C	C# o D b	D	D# o E b	E	F	F# o G b	G	G# o A b	A	A# o B b	B

Taula 2: comparativa de la nomenclatura de les notes de l'escala musical occidental.

La nomenclatura anglosaxona és la internacional, mentres que la nomenclatura llatina és la més tradicional i s'usa principalment a Espanya, França i Itàlia.

#### 2.2.1.4 Taula general de freqüències en afinació temperada igual

La taula a continuació recull les freqüències de totes les notes que s'usen en la música. Les seves freqüències van dels 30 als 4190 Hz, i són les més habituals de trobar en peces musicals. Els subíndexs indiquen a quina escala pertany cada nota i canvien a partir de les notes do ( C ), ja que és la nota que comença l'escala natural.

Nota	Freq. (Hz)	Nota	Freq. (Hz)	Nota	Freq. (Hz)	Nota	Freq. (Hz)
A <sub>0</sub>	27,50	G <sub>2</sub>	98,00	F <sub>4</sub>	349,23	D# <sub>6</sub>	1244,51
A# <sub>0</sub>	29,16	G# <sub>2</sub>	103,83	F# <sub>4</sub>	369,99	E <sub>6</sub>	1318,51
B <sub>0</sub>	30,89	A <sub>2</sub>	110,00	G <sub>4</sub>	392,00	F <sub>6</sub>	1396,91
C <sub>1</sub>	32,70	A# <sub>2</sub>	116,54	G# <sub>4</sub>	415,30	F# <sub>6</sub>	1479,98
C# <sub>1</sub>	34,65	B <sub>2</sub>	123,47	<b>A<sub>4</sub></b>	<b>440,00</b>	G <sub>6</sub>	1567,98
D <sub>1</sub>	36,71	C <sub>3</sub>	130,81	A# <sub>4</sub>	466,16	G# <sub>6</sub>	1661,22
D# <sub>1</sub>	38,89	C# <sub>3</sub>	138,59	B <sub>4</sub>	493,88	A <sub>6</sub>	1760,00
E <sub>1</sub>	41,20	D <sub>3</sub>	146,83	C <sub>5</sub>	523,25	A# <sub>6</sub>	1864,65
F <sub>1</sub>	43,65	D# <sub>3</sub>	155,56	C# <sub>5</sub>	554,37	B <sub>6</sub>	1975,53
F# <sub>1</sub>	46,25	E <sub>3</sub>	164,81	D <sub>5</sub>	587,33	C <sub>7</sub>	2093,00
G <sub>1</sub>	49,00	F <sub>3</sub>	174,61	D# <sub>5</sub>	622,25	C# <sub>7</sub>	2217,46
G# <sub>1</sub>	51,91	F# <sub>3</sub>	185,00	E <sub>5</sub>	659,26	D <sub>7</sub>	2349,32
A <sub>1</sub>	55,00	G <sub>3</sub>	196,00	F <sub>5</sub>	698,46	D# <sub>7</sub>	2489,02
A# <sub>1</sub>	58,27	G# <sub>3</sub>	207,65	F# <sub>5</sub>	739,99	E <sub>7</sub>	2637,02
B <sub>1</sub>	61,74	A <sub>3</sub>	220,00	G <sub>5</sub>	783,99	F <sub>7</sub>	2793,83
C <sub>2</sub>	65,41	A# <sub>3</sub>	233,08	G# <sub>5</sub>	830,61	F# <sub>7</sub>	2959,96
C# <sub>2</sub>	69,30	B <sub>3</sub>	246,94	A <sub>5</sub>	880,00	G <sub>7</sub>	3135,96
D <sub>2</sub>	73,42	C <sub>4</sub>	261,63	A# <sub>5</sub>	932,33	G# <sub>7</sub>	3322,44
D# <sub>2</sub>	77,78	C# <sub>4</sub>	277,18	B <sub>5</sub>	987,77	A <sub>7</sub>	3520,00
E <sub>2</sub>	82,41	D <sub>4</sub>	293,66	C <sub>6</sub>	1046,50	A# <sub>7</sub>	3729,31
F <sub>2</sub>	87,31	D# <sub>4</sub>	311,13	C# <sub>6</sub>	1108,73	B <sub>7</sub>	3951,06
F# <sub>2</sub>	92,50	E <sub>4</sub>	329,63	D <sub>6</sub>	1174,66	C <sub>8</sub>	4186,00

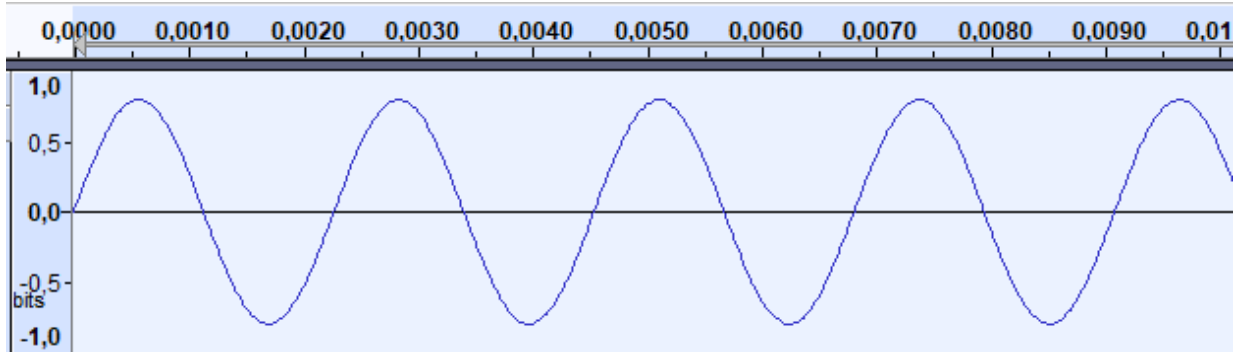
Taula 3: Freqüència de les notes musicals en afinació temperada igual

## 2.2.2 El secret dels instruments musicals: el timbre

El timbre és la característica que diferencia el so dels tons que comparteixen altura i freqüència, és únic en cada sistema sonor i recull totes les característiques que no tenen relació amb els atributs ja mencionats, com la intensitat, l'altura i la duració.

El timbre d'un instrument es deu a la complexitat de les ones que genera. La música i els sons que se senten en el dia a dia no sonen en una única freqüència, sinó que estan formats d'una freqüència fonamental que defineix l'altura del so que l'oient percep i tots els seus harmònics, que són múltiples sencers de la freqüència d'ona fonamental. El que caracteritza l'instrument és el nombre i l'amplitud dels diferents harmònics o sobretons.

Un so pur, sense harmònics ni variacions d'amplitud, té la forma d'ona (amplitud del so respecte al temps) mostrada a la imatge 32. S'ha enllaçat un fitxer d'àudio amb el so de l'ona pura al codi QR de la imatge 33.

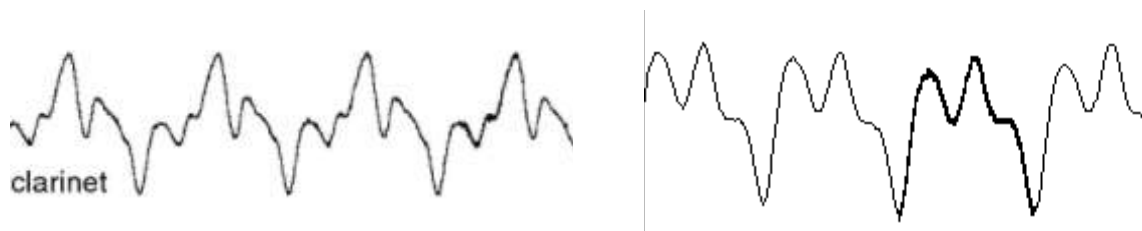


Imatge 32: Forma d'ona d'un to pur.



Imatge 33: Codi QR que condueix a un [fitxer d'àudio amb el so d'un la<sub>4</sub> pur](#).

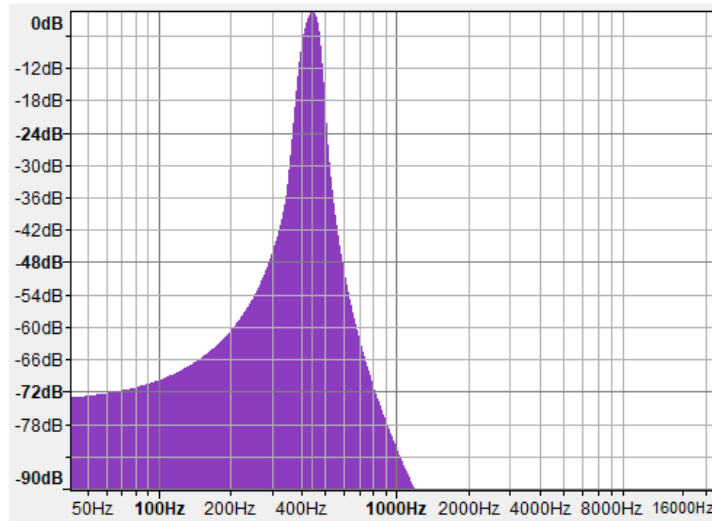
El contrast amb la forma d'ona de diferents instruments musicals és molt notable:



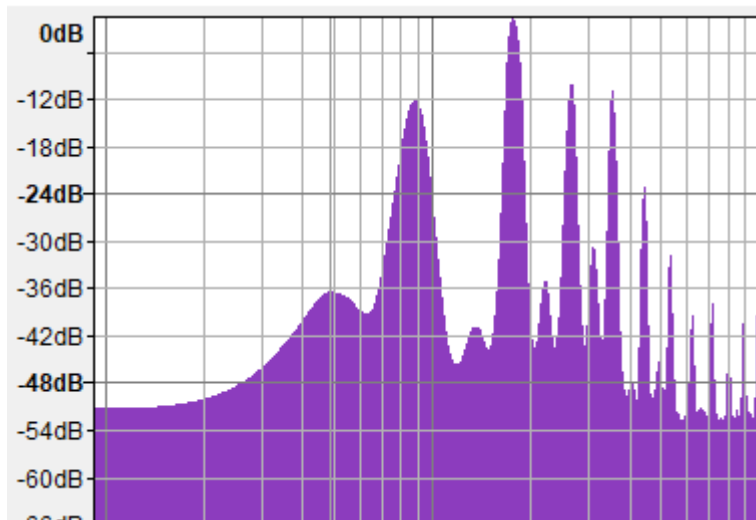
Imatges 34 i 35: formes d'ona respectives d'un clarinet i una flauta.

A banda de l'amplitud en funció del temps, el timbre d'una ona es pot representar a l'espectre del so. L'espectre d'un so és la representació de l'amplitud de les freqüències que el

conformen. La imatge 36 mostra l'espectre d'un so pur, que consta només d'una freqüència, i la imatge 37 mostra l'espectre del so d'un violí, que és un instrument molt complex amb una gran quantitat d'harmònics.



Imatge 36: Espectre del so d'un  $la_4$  pur.



Imatge 37: Espectre del so d'un  $la_5$  tocat amb un violí.

Dins el marc pràctic d'aquest treball, a partir de l'apartat 3.3.5, es fa un anàlisi comparativa tímbrica del violí i el monocordi en els paràmetres de la forma d'ona i l'espectre sonor.

## 2.3 El comportament del so en els violins

### 2.3.1 La vibració de les cordes

En els instruments de corda, les cordes són l'origen de la vibració. L'intèrpret del violí s'encarrega de pressionar la corda amb un dit de la mà esquerra, modificant-ne la llargada i així la freqüència fonamental, i amb la mà dreta, usant l'arquet, frega la mateixa corda per provocar-ne la vibració.

El tipus de vibració que s'origina en les cordes dels instruments i el perquè de les freqüències a les que sonen té a veure amb el fenomen de les ones estacionàries.

#### 2.3.1.1 Les ones estacionàries

Les ones estacionàries són un cas d'interferència d'ones, que es produeix quan una ona troba un obstacle que n'impedeix la propagació i genera una ona reflectida que interfereix amb l'ona incident. L'ona resultant és una ona que roman en una regió limitada (la part vibrant de la corda de l'instrument), una ona estacionària.

L'ona reflectida té la mateixa amplitud, freqüència i velocitat que l'ona incident, però sentit oposat. Quan una ona es reflecteix, canvia la seva fase  $180^\circ$  o  $\pi$  rad, per tant en els extrems de l'ona estacionària sempre s'hi produeix una interferència destructiva i s'hi origina un **node**, és a dir, un punt immòbil, d'amplitud zero.

En els instruments de corda, les cordes estan fixades per dos extrems, per tant l'ona estacionària està limitada per dos nodes a una certa distància ( $L$ ). Aquests dos nodes suposen una limitació per l'oscil·lació de la corda, ja que, per tal que es pugui perpetuar, l'ona amb la que la corda vibri haurà de ser d'una freqüència capaç d'adaptar-se als dos nodes dels extrems. Així doncs, només hi ha certes freqüències per les quals es poden produir ones estacionàries, i són aquelles en què l'ona reflectida en superposició amb l'ona incident dona una interferència constructiva que reforça l'amplitud d'ambdues.

Aquestes s'anomenen freqüències de ressonància de la corda, modes de vibració o bé **harmònics**.

La longitud dels harmònics verifica la següent expressió:



$$\lambda_n = 2L / n ,$$

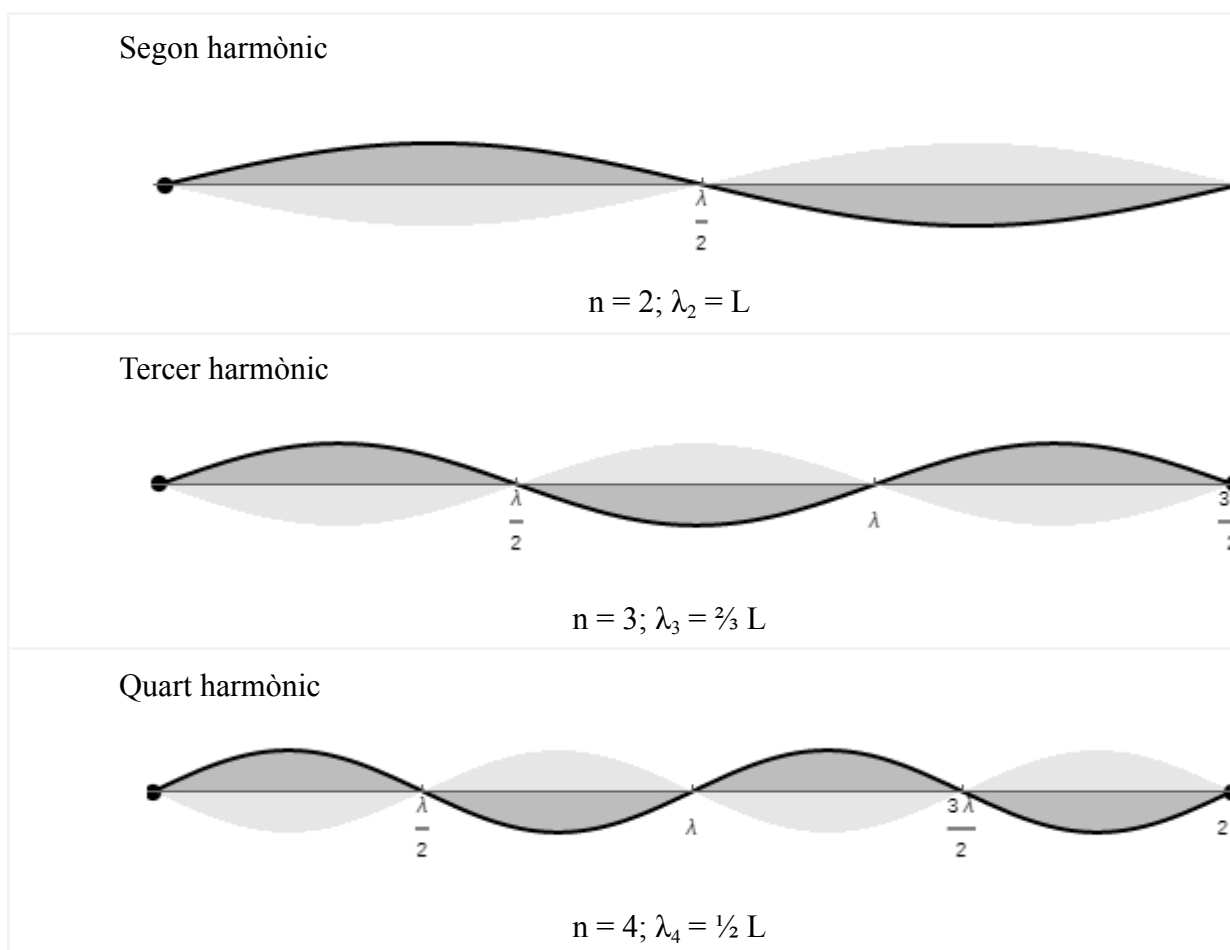
on n és el nombre d'antinodes o ventres.

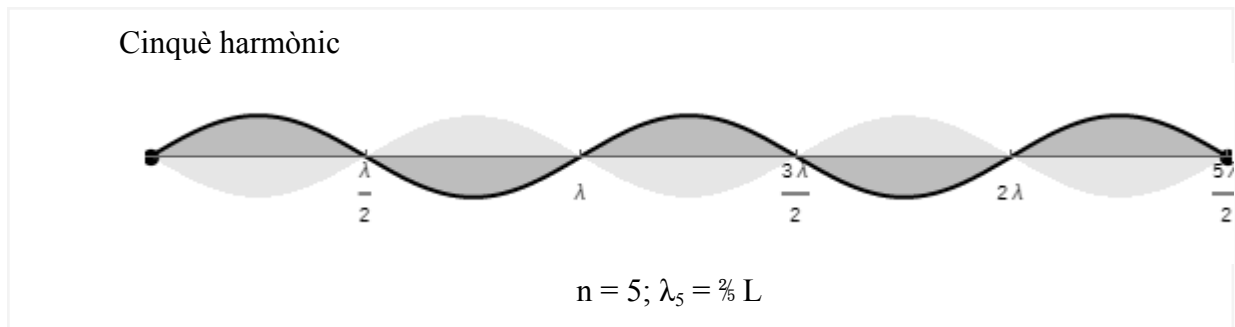
La freqüència de ressonància més petita que es pot donar és aquella per la qual L correspon a mitja longitud d'ona. Aquesta és la freqüència fonamental o l'harmònic fonamental de la corda, i consta de dos nodes i un únic ventre o antinode. També el podem denominar primer harmònic ( $\lambda_1$ ).

El primer harmònic compleix  $n = 1$ ;  $\lambda_1 = 2L$



La resta de modes de vibració s'anomenen harmònics superiors, i consten de múltiples ventres.





Taula 4: Diagrama de les ones estacionàries produïdes en una corda fixa pels dos extrems.

### 2.3.1.2 Càlcul de les freqüències d'una corda.

En apartats anteriors s'ha especificat que la longitud d'ona es relaciona amb la freqüència a través de la velocitat d'ona.

$$v = \lambda * f$$

La velocitat d'ona en una corda depèn de la seva tensió i de la massa per unitat de longitud ( $\mu$ ), seguint la següent relació:

$$v = \sqrt{\frac{\text{tensió}}{\mu}}$$

Relacionant les tres fórmules anteriors s'arriba a la fórmula per la freqüència de l'ona estacionària.

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{\text{tensió}}{\mu}}$$

Es substitueix  $n$  segons l'harmònic que es vol trobar. Per al primer harmònic,  $n = 1$ , i així consecutivament. El valor d' $n$  és sempre natural. Així doncs, és important destacar que els harmònics d'una corda estan quantitzats com a múltiples d'una freqüència fonamental  $f_1$ .

### 2.3.1.3 So de l'ona estacionària

En la corda subjectada pels dos extrems s'hi pot donar el so de la seva freqüència fonamental i de tots els harmònics superiors. L'amplitud d'ona és més petita a cada harmònic superior. Així doncs, el so final és reconeixible per la freqüència fonamental, que sona amb més intensitat que totes les altres, però també s'hi poden identificar les freqüències superiors amb una menor intensitat.

La intensitat dels diferents harmònics és el que caracteritza el so concret de cada instrument musical, de cada veu. A l'espectograma d'un so s'hi poden identificar els harmònics, en forma de pics més petits (de menor amplitud) que el de la freqüència fonamental però amb exactament la mateixa forma. L'amplitud d'aquests pics vindrà donada per la ressonància de la resta del cos de l'instrument, i determinarà la riquesa del so.

### 2.3.2 La vibració del cos del violí

La ressonància acústica és un fenomen físic pel qual un cos elàstic entra en vibració per influència d'una altra vibració coincident amb les seves freqüències naturals. Quan això passa, interfereixen dues ones sonores amb la mateixa freqüència, de manera que s'amplifica l'ona sonora principal.

La vibració del cos del violí a conseqüència de la vibració de les cordes és el factor determinant per l'amplificació i el color del so resultant. El que s'anomena *cos del violí* implica a unes quantes "zones" que vibren amb la seva respectiva ressonància. El conjunt de ressonàncies parcials es poden separar en modes de vibració. Els modes són ones estacionàries que tenen lloc en un espai tancat o determinat, i cada mode és una vibració de certa part de l'instrument de la que es poden estudiar les formes i les freqüències.

La tasca d'aquestes ressonàncies parcials és amplificar selectivament els harmònics de la corda del violí, de manera que l'espectre del so final adquireix diferents formes depenent de quina ressonància hi predomina.

Els fenòmens acústics que es donen en el cos del violí, però, són molt complexos i resulta molt difícil identificar-los per separat. Això es deu parcialment a l'ànima, que connecta la tapa amb el fons i amb l'interior de la caixa de ressonància, de manera que la vibració independent de cadascuna d'aquestes zones és molt difícil de distingir. A més, les formes dels harmònics parcials tendeixen a diferir quan es tracta de diferents violins, degut a una sèrie de factors com la singularitat de la fusta i l'art amb el que cadascun és construït.

De totes maneres, sí que s'han pogut realitzar, al llarg del temps, diferents sistemes de nomenclatura de les ressonàncies parcials generalitzades del violí. Un d'aquests és l'utilitzat per Erik Jansson, que identifica els modes - les ones estacionàries generades en un espai tancat determinat - d'acord amb el principal element que vibra (la lletra en majúscula) i els numera en el subíndex segons l'altura creixent de la freqüència fonamental del mode.

El sistema d'Erik Jansson distingeix entre:

Air modes ( $A_0, A_1, A_2, \dots$ ): el moviment de l'aire dins la caixa

Top modes ( $T_1, T_2, T_3, \dots$ ): el moviment de la tapa

Back modes ( $B_1, B_2, B_3, \dots$ ): el moviment del fons

Body modes ( $C_0, C_1, C_2, \dots$  també inclou N -de neck-): aquells moviments en els quals la tapa i el fons es mouen de manera similar. La C prové de Corpus.

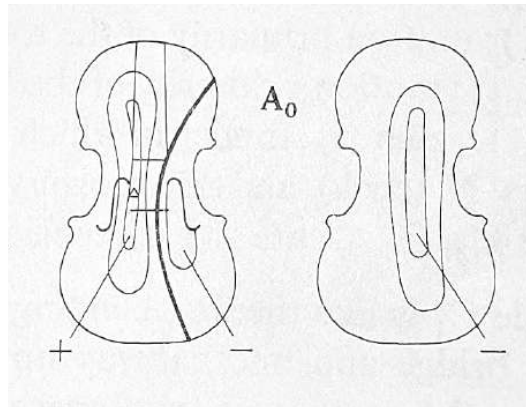
La caracterització científica del so del violí segueix en procés d'investigació, però la suposició principal és que la posició freqüencial de les ressonàncies més baixes del violí en relació amb als pics de les seves cordes lliures és el que determina el so característic del violí. Potser, a la major coincidència de les freqüències de les ressonàncies amb els pics freqüencials de la vibració de les cordes lliures, major és la qualitat de l'instrument.

Els modes de ressonància determinats com als més importants en freqüències baixes són els denominats  $A_0, T_1, C_3$  i  $C_4$ .  $A_0$  és el més consolidat, referent a l'aire provinent de la caixa de ressonància.  $T_1, C_3$  i  $C_4$  es van identificar com a modes importants més tard, en l'observació dels científics Alonso Moral i Jansson en una competició escandinava de luthiers. L'observació va determinar que els violins amb una puntuació més elevada pel que fa a la qualitat corresponien amb els que mostraven una resposta més intensa als tres modes.

A continuació s'exposa una breu caracterització dels quatre modes de més importància en la vibració del cos del violí.

### **2.3.2.1 Mode $A_0$**

Com ja s'ha mencionat, el mode  $A_0$  correspon a la ressonància amb les característiques més consolidades: és la de l'aire de la caixa de ressonància que surt pels forats de les efes. Aquesta té lloc en freqüències entre els 260 i els 300 Hz (és a dir, els tons entre el  $do_4$  i el  $re_4$ ), i és el mode més greu amb importància acústica.

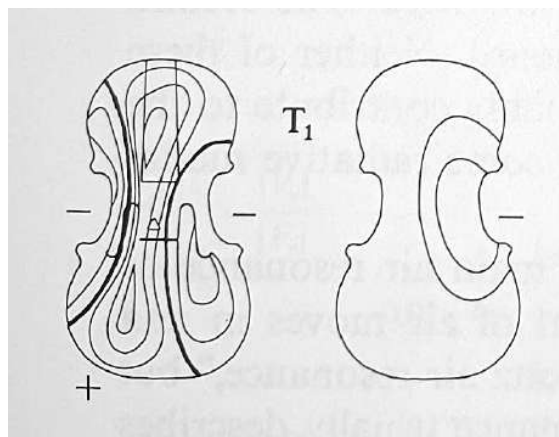


Imatge 38: forma (o distribució d'amplituds) del mode  $A_0$ . La línia fosca és la línia nodal.

### 2.3.2.2 Mode $T_1$

Correspon al moviment fonamental de la tapa del violí. En diversos experiments s'ha trobat que podria actuar com a ressonador acoblat amb el mode  $C_3$ ; les respectives freqüències naturals es pertanyen al mateix rang. Les resonàncies acoblades tenen un funcionament diferent que les separades: mentre que les segones s'uneixen en un sol pic freqüencial, les resonàncies acoblades sempre formen dos pics separats.

La freqüència del mode  $T_1$  volta els 460 Hz.

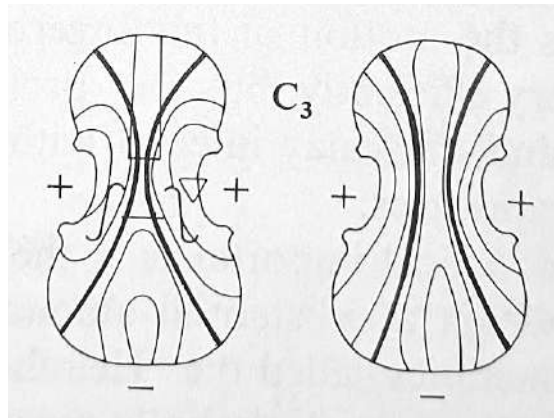


Imatge 39: forma del mode  $T_1$

### 2.3.3.3 Mode $C_3$

El mode  $C_3$  es troba d'una manera molt més dominant al so dels violins bons, respecte als de menys qualitat. En el mode  $C_3$  les vibracions de la tapa i el fons són iguals i estan en fase, i té quatre nodes, dos als extrems verticals de la caixa i dos als extrems horitzontals.

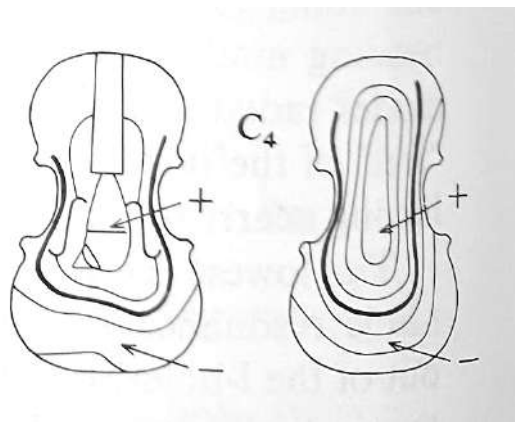
Té un rang de freqüència entre els 400 i els 500 Hz. Se'n pot destacar l'avenença amb el la 440.



Imatge 40: forma del mode  $C_3$

#### 2.3.2.4 Mode $C_4$

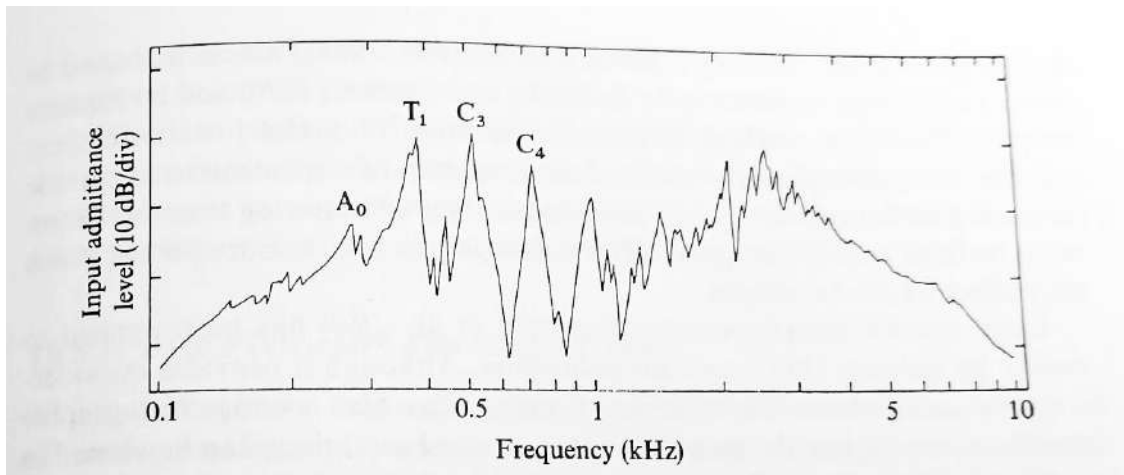
El mode  $C_4$  mostra un pic notable pel que fa al moviment però té poca afectació sonora. Es dona en freqüències al voltant de 700 Hz.



Imatge 41: forma del mode  $C_4$

#### 2.3.2.5 Identificació dels pics dels modes principals

La imatge a continuació mostra l'entrada de moviment en un detector col·locat al costat de la barra harmònica d'un violí Guarneri. S'hi identifiquen els quatre pics mencionats.



Imatge 42: Identificació dels modes ressonants d'un violí en un espectrograma mecànic

### 2.3.3 El moviment del pont

La funció principal del pont és transformar el moviment de les cordes vibrants en força motriu periòdica, que s'aplica al cos de l'instrument mitjançant els dos peus que mantenen contacte amb la tapa. A més, la seva acció amplifica el so d'un elevat rang de freqüències.

Per fer-ho, el pont vibra de manera longitudinal, flexural i torsional al mateix temps, i té una elevada quantitat de modes de vibració.

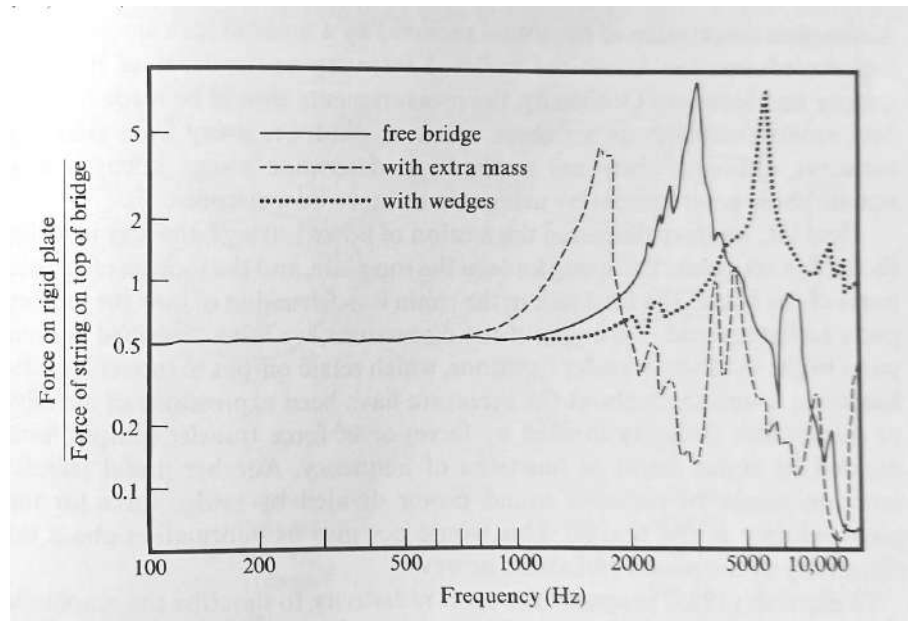
La forma i la massa del pont són determinants pel que fa a la sonoritat de l'instrument final.

La seva silueta afecta principalment a l'amplificació del so. Un científic anomenat Savart, el 1840, explicava que un violí amb un pont fet d'una peça de fusta massissa pràcticament no sonaria. Les primeres millores es manifestarien quan se li donessin dos peus al pont; aquests provoquen que la força es traspassi a la caixa tant per la banda de la barra harmònica com per la banda de l'ànima. La qualitat del so incrementaria notablement a mida que anessim modificant la silueta del pont; primer tallant-hi les dues ranures laterals i progressivament transformant-lo fins a obtenir la forma actual.

L'altra afectació principal que té la peça en el so final és més tímbrica: té a veure amb les freqüències dominants i rau en la massa del pont.

Les ressonàncies naturals d'un pont de violí en un suport rígid xifren entre els 3000 i els 6000 Hz. A l'afegir-hi una massa addicional, com podria ser la de la sordina, les ressonàncies

succeeixen a freqüències menors, provocant que en el so final de l'instrument agafin més pes aquestes freqüències més baixes i es pugui percebre un so més “fosc” o “mate”. Pel contrari, una major “brillantor” en el so provocada per un domini de les freqüències més altes no s'aconsegueix amb un pont més fi, que provocaria el traspàs de menys força a la caixa harmònica, sinó que s'aconsegueix donant elasticitat addicional al pont. Una major elasticitat pot ser donada per petites falques col·locades dins dels forats.



Imatge 43: Funció de la transferència de força del pont lliure (línia contínua), amb massa addicional de 1,5 g (línia discontinua) o bé amb elasticitat addicional (línia puntejada), segons el domini freqüencial. Font: *llibre*, dades de Reinecke citades per Müller, 1979

### 2.3.4 El moviment de les tapes del violí

Les tapes del violí configuren una part molt important de l'instrument, i tenen una afectació molt destacable en el so definitiu. Malgrat això, la ciència d'aquestes peces, en el sentit del tipus d'investigació és un camp molt difícil d'investigar degut a la diferència abismal entre els modes de vibració de les tapes lliures amb els de les mateixes tapes integrades a l'instrument.

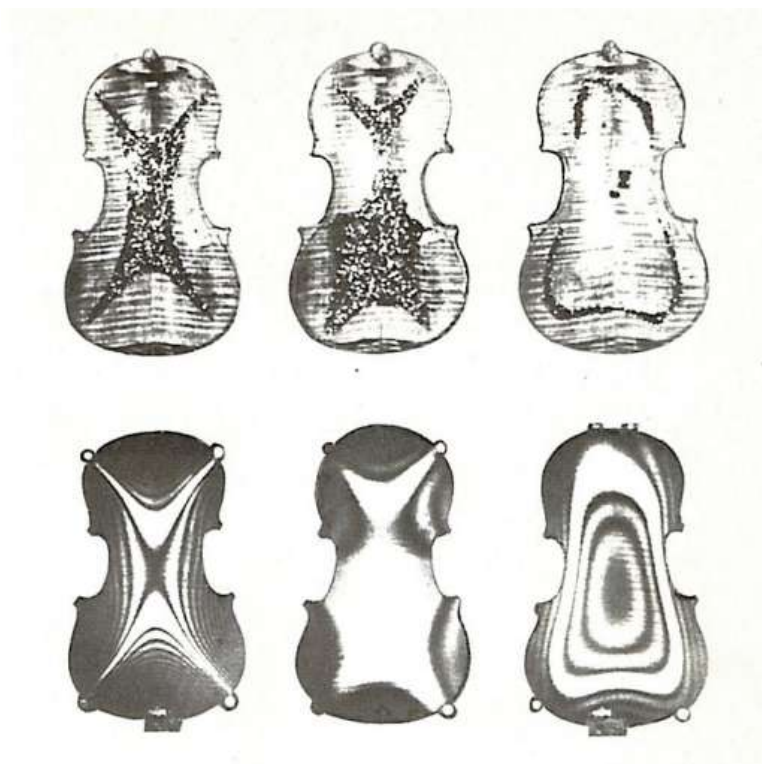
Les transformacions dels modes de les tapes del violí es donen al llarg del procés d'ensamblatge, en el qual les tapes passen per una gran quantitat de canvis de naturalesa i interaccions, com l'envarnissament en diverses capes de la superfície de l'instrument i l'acoblament dels modes de les tapes lliures amb el dels nous modes provocats per



l'ensamblatge de les dues peces amb la resta de la caixa de ressonància: el mode de vibració de l'aire tancat, l'acoblament de les dues tapes enganxades per l'ànima i els aros laterals...

La dificultat de relacionar els modes de vibració inicials amb els finals, però, no neguen que existeixin uns patrons establerts pel què fa a la construcció de tapes, que es fa seguint una afinació determinada relativa entre la tapa i el fons. Les oscil·lacions de la tapa i el fons lliures del violí es donen en forma d'ona estacionària.

Hi ha diferents modes de vibració de les tapes soltes del violí, que es poden identificar mitjà de dues tècniques. La primera és denominada tècnica de Chladni, i consisteix en la col·locació de la tapa lliure en horitzontal, sobre un altaveu, amb la cara interior cara amunt i llimadures escampades per la seva superfície. S'emeten vibracions de freqüència única. Hi ha determinades freqüències en les quals les llimadures de les tapes formen configuracions característiques: són els seus modes de vibració. La tècnica làser permet una observació més nítida d'aquestes configuracions.

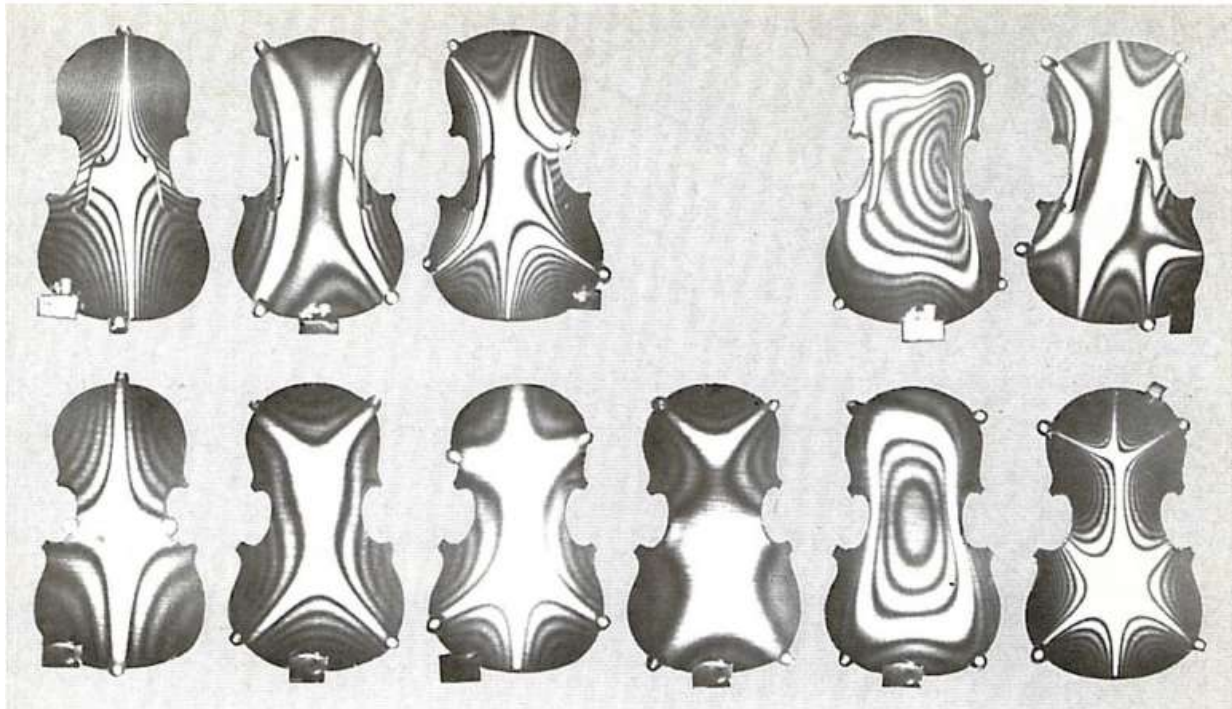


Imatge 44: Tres odes de vibració de les tapes del violí detectats amb les tècniques de Chladni i làser, respectivament. Aquests modes de vibració en les tapes del violí on s'han trobat corresponen a les freqüències de 165, 222 i 348 Hz. La tècnica de Chladni mostra en fosc les zones d'interferències destructives, mentre que el làser les presenta de color

blanc

El que mostren aquestes configuracions són les línies nodals i antinodals dels modes de les tapes del violí. Aquestes línies són aconseguïdes amb la unió dels nodes i els antinodes del mode de vibració en qüestió, i representen d'una manera molt clara la naturalesa de l'ona estacionària en les tapes lliures.

La tapa i el fons lliures presenten una varietat important de modes de vibració. Es poden visualitzar alguns exemples dels modes de vibració d'un bon violí a la imatge X:



Imatge 45: Exemples de modes de vibració de la tapa i el fons del violí.

# 3. Part pràctica: l'anàlisi sonor del violí i del meu instrument

## 3.1 Elaboració pròpia d'un monocordi

### 3.1.1 Motivació

El monocordi és un instrument senzillament format per una corda tensa entre dos extrems sobre una fusta de suport. La seva estructura és tan primària com el seu funcionament, de manera que resulta molt senzill trobar-hi les proporcions matemàtiques que defineixen la música. En moltes ocasions ha estat considerat més proper a un instrument científic que a un instrument musical.

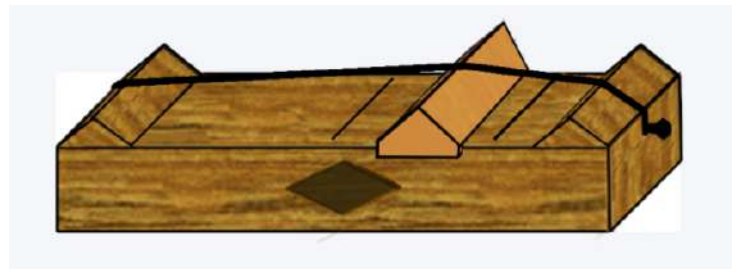
Aquest és el motiu que em va fer veure que el monocordi lligava amb la temàtica i els objectius d'aquest treball, i que experimentar amb un instrument senzill com aquest em podia ser d'utilitat per comprendre, més tard, la complexitat del violí, i establir connexions entre el so dels dos. Certament, no hi havia millor manera d'aconseguir un monocordi a la meva mida que construir-lo jo mateixa.

La meva àvia és una aficionada a la restauració de mobles. Fa una bona temporada que hi dedica el seu temps lliure, i a poc a poc i al llarg dels anys ha anat donant forma a un petit taller fuster a la masia antiga de la família, on portem tota la vida celebrant els dinars familiars. Pensant amb la construcció del monocordi, de seguida em va venir a la ment el talleret de la meva àvia. A banda de disposar de totes les eines, fustes i aparells necessaris per dur-hi a terme quasi qualsevol treball manual i fuster, sempre ha estat per mi un petit paradís misteriós on perdre'm, remenar i experimentar amb la fusta i la creativitat. Crear una part del treball de recerca al taller de la meva àvia em va servir per implicar-hi una altra passió de la meva vida.

### 3.1.2 Construcció del monocordi

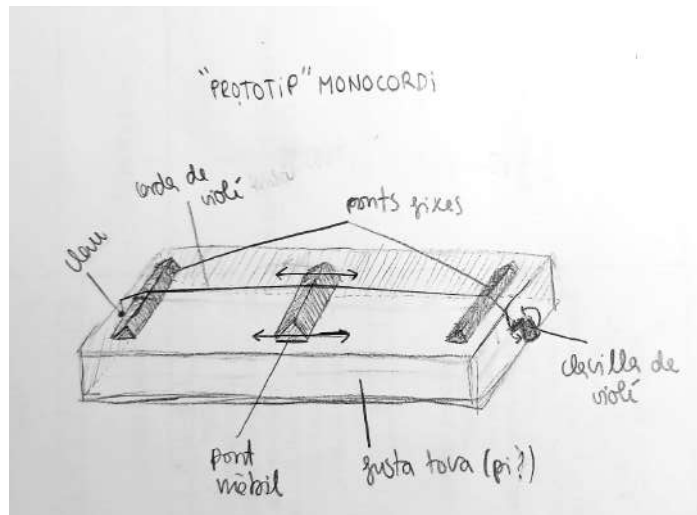
### 3.1.2.1 Plantejament i obtenció de materials

El primer pas per construir el meu monocordi va ser idear-lo. Per això vaig estar buscant idees en muntatges de monocordis per la xarxa. Per sort, el muntatge d'aquest tipus d'instrument és prou popular i comú, de manera que no em va ser difícil trobar prototips amb els que inspirar-me a l'hora de dissenyar el meu propi.



Imatges 46, 47 i 48: algunes inspiracions de monocordis. Pàgines web de referència, respectivament:

Finalment, fusionant les inspiracions trobades per internet vaig imaginar un instrument semblant a aquest:



Imatge 49: Primer esbós del monocordi.

La meua àvia disposava de la fusta adequada en el seu taller, de manera que vaig decidir adaptar les dimensions de l'instrument a les mides de les fustes residuals que la meua àvia tinguéssim i poguessin servir.

Sols em faltava aconseguir la corda de violí i la clavilla per poder-la tensar un cop col·locada a l'instrument. A la botiga de música "Grup Vivaldi" de Girona vaig comprar-hi una corda *la* de violí. No tenien cap clavilla de violí, però van trobar una clavilla de guitarra elèctrica antiga i me la van donar de franc.

Vaig muntar el monocordi amb l'ajuda i supervisió de la meua àvia, que em va ajudar, assessorar i presentar tots els estris. Alguns ja els coneixia, però d'altres no, de manera que va ser un bon aprenentatge. Vam desplaçar la taula de muntatge a l'exterior de la masia, ja que feia molt bon dia i hi havia més llum. Va ser una experiència molt agradable.

### 3.1.2.2 Material i estris

Recullo el material i els estris emprats per la construcció del monocordi a continuació:

#### **MATERIAL:**

- |  |   |
|--|---|
| - Una corda de violí (La)                                    | - Una fusta de pi. 64 x 9,5 x 2,5 cm                |
| - Una clavilla vella de guitarra elèctrica<br>Gisbon Lespaul | - Un llistó de fusta de caoba. 25 x 2,8 x 1,5<br>cm |

- Claus petits
- Cola blanca de fusteria
- Cargol gros foradat perpendicularment

**ESTRIS:**

- Una serra mecànica circular
- Un tornavís
- Una llimadora elèctrica de banda
- Un trepant
- Una polidora
- Una clau anglesa
- Un serjant

**3.1.2.3 Elaboració de les peces i muntatge**

En primer lloc, de la fusta de pi base en vam tallar un cantó en forma de prisma triangular per servir de pont mòbil. Ho vàrem fer amb amb la serra mecànica circular. Després vam tornar a tallar la fusta perquè quedés en forma de prisma regular.



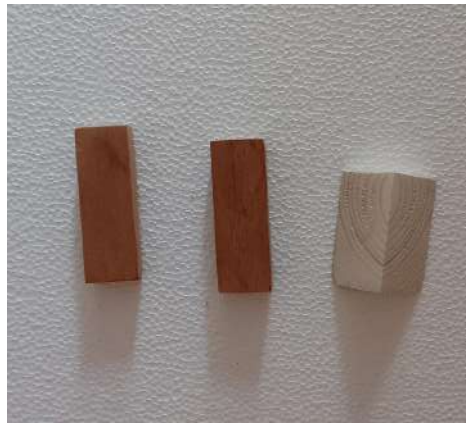
Imatge 50: Serra circular mecànica tallant un tros de la fusta de pi base per fer-ne el pont del monocordi.

Vam tallar dos trossos del llistó de caoba per obtenir-ne els dos ponts fixos, mirant que mesuressin, de llargada, uns dos centímetres menys que l'amplada de la fusta base.

Amb la polidora i la llimadora elèctriques vam polir la superfície de la fusta base de pi i vam llimar les vores de la cara superior per arrodonir-les. Al fer-ho, la pintura va saltar i la fusta va quedar del color natural del pi. També vam polir els tres ponts.



Imatge 51: Fusta base, de pi, llimada i polida.



Imatge 52: Els dos ponts fixes, de caoba, i el pont mòbil, de pi, polits.

Posteriorment, vàrem fixar els dos ponts fixes als extrems de la base. Primer hi vam fer dos forats, un a cadascun dels extrems, amb l'ajuda del trepant. Després els vam encolar a la posició correcta i per últim hi vam enroscar els cargols amb un tornavís.



Imatge 53: Els dos ponts fixes clavats a la base de pi.

El següent pas va ser clavar la corda de violí a l'instrument. Ho vam fer amb un clau petit que vam passar per l'anella de la corda. El vam clavar a una de les cares laterals curtes de la base.



Imatge 54: Un dels laterals del monocordi

L'altre extrem, que havia de poder tensar-se, ens va dur més problemes. En primer lloc vam clavar la clavilla de guitarra a la cara oposada d'on havíem clavat el primer extrem de corda, però quan hi vam intentar passar la corda, va resultar ser massa prima per la clavilla de guitarra, cosa que impossibilitava que aquesta la tensés i destensés.

Vam haver de desclavar la clavilla de guitarra i buscar alternatives. Així doncs, vam acabar desmuntant una simarra que ja no usàvem per utilitzar-ne el clau gros que en subjectava una de les cordes. Després de descargolar-lo de l'instrument, vam fer un forat sobre un dels ponts fixos amb el trepant i vam enroscar el cargol al monocordi amb una clau anglesa.

Es tracta d'un cargol amb un forat que l'atravessa, per on es pot passar i lligar la corda. Enroscant el cargol amb una clau anglesa s'aconsegueix tensar la corda. Va servir molt bé com a substituent de la clavilla de guitarra.







Imatge 55: Simarra, instrument d'on vam treure el caragol que faria de clavilla

Imatge 56: Ampliació dels claus del dhfaosdhfa

Imatge 57: Foradant el pont fixe per clavar-hi el nou cargol

Imatge 58: La "clavilla" definitiva amb la corda tensada. A sota, els forats de la clavilla inicial.

Vam col·locar el pont sota la corda i la vam acabar de tensar per enllestir l'instrument.  
El resultat final va ser el mostrat a les imatges 59, 60 i 61



## 3.2 Proporcions i escala musical en el monocordi

L'origen de l'escala musical com la coneixem està a l'Antiga Grècia, i s'atribueix als Pitagòrics. En la seva recerca de les regularitats numèriques a la natura i amb l'ajuda del monocordi, van establir les proporcions que donen les notes de l'escala musical. Gràcies al monocordi van descobrir la propietat que relaciona la llargada d'un objecte vibrant amb l'altura del seu so, que es compleix en tots els tipus d'objectes. Durant els centenars d'anys previs al descobriment de les freqüències sonores, les notes musicals es van definir per la llargada de l'objecte vibrant.

L'experimentació dels Pitagòrics consistia en la modificació de la longitud de la corda vibrant del monocordi seguint les proporcions bàsiques dels nombres naturals. El resultat demostra que les proporcions numèricament més simples donen lloc als sons més concordants, als intervals més usats i característics de la música occidental.

El producte que van deixar els Pitagòrics amb la seva investigació va ser l'escala natural, de vuit notes, que segueix essent la base de la música, encara que ara existeixin altres notes intermèdies.

Amb el meu monocordi, i seguint les directrius impreses al llibre *El beso y el mordisco* (citat a la bibliografia) recrearé les proporcions de l'escala musical. M'ajudaré de dues tires de paper de la mateixa llargada que la corda vibrant, on dibuixaré, per una banda, les proporcions, i per l'altra, les notes de l'escala musical que n'obtingui. Finalment la tira amb les notes de l'escala musical natural l'enganxaré al monocordi i em servirà de referència per tocar



Imatge 62: procés d'elaboració de l'escala musical en proporcions de llargada

### 3.2.1 Proporcions bàsiques

Les primeres divisions fetes pels Pitagòrics van ser les que seguien els nombres del seu tetrakis sagrat: 1, 2, 3, 4. Aquests quatre nombres eren el fonament de tot el seu pensament i, per tant, també havien de ser els fonaments de la música.

#### **1:1, el to sencer**

La longitud màxima que pot tenir la part vibrant de la corda del meu monocordi és de 35,7 cm. Vaig partir d'aquesta xifra per la resta de proporcions.

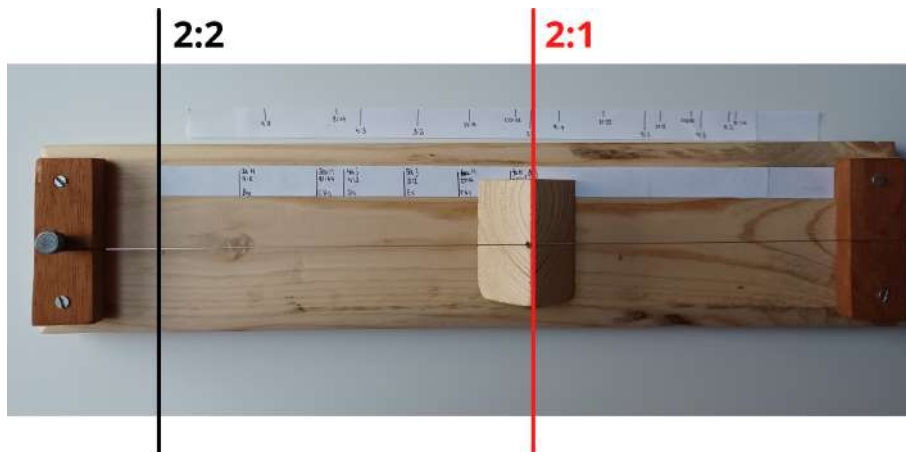


Imatge 63: Esquema de la ona vibrant de la corda del monocordi

L'extrem fixe de la corda representa el 0, i l'extrem on hi ha col·locat el pont mòbil, la unitat sencera de la zona vibrant. Per obtenir la resta de tons de l'escala, vaig buscar les fraccions d'unitat pertinents i vaig marcar degudament la tira de paper de referència.

#### **2:1, l'octava**

Vaig dividir la longitud inicial (35,7 cm), fent una marca a la meitat de la zona vibrant. Així vaig obtenir la longitud que dona l'octava aguda del  $la_4$ .



Imatge 64: obtenció de la proporció 2:1 en el monocordi

### 3:2, la quinta justa

Vaig dividir la longitud inicial (35,7 cm) en tres segments d'11,9 cm. Vaig fer una marca a  $2/3$ . Col·locant el pont a la marca mencionada s'obté el so de la quinta justa ascendent del  $la_4$ .



Imatge 65: Obtenció de la proporció 3:2 en el monocordi

### 4:3, la quarta justa

Dividint la corda en quatre parts iguals i marcant la més gran (els  $3/4$  de la corda sencera) vaig obtenir la proporció que dona la quarta justa.



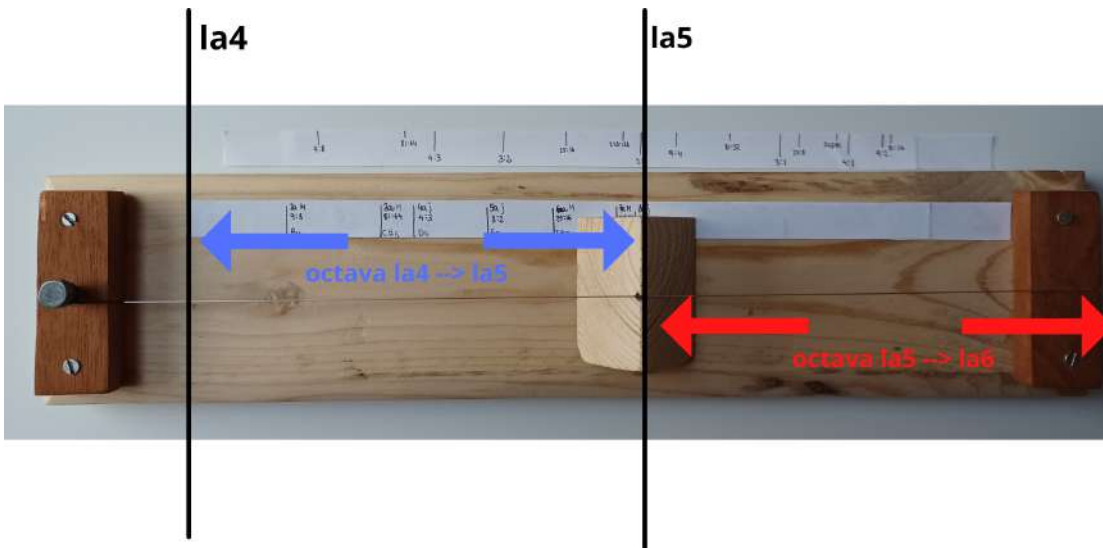
Imatge 66: Obtenció de la proporció 4:3 en el monocordi

### 3.2.2 Divisió en subterços

El tetrakis sagrat no permetia fer més subdivisions que les quatre vistes, i per tant les proporcions de les altres notes de l'escala prenen valors més aparentment més complexos. El que sorprèn és que totes aquestes proporcions aparentment extravagants, en realitat no siguin més que divisions en terços de les proporcions d'altres notes.

#### **9:8, la segona major**

A continuació vaig dividir la corda en terços a partir de la marca a 3:2. En vaig obtenir les proporcions 2/9 i 4/9. El 4/9 quedava a la meitat dreta de la corda vibrant, i per tant, donava una proporció menor a la de l'octava: la nota que dona 4/9 no és la segona major, sinó la novena major, pertanyent a la següent escala natural.



Imatge 67: Imatge explicativa de les dues octaves que és capaç de tocar el monocordi.

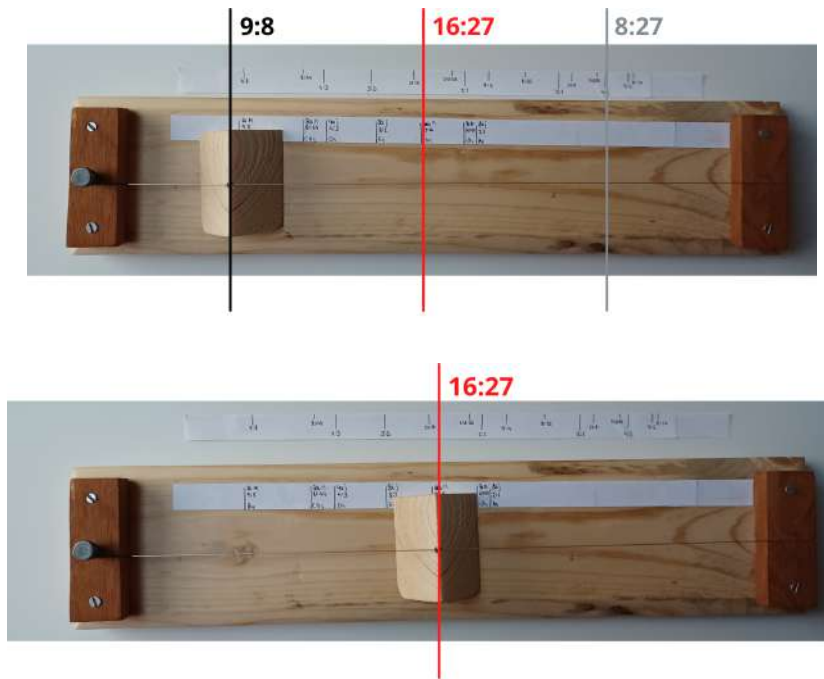
Com que el  $\frac{4}{9}$  queda a la meitat més aguda de la corda i no forma part de l'escala natural que s'està desenvolupant, cal duplicar la proporció. Al duplicar la proporció vaig obtenir una marca als  $\frac{8}{9}$ .



Imatge 68: obtenció de la proporció 9:8 en el monocordi

### 27:16, la sexta

Des de la posició anterior ( $\frac{8}{9}$ ), vaig tornar a dividir en terços, obtenint  $\frac{8}{27}$  i  $\frac{16}{27}$ . Vaig marcar els  $\frac{16}{27}$ .



Imatge 69: Obtenció de la proporció 16:27 en el monocordi

### 81:64, la tercera major

Partint de l'última posició (16/27), vaig dividir l'extrem llarg en terços: obtinc 16/81 i 32/81. Com que l'última proporció (32/81) tornava a quedar a l'extrem contrari, vaig doblar-la i vaig obtenir 64/81.



Imatge 70: Obtenció de la proporció 81:64 en el monocordi

### 243:128, la sèptima major

Finalment, vaig tornar a dividir la posició anterior en terços, per obtenir  $64/243$  i  $128/243$ . La marca a  $128/243$  assenyala l'última nota de l'escala natural.



Imatge 71: Obtenció de la proporció 246:128 en el monocordi

### 3.2.3 Funcionament del monocordi

El següent codi QR condueix a un vídeo del meu monocordi tocant l'escala major natural de  $la_4$  seguint les proporcions recentment exposades.



Imatge 72: QR que enllaça a un [vídeo del monocordi fent sonar una escala](#) .

## 3.3 Comparació de les ones sonores del violí i del monocordi

### 3.3.1 Metodologia

El primer pas per la comparació de les ones sonores del violí i el monocordi va ser l'enregistrament del seu so.



La gravació del so del violí va ser possible gràcies a la Patrícia Martín, graduada del grau mitjà de música clàssica al conservatori de Girona amb el violí com a primer instrument. Vam dur a terme l'enregistrament del violí a casa meua emprant la gravadora del meu telèfon mòbil i uns auriculars amb micròfon. Vaig elegir aquests dos aparells després de comparar la nitidesa d'ona que em donaven els diferents recursos d'enregistrament que tenia a disposició, i establir que aquests eren els que em proporcionaven una major qualitat sonora. En el tractament de les dades s'han de tenir en compte les limitacions i falta de rigor implícites en la poca especificitat de les eines emprades.



Imatge 73: procés d'enregistrament del so del violí amb la Patrícia

El so del monocordi va ser enregistrat en les mateixes condicions i pels mateixos aparells.

Vaig registrar una sèrie de tons d'interès en el violí i en el monocordi, tenint en compte disposar de més d'una gravació del mateix to a tall de rèpliques. Totes les gravacions que consten en aquest apartat amb el pertinent anàlisi han estat enregistrades per mi.

El software lliure Audacity va ser el programa que vaig usar per obtenir tant el perfil d'ona com l'espectre de cadascun dels sons. Amb l'Audacity vaig poder realitzar una millora de la qualitat sonora dels sons enregistrats a través de la reducció de soroll ambient i l'amplificació sonora. Posteriorment, amb les dades sintetitzades pel software amb relació a les meves gravacions, vaig dur a terme la comparació de les ones sonores dels dos instruments pel

que fa a tres aspectes: per una banda, l'**envolvent acústic**, per l'altra el **perfil d'ona** i per últim l'**espectre**. L'ordre amb el qual s'han desenvolupat els tres paràmetres va de més superficial a més concret.

En diversos punts al llarg de l'apartat a continuació he usat un so pur<sup>3</sup> com a referència per exemplificar algunes observacions, tenint-lo en compte com el so més pur i simple que existeix. Aquest to pur l'he sintetitzat digitalment amb Audacity.

### 3.3.2 Semblances i diferències entre el monocordi i el violí

El violí i el monocordi mantenen certes semblances i diferències principals a nivell extern. Les dissemblances entre aquests dos instruments seran identificables en la comparació de les característiques del seu so. És pertinent enumerar-les abans de realitzar la comparació dels seus sons. L'experimentació que es du a terme als apartats següents resoldrà quin tipus d'afectació tenen aquestes diferències en el so.

#### 1. Corda pinçada i corda fregada

El monocordi i violí tenen en comú que són instruments de corda, però el monocordi és de corda pinçada i el violí de corda fregada. Això vol dir que a la corda del monocordi se li dona energia tot pinçant-la, generalment amb el dit, mentre que el violí sona quan se li freguen les cordes amb un arquet.

#### 2. Presència de caixa de ressonància

El violí té una caixa de ressonància, mentre que el monocordi no. Les ressonàncies que es puguin donar en el monocordi correspondran al seu suport i l'ambient on es faci sonar.

#### 3. El nombre de cordes

El violí té quatre cordes i el monocordi només una.

#### 4. Corda $la_4$

---

<sup>3</sup>El so provocat per una oscil·lació perfectament sinusoidal, sense harmònics.

La corda amb harmònic fonamental al  $la_4$  és un element comú entre el monocordi i el violí. A més, el monocordi està construït de manera que la corda vibrant té una llargada semblant a la de les cordes del violí i és feta del mateix material.

### 3.3.3 So del violí, el monocordi i l'ona pura

A continuació es proporciona un codi QR que conté un enllaç a una pista d'àudio en la que es pot sentir la mateixa escala - l'escala major natural de  $la_4$  - tocada respectivament amb el monocordi i el violí. L'àudio finalitza amb la mateixa escala generada amb tons purs a través de l'Audacity.

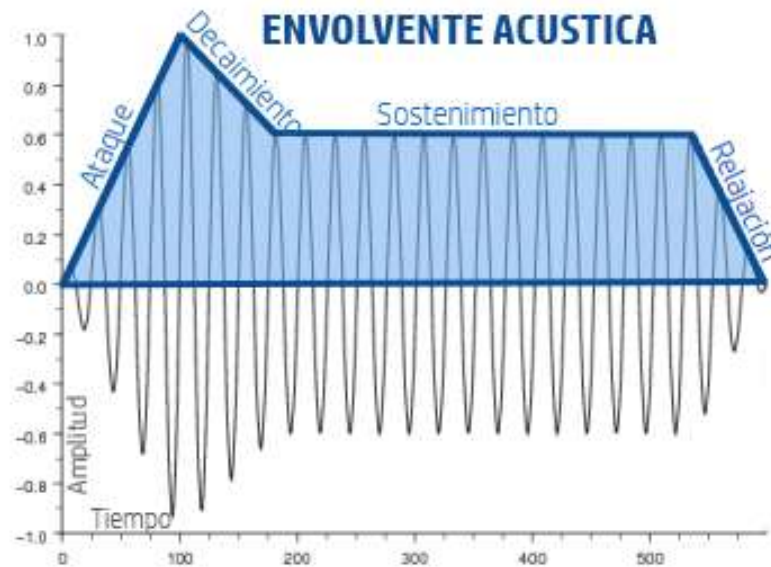


Imatge 74: QR que enllaça a un [fitxer d'àudio amb les escales naturals de  \$la\_4\$](#) . La primera està generada amb tons purs a l'Audacity, la segona és tocada amb el monocordi, la segona amb un violí.

### 3.3.4 Comparació de les envolvents dinàmiques

#### 3.3.4.1 Definició breu d'envolvent dinàmica

L'envolvent dinàmica és la variació del volum o la intensitat sonora respecte al temps. De manera genèrica, hi ha quatre fases en les envolvents sonores: l'**atac**, que és el temps d'entrada del so fins a arribar a una amplitud màxima momentània; el **decaïment**, durant el qual aquesta amplitud es redueix per donar una intensitat estable; el **sosteniment**, l'amplitud que es manté constant fins que es deixa d'induir vibració, i l'**extinció**, el temps que triga el so a perdre tota la seva amplitud. La presència i la durada de cadascuna d'aquestes fases en una envolvent acústica donen informació sobre el sistema oscil·latori que ha generat el so.

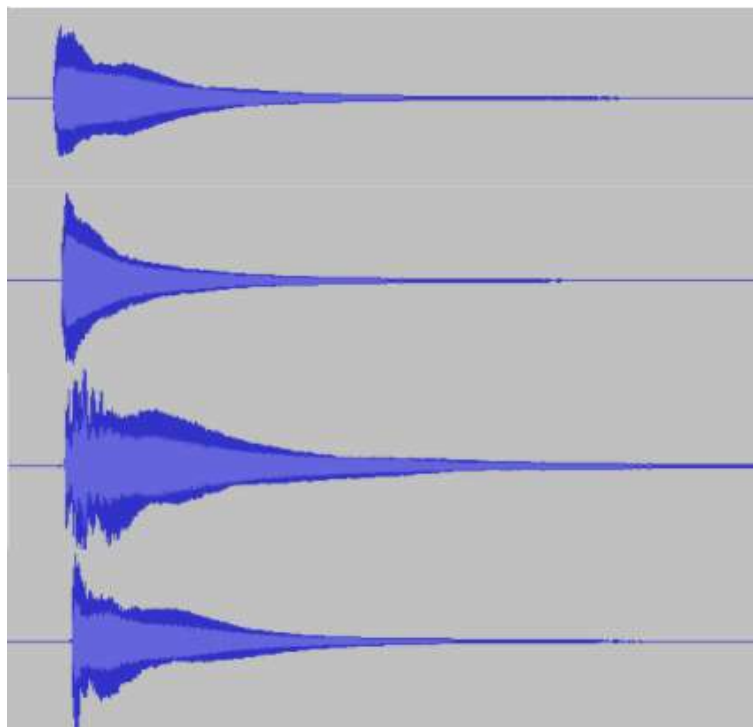


Imatge 75: esquema explicatiu de les fases de en l'envolvent acústica d'un to. En català: atac, decaïment, sosteniment i extinció.

L'envolvent sonora és la informació que dona el programa Audacity d'entrada, en importar-hi qualsevol so.

### 3.3.4.2 Comparació qualitativa de les envolvents del violí i del monocordi

La següent imatge 76 mostra les envolvents de diversos tons tocats pel monocordi:

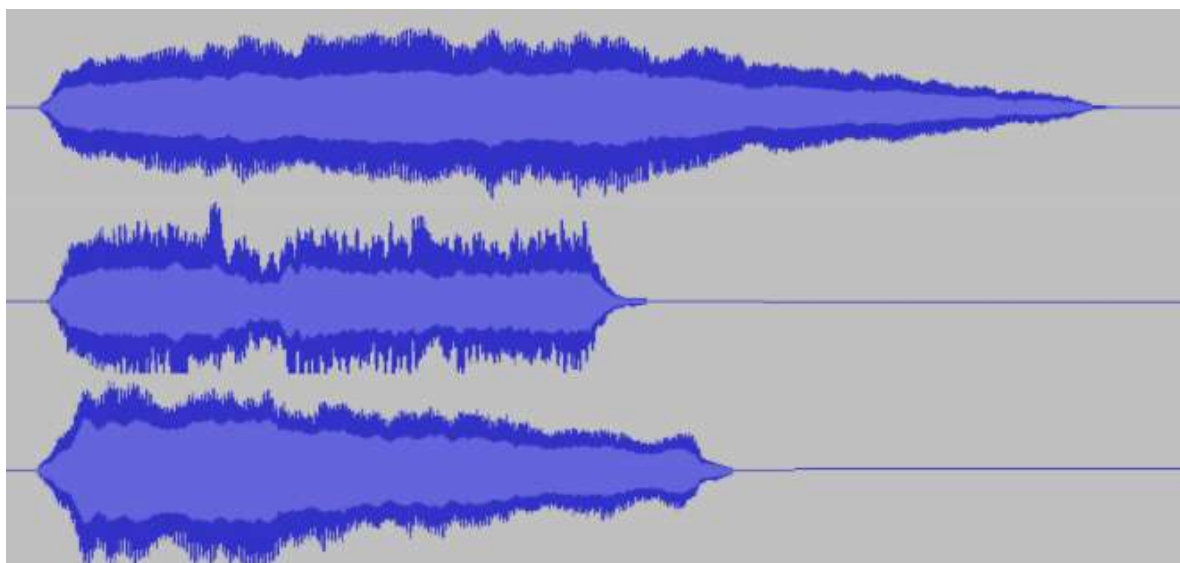


Imatge 76: envolvents de gravacions del monocordi de les notes si4, do#5, la4 i la5

S'hi poden observar les següents característiques:

- Atac molt directe (de molt curta durada)
- Decaïment definit, curta durada
- Sosteniment curt i poc notable
- Extinció de durada considerable

La següent imatge 77 mostra les envolvents de diversos tons tocats pel violí:

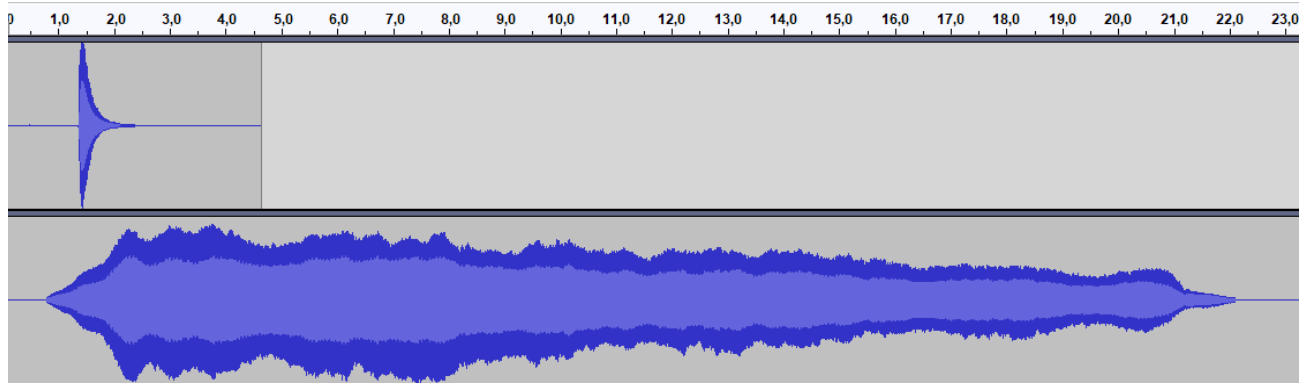


Imatge 77: envolvents de gravacions del violí en els tons la4, la4 i la5 polifònics i la5

S'hi poden observar les següents característiques:

- Atac curt però no directe
- Absència de decaïment: de l'atac es passa al sosteniment
- Sosteniment llarg, notable, i irregular
- Extinció curta

Finalment, a la següent imatge 78 exposo una envolvent de to de monocordi i de violí en el mateix interval temporal:



Imatge 78: envolvents del to la5 tocat, respectivament, per el monocordi i el violí, respecte al mateix interval temporal.

Les dades exposades posen en manifest una sèrie de diferències en els envolvents del monocordi i del violí:

1. **Durada:** el so d'una nota tocada pel monocordi és molt més curt que el so d'una nota tocada pel violí.

Això es deu al mètode de transmissió d'energia a la corda vibrant en cada cas: el pinçament en el monocordi sols permet donar tota l'energia a la corda de forma instantània, de manera que l'energia sonora del monocordi de seguida es dissipa. En canvi, en el violí l'arc permet transmetre energia mecànica a la corda durant un període de temps controlable, que en el cas del so que s'està estudiant, és llarg. L'energia sonora del violí no comença a dissipar-se fins que l'intèrpret ho decideix.

2. **Decaïment:** en l'envolvent del monocordi es pot identificar la fase de decaïment entre el màxim de l'atac i el breu sosteniment. En canvi, l'envolvent del violí no mostra cap període de decaïment.

Això torna a deure's a la forma de transmissió d'energia a la corda en cada cas. L'energia instantània que es traspasa a la corda del monocordi requereix aquest decaïment per tal d'assolir una intensitat sostenible en la corda. En canvi, amb l'acció de l'arc del violí l'energia es transmet de manera progressiva, de manera que en la seva envolvent no s'hi observa un decaïment entre l'atac i el sosteniment, sinó que l'energia de l'atac es canalitza directament al sosteniment.

3. **Sosteniment:** es pot observar que durant el sosteniment, el monocordi manté una intensitat igual en tots els punts, mentre que el sosteniment del violí és format per intensitats irregulars.

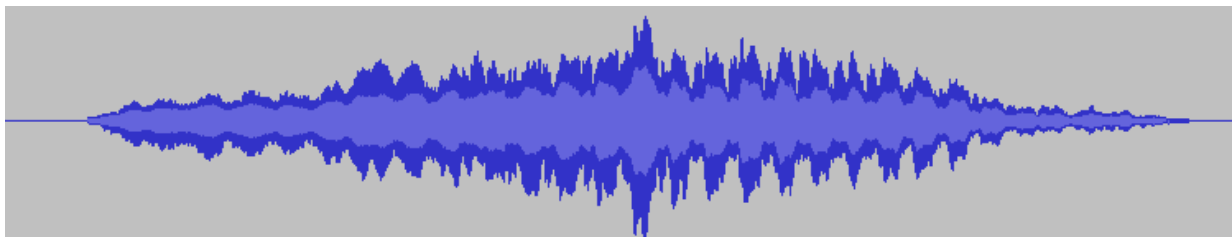
L'explicació d'aquest aspecte reconduïx altra vegada a l'acció de l'arc. Quan l'intèrpret frega la corda, té el poder de modular la intensitat que transmet al violí al llarg del temps, i així, de controlar el tipus de so que se sentirà al llarg de la interpretació. La forma del sosteniment del violí no és fixa, varia segons la interpretació que li doni l'intèrpret.

Un exemple de modulació de la intensitat del so del violí durant la fase del sosteniment és l'ús del vibrato, una tècnica interpretativa per embellir el so.

El següent codi QR condueix a una gravació del  $la_4$  vibrat d'un violí:



Imatge 79: Codi QR que enllaça l'[enregistrament del vibrato d'un  \$la\_4\$  de violí](#)



Imatge 80: Envoltent dinàmica del vibrato d'un  $la_4$  de violí

En aquest cas es pot observar com l'intèrpret de violí ha modulats la intensitat del so del seu violí durant la fase de sosteniment amb un objectiu interpretatiu: provocar el vibrato de la nota.

### 3.3.4.3 Conclusions

La conclusió que es pot treure d'aquesta comparació i anàlisi de les envolvents dinàmiques del violí i el monocordi respecte al fenomen físic és que la forma d'envolvent depèn completament de l'instrument musical que es toca i la manera com es transmet energia al cos vibrant.

Respecte al so del violí, les conclusions que es treuen d'aquest apartat especifiquen l'afectació que té en el so de l'instrument l'acció del fregament de la corda amb l'arc:

Per una banda, es conclou que l'intèrpret de violí té la capacitat de modular la intensitat que dona al so de l'instrument, i per tant de modificar la forma de la seva envolvent dinàmica, que serà diferent segons el tipus d'interpretació que es busqui. El fregament de la corda amb l'arquet permet a l'intèrpret de violí jugar amb matisos i subtileces d'expressió .

Per l'altra banda, es pot dir que l'envolvent dinàmica del violí no passa per la fase de decaïment.

## 3.3.5 Comparació dels perfils d'ona

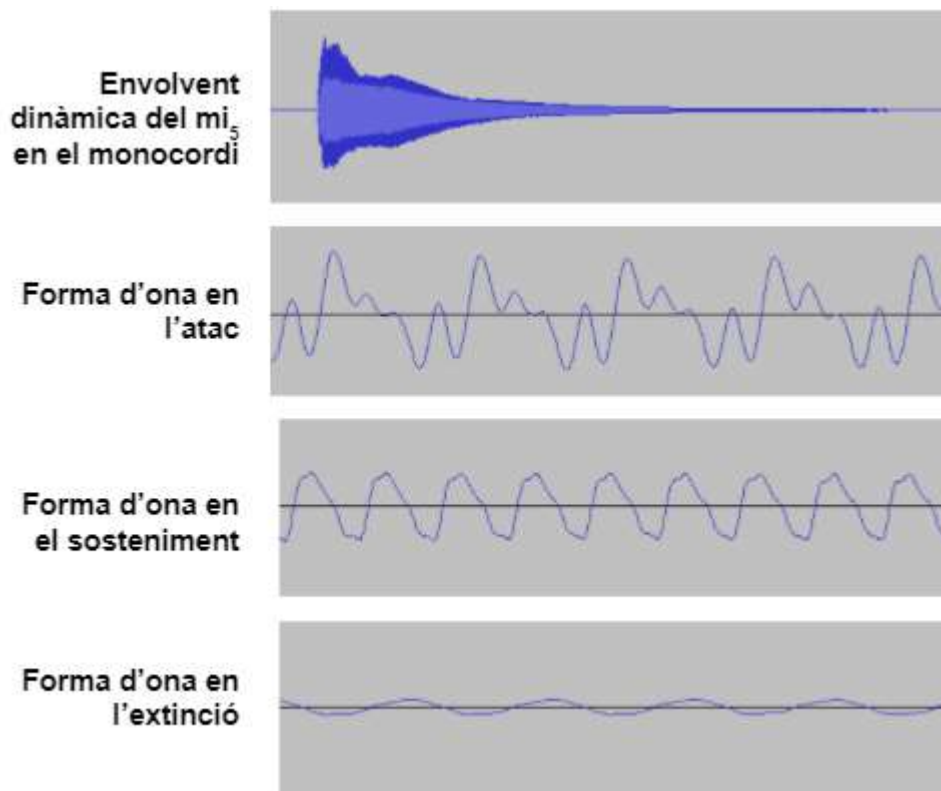
### 3.3.5.1 Definició breu de perfil d'ona

El perfil d'ona o forma d'ona és la representació de l'amplitud d'una ona (eix y) al llarg d'un període de temps (eix x), a escala petita, i és el que determina el timbre de la font sonora. Això vol dir que és diferent i característic en cada cos sonor.

El caracteritzen les interaccions de les diferents ones. Com més freqüències formin part del so d'una ona, més complexe serà el perfil d'ona d'aquesta: la forma d'ona és una superposició de totes les freqüències que participen en un so.

El perfil d'ona és dinàmic (varia en el temps), i està condicionat per l'evolució de les envolvents dinàmiques de cadascuna de les ressonàncies parcials que el formen. Com que la intensitat relativa dels parcials és diferent en cada moment, la forma d'ona també ho és. Això es pot demostrar analitzant el perfil de la mateixa ona sonora en diferents fases de la seva envolvent.





Imatge 81: Perfil d'ona en les diferents fases de l'envolvent del monocordi

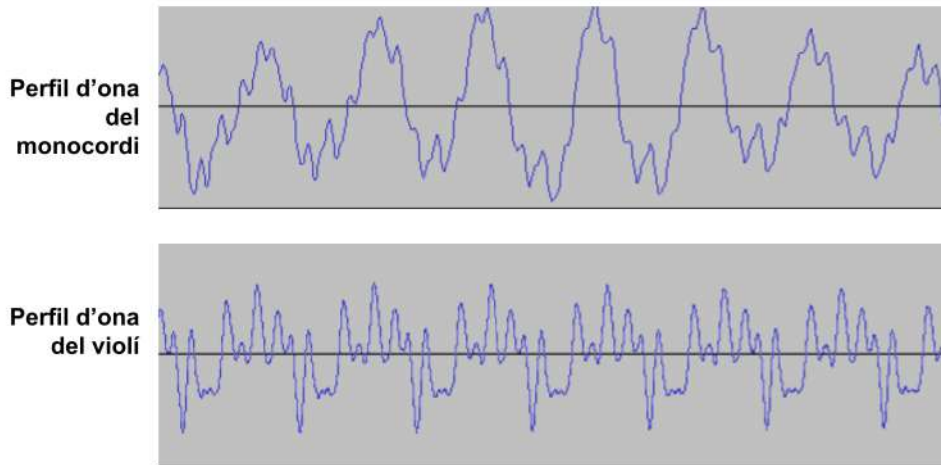
Cal tenir en compte aquest factor a l'hora de comparar els perfils d'ona de diferents instruments.

A l'Audacity, es pot obtenir el perfil d'ona ampliant l'envolvent del so que surt en el moment d'importar-lo fins a poder-hi identificar la periodicitat. El perfil dels períodes que es distingeixen representa el perfil d'ona.

### 3.3.5.2 Comparació dels perfils d'ona del monocordi i del violí

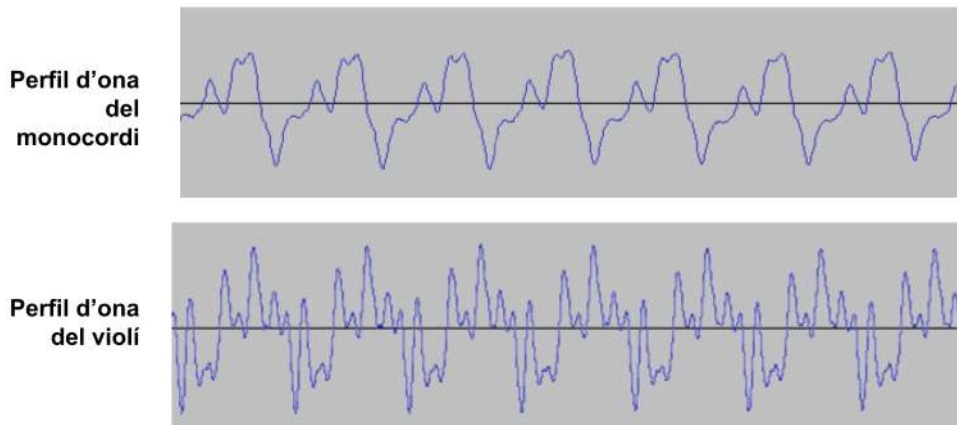
Les imatges a continuació mostren els perfils d'ona d'un la<sub>4</sub> tocat pel monocordi i pel violí en diferents fases de la seva envolvent dinàmica.

**PERFIL D'ONA DEL LA<sub>4</sub> DEL MONOCORDI I EL VIOLÍ EN L'AMPLITUD MÀXIMA DE L'ATAC**



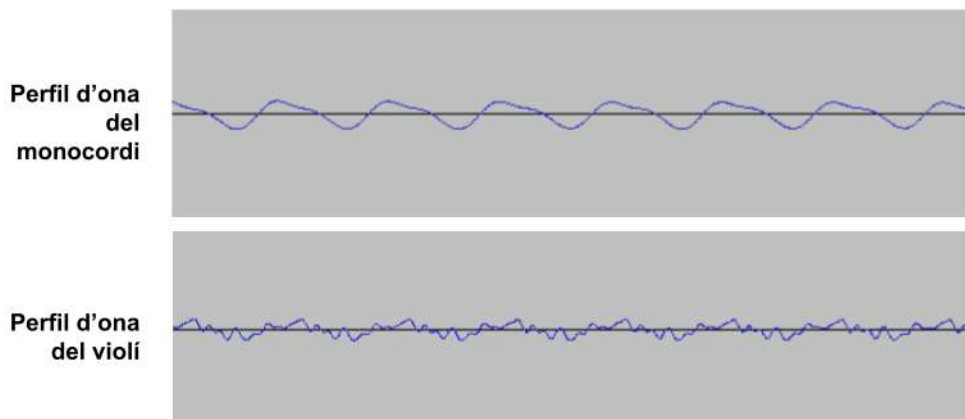
Imatge 82: Comparació dels perfils d'ona del monocordi i el violí en l'amplitud màxima del seu atac

**PERFIL D'ONA DEL LA<sub>4</sub> DEL MONOCORDI I EL VIOLÍ EN EL SEU SOSTENIMENT**



Imatge 83: Comparació dels perfils d'ona del monocordi i el violí en el seu sosteniment

**PERFIL D'ONA DEL LA<sub>4</sub> DEL MONOCORDI I EL VIOLÍ EN LA SEVA EXTINCIÓ**



Amb l'observació d'aquestes últimes dades són identificables fonamentalment dues diferències entre els perfils d'ona del monocordi i del violí:

1. La **transformació del perfil d'ona del monocordi al llarg del temps**:

Resulta molt evident a la vista que el perfil de l'ona del monocordi és irregular en totes les fases de la seva envoltant dinàmica, mentre que el perfil d'ona del violí segueix un patró altament uniforme independentment de la condició instantània del so.

Això denota una regularitat en el so del violí que fa que el seu so tingui un caràcter nítid, característic i fàcilment distingible, que es tradueix en qualitat sonora.

2. Hi ha una evident diferència en la **quantitat de pics** de cadascun dels sons.

En la seva fase de màxima complexitat, es distingeixen en el perfil d'ona del monocordi 4 pics. En el del violí se n'hi distingeixen 6 més afilats. Això dota el segon instrument de complexitat sonora, si es contrarrasta amb el perfil d'un so pur, que només mostra un sinusoide. El perfil d'ona del monocordi mostra molta més semblança amb el del so pur, mostrat a la imatge 85.



Imatge 85: Perfil d'ona d'un la4 pur.

### 3.3.5.3 Conclusions

De l'anàlisi comparativa de la forma d'ona se'n pot extreure la conclusió que la uniformitat en la forma d'ona al llarg del temps i l'abundància de freqüències són dos indicis de la qualitat de l'instrument i la interpretació del so.

La forma d'ona del violí compleix aquests dos paràmetres, i per tant està dotada d'un so molt ric.

## 3.3.6 Comparació dels espectres sonors

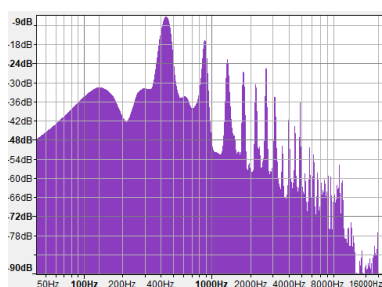
### 3.3.6.1 Definició breu d'espectre sonor

L'espectre d'un so és la representació de la distribució de la intensitat sonora (eix y) en funció de les freqüències (eix x): mostra les freqüències que intervenen en un so amb les seves respectives intensitats. L'oïda humana funciona d'una manera semblant a l'espectre sonor, ja que classifica les amplituds segons la freqüència. L'espectre d'un so és un element molt important en la caracterització del timbre d'un instrument, i revela molt sobre el comportament del so en l'instrument en qüestió.

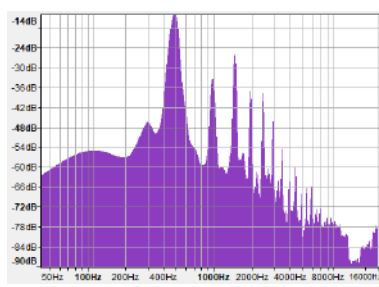
El programa Audacity compta amb una eina que traça l'espectre del so.

### 3.3.6.2 Comparació de l'espectre sonor del monocordi i del violí

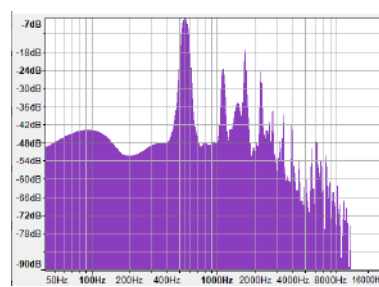
Els gràfics a continuació mostren l'espectre de cadascuna de les notes de l'escala de la major natural ( $la_4 \rightarrow la_5$ ) tocada amb el monocordi.



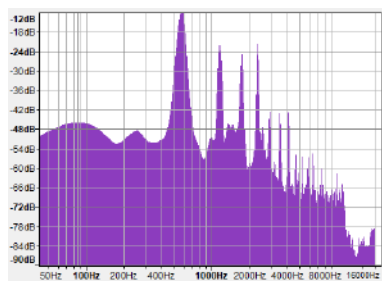
$la_4$



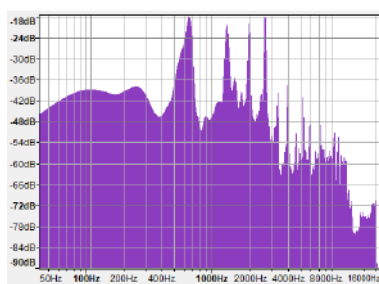
$si_4$



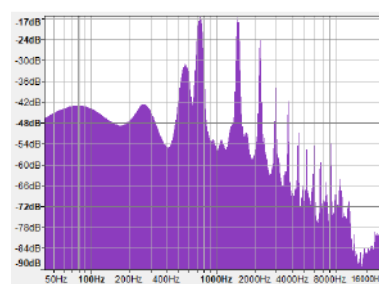
$do\#_5$



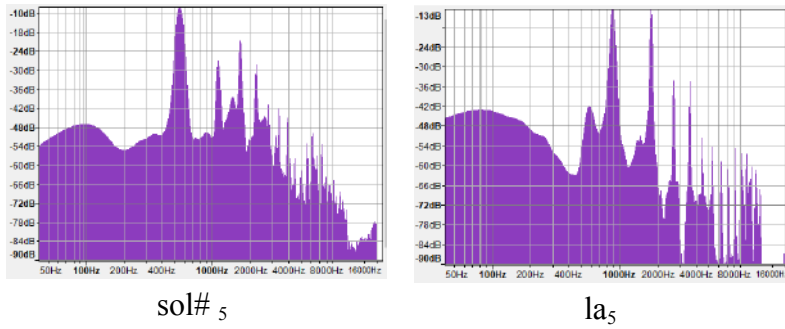
$re_5$



$mi_5$

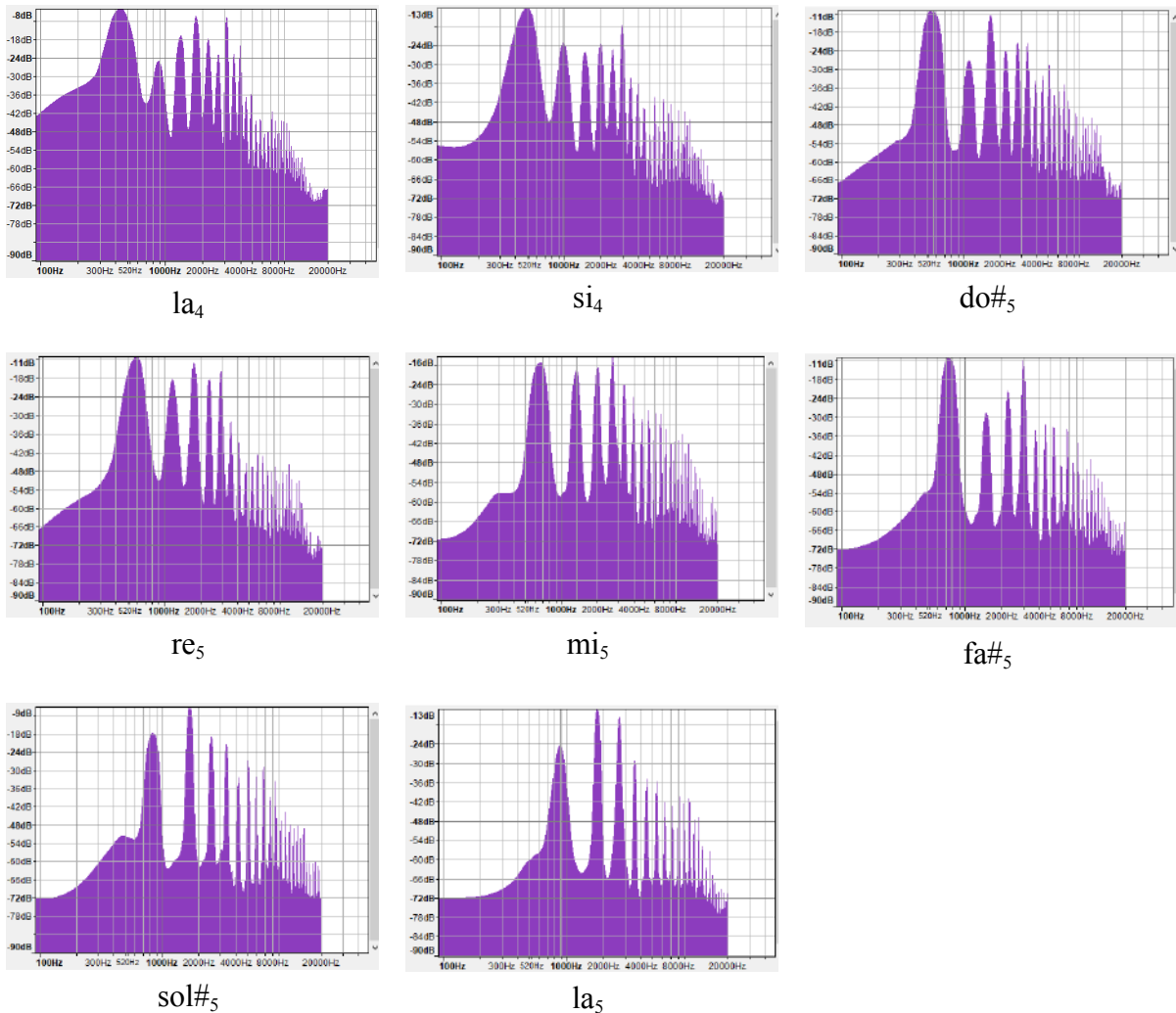


$fa\#_5$



Taula 5: espectre de les notes de l'escala de la toques amb el monocordi

Els gràfics a continuació mostren l'espectre de cadascuna de les notes de l'escala de la major natural (la<sub>4</sub> → la<sub>5</sub>) tocada amb el violí.



Taula X: espectre de les notes de l'escala de la natural toques amb el violí

L'observació de les dades anteriors condueix a una conclusió destacable:

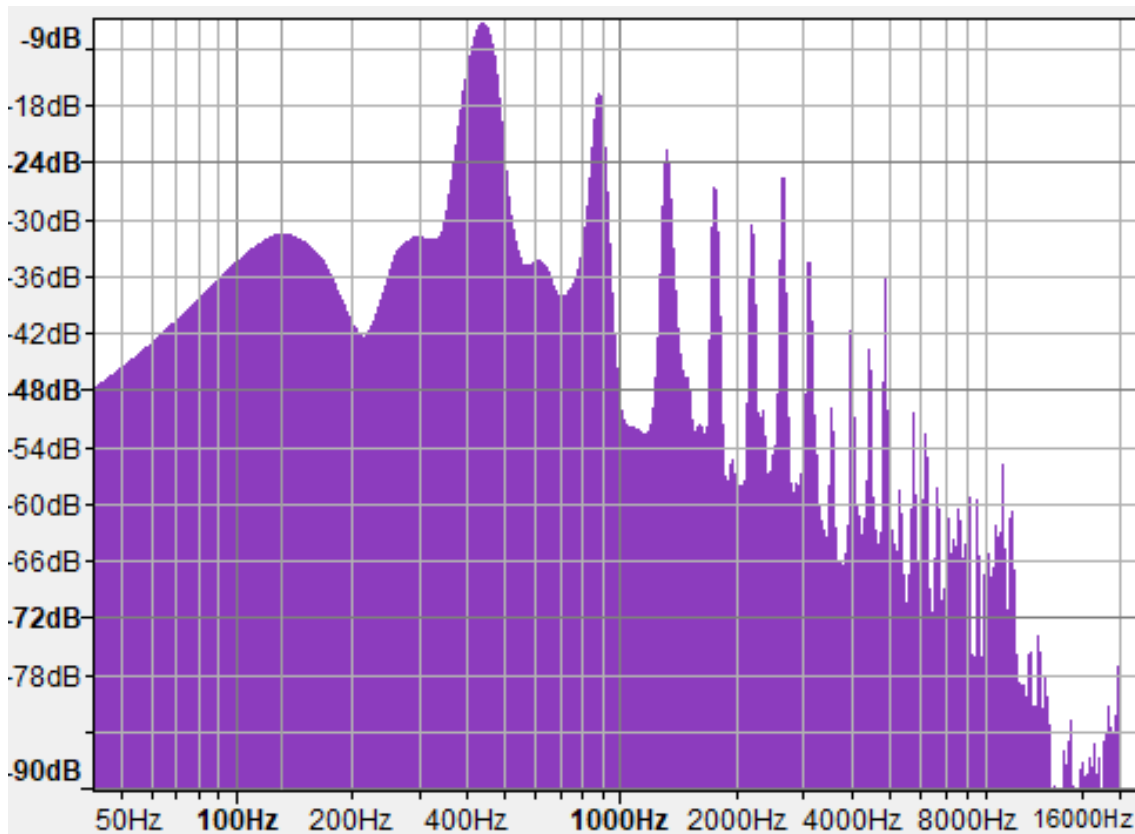
1. L'espectre de les diferents notes toades amb un mateix instrument segueix un **patró similar**. De manera superficial es podria dir que aquest patró, característic de cada instrument musical, es desplaça cap a la dreta amb l'augment de la freqüència fonamental del to enregistrat.

La resta de conclusions defineixen els matisos d'aquesta primera:

2. Hi ha una **deformació visible de la figura de l'espectre** que s'accentua progressivament a mesura que les notes són més agudes. L'explicació d'aquest fet s'atribueix a la facilitat de vibració: com més llarga és la corda oscil·lant, més fàcilment vibra. Les notes agudes, doncs, són més difícils de fer sonar i vibren amb menys volum, provocant mancances en l'enregistrament. Per tots els fets enumerats, les notes agudes són més propenses a desencadenar una distorsió del timbre.
3. Els espectres del violí mantenen una notable **uniformitat** respecte als del monocordi, el que és el mateix que dir que la deformació mencionada en el punt anterior és més accentuada en el monocordi. El motiu rau en les quatre cordes del violí respecte a l'única corda del monocordi. Mentre que pel monocordi l'única manera de donar tons més aguts és escurçar la corda, el violí compta amb cordes de freqüències més altes i, per tant, obté les notes agudes fent vibrar una corda de llargada major. Això facilita que el timbre del violí mantingui un major grau d'uniformitat en els tons aguts.

Ja que s'ha enunciat que els espectres de les notes toades amb el mateix instrument segueixen un patró similar, per procedir a l'anàlisi i comparació dels pics dels espectres del monocordi i el violí es prendran únicament les dades dels espectres del to fonamental,  $la_4$ , en cada cas.

La següent imatge 86 és l'espectre del  $la_4$  tocat amb el monocordi.



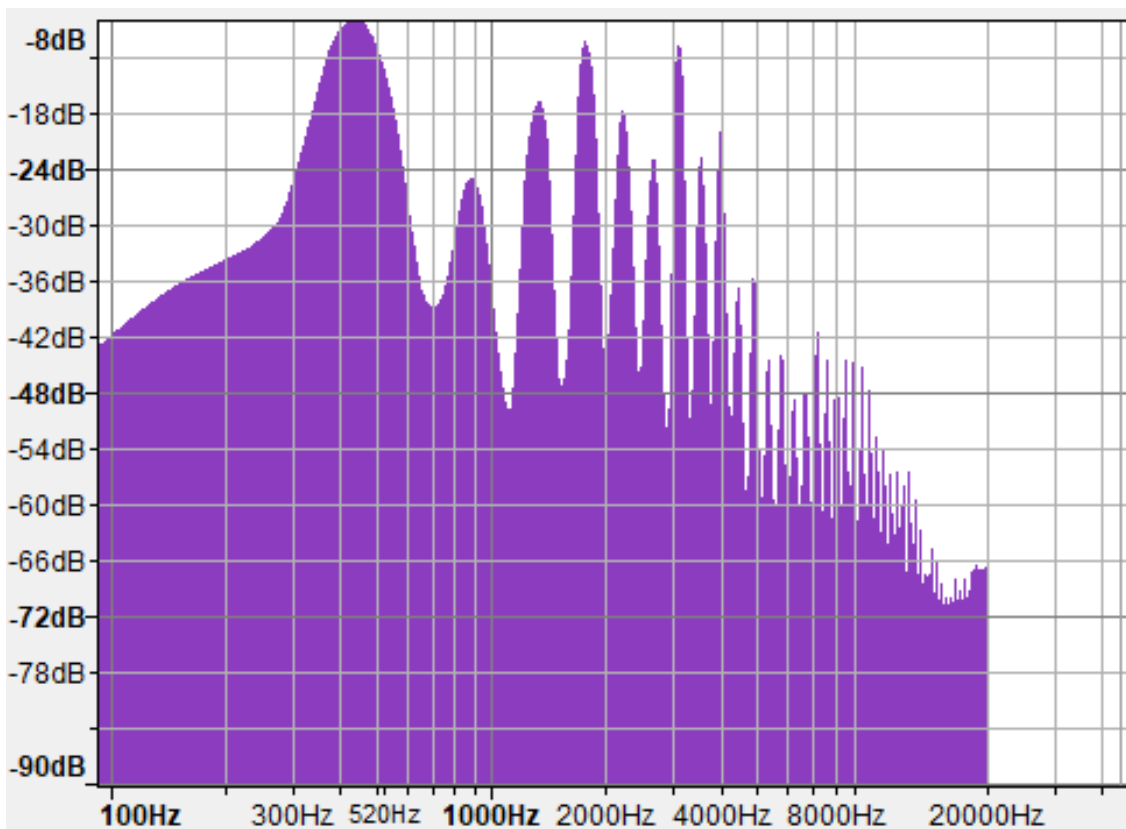
Imatge 86: espectre del la<sub>4</sub> tocat per el monocordi

La taula a continuació descriu els pics amb una amplitud superior a -33,00 dB de l'espectre del la<sub>4</sub> tocat pel monocordi. S'han ressaltat els pics amb amplituds majors de -20 dB.

PIC	FREQÜÈNCIA (Hz)	NOTA	CÀLCUL D'HARMÒNIC	AMPLITUD (dB)
1	130	do <sub>3</sub>	no és harmònic	-31,7
2	438	la <sub>4</sub>	$438/438 = 1 ; \lambda_1$	-9,5
3	879	la <sub>5</sub>	$\frac{879}{438} = 2,01; \lambda_2$	-16,8
4	1316	mi <sub>6</sub>	$\frac{1316}{438} = 3,00; \lambda_3$	-22,3
5	1757	la <sub>6</sub>	$\frac{1757}{438} = 4,01; \lambda_4$	-26,5
6	2197	do <sub>#7</sub>	$\frac{2197}{438} = 5,02; \lambda_5$	-30,5
7	2642	mi <sub>7</sub>	$\frac{2647}{438} = 6,04; \lambda_6$	-24,5

Taula 6: Anàlisi dels pics de l'espectre del la<sub>4</sub> tocat amb el monocordi.

La següent imatge 87 és l'espectre del la<sub>4</sub> tocat amb el violí:



Imatge 87: Espectre del la4 tocat per el violí

La taula a continuació descriu els pics amb una amplitud superior a -33,00 dB de l'espectre del la<sub>4</sub> tocat amb violí. S'han ressaltat els pics amb amplituds majors de -20 dB.

PIC	FREQÜÈNCIA (Hz)	NOTA	CÀLCUL D'HARMÒNIC	AMPLITUD (dB)
1	437	la <sub>4</sub>	$437/437 = 1 ; \lambda_1$	-7,9
2	885	la <sub>5</sub>	$\frac{885}{437} = 2,03; \lambda_2$	-25,0
3	1335	mi <sub>6</sub>	$\frac{1335}{437} = 3,05; \lambda_3$	-16,7
4	1773	la <sub>6</sub>	$\frac{1773}{437} = 4,06; \lambda_4$	-10,8
5	2205	do# <sub>7</sub>	$\frac{2205}{437} = 5,06; \lambda_5$	-17,1
6	2655	mi <sub>7</sub>	$\frac{2655}{437} = 6,08; \lambda_6$	-22,7
7	3110	sol <sub>7</sub>	$\frac{3110}{437} = 7,11; \lambda_7$	-10,9
8	3527	la <sub>7</sub>	$\frac{3527}{437} = 8,07; \lambda_8$	-22,4



9	3979	si7	$\frac{3979}{437} = 9, 11; \lambda_9$	-19,7
---	------	-----	---------------------------------------	-------

Taula 7: Anàlisi dels pics de l'espectre del la<sub>4</sub> tocat amb el violí.

Les dades dels pics dels espectres de mateixa nota tocada amb els dos instruments diferents permeten observar el següent:

1. Els pics dels dos instruments **coincideixen en freqüència** però no en amplitud.

Observant les dues taules s'aprecia que els pics en els dos casos es troben a les mateixes freqüències, que són en els dos casos són els primers harmònics de l'ona estacionària la<sub>4</sub> (són múltiples de la seva freqüència, com s'ha calculat a la taula 7). La diferència està en la seva amplitud relativa, que és observable tan a la imatge com a la taula.

Un exemple clar n'és la posició del segon harmònic, la<sub>5</sub>, en una hipotètica classificació per amplituds d'ona. En l'espectre del monocordi, el la<sub>5</sub>, d'amplitud -16,8 dB és el subtò més intens. En canvi, en l'espectre del violí, el la<sub>5</sub>, d'amplitud -25,0 dB ocupa l'última posició dintre les freqüències presents a la taula.

Aquest cas reflecteix l'acció de la caixa de ressonància del violí, que amplifica selectivament les freqüències generades en l'ona estacionària.

2. Hi ha una diferència notable en la **quantitat d'harmònics importants** en el so dels dos instruments.

L'elaboració de les taules interpretatives dels harmònics s'ha fet destriant els harmònics de més pes, considerant "harmònics de pes" aquells dels quals l'amplitud supera els -33 dB. En el monocordi s'han trobat 7 harmònics que complidors aquest criteri, mentre que al violí se n'han trobat 9. Després encara se n'ha fet una segona distinció ressaltant solament aquells harmònics que sobrepassen els -20 dB. El monocordi ha resultat tenir 2 harmònics d'amplitud major als -20 dB, el violí 6. Així doncs, es pot establir que el violí té més harmònics de pes que el monocordi.

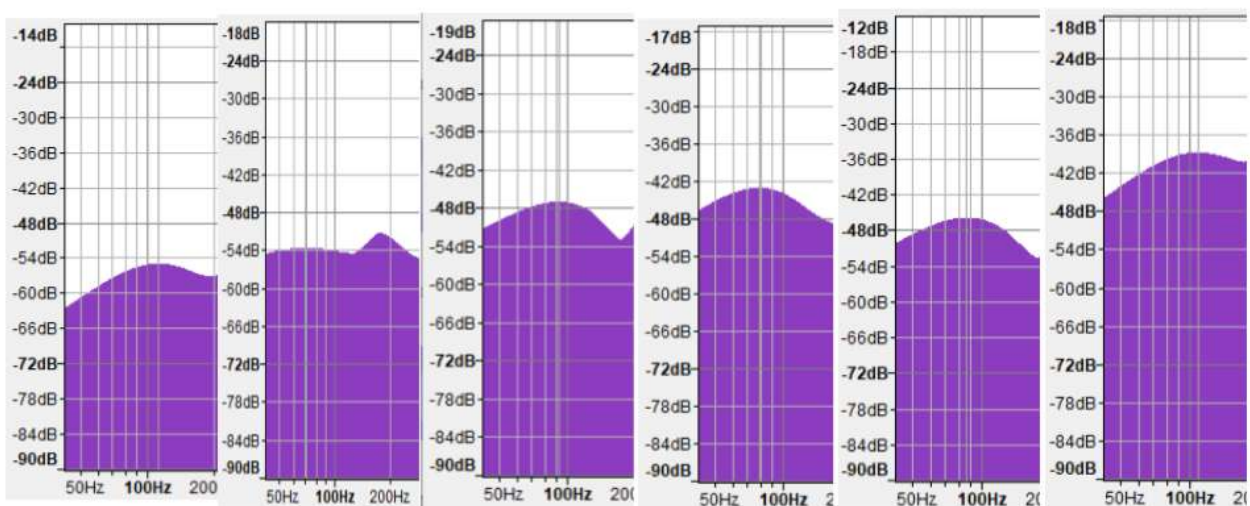
Aquesta dada concorda amb les observacions sobre el perfil d'ona redactades a l'apartat 3.3.5.

Això es deu a la caixa de ressonància del violí, que amplifica els harmònics del violí. La presència d'harmònics importants és un factor molt enriquidor del so. L'elevada

quantitat d'harmònics de pes li atribueixen al violí un timbre característic i ric, en comparació amb el del monocordi.

3. La **posició de la freqüència fonamental** en l'espectre del violí és de la freqüència de pes més baixa. En el del monocordi, en canvi, s'hi adverteix un bony als 130 Hz, a una freqüència menor a la fonamental de la corda. Si bé l'amplitud d'aquest pic (-31,7 Hz) no és exagerada, sí que és notable.

A més, observant els espectres de la resta de notes tocades amb el monocordi, es pot advertir en totes elles un pic d'aquesta mateixa naturalesa al voltant dels 130 Hz, com s'assenyala a la imatge 88. Això vol dir que no varia amb la freqüència fonamental de la corda; aquest fet refuta que no es pot tractar d'un harmònic fruit de l'ona estacionària de la corda.



Imatge 88: Ampliació del pic de freqüència propera 130 Hz present a l'espectre de totes les notes tocades amb el monocordi.

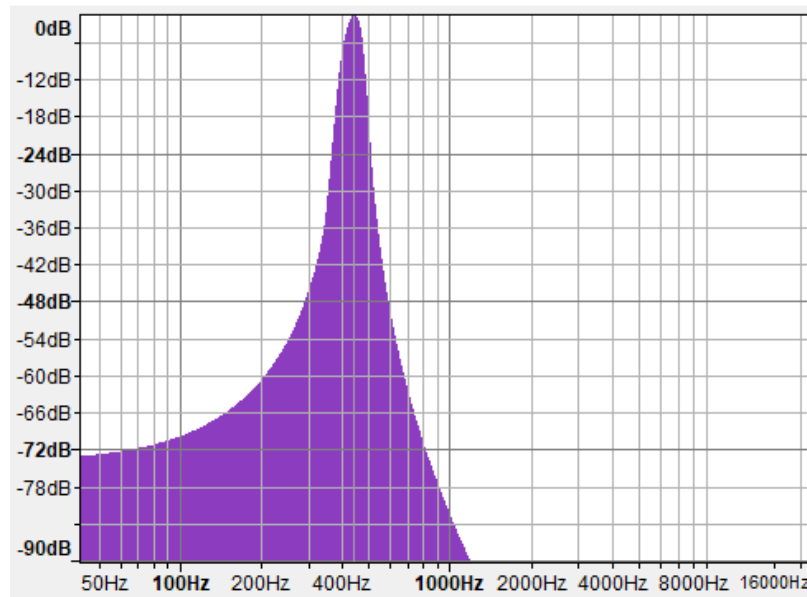
Les característiques d'aquest bony apunten que es tracta d'una ressonància parcial del monocordi, encara que no es disposa dels mitjans per reconèixer de quina part de l'instrument prové.

4. Es pot advertir una diferència en la **forma de l'envolvent espectral**. Per envolvent espectral s'entén la forma de la corba que uneix els pics de l'espectre d'un so. La diferència de les formes de les envoltants espectrals és provocada per la diferent amplitud relativa dels pics: en l'espectre del monocordi s'hi observa una davallada progressiva de l'amplitud dels pics a mida que les freqüències s'allunyen de la

fonamental, seguint un patró semblant al que seguirien les amplituds dels harmònics d'una ona estacionària (cada harmònic més agut té una amplitud menor). L'espectre del violí, en canvi, té una forma irregular i imprevisible.

La causant d'això torna a ser la caixa de ressonància del violí. Els modes de vibració que s'hi donen amplifiquen selectivament alguns dels harmònics de la corda vibrant, provocant una major complexitat en la forma de l'envolvent espectral.

Comparant les envolvents espectrals del violí i el monocordi amb l'envolvent espectral d'un to pur (imatge 89), és possible relacionar per semblança la forma de davallada dels pics de l'envolvent del monocordi amb la del to pur.



Imatge 89: Espectre d'un  $la_4$  pur generat amb el software Audacity

Si contemplem el to pur com a la major simplicitat sonora existent, podem concloure de l'última comparació que una major ressonància provoca una major complexitat en l'envolvent espectral d'un so, i que una major complexitat en l'envolvent espectral d'un so provoca una major complexitat i riquesa sonora.

### 3.3.6.3 Conclusions

Les conclusions de l'anàlisi i comparació de l'espectre del violí i el monocordi són les següents:

Pel que fa als espectres acústics, es pot concloure que la forma de l'espectre d'un so depèn de l'instrument musical que el toqui, sobretot de la seva ressonància. Un instrument musical dona espectres molt similars en tots els seus tons, i la uniformitat d'aquests espectres és un indicador de la qualitat del so.

També s'ha arribat a la conclusió que els sons més purs conformen una envolvent espectral en forma de davallada progressiva a mesura que les freqüències s'allunyen de la freqüència fonamental. Com més difereix l'envolvent espectral d'un so d'aquest model d'espectre de so pur, major és la complexitat del seu timbre, i estarà dotat de més ressonància.

Sobre els dos instruments estudiats, es pot arribar a la conclusió que el principal cos vibrant del monocordi és la corda, ja que la forma del seu espectre és fidel a la forma hipotètica de l'espectre d'una ona estacionària. Contràriament, en el violí, els valors d'amplitud que prenen els harmònics de l'ona estacionària de la corda són fortament alterats per la ressonància del cos de l'instrument, i això assenyalava l'efecte de la caixa de ressonància.

## 4. Conclusions

Aquesta recerca centrada en el violí i el funcionament de la música i el so m'ha proporcionat una sèrie d'aprenentatges i m'ha permès arribar a certes conclusions en relació amb als meus objectius primaris.

El meu primer objectiu era **comprendre els violins com a objecte acústic i instrument musical**. Puc afirmar que he estat capaç de comprendre els violins i el seu funcionament a un nivell prou profund, encara que no en la totalitat.

He arribat a la conclusió que la sonoritat del violí depèn pràcticament de forma exclusiva de les condicions de vibració mecànica de cadascuna de les seves peces i les interaccions entre elles: que les cordes vibren en forma d'ones estacionàries de freqüències definides per la seva llargada, tensió, densitat i massa per unitat de longitud, i que posteriorment són amplificades pel conjunt de ressonàncies que es donen en totes peces del violí, de forma simultània i en diferents modes.

En segon lloc, m'havia proposat **entendre l'evolució i valor històric dels violins**. La recerca històrica duta a terme a l'inici del treball m'ha permès descobrir les formes antigues d'aquest instrument i conèixer els personatges claus en la seva història.

Puc concloure que l'evolució i millora del violí al llarg dels segles ha estat, en moltes ocasions, intuïtiva, i la investigació científica sobre la construcció de violins i les formes òptimes pel so s'ha dut a terme d'una manera molt posterior a la seva caracterització. També que el model de violí actual parteix dels violins construïts a Cremona el segle XVI pels mestres luthiers de les famílies Amati, Stradivari i Guarneri.

Un altre objectiu d'aquesta recerca era **conèixer les nocions bàsiques de la física acústica tant de manera general com específicament aplicada al violí**. L'aprenentatge sobre aquest tema ha estat un procés llarg que he pogut reflectir no només en l'apartat purament dedicat a la ciència del so, sinó que també en els apartats posteriors dedicats a l'escala musical, el funcionament del violí i sobretot en l'anàlisi dels resultats de les experimentacions dutes a terme al final del procés.

Amb l'estudi d'aquest tema puc definir que la física acústica té el seu fonament en els fenòmens oscil·latoris mecànics i ondulatoris i la superposició d'aquests, que comparteixen

unes característiques periòdiques a partir de les quals s'obre un gran ventall de paràmetres estudiables, com són les freqüències i els harmònics d'un cos sonor i les proporcions entre ells, la constitució d'un timbre, els modes de vibració i la seva forma, la presència de línies nodals i antinodals, la variació o uniformitat de les característiques sonores d'un cos sonor al llarg del temps, l'afectació de les diferents parts d'un cos sonor en l'ona sonora final o els paràmetres que determinen el grau de qualitat o bellesa d'un so.

També em vaig proposar **construir un instrument musical senzill, un monocordi**. Puc dir que he aconseguit construir-lo i fer-lo sonar amb èxit seguint les lleis de proporció intervàlica establertes pels Pitagòrics, i que he pogut observar en aquest instrument construït per mi el funcionament de les regles de la física acústica de les quals m'havia documentat.

El cinquè objectiu que em vaig proposar va ser **aprendre l'ús de l'espectrògraf i l'anàlisi de l'espectre d'un so**. En aquest sentit, he acabat usant el software Audacity, que a banda de la funció d'espectrògraf en té d'altres que també he hagut d'aprendre a fer servir i analitzar.

Aquest treball m'ha permès formar-me en l'anàlisi digital de sons, i aprofundir en els paràmetres de la millora de la qualitat sonora a través de l'amplificació d'ona i la reducció de soroll ambient, la identificació de l'envolvent dinàmica i espectral d'un so, la identificació del timbre o la forma d'ona, la generació de l'espectre sonor i la síntesi d'un so pur.

El meu últim propòsit era **analitzar i comparar el so i timbre del violí amb el del propi monocordi amb l'ajuda d'un espectrògraf**. He pogut dur a terme aquesta tasca analitzant els sons del violí i el monocordi amb l'Audacity i comparant-ne les dades qualitativament i quantitativament.

De la comparació del so del violí i el monocordi n'he conclòs que l'envolvent dinàmica d'un so depèn de la manera com es transmet energia al cos vibrant, mentre que la forma d'ona i l'espectre deuen les seves característiques al tipus de ressonància de l'instrument.

També he pogut identificar algunes característiques del violí en aquests dos camps que li atorguen qualitat sonora respecte al monocordi: són la capacitat de modulació de la forma d'envolvent dinàmica per part de l'interpret, la uniformitat en el perfil d'ona i l'envolvent espectral del so en diferents circumstàncies sonores, l'abundància d'harmònics notables fruit de l'amplificació de la caixa de ressonància i la complexitat de l'envolvent espectral del seu so.

Finalment, tenint en compte la sèrie de conclusions que acabo de presentar, puc donar resposta a la hipòtesi formulada a l'inici de la recerca: “**Partint de l’anàlisi i l’estudi teòric del violí i les seves característiques acústiques, puc construir el meu propi instrument senzill i realitzar un correcte estudi del seu so?**”. Resolc aquesta hipòtesi establint que sí, que he estat capaç de construir el meu propi monocordi i estudiar certs aspectes del seu so.

Com a clausura d’aquest treball, vull deixar una valoració de l’impacte que ha tingut en mi mateixa.

Ha estat molt gratificant per mi comprendre el funcionament del so, que ja he començat a observar en diversos àmbits de la meua vida. M’enorgulleix el fet que de tant en tant, en un moment d’abstracció, em sorprengui a mi mateixa traient conclusions sobre el perquè del so d’allò o d’allò altre, ja que em recorda que he estat investigant pel meu compte sobre una cosa que he acabat interioritzant. Això és el que em fa pensar que potser ha valgut la pena més del que m’imaginava, i que del treball dur me n’enduc aprenentatges que no crec que m’abandonin mai.

També m’agradaria deixar per escrit que en molts moments del procés hauria preferit dur a terme una recerca més específica sobre un tema concret dins l’acústica dels violins, ja que això m’hauria permès conèixer un aspecte determinat d’aquest tema amb molta més profunditat i fer menys caòtic el procés d’investigació. Malgrat això, mirar-ho des de la distància i el raonament m’ha fet adonar que la realització d’un treball així d’ampli m’ha donat una perspectiva que no tindria d’una altra manera i que segur que m’ha enriquit.

-

# 5. Bibliografia

## 5.1 Llibres:

REMNANT, Mary. *Historia de los Instrumentos Musicales*. 1a edició. Sta. Perpètua de Mogoda: Ediciones Robinbook, 2002.

KENNEDY, Michael; BOURNE KENNEDY, Joyce. *Diccionario Oxford de Música*. 1a edició. Barcelona: Ediciones Omega, 2015.

PIEROZZI, Alessandro. *Los instrumentos musicales, música en el tiempo*. 1a edició. Madrid: Alianza Editorial, 2018.

DEL CASTILLO, B. [et al.]. *Guía práctica de especies de madera*. 1a edició. Madrid: Confemadera, 2004.

FLETCHER, Neville; ROSSING, Thomas. *The Physics of Musical Instruments*. 1a edició. Nova York: Springer-Verlag, 1991.

CHION, Michel. *El sonido*. 1a edició. Barcelona: Editorial Paidós, 1999.

MAOR, Eli. *La música y los números. De Pitágoras a Schoenberg*. 1a edició. Madrid: Turner publicaciones, 2018.

SERRA, S. [et. al.]. *Física. 2n Batxillerat*. 2a edició. Aravaca: McGraw-Hill, 2018.

ROSSING, Thomas [et al.]. *The science of string instruments*. 1a edició. Nova York: Springer-Verlag, 2010.

## 5.2 Articles i documents consultats per la xarxa:

MALEY, Carleen. “Acústica de las tablas del violín” dins *Acústica musical. Temas de investigación y ciencia*, núm. 21, 2000, p. 48-59.

ROYAL SOCIETY PUBLISHING. *La resonància del violí a través de les efes i l'evolució dels forats en instruments de corda* [en línia].  
<<https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspa.2014.0905>> [consulta: 09/07/2021]



CAMPION COLLEGE. *The Fibonacci sequence and the golden ratio in music*. [en línia]  
<[https://www.pennedout.com/things/music/fibonacci\\_and\\_golden\\_ratio\\_in\\_music.pdf](https://www.pennedout.com/things/music/fibonacci_and_golden_ratio_in_music.pdf)>  
[consulta: 20/07/2021 ]

UOC. *Acústica, ones mecàniques i so*. [en línia]  
<[ebapps/o2/bitstream/10609/51241/7/F%C3%ADsica%20II\\_M%C3%B2dul2\\_Ac%C3%BAstica.%20Ones%20mec%C3%A0niques%20i%20so.pdf](https://ojs.uoc.edu/bitstream/10609/51241/7/F%C3%ADsica%20II_M%C3%B2dul2_Ac%C3%BAstica.%20Ones%20mec%C3%A0niques%20i%20so.pdf)> [consulta: 10/09/2021]

UNIVERSIDAD PALERMO. *El fundamento matemático de la escala musical y sus raíces pitagóricas*. [en línia]  
<<https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/CyT6/6CyT%2003.pdf>> [consulta: 29/09/2021]

UOC. *Reconeixement automàtic d'instruments musicals*. [en línia]  
<<http://hdl.handle.net/10609/8048>> [consulta: 07/10/2021]

CITeseerX. *On the body resonance C3 and its relation to the violin construction*. [en línia]  
<<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.641.8284&rep=rep1&type=pdf>>  
[consulta: 07/10/2021]

## 5.3 Pàgines web:

La història del violí:

- <https://www.deviolines.com/historia-del-violin/>
- <https://willysanchezdecos.com/2014/06/13/instrumentos-de-cuerda-frotada-del-arco-priimitivo-al-violin-romantico/>  
**data de consulta: 14/06/2021**

Construcció de violins:

- [https://www.kevinleeluthier.com/violinmaking/making\\_1.htm](https://www.kevinleeluthier.com/violinmaking/making_1.htm)  
**data de consulta: 09/07/2021**
- <http://einafustalletrainota.blogspot.com/2008/03/el-pont.html>  
**data de consulta: 10/07/2021**

Parts del violí en català:

- <https://parlantedemusica.wordpress.com/>  
**data de consulta: 10/07/2021**

Enteniment del vocabulari tècnic i conceptes desconeguts:

- [https://ca.wikipedia.org/wiki/Ona\\_estacion%C3%A0ria](https://ca.wikipedia.org/wiki/Ona_estacion%C3%A0ria)  
**data de consulta: 10/07/2021**
- <https://ca.wikipedia.org/wiki/Decibel>

**data de consulta: 09/09/2021**

- [https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice\\_ac%C3%BAstico\\_cient%C3%ADfico](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice_ac%C3%BAstico_cient%C3%ADfico)

**data de consulta: 11/08/2021**

Construcció d'un monocordi:

- <https://agueiro.xunta.gal/view/view.php?id=11475>

**data de consulta: 11/08/2021**

Música i so: física en context

- <https://sites.google.com/a/xtec.cat/fisicaencontext/home/2n-batxillerat/6-musica-i-so>

**data de consulta: 01/09/2021**

Percepció humana del so

[https://ioc.xtec.cat/materials/FP/Recursos/fp\\_prp\\_c03\\_/web/fp\\_prp\\_c03\\_htmlindex/WebConte nt/u3/a1/continguts.html](https://ioc.xtec.cat/materials/FP/Recursos/fp_prp_c03_/web/fp_prp_c03_htmlindex/WebConte nt/u3/a1/continguts.html)

**data de consulta: 09/09/2021**

Espectogrames:

- <https://media.upv.es/player/?id=a8b6d560-5f35-11e8-aab9-a1a4e108f2ab>

**data de consulta: 26/09/2021**

L'arc del violi

- <https://www.buenastareas.com/ensayos/Arc-Violi/5759824.html>

**data de consulta: 20/10/2021**

## 5.4 Fonts de les imatges:

Imatge 1: REMNANT, Mary. *Historia de los Instrumentos Musicales*. 1a edició. Sta. Perpètua de Mogoda: Ediciones Robinbook, 2002.

Imatge 2: REMNANT, Mary. *Historia de los Instrumentos Musicales*. 1a edició. Sta. Perpètua de Mogoda: Ediciones Robinbook, 2002.

Imatge 3: REMNANT, Mary. *Historia de los Instrumentos Musicales*. 1a edició. Sta. Perpètua de Mogoda: Ediciones Robinbook, 2002.

Imatge 4: REMNANT, Mary. *Historia de los Instrumentos Musicales*. 1a edició. Sta. Perpètua de Mogoda: Ediciones Robinbook, 2002.

Imatge 5: <https://descubriolahistoria.es>

Imatge 6: <https://www.kevinleeluthier.com>

Imatge 7: PIEROZZI, Alessandro. *Los instrumentos musicales*. 1a edició. Madrid: Alianza Editorial, 2018.

Imatge 8: <https://www.kevinleeluthier.com/>

Imatge 9: <https://www.kevinleeluthier.com>

Imatge 10: <https://www.miguelmateoluthier.com/>

Imatge 11: <http://einafustaltrainota.blogspot.com/>

Imatge 12: <https://www.pikist.com>

Imatge 13: Youtube, canal Irazú Violín.

Imatge 14: <https://www.arc-verona.es>

Imatge 15: <https://www.pikist.com>

Imatge 16: <https://www.pikist.com>

Imatge 17: SpringerLink.

Imatge 18: Strings magazine

Imatge 19: Strings magazine

Imatge 20: [www.deviolines.com](http://www.deviolines.com)

Imatge 21.1: [https://www.pennedout.com/things/music/fibonacci\\_and\\_golden\\_ratio\\_in\\_music.pdf](https://www.pennedout.com/things/music/fibonacci_and_golden_ratio_in_music.pdf)

Imatge 21.2: <https://violin-barcelona.blogspot.com/>

Imatge 21.3: <https://www.arkiplus.com/estilo-jonico/>

Imatge 21: Elaboració pròpia; geogebra

Imatge 22: Elaboració pròpia; geogebra

Imatge 23: Elaboració pròpia; geogebra

Imatge 24: Elaboració pròpia; geogebra

Imatge 25: <https://demonstrations.wolfram.com/HarmonicOscillation/>

Imatge 26: <https://demonstrations.wolfram.com/HarmonicOscillation/>

Imatge 27: <https://demonstrations.wolfram.com/HarmonicOscillation/>

Imatge 28: SERRA, S. [et. al.]. *Física. 2n Batxillerat*. 2a edició. Aravaca: McGraw-Hill, 2018.

Imatge 29: SERRA, S. [et. al.]. *Física. 2n Batxillerat*. 2a edició. Aravaca: McGraw-Hill, 2018.

Imatge 30: <http://niobio.github.io/>

Imatge 31: <https://myloview.es>

Imatge 32: Elaboració pròpia

Imatge 33: Elaboració pròpia

Imatges 34 i 35:

<https://www.semanticscholar.org/paper/The-physicist's-guide-to-the-orchestra-Bonard/a6209c277c5fd4e3e824ffb41bfa9a2e612f8d51>

Imatge 36: Elaboració pròpia

Imatge 37: Elaboració pròpia

Imatges 39 a 43: FLETCHER, Neville; ROSSING, Thomas. *The Physics of Musical Instruments*. 1a edició. Nova York: Springer-Verlag, 1991.

Imatge 44: . <http://materias.df.uba.ar/12b2018c1/files/2012/07/violin-resonancia.pdf>

Imatge 45: . <http://materias.df.uba.ar/12b2018c1/files/2012/07/violin-resonancia.pdf>

Imatge 46: <https://n9.cl/pahfv>

Imatge 47: <http://socialmusik.es/la-revolucion-del-monocordio/>

Imatge 48: <https://n9.cl/dulkk>

Imatges 49 a 74: Elaboració pròpia

Imatge 75: <https://soundsystems.es/blog/>

Imatges 76 a 89: Elaboració pròpia

## 5.4 Fonts de les taules:

Taula 1: DEL CASTILLO, B. [et al.]. *Guía práctica de especies de madera*. 1a edició. Madrid: Confemadera, 2004.

Taula 2: Elaboració pròpia.

Taula 3: UOC. *Acústica, ones mecàniques i so*. [en línia]

<[cbapps/o2/bitstream/10609/51241/7/F%C3%ADsica%20II\\_M%C3%B2dul2\\_Ac%C3%BAstica.%20Ones%20mec%C3%A0niques%20i%20so.pdf](cbapps/o2/bitstream/10609/51241/7/F%C3%ADsica%20II_M%C3%B2dul2_Ac%C3%BAstica.%20Ones%20mec%C3%A0niques%20i%20so.pdf)> [consulta: 10/09/2021]

Taula 4: <https://sites.google.com/a/xtec.cat/fisicaencontext/home/2n-batxillerat/6-musica-i-so>

Taula 5: Elaboració pròpia.

Taula 6: Elaboració pròpia.

Taula 7: Elaboració pròpia.

Taula 8: Elaboració pròpia.