



Treball de  
Recerca

---

# ESCOLTA-HO EN EL VENT

Estudi, redisseny i  
construcció d'una flauta  
travessera amb impressió 3D

---

Tutoritzat per Pau Pagès  
Institut de Celrà  
Curs 2023-2024  
Sira Font i Ginjaume

***“La flauta és un instrument amb efectes nocius sobre la moral. És massa excitant. “***

MARCEL MOYSE - *flautista*

***“The flute is simply divine: an instrument of grace. “***

THEOBALD BÖHM - *pare de la flauta moderna*

## **RESUMEN (castellà)**

Este trabajo trata sobre el estudio y la creación de una flauta travesera, un instrumento de viento madera con muchos años de historia.

Este instrumento ha estado presente en muchas culturas a lo largo del tiempo, y es un recurso bonito y popular para expresar sentimientos y emociones. Los sonidos que produce la flauta tienen una explicación física, que es el tema que estudia la psicoacústica. Relacionar la física con la música puede ser muy positivo para entender el funcionamiento de una cosa tan bonita como es el sonido musical.

En mi trabajo he descrito su funcionamiento, las fórmulas físicas que lo rigen, sus diferentes componentes y he investigado su origen e historia. También he diseñado, creado y habilitado un modelo de flauta hecha con impresión 3D de resina y plástico.

Por último, he analizado las características sonoras de la flauta travesera hecha con impresión 3D, y las he comparado con las de una flauta industrializada de latón, para poder determinar si el material del que está hecha determina su calidad de sonido.

## **ABSTRACT (anglès)**

This work is about the study and creation of a transverse flute, a woodwind instrument with many years of history.

This instrument has been present in many cultures throughout time, and it is a beautiful and popular resource to express feelings and emotions. The sounds produced by the flute have a physical explanation, which is the subject of psychoacoustics. Relating physics to music can be very positive to understand the functioning of such a beautiful thing as musical sound.

In my work I have described how it works, the physical formulas that govern it, its different components and I have investigated its origin and history. I have also designed, created and enabled a model of a 3D printed flute of resin and plastic.

Finally, I have analyzed the sound characteristics of the transverse 3D printed flute, and I have compared them with those of an industrialized brass flute, in order to determine whether the material it is made of determines its sound quality.

## ÍNDIX

<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>1</b>
<b>2. LA FLAUTA TRAVESSERA</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Història</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Model de Theobald Böhm</b>	<b>7</b>
<b>2.3. Materials</b>	<b>7</b>
<b>2.4. Anatomia de la flauta</b>	<b>8</b>
2.4.1. El cap	8
2.4.2. El cos	9
2.4.3. El peu	9
<b>2.5. Mecanismes</b>	<b>9</b>
2.5.1. Orificis tonals	9
2.5.2. Claus	10
2.5.3. Palanques	12
2.5.4. Costella	12
<b>2.6. Manteniment</b>	<b>13</b>
<b>2.7. Tipus de flautes segons els mecanismes</b>	<b>13</b>
<b>3. PRINCIPI FÍSIC DEL SO EN LA FLAUTA</b>	<b>15</b>
<b>3.1. Què és el so?</b>	<b>15</b>
3.1.1. So musical	15
<b>3.2. Física del so</b>	<b>16</b>
3.2.1. Vibració	16
3.2.2. Ones sonores	17
3.2.3. Classificació dels instruments	18
<b>3.3. Producció de so en la flauta travessera</b>	<b>18</b>
3.3.1. Creació del so inicial	19
3.3.2. Producció del so final	20
3.3.3. Els forats de to de la flauta	21
<b>3.4. Altres aspectes</b>	<b>21</b>
3.4.1. Harmònics	21
<b>3.5. Variacions de so segons el material</b>	<b>22</b>

<b>4. PART PRÀCTICA</b>	<b>23</b>
<b>4.1. Construcció de la flauta</b>	<b>25</b>
4.1.1. Introducció al món de la impressió 3D	25
4.1.2. Disseny de la flauta	26
4.1.3. Prototips previs	27
4.1.4. Impressió final	31
4.1.5. Addició de les claus i els mecanismes	33
<b>4.2. Comparació del so entre materials</b>	<b>35</b>
<b>5. CONCLUSIONS</b>	<b>38</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>41</b>
<b>7. ANNEXOS</b>	<b>43</b>
<b>7.1. Mecanismes de la flauta</b>	<b>43</b>
<b>7.2. La família de la flauta travessera</b>	<b>44</b>
<b>7.3. Dissenys 3D de la flauta travessera</b>	<b>46</b>
7.3.1. Disseny part central de la flauta	46
7.3.2. Disseny part inferior de la flauta	47
<b>7.4. Assajos acústics</b>	<b>48</b>
7.4.1. Instrumentació per comparar ones sonores	49
7.4.2. Càlcul teòric dels resultats	49
7.4.3. Altres gràfiques	51
<b>7.5. Aproximació del pressupost</b>	<b>56</b>

***Voldria donar les gràcies a un seguit de persones que m'han ajudat, i recalcar que sense elles aquest treball de recerca no hauria estat possible:***

*A en Quim Gibert i Font, un lutier de flautes de Blanes, per atendre les meves consultes tan amablement i pel seu suport incondicional al llarg de tot el projecte.*

*A la Nora Brugada i Garriga, estudiant de disseny de producte, per haver-me ajudat amb el SolidWorks®.*

*A l'Àngel Renart i Blanch, enginyer industrial a Inbrooll Industries SL, per l'ajuda en la impressió de la flauta i per compartir la seva expertesa en l'evolució dels diferents prototips que vam anar imprimint.*

*A la Mercè Farré, la meva professora de flauta, per inspirar-me i acompanyar-me en tot el procés de recerca sobre la flauta.*

*A en Jordi Servosa i Roca, enginyer acústic, per deixar-me els seus equips i per facilitar-me anàlisis de so molt acurats.*

*A l'Aina Fuguan Batlle i Mallorquí, per haver accedit a regalar-me la seva flauta travessera, i a l'empresa Inbrooll, per donar-me accés a les seves impressores 3D.*

*A en Pau Pagès i Jaén, el meu tutor de recerca, per l'entusiasme i suport que m'ha transmès en tot moment.*

*I per últim, m'agradaria donar gràcies a la meva família i amics, però sobretot als meus pares, per haver confiat en mi en tot moment, per haver-me ajudat a superar tots els entrebancs que se'm presentaven i per haver-me mostrat suport incondicional.*

## 1. INTRODUCCIÓ

---

La música és una de les formes d'expressió més extraordinàries de l'ésser humà. A través d'ella aconseguim transmetre emocions d'una forma bonica i única. No només és una eina de comunicació, sinó que també és un important símbol cultural que estableix la identitat individual i comunitària. És per això que considero que aprendre a tocar un instrument musical pot resultar ser de gran profit: una eina per adquirir habilitats de comunicació i d'expressió.

La flauta travessera ha estat el meu instrument des que tinc 6 anys. Porto tota la vida estudiant música, i considero que el meu instrument és una peça essencial de la meua vida. Em sento molt privilegiada d'haver-la tingut present al llarg dels anys, i sempre he tingut ganes d'experimentar i portar la passió pel meu instrument un pas més enllà.

A causa d'aquest desig, quan vaig començar a donar voltes sobre un possible tema pel meu treball de recerca, se'm va acudir fer alguna cosa relacionada amb la flauta travessera. Volia aprofundir sobre aquest instrument, però també volia que el meu treball tingués una part enfocada a la física. Així va ser com vaig decidir fusionar aquests dos àmbits. El so en la flauta travessera podia ser un bon context per l'estudi de les ones sonores i la seva propagació. Em va semblar que relacionar la física amb la música podia arribar a ser molt positiu per entendre el funcionament d'una cosa tan bonica com és el so musical.

Després de pensar molt en com enfocar-ho, vaig decidir que volia buscar una manera de construir una flauta travessera sense afectar la qualitat del so, i fer-ho amb un material que fos menys costós i més fàcil de manipular que el metall (les flautes travesseres solen estar fetes d'alpaca o llautó). Va ser aquí quan vaig decidir anar a visitar en Quim Gibert i Font, un lutier de Blanes que es dedica a la restauració de flautes i a la impressió 3D d'alguns instruments senzills com la gralla. En el cas d'instruments com la flauta travessera és molt més complicat fabricar-la amb impressió 3D, degut a la precisió que es necessita perquè els mecanismes funcionin correctament i a la seva longitud i al poc gruix que té el cos central. Després de parlar amb ell, tot i que em va dir que era un repte molt gran i que ell no ho havia aconseguit, vaig decidir que intentaria modelar i imprimir el cos d'una flauta amb tecnologies d'impressió 3D, i que després hi muntaria tots els mecanismes que l'acompanyen.

Els instruments musicals són molt especials, i molt poques persones es dediquen a la construcció d'aquests perquè és un ofici molt complicat. Jo era totalment inexperta en el disseny d'objectes 3D, però és un sector que em crida molt l'atenció i que trobo que té molt de

potencial. Em va semblar interessant poder fer recerca del tema i utilitzar aquestes eines tan innovadores per construir la meua flauta. Tot i que no sabia del cert si podria dur a terme un treball d'aquestes dimensions, em vaig engrescar i ho vaig provar de totes maneres.

Com a hipòtesi del meu treball vaig plantejar:

*“És possible construir una flauta travessera amb una impressora 3D obtenint un so que respecti les propietats sonores d'una flauta industrial d'alpaca.”*

Per verificar o refutar la hipòtesi em vaig marcar els següents objectius:

- Investigar la història de la flauta travessera.
- Entendre i conèixer els mecanismes intrínsecs de la flauta.
- Fer un estudi de la creació del so en la flauta.
- Conèixer bé els paràmetres físics que caracteritzen el so.
- Aprendre a fer servir un programa de disseny professional que em permeti dibuixar una flauta, i d'aquesta manera, imprimir-la en 3D.
- Reconstruir els mecanismes de la flauta i fer els ajustos necessaris perquè funcionin tots els conjunts de claus.
- Fer una anàlisi del so de la flauta impresa en 3D i d'una flauta de llautó per determinar si tenen la mateixa qualitat de so.

Amb els objectius ja molt clars del que volia fer, vaig començar a buscar contactes, informació, estudis i experiència que m'han anat servint per a conformar aquest treball.

Així doncs, el meu treball té una **part teòrica**, on primer de tot s'explica la història de la flauta, ja que volia saber si s'han construït flautes travesseres de diferents materials, i també volia indagar perquè es considera un instrument de vent-fusta si, en canvi, totes les que he vist són sempre de metall. En segon lloc, he volgut descriure i entendre els mecanismes que la formen i, finalment, he estudiat la física del so. La secció històrica l'he anat omplint amb l'ajuda d'informació trobada internet i amb les explicacions d'alguns professionals en l'instrument. Pel que fa al funcionament dels mecanismes, per un costat he consultat llibres i per un altre vaig haver d'aconseguir una flauta de segona mà per poder desmuntar-la i estudiar, més còmodament i de primera mà, els seus mecanismes. Han fet falta moltes hores d'observació i de dibuixar esquemes per intentar entendre tots i cada un dels conjunts que formen aquest complex instrument. En relació a la física del so, he fet una recerca exhaustiva d'estudis i assajos relacionats amb les ones sonores: els tipus d'ones, com mesurar-les i diferenciar-les,

entendre com s'origina el so en la flauta, etc. Al principi estava molt perduda, però mica en mica, he anat omplint els diferents apartats fent-ho el més entenedor possible. Bàsicament, volia fer un coixí de coneixement per entendre les propietats del so i per poder trobar una manera efectiva de comparar el so d'una flauta travessera comprada feta de llautó amb la de plàstic construïda per mi mateixa.

Llavors també he fet una **part pràctica**, on explico tots els passos del disseny i construcció de la meva flauta i hi faig la comparació de so de les dues flutes. Aquesta part pràctica va començar amb aprendre a fer servir el programa de disseny *SolidWorks*®. Després vaig fer diverses proves i vaig començar a endinsar-me en el món de les impressores 3D, més concretament, en les de fil i resina. A partir d'aquí vaig anar imprimint diferents prototips, fallits, que vaig haver d'anar redissenyant i retocant. Va ser difícil aconseguir un disseny que respectés la geometria interior de la flauta i, a la vegada, encaixés a la perfecció al muntatge dels mecanismes que la formen. Tot i la dificultat d'aquest repte, vaig aconseguir un disseny de prototip que complia ambdós requisits. Un cop impresa la versió definitiva, vaig muntar tots els mecanismes de la flauta travessera en el cos que havia dissenyat, treballant en un taller per retocar mides i polir forats. Finalment, vaig contactar amb un enginyer acústic perquè em deixés fer ús d'un sonòmetre professional de precisió que em permetés captar les freqüències de so de diferents notes amb la flauta, i d'un analitzador d'espectres per extreure'n gràfics que mostressin la comparació qualitativa del so entre les dues flutes.

He hagut de superar molts reptes al llarg del treball: en primer lloc, agafar les mides correctament per fer que el disseny encaixés a la perfecció amb els mecanismes tot i no tenir cap mena d'experiència en el disseny d'objectes 3D; en segon lloc, el meu desconeixement total sobre la física del so, ja que no s'estudien les ones fins a segon de batxillerat; en tercer lloc, el temps limitat per fer una feina d'aquestes dimensions. És per això que agraeixo a totes les persones que m'han ajudat a fer possible aquest treball, per haver confiat en mi i haver-me donat suport en diferents moments.

Gràcies.

## 2. LA FLAUTA TRAVESSERA

---

La flauta travessera és un dels grans instruments melòdics de l'orquestra que normalment ocupa la posició de solista. Aquest instrument tan antic s'empra en un gran ventall de cultures, ja que té un so molt agradable i pot realitzar tant notes de llarga duració com d'altres de curtes i àgils. Majoritàriament, s'utilitza en la música clàssica per a orquestres simfòniques o formacions de cambra.

La seva modalitat actual en el món occidental consisteix en un tub quasi cilíndric de metall, proveït de forats i claus. Es toca bufant directament contra l'embocadura<sup>1</sup>, sostenint-la paral·lelament al pla de la cara de l'instrumentista.

En contra de les creences populars, la flauta està classificada dins la família de vent fusta. Això és degut al fet que antigament es fabricaven exclusivament d'aquest material. En la classificació formal que estudia l'organologia<sup>2</sup>, les flautes pertanyen a una família més concreta: la família dels instruments de bisell<sup>3</sup>.

El tret principal que la caracteritza és que és l'instrument amb el registre més agut de la seva família i de tota l'orquestra.

### 2.1. Història

---

Abans d'endinsar-se en els detalls tècnics de la flauta, se n'ha de conèixer la història i el recorregut que ha tingut al llarg dels anys.

És molt interessant saber que les flautes són l'instrument musical més antic del món. Tot i que és difícil establir la data d'origen exacta d'un instrument, hi ha hagut una sèrie de troballes que ens permeten fer-nos una idea aproximada de la seva aparició. La més antiga d'aquestes descobertes és una flauta amb més de 42.000 anys que es va trobar a Alemanya. Darrere seu se n'han trobat amb 30.000 o 20.000 anys d'antiguitat. En aquella època totes estaven construïdes amb ossos d'animals.

---

<sup>1</sup> Veure apartat 2.4.1.

<sup>2</sup> L'organologia: ciència musicològica que estudia els instruments musicals.

<sup>3</sup> El bisell és una peça de fusta o de metall tallada en biaix sobre la qual el vent produeix el so en els instruments com la flauta dolça i certs jocs d'orgue.



Figura 1: Restes d'una flauta amb més de 35.000 anys d'antiguitat. Font: Viquipèdia.

Per altra banda, les evidències documentades de la flauta es remunten cap al 2000 a.C. a Egipte. Evidentment no existia la flauta tal com la coneixem, però en aquella època es comença a fer un lloc dintre la cultura egípcia. Gràcies a la iconografia següent, sabem que en aquella època anomenaven "Aulós" a aquest instrument, i ens permet deduir també que ja tenia un paper important dins les celebracions dels faraons i dintre de rituals religiosos que es realitzaven.



Figura 2: Iconografia en una copa de ceràmica grega amb un músic tocant l'"Aulós". Font: Museu del Louvre.



Figura 3: Reproducció actual del que era una flauta en l'època egípcia. Font: "Museo de Ureña".

A causa de la influència de diferents civilitzacions, especialment la Mesopotàmica, la flauta va evolucionar durant segles adoptant noves formes i essent construïda amb nous materials. Tot i que no hi ha evidències clares, es creu que la flauta va arribar a Europa des d'Àsia amb el nom de "Shinobue"<sup>4</sup> al segle XII, i va esdevenir la base de la flauta travessera actual. En aquell moment era una flauta d'una sola peça amb només sis forats. Com a prova d'això tenim el tractat d'instruments *Theatrum instrumentorum Seu Sciagraphia de Michaelis Praetorii C* i a *Las Cantigas de Santa Maria* (s. XIII).

<sup>4</sup> El "Shinobue" és el primer model de flauta que es toca transversalment. Va aparèixer a Xina l'any 900 a.C..



Figura 4: Il·lustració anglesa de dos burgesos tocant el "Shinobue". Font: "A guide to musical instruments" - Jérôme Leujene.

Aquests eren els inicis de la flauta, però la seva gran evolució començà en el segle XVII. Fins al moment es feia d'una sola peça i es tocava verticalment, però llavors Jacques Hotteterre va instaurar un model que revolucionaria completament l'instrument, fins a desviar-lo cap a un de separat i independent de la flauta dolça: la flauta travessera. Aquest gran enginyer i músic va crear un disseny de flauta que es componia de tres parts desmuntables que permetien regular l'afinació. També va fer que el tub es tornés cònic, millorant el timbre i l'afinació.

La seva última innovació va ser dotar l'instrument de molts més forats perquè tingués accés a dues octaves senceres. El seu objectiu era donar-li les capacitats suficients perquè la flauta, ara anomenada flauta travessera, s'introduís en el món dels instruments solistes. Efectivament, va complir amb les seves expectatives.



Figura 5: Model de flauta travessera ideat per Jacques Hotteterre. Font: "Great flute makers of France" - Tula Giannini.

El model de Jacques Hotteterre va prevaldre durant el segle XVIII amb algunes modificacions que ampliaven les possibilitats de l'instrument i intentaven aconseguir l'homogeneïtat de so i una major facilitat per a l'interpret de l'instrument.

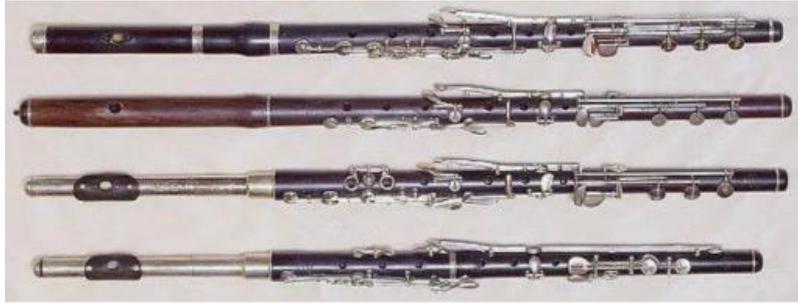


Figura 6: L'evolució del disseny de la flauta travessera al llarg del segle XVIII. Font: "La evolución de la flauta" - Staccato.

## 2.2. Model de Theobald Böhm

El model de la flauta travessera que coneixem avui en dia es va realitzar el segle XIX per Theobald Böhm. Aquest músic i inventor cèlebre va perfeccionar i modernitzar-ne totalment el disseny per tal de simplificar al màxim la tècnica d'execució de l'instrument. Per fer-ho, va elaborar un nou sistema de claus, d'anelles i de varetes.

Aquest model té un cos de 19 mm de diàmetre amb un total de 17 forats. El seu diàmetre presenta una petita reducció a la part del cos (de 2 mm) per afavorir l'emissió de les notes greus. La longitud total de la flauta és d'uns 67 cm. Té una extensió de 3 octaves, de do4 a do7.

A part d'aquesta innovació, Theobald Böhm va escriure "Die Flöte und das Flötenspiel" (*La flauta i l'art de tocar-la*), un tractat que conté els principis<sup>5</sup> acústics, tècnics i artístics que utilitzen tots els fabricants de flautes de l'època contemporània fins a l'actualitat.

## 2.3. Materials

Tot i que la flauta tradicional va passar per diferents materials (os, bambú, fusta), les flautes travesseres es van fabricar únicament de fusta fins a l'aparició del disseny de Theobald Böhm el 1847, que combinava la fusta amb algun aliatge de metall.

El material usat en la fabricació ha variat al llarg dels darrers anys, però avui en dia es poden utilitzar els següents materials per a la seva construcció: plata daurada, or blanc, alpaca, platí, pal·ladi, níquel, titani, carboni, letó, acer i cotar. Molts fabricants experimenten combinant caps compostos de materials diferents dels del cos.

<sup>5</sup> Veure apartat 3.3.2.

El material més corrent actualment en els professionals és l'alpaca<sup>6</sup>, ja que els models fets amb aquest material destaquen per la seva ràpida resposta i una projecció del seu so considerable per aquesta categoria de productes. Tot i que és el material òptim, té un preu molt elevat, és per això que moltes empreses es decanten pel llautó<sup>7</sup>, que és més barat i també té una qualitat molt bona.

## 2.4. Anatomia de la flauta

Com he mencionat prèviament, el model actual de la flauta està format principalment per tres parts que s'uneixen entre elles mitjançant encaixos: el cap, el cos i el peu. Dins de cada una d'aquestes parts s'hi troben altres tipus de components i mecanismes que li donen cos i forma. S'ha de desarmar per guardar-se i s'ha de tornar a muntar per ser tocada.

### 2.4.1. El cap

El cap és la part superior de la flauta, la qual conté el forat pel qual el flautista bufa. A aquest forat, com en altres instruments similars, se li diu embocadura. L'embocadura posseeix una peça metàl·lica adherida que es diu llavi o bisell.

L'embocadura requereix una tècnica específica amb la boca per bufar d'una manera determinada i fer sonar l'instrument de la manera en què va ser dissenyada.

A l'extrem del cap hi ha una peça que s'anomena corona<sup>8</sup>. És un cilindre de suro que es pot cargolar i descargolar. La seva funció és ajustar la llargada del cos de la flauta per regular l'afinació de l'instrument.



Figura 7: La secció de la flauta travessera denominada com a "cap". Font: pròpia.

<sup>6</sup> La alpaca és un aliatge metàl·lic fet de coure, zinc i níquel. S'empra en la fabricació de coberts i en orfebreria.

<sup>7</sup> El llautó és un aliatge de coure i de zinc. Té un color groguenc i és susceptible de gran poliment.

<sup>8</sup> Mirar apartat 4.3.1.3.

### **2.4.2. El cos**

De les parts de la flauta travessera aquesta és la més llarga i la que conté més forats i peces. Té 13 forats, 3 dels quals són més petits que la resta. En aquest tram de la flauta, hi trobem la majoria dels mecanismes<sup>9</sup> interns que permeten fer les diferents notes.



Figura 8: La secció de la flauta travessera denominada com a "cos". Font: pròpia.

### **2.4.3. El peu**

És la part més allunyada de la flauta i també la més curta. Aquesta part pot tenir 3 o 4 forats<sup>10</sup>, depenent del rang de notes que es vulgui aconseguir.



Figura 9: La secció de la flauta travessera denominada com a "peu". Font: pròpia.

## **2.5. Mecanismes**

El funcionament de notes de la flauta es troba distribuït entre el cos i el peu. A simple vista és un mecanisme molt complex i molt difícil de disseccionar. Hi ha moltes peces, que quan s'uneixen formen mecanismes. Per fer-ho entenedor, he decidit explicar cada peça una per una.

### **2.5.1. Orificis tonals**

Els orificis tonals, també anomenats "xemeneies" són els forats per on surt expulsat l'aire des de dins del cos de la flauta. Depenent de la combinació dels forats que es tapen, la nota produïda serà diferent. La majoria de flautes tenen 13 xemeneies grans i 3 de petites.

<sup>9</sup> Veure annex 7.1.

<sup>10</sup> Veure apartat 2.7.



Figura 10: *Xemeneia d'una flauta. Font: pròpia.*

La flauta travessera trenca amb els esquemes dels instruments de vent fusta, ja que aquests normalment tenen els forats calats arran del cos. En canvi, els orificis tonals de la flauta sobresurten del cos del tub. Segons com es construeixen trobem:

- **Xemeneies estirades:** Els orificis tonals són perforats per una màquina que els emboteix del tub aplicant calor i pressió, amb l'ajuda d'uns coixinets de boles giratòries, que posteriorment els pressionen i ajusten de nivell i orientació.
- **Xemeneies soldades:** Quan se solden directament al tub. Normalment es solden a mà, el que significa que és una labor que requereix molta precisió i és lenta de realitzar. Aquests orificis es troben en les flautes pensades per a professionals que són més cares.

En ambdós casos es distancien del tub aproximadament uns 5 mm com a màxim i 1 mm com a mínim.

### **2.5.2. Claus**

Són les peces que es pressionen amb els dits per tapar els orificis tonals de la flauta i variar així el to que s'obté. La majoria de claus es troben al cos, tot i que n'hi ha algunes al peu. És un mecanisme relativament complex format per diferents parts.



Figura 11: *Imatge d'un conjunt de claus de la flauta. Font: pròpia.*

## → Plats

Els plats són les peces que, al pressionar-les, tapen els forats. En una flauta dolça, els forats els tapem amb els tous<sup>11</sup> dels dits directament. En les travesseres premem aquests plats que a la vegada tapen el forat. N'hi ha dos tipus:

- Plats tancats: Amb aquest tipus de plats simplement hem de pressionar-los i els forats es taparan. És preferible per a principiants que es concentren en les digitacions en lloc de col·locar les mans amb extrema precisió.



Figura 12: Flauta amb plats tancats. Font: "Variaciones de la flauta" - Nick Thomson.

- Plats oberts: Són els que tenen un forat al mig. En les flautes de plats oberts només n'estan oberts alguns plats en els quals es recolzen els dits (no en tots els plats és necessari posar-los-hi). En apretar unes claus, altres plats també baixen. És un conjunt de mecanismes una mica complexos a simple vista.

Els plats oberts tenen una entonació superior, ja que hi ha més flexibilitat per controlar el to. Els flautistes més avançats utilitzen flautes amb aquests plats per promoure una millor posició de la mà, per obtenir una millor qualitat de to i per poder tocar tècniques esteses<sup>12</sup>.



Figura 13: Flauta amb plats oberts. Font: "Variaciones de la flauta" - Nick Thomson.

## → Coixinets

S'insereixen a la part inferior de les claus. La seva funció principal és donar un acabat llis i hermètic que és necessari per tancar eficaçment l'orifici tonal. També serveixen per protegir el metall, amb el que està fet la flauta, dels cops. Estan fets amb feltre<sup>13</sup> i s'han d'anar canviant regularment, ja que acumulen humitat i brutícia.

<sup>11</sup> La polpa del dit, on tenim l'empremta digital.

<sup>12</sup> Els *trinats*, els *vibratos* i els *piccolos* són exemples d'aquestes tècniques esteses que es poden aconseguir tocar quan tens un nivell elevat com a flautista.

<sup>13</sup> Drap gruixut de llana o pèl compost de fibres entrelaçades i adherides les unes a les altres.



Figura 14: Coixinets d'una flauta travessera.  
Font: "Zapatillas para flautes" - Ruemen.

### → **Molles**

Com a part del mecanisme de claus trobem les molles, que són unes peces petites que connecten amb d'altres per fer funcionar el moviment. Són les encarregades de fer que quan deixis d'apretar una clau, aquesta torni al seu lloc i no estigui tapant l'orifici tonal tota l'estona. Es poden construir amb diferents materials com acer inoxidable, plata o or. El més habitual és l'acer blau, que es pot trempar per endurir-lo encara més.



Figura 15: Extracció d'una molla de la flauta. Font: pròpia.

### **2.5.3. Palanques**

A part de les claus, a la flauta hi ha uns pocs mecanismes que faciliten al flautista tocar algun conjunt de notes que sigui difícil pel flautista. És a dir, són com "dreceres" que faciliten la digitació d'algunes notes.



Figura 16: Il·lustració d'una palanca. Font: pròpia.

### **2.5.4. Costella**

Les costelles o eixos són peces encarregades d'unificar i subjectar totes les claus a la flauta. Tenen pilars que les aguanten sense impedir que puguin rotar.

## 2.6. Manteniment

Com que quan toquem la flauta els canvis de to canvien segons la combinació d'obturació dels forats a través de les claus, si en algun lloc s'escapa l'aire per defectes de l'obturació, el so es veu afectat de manera important.

És per això que el manteniment de la flauta és molt crucial, no només per estètica, sinó també per aconseguir un millor rendiment de l'instrument. L'estat general de "salut" d'un instrument també és fonamental per la seva durabilitat.

La flauta s'ha de netejar completament sempre després de tocar, tant per dins com per fora. Es fa amb mocadors de microfibra, ja que acumulen ràpidament restes de greix i suor de la pell.

## 2.7. Tipus de flautes segons els mecanismes

La flauta de Böhm forma part d'una família de flautes travesseres<sup>14</sup> que es classifiquen pels seus registres més greus o més aguts.

Alhora, de flautes de Böhm (el model de flauta del que tracta el meu treball) n'hi ha de diversos tipus, segons les variacions en la forma d'alguns mecanismes<sup>15</sup>.

Al peu de la flauta, poden existir dos tipus de mecanismes:

- Peu de do: sistema de tres claus (do, do# i re#). La nota més greu és do3.
- Peu de si: sistema de quatre claus (si, do, do# i re#).

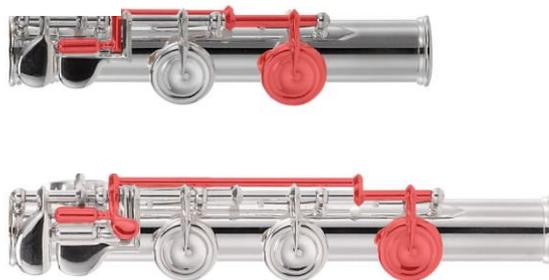


Figura 17: En la imatge superior s'observa un peu de do. En la imatge inferior s'observa un peu de si. Font: pròpia.

<sup>14</sup> Veure l'annex 7.2.

<sup>15</sup> Entenem com a mecanismes tot el conjunt del sistema de claus de la flauta travessera.

Si ens fixem en les claus, normalment la majoria dels plats de la flauta estan en una línia. Tot i que això és el més usual, hi ha algunes flautes que tenen dues claus desalineades. Més concretament, les claus desalineades són les encarregades de fer sonar la nota Sol. És una disposició més còmoda si no tens els dits llargs. L'objectiu d'aquesta modificació no és per a millorar el so de la flauta, sinó que es fa amb vista a eliminar costos de producció i manteniment pel fet de simplificar mecanismes.

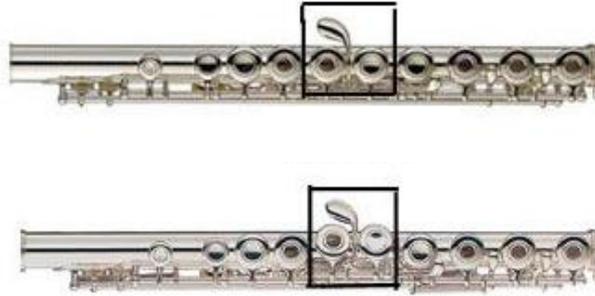


Figura 18: En la imatge superior s'observa una flauta amb les claus alineades. En la inferior, una amb les claus desalineades. Font: pròpia.

En el cas de les meves flautes, tant la que toco professionalment com les que he construït són flautes amb peu de si i amb el sol desalineat.

### 3. PRINCIPI FÍSIC DEL SO

Els fenòmens físics que originen el so dels instruments són desconeguts per bona part de qui en fa ús. Seguidament s'explica de manera entenedora què és, com es produeix, i com es desenvolupa el so.

#### 3.1. Què és el so?

Quan parlem del so, normalment pensem en aquell estímul que passa a les nostres orelles. Però, quan un arbre cau en un bosc desert sense un oient a prop, existeix un so? Així mateix, quan sentim un so que ha estat generat dintre del nostre aparell auditiu, i no en el món exterior, existeix un so? En ambdós casos la resposta és que sí. La definició més completa del terme so ha de considerar tant el fenomen físic com el fenomen psicoacústic. Per diferenciar-los direm que en el primer cas va existir únicament un esdeveniment sonor, i en el segon cas, únicament un esdeveniment auditiu. Generalment existeixen tots dos: l'ona mecànica que es propaga per un medi a través de les seves partícules, i la sensació auditiva que aquesta produeix.

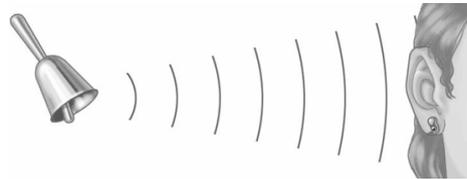


Figura 19: Esquema d'una ona que es propaga i és percebuda pel sistema auditiu.  
Font: "Només ho sap el vent" - UVic.

##### 3.1.1. So musical

No totes les ones acústiques s'identifiquen com a sons musicals. Els sons musicals són només una part de tots els sons que els humans podem percebre, però la frontera entre so i soroll no és absolutament precisa. De manera general, es sol entendre com a so musical tot allò que té un "to" associat. El to és aquella característica que permet ordenar-los en una escala de greus a aguts. Per altra banda, es considera soroll (no musical) tots aquells sons que no són agradables, és a dir, so no desitjat.

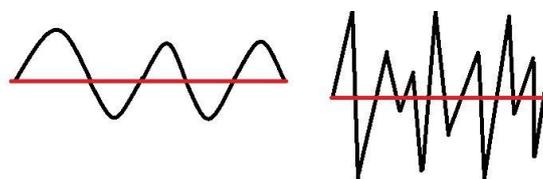


Figura 20: Comparació entre un so musical i un soroll. Font: pròpia.

## 3.2. Física del so

El so és la matèria primera de la música, per això és necessari definir físicament què és i com es produeix. La física del so és estudiada per l'acústica, que tracta tant la propagació de les ones sonores en els diferents tipus de mitjans com la interacció d'aquestes ones sonores amb els cossos físics.

El so és generat a partir del moviment vibratori d'un sistema mecànic o acústic, com podrien ser cordes, membranes o columnes d'aire. Aquest moviment es transmet per mitjà de l'aire i provoca canvis en la velocitat i pressió que es propaguen en totes direccions. La propagació d'aquests canvis a l'aire s'anomena ona acústica o sonora.

En aquesta secció es revisaran els conceptes fonamentals i les diverses magnituds i variables associades amb el fenomen sonor, per entendre millor la idea de vibració i d'ona sonora.

### 3.2.1. Vibració

Com s'ha dit prèviament, el so és una successió de canvis de pressió provocats per una vibració. La vibració provoca alteracions a les partícules del medi, que normalment és l'aire, creant canvis de pressió que es propaguen en forma d'ones. Quan diem que les vibracions produeixen deformacions i tensions a la posició d'equilibri, aquest concepte es refereix al valor de la vibració quan el medi es troba en repòs i no hi actua cap força.

Es parla de vibració acústica quan els efectes de la vibració tenen una magnitud associada a un medi material.

Quan un medi vibra, no només s'alteren les magnituds que descriuen el moviment (posició, velocitat, acceleració) sinó també totes les altres que es relacionen amb les propietats del medi. Així, per al cas de les vibracions de l'aire, és freqüent parlar de les fluctuacions<sup>16</sup> de la pressió i de la densitat.

En situació de silenci total, l'estat de l'aire és el mateix en qualsevol zona de l'espai: la densitat (nombre de molècules per unitat de volum) és aproximadament  $1,23 \text{ kg/m}^3$  (mesurat a  $15^\circ\text{C}$  i al nivell del mar), el valor mitjà de la velocitat és zero (és a dir, tot i que en un petit volum hi pot haver molècules movent-se en direccions diferents, la seva mitjana és nul·la) i el de la pressió és aproximadament d'una atmosfera (1 atmosfera). Qualsevol canvi en alguna d'aquestes magnituds va associat amb canvis en les altres dues.

<sup>16</sup> Una fluctuació és una desviació del valor d'una magnitud variable respecte al seu valor mitjà.

Quan volem parlar de fenòmens acústics, no donem els valors absoluts d'aquestes variables, sinó el seu canvi respecte dels valors mitjans. Es parla llavors de variables acústiques.

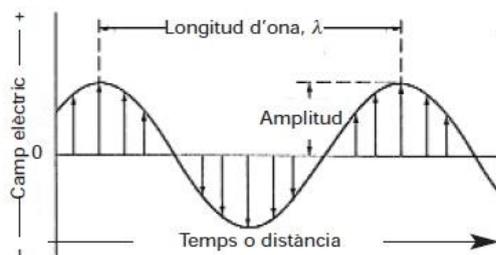
### 3.2.2. Ones sonores

La naturalesa del so musical és l'ona sonora. Com es concreta en l'apartat anterior, una ona sonora és la propagació en les tres direccions de l'espai dels canvis vibratoris que provoca un objecte dins l'aire. Tot i que vibració i ona són conceptes molt propers, no són iguals.

- Vibració. És un concepte local: el canvi d'una magnitud al llarg del temps en un únic punt de l'espai.
- Ona. Pel contrari, ona és un concepte espacial, doncs afecta a molts punts de l'espai.

La velocitat d'aquestes ones depèn totalment de les propietats físiques del medi, sobretot de la temperatura i la densitat. En el cas de l'aire, la velocitat és d'uns 340 m/s a 20 graus centígrads. En un medi de propagació més dens que l'aire, com que les partícules estaran més a prop, es facilitarà la propagació i la velocitat serà més alta.

Per poder descriure una ona sonora cal mesurar les seves característiques. Però per poder descriure'n el so no s'ha de fer una anàlisi de l'ona al llarg de l'espai on es propaga, sinó que hem d'agafar un punt concret en l'espai i mirar com hi varia la pressió al llarg del temps. Amb aquestes variacions de pressió, podrem fer un estudi acurat del so.



Magnitud	Símbol	Descripció	Unitats
Amplitud	A	Distància màxima a què arriba l'elongació	m
Elongació	x o y	Distància a què es troba un punt del medi respecte la seva posició d'equilibri (en ones mecàniques) o valor d'un camp respecte al seu valor mitjà (en ones immaterials)	m
Longitud d'ona	$\lambda$	Mínima distància entre dos punts que es trobin en fase, és a dir, en el mateix estat de vibració	m
Nombre d'ona	k	$k = 2\pi/\lambda$	rad/m
Període	T	El temps que tarda la ona en completar una vibració o el temps que tarda la ona en completar una longitud d'ona	s
Freqüència	$\nu$	Nombre de oscil·lacions per segon o la inversa del període	Hz ( $s^{-1}$ )
Freqüència Angular	$\omega$	$\omega = 2\pi/T$	rad/s
Velocitat de Propagació	v	Distància que avança la ona per unitat de temps. En medis homogenis, la velocitat no varia: $v = \lambda/T = \omega/k$	m/s

Figura 21: Resum dels conceptes bàsics associats a les ones propagatives. Font: pròpia.

### 3.2.3. Classificació dels instruments

La classificació més freqüent que fem dels instruments musicals és classificar-los per l'element vibrant, i en distingirem només dos grans grups (prescindirem dels instruments de percussió):

- **Cordòfons:** L'element vibrant és la corda. Segons l'acció sobre la corda distingim els instruments de corda fregada (família del violí), pinçada (família de les guitarres) i percutida (piano).
- **Aeròfons:** L'element vibrant és la columna d'aire. En aquesta categoria tenim tots els instruments de vent, incloent la flauta.

Un criteri diferent per a classificar-los (i més interessant des del punt de vista de funcionament físic) és la manera en què l'instrumentista interacciona amb els elements vibrants. Igual que en els exemples vibratoris precedents, distingim dos tipus d'actuacions en els instruments: actuació instantània i actuació mantinguda al llarg del temps. I a partir d'aquests dos tipus d'actuacions classifiquem els instruments en dos grans grups: els instruments de vibració lliure (piano, guitarra, etc.) i els de vibració autoexcitada (flauta travessera, violí, etc.).

### 3.3. Producció de so en la flauta travessera

En contra del que podem imaginar-nos, un instrument realment no és l'objecte físic que veiem al imaginar-lo. Un instrument és tot allò necessari per crear el so desitjat. La majoria dels instruments musicals requereixen: d'una font d'energia que produeix la vibració, i d'un mecanisme que converteix aquesta font d'energia en un so musical.

Els instruments musicals han de fer vibrar l'aire dins de les freqüències audibles per l'oïda humana (entre els 20 Hz i els 20 kHz). Per produir so, cal un sistema amb elements mecànics que vibrin a freqüències adequades i que tingui acoblament amb l'aire. Sovint els paràmetres mecànics del sistema varien per l'actuació de l'instrumentista, això permet obtenir diversos tons amb un mateix sistema vibratori i variar-ne les característiques acústiques.

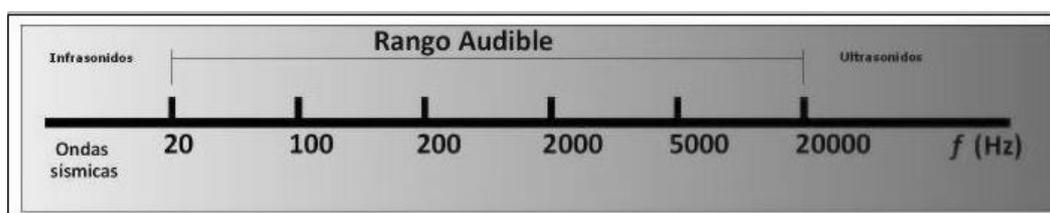


Figura 22: Esquema de les freqüències audibles per l'oïda humana. Font: "Principi físic de la música", Eliezer Martínez.

En essència, una flauta és un tub cilíndric buit, que a dins hi vibra una columna d'aire. Totes les modernitzacions i variacions d'aquest instrument no alteren els principis bàsics següents:

→ **VOLUM - pressió**

Alteració contínua de l'altura del so deguda a les variacions de la pressió de l'aire. La nota de bisell força el ressonador a seguir la vibració.

→ **NOTA - freqüència**

Alteració discontinua de la freqüència en tapar o destapar forats del tub. El so varia en funció de la distància del forat al bisell (L). Si s'obre un forat, es canvia la L i, com s'acaba de comentar, canvia la freqüència.

→ **HARMÒNIC - velocitat**

Alteració discontinua de l'altura del so en variar la pressió de l'aire. Quan es bufa amb més potència, el so salta cap a un harmònic<sup>17</sup> més agut, ja que en modificar la velocitat de l'aire és força l'instrument a canviar de mode de vibració.

### **3.3.1. Creació del so inicial**

L'inici del fenomen sonor en la flauta comença just quan el flautista bufa amb l'objectiu de produir so. El flux d'aire va a través del forat de l'embocadura i colpeja el bisell. Com que de la boca surt un flux d'aire turbulent (gens uniforme), això provoca que quan bufem, una part de l'aire entri i una part de l'aire surti a l'exterior en forma de remolins (vòrtex de Karman<sup>18</sup>). La turbulència la trobem en la forma, el període, la longitud i la velocitat, entre altres paràmetres del corrent d'aire.

El corrent es barreja de forma gradual amb l'aire de l'entorn, ampliant i reduint la seva velocitat. Si representem la velocitat del corrent en funció de la distància del punt central del bisell, la corba resultant té forma de campana: la velocitat màxima queda al centre.

Degut a que el tub comprimeix l'aire cap a dins, l'aire actua com a molla; quan el corrent d'aire comença a fluctuar dins i fora del tub, aquesta "molla" rep una ràpida successió de petits copets i comença a vibrar a una freqüència diferent a la del bisell inicial. Mica en mica el flux caòtic va adoptant vibracions rítmiques sincronitzades.

---

<sup>17</sup> Veure l'apartat 3.4.1.

<sup>18</sup> Un patró repetitiu de vèrtex remolins que és responsable de la separació del flux d'un fluid al voltant dels cossos contundents.

### **3.3.2. Producció del so final**

Quan el flux d'aire està ben sincronitzat, es produeix una nota musical. Aquesta nota pot ser alterada lleugerament per ajustos en la respiració i en el moviment de llavis, però per canviar-ne totalment la freqüència (o nota), cal canviar la longitud de la columna.

La freqüència que tindrà l'ona sonora dins la columna d'aire depèn de la velocitat del so a l'aire i de la geometria de la columna.

La columna d'aire vibra gràcies a l'aire que s'introdueix a través del forat de l'embocadura, donant lloc al seu so fonamental. L'altura d'aquest so depèn de la longitud efectiva de la columna d'aire en vibració. És per això que el control del to es modifica obrint i tancant el sistema de claus al llarg de la longitud del tub.

Les notes més agudes de la primera octava s'obtenen fent més curta la longitud de la columna d'aire i augmentat la freqüència. S'aconsegueix obrint els forats i bufant més fort per tenir una velocitat més alta de propagació. En canvi, per fer les notes més greus s'ha de disminuir la velocitat de propagació, perquè d'aquesta manera l'ona acústica viatgi més lluny tot allargant el recorregut, i a conseqüència puguem obtenir una freqüència més baixa. S'obtenen bufant menys.

L'afinació correcta d'una nota depèn de la distància de la boca a l'instrument i del lloc exacte on ha de ser col·locat l'orifici. Les proporcions de qualsevol instrument han d'estar mil·limetrades.

L'any 1846 Böhm va fer una sèrie d'experiments per intentar trobar les dimensions del tub més adequades per una columna d'aire perfecte, va concloure que:

1. La potència, l'amplitud i la determinació clara d'una nota fonamental, és proporcional al volum d'aire posat en vibració.
2. Reduir l'amplada i la llargada de la part més alta del tub té importància alhora de la producció de les notes i l'afinació de les octaves.
3. Aquesta reducció ha de ser realitzada amb una proporció geomètrica, que està íntimament lligada a la corba d'una paràbola.
4. La formació de les ones sonores té lloc més fàcilment en un tub cilíndric, tal que la seva longitud sigui 30 vegades el seu diàmetre.

### 3.3.3. Els forats de to de la flauta

Quan obrim els orificis tonals el que estem fent és canviar la pressió dins del tub i provocar un canvi d'impedància<sup>19</sup> que portarà a la creació d'una freqüència concreta.

El disseny d'una flauta és imperfecte i moltes notes requereixen un lleuger ajust de to pel músic. Es canvia l'afinació del to principalment movent la barbata cap enrere i cap endavant, acostant-se el forat de la embocadura o allunyar-lo i així canviar la geometria del raig de bufada. Aquestes accions tenen diverses funcions: es disminueix l'obertura del forat, es disminueix l'angle sòlid disponible que l'ona de so pot irradiar i es redueix la longitud i es canvia l'angle del raig.

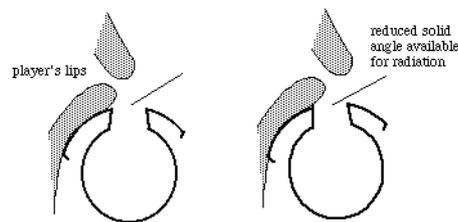


Figura 23: Il·lustració de l'angle de bufada d'un flautista. Font: "Flute acoustics" - Joe Wolfe.

## 3.4. Altres aspectes

### 3.4.1. Harmònics

Quan, sense destapar forats, intentem bufar amb més velocitat i més pressió, ràpidament sonarà una nota nova, ja que s'haurà excitat una ressonància superior a la fonamental. Els músics que no coneixen el funcionament dels instruments sempre n'han dit harmònics, però els harmònics són un altre concepte: són sempre múltiples a la freqüència fonamental i es troben a les ones complexes.

Les freqüències dels modes superiors no són múltiples exactes a la freqüència del to fonamental, però s'hi assemblen per proximitat. Les ressonàncies de la columna d'aire de qualsevol tub obert, tenen freqüències molt properes però diferents a múltiples exactes harmònics. La raó és que la longitud efectiva del tub disminueix suaument quan s'incrementa la freqüència, una virtut de les variacions del flux en un tub amb els extrems oberts. Sovint el que es fa és excitar el so de manera que sona un mode superior, un concepte realment diferent als harmònics.

Generalment com que la flauta és un instrument molt variable, obtenim freqüències diferents -però properes- entre el do fonamental i els seus modes superiors.

<sup>19</sup> Representa la quantitat de resistència amb la que s'oposa un circuit a la circulació de corrent.

### 3.5. Variacions de so segons el material

La resposta a si el material de construcció és important a tenir en compte en el so de l'instrument és sovint dubtosa. Hi ha estudis sobre la idoneïtat d'un material o un altre a l'hora de construir flautes, però cap d'aquests és conclusiu.

S'han fet experiments substituint una flauta de fusta per una de plàstic (Coltman 1971, Widholm 2001), i s'ha demostrat que ni flautistes ni espectadors no poden distingir entre flautes fetes de diferents materials. Contràriament, el constructor de la flauta moderna, Theobald Böhm, afirma que és l'estructura molecular del material la que determina el timbre de la flauta. Per altre banda, l'enginyer industrial i constructor de flautes Josep Tubau afirma que el material només és important en l'acabat de l'instrument.

A través de professors de l'escola de música, podríem dir que el material en els instruments de vent influeix de manera facilitadora a l'hora de fer sonar l'instrument. La columna d'aire entra en vibració més fàcilment o més difícilment segons el material. Tanmateix això és més important en altres instruments de vent, no en les flautes.

El que podem afirmar amb seguretat és que el factor més important que determina el de la flauta travessera és la seva geometria interna, per on s'estableix la columna d'aire. La forma i la geometria del bisell són el factor més crucial. El material del qual es construeix la paret de l'instrument, en canvi, no té evidències de que tingui cap efecte apreciable en el color o en el rang de dinàmiques (qualitat de so i musicalitat) de l'instrument.

Actualment els professionals que es dediquen a la flauta, opten per una combinació de materials i marques pel seu instrument. Sigui per la geometria de la embocadura, sigui per la sonoritat d'un material en concret, el material per ells és un factor a tenir en compte.

Tot això està per concloure. Existeixen molts factors que influeixen en el resultat final d'una flauta, el material de construcció és només una de moltes circumstàncies a considerar.



Figura 24: Seguit de flautes travesseres construïdes amb diferents materials. Font: Viquipèdia.

#### 4. PART PRÀCTICA: CONSTRUCCIÓ D'UNA FLAUTA TRAVESSERA

La part pràctica del meu treball va començar quan vaig anar a visitar en Quim Gibert i Font, un lutier<sup>20</sup> situat a Blanes que es dedica a la reparació d'instruments de vent i a la impressió 3D de gralles i flautins.



Figura 25: Taller d'en Quim Gibert. Font: pròpia.

Tot i que ja se m'havia acudit d'imprimir la meua flauta amb una impressora 3D, no ho vaig veure del tot clar fins que el vaig visitar a ell. Només d'arribar em vaig quedar ben sorpresa perquè sense saber-ho, havia anat a parar al taller d'un lutier que no només reparava instruments, sinó que també en fabricava i comercialitzava. Em va ensenyar els seus prototips i dissenys, i gràcies a això vaig veure que era un camí viable i al meu abast, ja que a casa tinc accés a impressores 3D de qualitat.

En Quim em va dir que, tot i que requeriria de moltes hores de feina, ell creia que jo seria capaç de dissenyar i imprimir el cos nu de la flauta, però em va convèncer de no intentar reproduir tots els mecanismes i les claus també en 3D. Són uns mecanismes que funcionen gràcies a les seves mides petites i a la capacitat de lliscar dels materials amb què es fabriquen. Aquestes dues característiques no es poden aconseguir amb una impressora 3D, i hauria

---

<sup>20</sup> Un lutier és un artesà que fabrica i repara instruments musicals, especialment de cordes pinçades o fregades.

d'haver redissenyat tots els conjunts que formen la flauta. En Quim mateix em va dir que havia intentat imprimir algun instrument de claus tot en plàstic, però que **mai ho havia aconseguit**.



Figura 26: En Quim Gibert tocant una gralla impresa amb 3D. Font: pròpia.



Figura 27: Intent fallit d'en Quim Gibert d'imprimir un clarinet. Font: pròpia.

De seguida vaig descartar aquesta opció, perquè hagués requerit molt més temps i experiència. Després se'm va acudir que podia utilitzar els mecanismes d'una flauta de segona mà, i trobar una manera d'acoblar-los al cos imprès de la flauta. Tot i no estar completament segura de poder-ho aconseguir, vaig decidir intentar-ho, i així és com vaig començar a dissenyar la meua flauta.



Figura 28: Taula d'impressió de les gralles que en Quim Gibert comercialitza a la seva empresa. Font: pròpia.

## 4.1. Construcció de la flauta

### 4.1.1. Introducció al món de la impressió 3D

La impressió 3D és una tecnologia d'innovació que està aportant canvis importants en tots els sectors. En el passat, la construcció i muntatge d'objectes de manera mecànica era costosa a nivell de material i temps, a més de requerir habilitats específiques. La impressió 3D permet realitzar objectes de tota mena amb una reducció considerable dels costos econòmics i d'inversió de temps.

Aquesta tecnologia consisteix en crear objectes tridimensionals mitjançant la superposició de capes generades a través d'una impressora.

Al llarg de tot el procés de construcció de la meva flauta he utilitzat dues impressores diferents, ambdues propietat de l'empresa *Inbrooll Industries SA*:

- Original Prusa i3 MK3S+: Aquest model és una impressora de filaments de polímers. És un impressora professional utilitzada per prototips no comercialitzats i peces de prova. L'he utilitzada per fer els prototips previs a la impressió final.
- Formlabs 3B+: Aquesta és una impressora de resina, pensada per imprimir peces molt precises i de qualitat. És la que he fet servir per imprimir el model final de la flauta travessera.

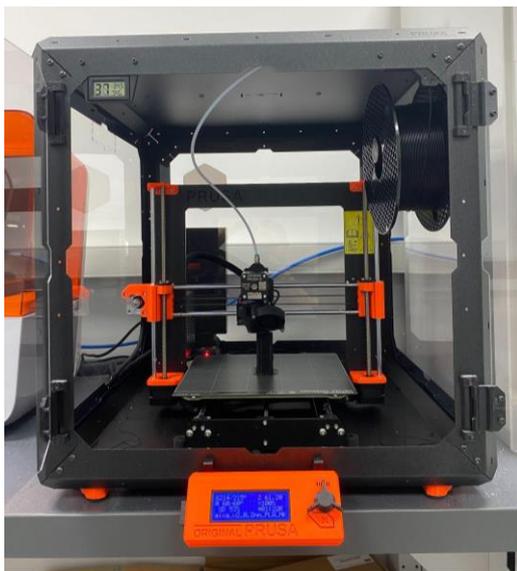


Figura 29: Impressora de filaments. Font: pròpia.

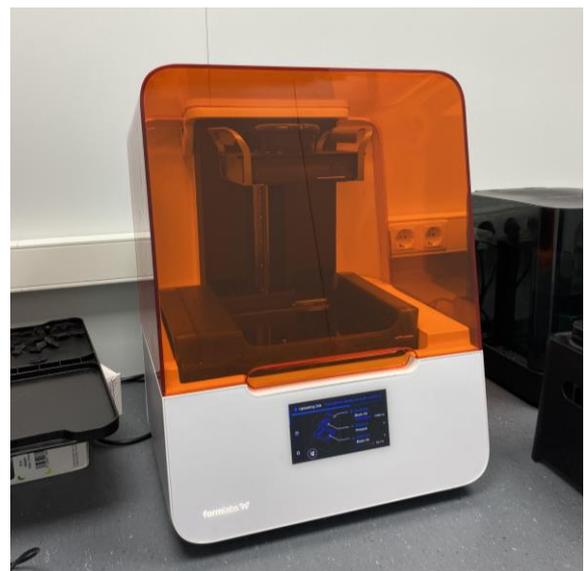


Figura 30: Impressora de resina. Font: pròpia.

#### 4.1.2. Disseny de la flauta

El primer pas va ser aconseguir una flauta travessera de segona mà per poder desmuntar-la i estudiar totes les peces que la formen. En vaig treure totes les claus fins que em va quedar el tub principal. Aquí va ser quan vaig haver de començar a dissenyar.



Figura 31: Cos nuu d'una flauta travessera industrial. Base del meu disseny. Font: pròpia.

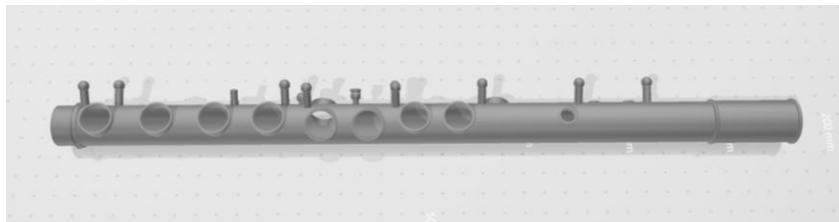


Figura 32: Disseny final de la part central de la flauta travessera. Font: pròpia.

Per fer tots els meus dissenys he estat utilitzant *SolidWorks*<sup>®</sup>, un software professional de disseny mecànic que et permet crear models sòlids en 3D. La flauta és una peça molt detallada, i per no afectar a la precisió sonora de l'instrument havia de fer les mesures el més exactes possibles. Per aconseguir aquest nivell de precisió vaig utilitzar un projector de perfils. És una eina idònia per aquest tipus de tasques.

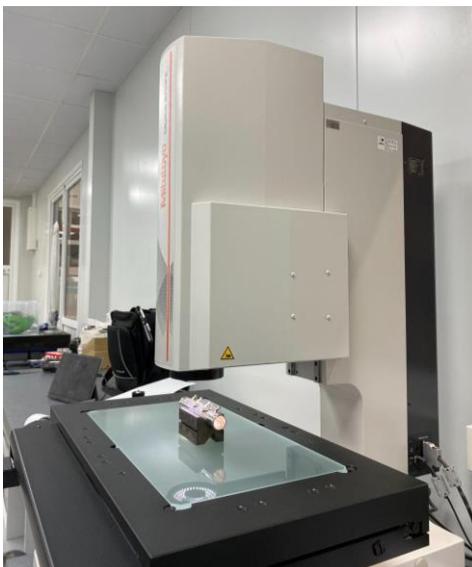


Figura 33: Projector de perfils. Font: pròpia.

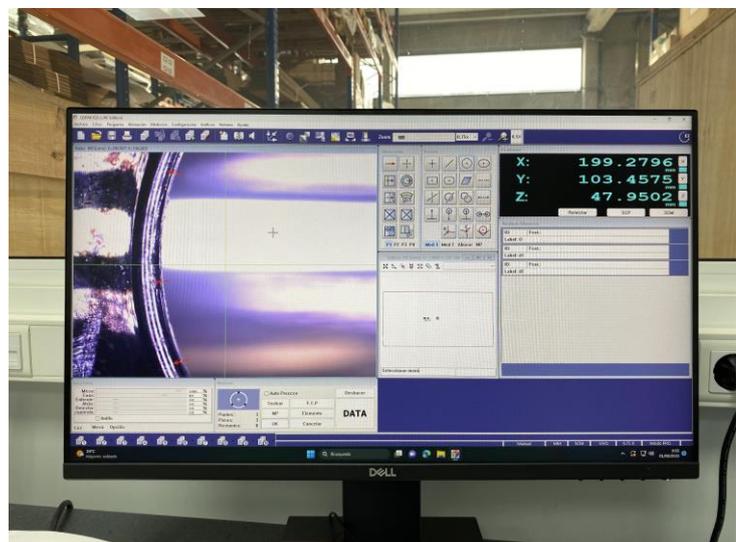


Figura 34: Programa que transcriu les dades del projector de perfils. Font: pròpia.

Un cop tenia les distàncies entre forats, eixos i extrems, vaig començar a investigar i remenar amb el *SolidWorks*®. Amb l'ajuda de la Nora Brugada i l'Àngel Renart vaig aconseguir dominar aquest programa, i vaig ser capaç de crear un primer model 3D de la flauta, al qual li he hagut d'anar retocant moltes coses.

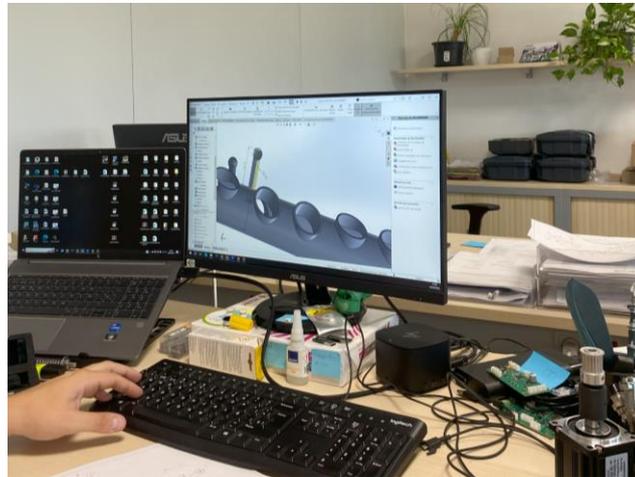


Figura 34: Estudi des d'on dissenyava la flauta amb *SolidWorks*®. Font: pròpia.

#### **4.1.3. Prototips previs**

En aquest apartat faré un recopilatori de les impressions que van precedir al disseny final. Aquestes les vaig anar fent amb una impressora de fil, ja que és més ràpida i el material és més barat que la de resina.

M'ha estat difícil recopilar tots els problemes i imprevistos que m'he trobat en el procés de construcció de la meua flauta, però en els apartats que venen a continuació intento mostrar-ne una petita part perquè us pugueu fer una idea de la immensitat del projecte.

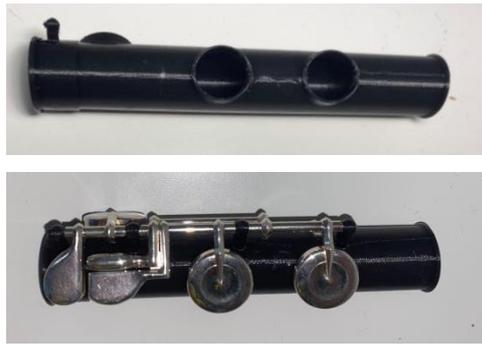


#### **Gruixudesa de les parets**

El primer que vaig fer va ser imprimir cilindres de diferents gruixos, per decidir quin gruix li donaria a la meua flauta.

Volia que fos el més petita possible, però havia de ser rígida perquè no es trenqués fàcilment. Vaig provar 4 mm, 8 mm i 12 mm. Després d'avaluar-los un per un, em vaig decantar pel de 8 mm.

En la flauta travessera industrialitzada les parets tenen un gruix de 1mm. Canviar aquest valor de cares a la impressió va suposar moltes modificacions en les mides preses.



### Les primeres proves

Per començar amb els dissenys, vaig decidir atacar primer el peu de la flauta, ja que era la part més petita i m'ajudaria a veure si estava encaminant bé el disseny.

La imatge del costat correspon a la primera impressió de totes. La vaig fer únicament per veure si els forats i els suports pels eixos eren prou resistents.

### Prototips i mètode assaig-error

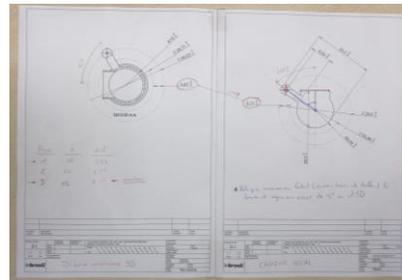
Després, vaig imprimir un primer peu de veritat. Aquest ja tenia la forma completa, i vaig poder muntar els mecanismes. Tot i això, algunes mides fallaven, i les claus no es podien accionar del tot bé.

Vaig desmuntar les peces i vaig continuar modificant el disseny. Com que ja començava a encaminar-me correctament, vaig començar a dibuixar la part central i el cap de la flauta.

### Prototip de cos sencer

Entre la creació del peu i el cos hi va haver uns quants prototips de prova, però, finalment, vaig poder imprimir un model de flauta dissenyat per mi mateixa sobre el qual es podien muntar els mecanismes de la flauta.

Tot i que tot es començava a posar a lloc, els suports dels eixos i els seus angles no acabaven d'encaixar, i vaig haver de trobar una manera de mesurar-los per poder solucionar el problema i seguir endavant. Quan finalment vaig trobar els angles adequats, vaig arreglar el disseny i vaig poder anar acotant errors que havia fet en un principi.



### Forats pels eixos

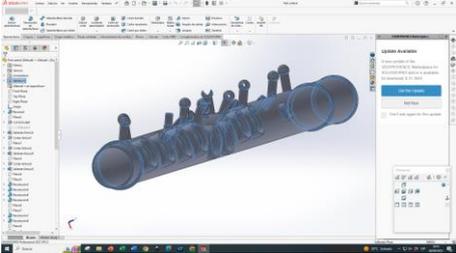
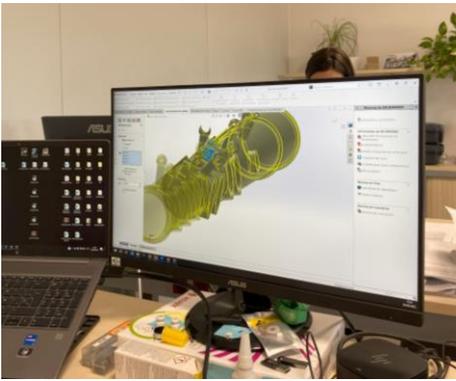
El següent obstacle que em vaig trobar abans d'imprimir el disseny final va ser haver de descobrir quina mida feien els forats dels suports per on havien de passar els eixos.

Vaig utilitzar un conjunt de punxons que serveixen per mesurar diàmetres. Es tracta d'anar provant-los tots fins que trobes el que encaixa a la perfecció.

Quan tenia les mides exactes d'aquests forats, ja ho tenia tot preparat per imprimir la versió final.

#### 4.1.3.1. Procés d'impressió amb filament

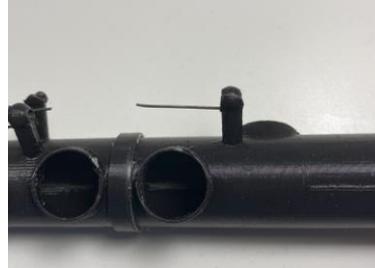
En aquest apartat del treball explicaré detalladament tot el que comporta imprimir un prototip de flauta amb la impressora de fil.

	<p><b>Disseny</b> Com és lògic, el primer pas és dissenyar la part de la flauta amb el <i>SolidWorks</i><sup>®</sup>.</p>
	<p><b>Adaptació a impressió</b> Un cop tens el disseny acabat, s'ha d'adaptar a la impressió. Això es fa en dos passos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Passar un autocorrector de disseny 3D que s'assegura que no tinguis espais buits o peces incompatibles.</li> <li>2. En el cas de les peces llargues, les havia de dividir en trossos més petits, ja que la impressora no és tan grossa com per fer-les senceres.</li> </ol>
	<p><b>Impressió</b> Les impressores no poden fer les peces de manera perfecta sense posar-hi suports. Quan les poses al programa de la impressora, aquesta pensa i afegeix tot de suports necessaris perquè s'aguanti la peça.</p> <p>Un cop impreses, has d'anar traient aquests suports amb molta cura de que no es trenquin i sense fer malbé cap dels suports del cos.</p>
	<p><b>Suports</b> Per treure els suports vaig utilitzar alicates, tornavisos i filferros llargs i durs.</p> <p>Mica en mica vas arrencant el material sobrant fins que et quedés amb la peça nua.</p> <p>S'ha de fer amb molta cura per no malmetre la peça.</p>

	<p><b>Encaixos</b></p> <p>Després és necessari llimar les parts que faran d'unió les unes amb les altres. Com que eren els primers prototips, encara no havia acabat d'ajustar les mides d'encaix, i feia falta llimar 1mm de plàstic per tal de que s'ajuntessin correctament.</p> <p>En la impressió final, aquest pas es suprimeix, perquè ja havia trobat la mida ideal perquè no s'escapés aire sense haver de passar-me tanta estona llimant.</p>
	<p>En aquesta imatge es pot veure totes les peces de la flauta impreses amb filament.</p> <p>Són un total de 7 peces: el peu, el cos dividit en dues parts amb el seu encaix, i el cap també dividit en dos i amb un altre encaix.</p>
	<p><b>Suports</b></p> <p>El següent pas consistia en llimar i foradar els suports perquè els eixos passessin més fàcilment sense encallar-se.</p> <p>Aquest pas també el vaig suprimir de cares a l'últim disseny, ajustant aquests suports perquè funcionessin a la perfecció amb els eixos i els mecanismes.</p>
 	<p><b>Molles</b></p> <p>Per provar si les molles serien capaces de fer retornar les claus, vaig provar de muntar els mecanismes en l'últim dels prototips.</p> <p>La meua primera idea va ser arrancar aquests filferros que actuen com a molles de la flauta de segona mà, per assegurar-me així que el material funcionés. Vaig adonar-me de que algunes no eren prou llargues, ja que perdien llargada quan les arrancava, i vaig haver de substituir algunes amb un filferro.</p> <p>Per enganxar-les al plàstic, el que feia era escalfar la peça de metall amb un encenedor i, un cop calent, el clavava dins els suports amb l'ajuda d'unes alicates.</p>

**Últim prototip**

Un cop tenia totes les molles col·locades, l'últim pas era muntar els mecanismes en el meu model per comprovar si funcionaven o no. Aquest procediment l'explicaré amb més detall a l'apartat de la impressió final.



Tot i fer 7 iteracions i més de 15 impressions de prova, en cap dels models de fil van acabar de funcionar bé les claus, ja que feia servir molles una mica malgastades i em faltava fer algun ajust al disseny. Aquests errors els vaig anar solucionant de cares al últim disseny.

**4.1.4. Impressió final**

Un cop vaig tenir fetes totes les proves prèvies a la impressió final, vaig refer el procés de construcció. Aquest cop, va resultar amb la flauta funcional. Com que la vaig imprimir amb la impressora de resina, el procés post-impressió canvia lleugerament.

**Impressió**

La impressió amb resina és un procés més llarg però més eficient. Un dels seus problemes és que és més petita que la de fil. És per això que vaig haver d'imprimir la flauta en 6 parts diferents.



	<p><b>Neteja i curat</b></p> <p>Un cop les peces estan definides amb la impressora de resina, han de passar per un procés de neteja, on es posa el cos sencer en remull amb alcohol perquè la resina restant que ha quedat enganxada es desprengui.</p> <p>Un cop netejada la peça, es posa en una màquina de llum ultraviolada per curar i enfortir el material.</p> 
	<p><b>Suports</b></p> <p>Tal i com feia amb les altres peces, el següent pas es treure els suports. La resina es un material més fràgil i s'ha d'anar amb molt de compte a l'hora de fer-ho.</p> <p>En el meu primer intent vaig arrencar sense voler un dels suports dels eixos i vaig haver de reimprimir tota la flauta.</p>
	<p><b>Encaixos</b></p> <p>A l'haver imprès la flauta en 6 parts, he hagut de fer 3 suports extres a part dels 2 que inclou la flauta travessera metàl·lica.</p> <p>Els dos suports que van al cos els he imprès amb resina negra, i l'encaix del cap l'he fet de resina transparent (únicament per raons estètiques).</p>
	<p><b>Part superior</b></p> <p>La primera secció de la flauta que vaig acabar va ser el cap. Després de fer tots els passos esmentats i d'haver ajuntat les dues parts amb un dels encaixos, vaig afegir la corona.</p>

	<p><b>Molles</b></p> <p>Per poder acabar les altres dues parts de la flauta, havia de muntar els mecanismes (explicat a l'apartat següent). Per fer-ho, però, abans havia d'enganxar les molles per fer retornar totes les claus.</p> <p>En aquest disseny vaig anar a Blanes a veure altre cop a en Quim per si em podia donar un material adient per fer les molles. Em va donar cordes de piano.</p> <p>A part de tallar-les a mida i donar-los-hi la curvatura necessària, vaig haver de fer els forats a la resina, ja que aquest material no es fon tant fàcilment com el plàstic.</p>
---	--

#### 4.1.5. Addició de les peces

Amb el cos nu de la flauta ja acabat, el següent pas va ser afegir els mecanismes. Ho vaig fer en cinc conjunts.

- Mecanisme peu: el primer mecanisme que vaig muntar va ser el del peu. D'aquesta manera podia comprovar que tot funcionés correctament amb la part més petita i senzilla de tot l'instrument.

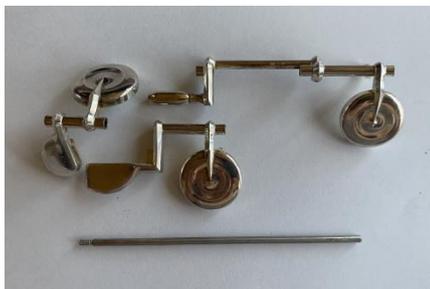


Figura 35: Mecanismes del peu. Font: pròpia.



Figura 36: Mecanismes adjuntats al peu. Font: pròpia.

- Mecanisme 1: el primer mecanisme del cos que es munta és el del Sol#.



Figura 37: Mecanismes del Sol#. Font: pròpia.



Figura 38: Mecanismes del Sol# acoblats al cos. Font: pròpia.

- Mecanisme 2: el segon, les claus de Sol.



Figura 39: Mecanismes del Sol. Font: pròpia.



Figura 40: Mecanismes del Sol acoblats al cos. Font: pròpia.

- Mecanisme 3: el tercer és la secció completa de trinos<sup>21</sup>.



Figura 41: Flauta travessera amb les claus peu, del Sol, del Sol# i dels trinos acoblades. Font: pròpia.

- Mecanisme 4: la resta de conjunts del cos estan suspesos en el mateix eix, així que s'adhereixen a la vegada.



Font 42: Mecanismes restants del cos. Font: pròpia.



Figura 43: Flauta travessera impresa amb resina amb tots els mecanismes acoblats. Font: pròpia.

<sup>21</sup> Són palanques o "dreceres" que faciliten la digitació d'algunes notes al flautista.

## 4.2. Comparació del so entre materials

Un cop construïda la flauta, tocava fer una comparació del so entre aquesta flauta i la industrial. Per fer-ho, vaig contactar amb en Jordi Servosa, un enginyer acústic que treballa a *SiS Consultoria* i disposa de tot tipus de material professional.

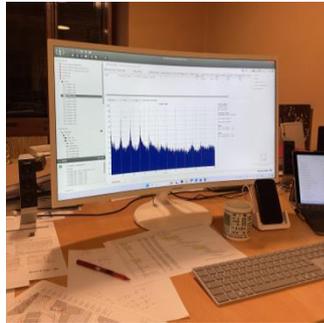


Figura 44: Despatx de'n Jordi Servosa. Els gràfics pertanyen a l'analitzador d'espectres. Font: pròpia.

Gràcies a la seva ajuda, vaig poder gravar sons amb les dues flautes i analitzar els seus espectres (on es mostren les diferents freqüències dels components harmònics). Ho vam fer utilitzant un sonòmetre<sup>22</sup>. Aquest aparell electrònic mesura la pressió i la freqüència del so. Un cop tens aquestes dades enregistrades, les passes a un analitzador d'espectre<sup>23</sup>, un equip de mesura que permet visualitzar en una pantalla les components espectrals de qualsevol tipus d'ones.



Figura 45: Imatge del sonòmetre feta el primer dia d'assajos acústics. Font: pròpia.



Figura 46: Il·lustració del que es veu a la pantalla del sonòmetre. Font: pròpia.



Figura 47: Imatge del sonòmetre feta el segon dia d'assajos acústics. Font: pròpia.

<sup>22</sup> Mirar annex 7.5.

<sup>23</sup> Veure annex 7.5.

Totes les comparacions les vam fer per “Fast Fourier Transform (FFT)”. És una fórmula ràpida i eficient de calcular la versió mostrejada d’un senyal. Aquest mètode és molt complicat de calcular, ja que conté matemàtiques aplicades, però l’analitzador d’espectres ho facilita molt. En tots els assajos he extret gràfiques on surt la freqüència de les ones i la seva pressió al llarg del temps. Amb aquestes dades podem comparar qualitativament sons produïts per instruments diferents. La primera comparació que vam fer era entre el so del cap de la flauta de metall i la de resina.

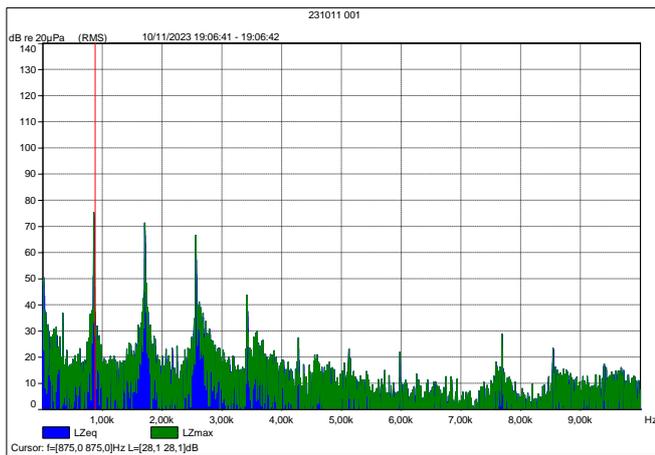


Figura 48: Espectre de l’ona del cap de la flauta metàl·lica.  
Font: pròpia.

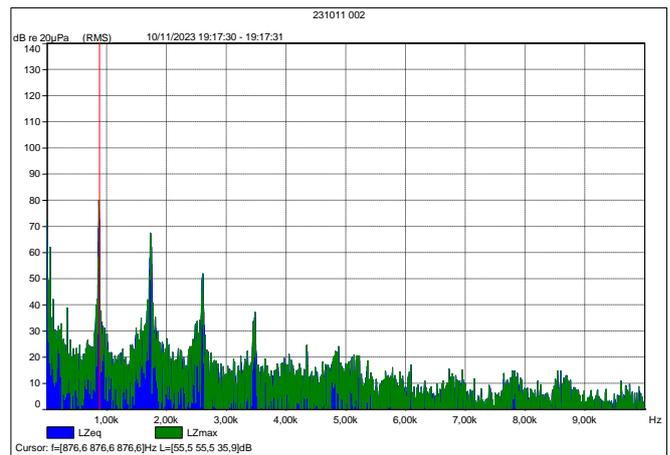


Figura 49: Espectre de l’ona del cap de la flauta de resina.  
Font: pròpia.

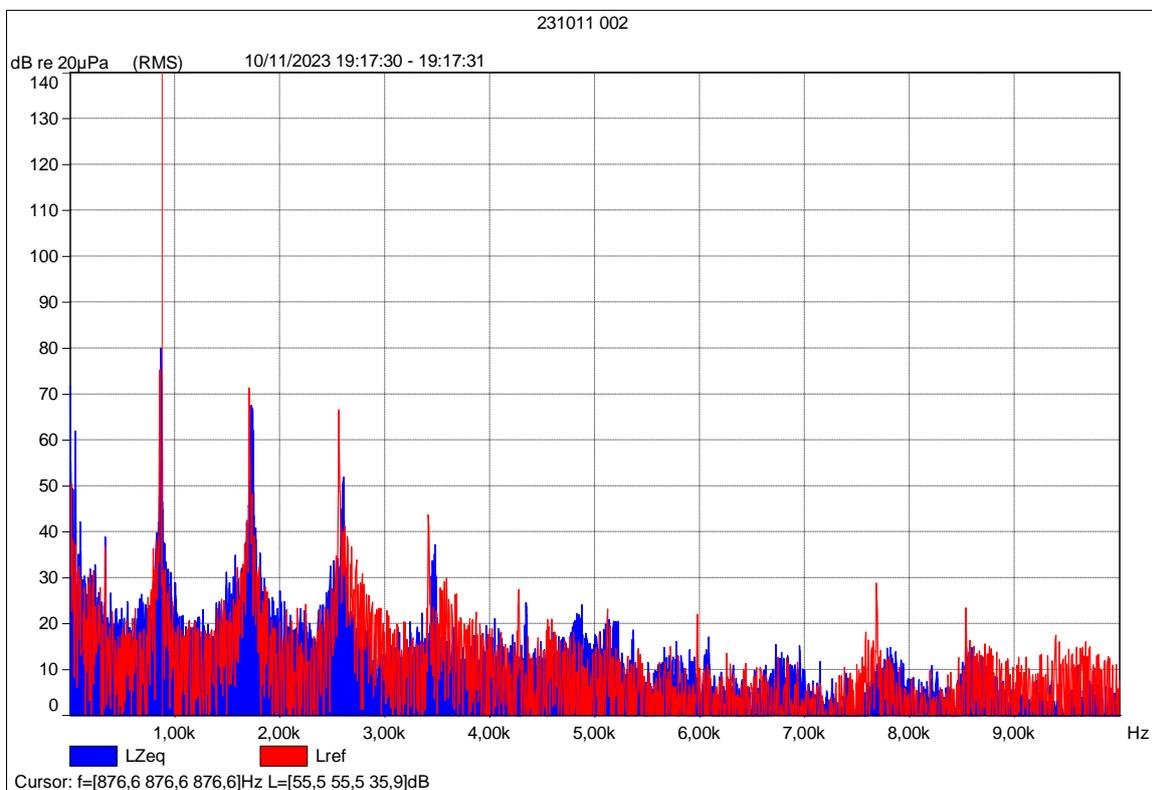


Figura 50: En aquest gràfic es veuen sobreposats els espectres de les dues ones mencionades prèviament. En blau, l’ona del so del cap de la flauta de resina. En vermell, la de la flauta metàl·lica. Font: pròpia.

	Flauta de metall	Flauta de resina	Percentatge error
Nota fonamental	876,7 Hz	875,8 Hz	0,1%
1r harmònic	1715,6 Hz	1732,2 Hz	0,9%
2n harmònic	2592,2 Hz	2612,5 Hz	0,7%
3r harmònic	4292,2 Hz	4082,8 Hz	4,8%
4t harmònic	5971,9 Hz	5534,7 Hz	7,3%

Figura 51: Taula representativa de la figura 50. Comparació de les freqüències en Hz del so del cap d'una flauta de metall i del cap d'una flauta de resina. Font: pròpia.

$$E_{\text{relatiu}} = \left| \frac{x_i - x_v}{x_v} \right| \times 100 = \left| \frac{875,8 - 876,7}{876,7} \right| \times 100 = \mathbf{0,1\%}$$

Figura 52: Exemple del càlcul utilitzat per trobar el percentatge d'error relatiu. Correspon a l'error en la nota fonamental. Font: pròpia.

Com es pot veure en la figura 49, la freqüència en els punts d'inflexió coincideix (875 i 876 Hz), i els harmònics<sup>24</sup> de l'ona són proporcionals l'un amb l'altre. Hi ha una petita variació en els últims harmònics, però són diferències que auditivament pràcticament no es noten. El que realment canvia el so és la nota fonamental i, tal i com es pot veure en la figura 51, l'error de variació entre les dues flautes és d'un 0,1%. Segurament les variacions dels harmònics finals són produïdes per la rugositat interior de la flauta de plàstic en comparació amb la de metall.

Amb aquest únic assaig ja podia afirmar que el **material no afecta el so d'una flauta travessera**, que era part de la hipòtesi inicial del meu treball. Tot i tenir proves suficients per confirmar la veracitat d'aquesta hipòtesi, vaig decidir ampliar els estudis acústics i fer la comparació d'un parell de notes de l'escala.

A continuació deixo els resultats comparatius amb les seves respectives taules. Observant els resultats, no queda dubte que la geometria interna de l'instrument és el factor realment determinant per produir els sons desitjats. El material, per altra banda, afecta únicament a la facilitat d'emetre aquest so i la qualitat dels seus últims harmònics. Aquests dos aspectes, però, no s'aprecien amb una simple audició.

Totes les dades que s'esmenten en aquest apartat també es poden calcular a partir de les equacions teòriques (veure l'annex 7.4.2.).

<sup>24</sup> Els harmònics són complementacions de la nota fonamental que ajuden a la plenitud del so. Es detecten als gràfics com a pics en les freqüències.

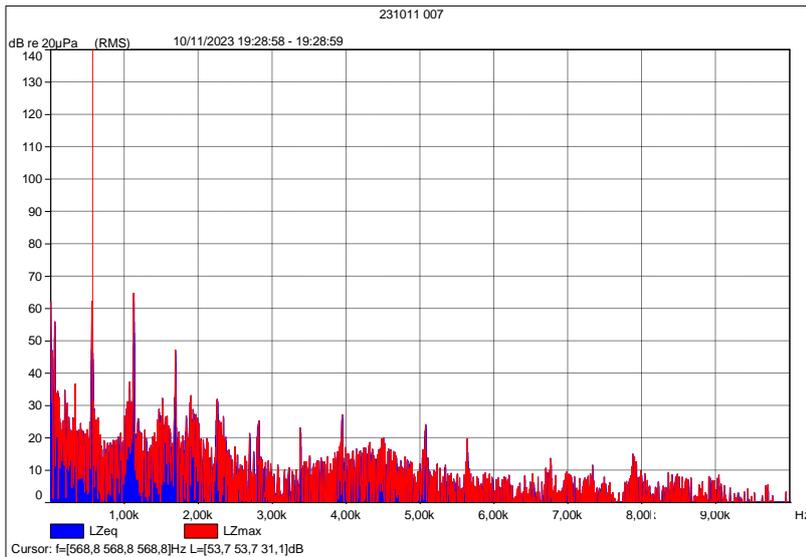


Figura 53: Comparació dels espectres de l'ona produïda per una flauta de resina tocant el Do (vermell), i una de metall fent la mateixa nota (blau). Font: pròpia.

Figura 54: Taula representativa de la figura 53. Comparació de les freqüències en Hz del so d'una flauta de metall tocant el Do i del d'una flauta de resina fent la mateixa nota. Font: pròpia.

	Flauta de metall	Flauta de resina	Percentatge error
Nota fonamental	565,6 Hz	568,1 Hz	0,4%
1r harmònic	1128,1 Hz	1136,3 Hz	0,7%
2n harmònic	1696,9 Hz	1713,8 Hz	0,1%
3r harmònic	2265,6 Hz	2300,1 Hz	1,5%
4t harmònic	2825,0 Hz	2796,9 Hz	0,8%

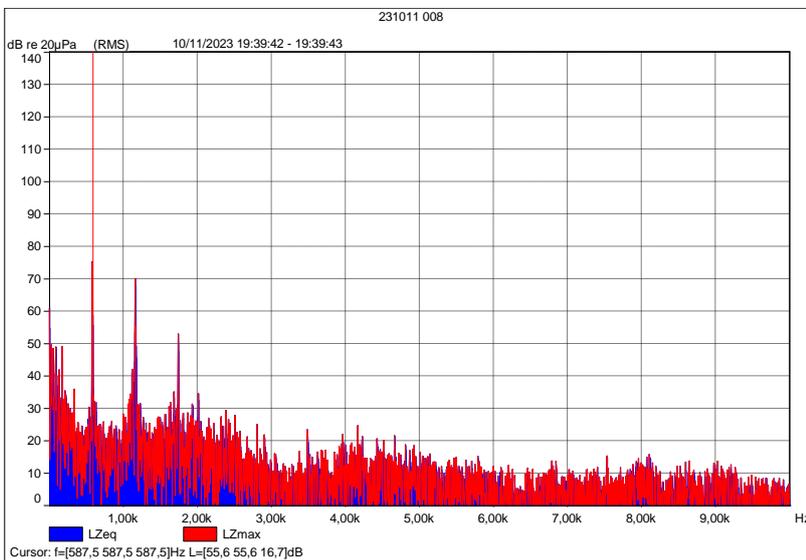


Figura 55: Comparació dels espectres de l'ona produïda per una flauta de resina tocant el La (vermell), i una de metall fent la mateixa nota (blau). Font: pròpia.

Figura 56: Taula representativa de la figura 55. Comparació de les freqüències en Hz del so d'una flauta de metall tocant el La i del d'una flauta de resina fent la mateixa nota. Font: pròpia.

	Flauta de metall	Flauta de resina	Percentatge error
Nota fonamental	429,7	424,1	0,6%
1r harmònic	875,9	865,9	1,1%
2n harmònic	1423,4	1476,6	0,7%
3r harmònic	1762,3	1781,3	1,0%
4t harmònic	2190,6	2115,6	0,4%

---

## 5. CONCLUSIONS

---

Ha arribat el moment de concloure el treball al qual he dedicat tantes hores. Després d’haver-hi invertit moltes ganes, molta energia i molt de temps, el finalitzo satisfeta de la feina feta i dels resultats obtinguts.

Quan el vaig començar, em vaig plantejar la següent hipòtesi:

*“És possible construir una flauta travessera amb una impressora 3D obtenint un so que respecti les propietats sonores d’una flauta industrial d’alpaca.”*

Puc dir que gairebé l’he assolida. He aconseguit, després de moltes proves, construir una flauta amb una impressora 3D, amb les xemeneies, els suports pels eixos i els encaixos corresponents. Hi he adherit molles, que he fabricat a partir de cordes de piano, i aprofitant les claus extretes d’una flauta de segona mà, tal i com vaig preveure a l’inici del treball, he muntat els mecanismes i he aconseguit que finalment aquesta soni. En analitzar el so, físicament parlant, respecta les propietats sonores d’una flauta travessera industrial feta amb alpaca, és a dir que les freqüències de vibració obtingudes en tocar una mateixa nota amb les dues flautes són pràcticament les mateixes. Això ho he comprovat comparant els espectres obtinguts en l’anàlisi de Fourier (mitjançant un sonòmetre i un analitzador d’espectres) i veient que són quasi idèntics, però la resistència més baixa de la resina fa que el so no tingui tanta potència.

Els objectius proposats al principi del treball també han estat totalment assolits. Pel que fa al primer de cercar informació sobre la història de la flauta travessera, em va sorprendre l’antiguitat d’aquest instrument, i també l’evolució en la que s’observa l’experimentació amb diferents materials. Gràcies a la recerca de pàgines web, a l’experiència professional dels fabricants de flautes i a la investigació de documents antics que tinguin constància de la seva existència, el considero completat.

El segon objectiu era entendre i conèixer els mecanismes intrínsecs de la flauta. Haig de reconèixer que no va ser fàcil. La flauta està formada per uns mecanismes molt complexos i difícils d’entendre. Per fer-ho, vaig basar-me en les explicacions d’en Quim Gibert i la Mercè Farrés, i en el que observava de la meua pròpia flauta. A mesura que redactava el que aprenia a la memòria escrita i, a la vegada, ho anava dissenyant en 3D, vaig anar comprenent el sistema de claus que conté la flauta travessera. Em sembla que ara em puc considerar tota una experta en el tema.

El següent objectiu consistia en fer un estudi de la creació del so en la flauta i conèixer bé els paràmetres físics que el caracteritzen. Segurament va ser la part teòrica que em va suposar més feina i dedicació. Al començar a buscar estudis físics i explicacions a la producció del so en la flauta, jo estava totalment perduda. No tenia coneixements d'aquest tema i no sabia com posar-m'hi. Em vaig veure obligada a començar de zero, fer-me una base de coneixement sobre les ones sonores i, un cop entenia els conceptes dels que volia parlar, vaig haver de trobar una manera entenedora i clara d'exposar-los en el meu treball. He fet tot el possible perquè la meva memòria escrita es pugui entendre sense un grau d'especialitat gaire alt, però que et permeti seguir els meus passos i les comparacions que faig al final de la meva part pràctica per a refutar la meva hipòtesi. Estic orgullosa i satisfeta de com ha quedat aquesta part del treball.

El quart objectiu ja estava encarat a la part pràctica, i era aprendre a fer servir un programa de disseny professional que em permetés dibuixar una flauta en 3D. Gràcies a la Nora Brugada i a l'Àngel Renart, he aconseguit fer tots els dissenys 3D del treball jo mateixa. El programa de disseny *SolidWorks*® està pensat per a l'ús professional. Jo, al no ser professional, vaig necessitar explicacions i ajudes en molts aspectes, però tot i les dificultats puc dir orgullosa que els dissenys són propis de dalt a baix.

Relacionat amb aquest objectiu, també em vaig plantejar reconstruir els mecanismes de la flauta i fer els ajustos necessaris perquè funcionessin tots els conjunts de claus. Aquest aspecte presentava dues dificultats: recrear la flauta amb les mides exactes, i fer que els mecanismes es poguessin acoblar sense problema. Per complir aquest propòsit han fet falta moltes iteracions, molts prototips, i dur a terme el mètode d'assaig i error fins que, finalment, he aconseguit tenir un model 3D de la flauta que encaixa a la perfecció amb les seves claus i els seus eixos.

L'últim objectiu era fer un anàlisi del so de la flauta impresa i reconstruïda en 3D i d'una flauta d'alpaca per determinar si tenien la mateixa qualitat de so. En aquest objectiu reposava la verificació de la meva hipòtesi. Un cop vaig tenir la flauta impresa i amb els mecanismes funcionals, vaig anar al despatx d'en Jordi Servosa per fer un anàlisi dels espectres sonors de les dues flautes i, d'aquesta manera, determinar si tenien la mateixa qualitat de so. Com he mencionat prèviament, aquest objectiu també ha estat assolit. Les dues flautes tenen les mateixes característiques sonores i, per tant, puc afirmar que **és possible construir una flauta amb una impressora 3D obtenint un so que respecti les propietats sonores d'una flauta industrial d'alpaca.**

En definitiva, aquest treball ha significat el meu primer contacte seriós amb la recerca i m'ha ensenyat la gran dificultat que té un projecte d'aquestes dimensions. He après molt i en molts àmbits diferents, ja que hi ha una vessant tecnològica important, una de científica d'assaig i error, una d'històrica, la part de dibuix tècnic i una part més de treball manual. Però per damunt de tot ha significat poder aprofundir l'estima que tinc al meu instrument, i buscar una manera econòmica<sup>25</sup> i original de reproduir-lo, sense perdre'n qualitat.

El meu treball de recerca m'ha suposat estar moltes tardes d'estiu prenent mides, dissenyant, modificant prototips i desesperant-me amb tots els intents fallits. De fet, a part dels aprenentatges ja esmentats, el veritable aprenentatge que he obtingut al llarg del treball ha estat gràcies a tots els problemes que se m'han presentat i que m'han obligat a pensar amb possibles noves solucions.

I ara, quan escolto el so de la flauta, sabent com es produeix el seu so i què el diferencia del d'altres instruments, em meravella encara més.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. BOEHM, Theobald. Traducció, introducció i notes MARTÍNEZ LÓPEZ, Vicente. *La flauta y la interpretació flautística*. Madrid: Mundimúsica, 1991.
2. AGULLÓ, Joaquim. *Acustica musical*. Barcelona: Prensa Científica, 1989.
3. AGULLÓ, Joaquim; Dra. BARJAU, Ana. La tenora i la barítona de l'IEC: un punt de trobada de ciència i música. Presentació físico-matemàtica.
4. H. BENADE, Arthur. *Fundamentals of Musical Acoustics*. Estats Units: Oxford University Press, 1976.
5. WOLFE, Joe; SCHOOL OF PHYSICS; the University of New South Wales. *Flute acoustics: an introduction*. Australia: 1997.
6. DICKENS, Paul A. *Flute acoustics: measurement, modelling and design*. Australia: School of Physics University of New South Wales, 2007.
7. PEJUAN, Arcadi; Factoria EPSEVG i Factoria ETSEIB (col·laboració). *Introducció a l'Acústica*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2018.
8. PERILLA CASTILLO, Eduardo; PINILLA SEPÚLVEDA, Álvaro Enrique. *Análisis del comportamiento dinámico-acústico y comprobación computacional para el diseño de flautas traversas*. Madrid: 2004.
9. YAMAHA. *Instrumentos de viento madera y de metal, flautas de estudio*. Yamaha Corporation, 2015.
10. Premisrecerca.uvic.cat. 2015. *Escolta-ho en el vent: el principi físic de la música a través d'una flauta* – Visitat el 3 d'agost 2023 amb l'enllaç:  
[https://premisrecerca.uvic.cat/sites/default/files/webform/090113d97ac568c96b5308cb7a3aa3e1269f7b45\\_NOM%C3%89S%20HO%20SAP%20EL%20VENT%20UVIC.pdf](https://premisrecerca.uvic.cat/sites/default/files/webform/090113d97ac568c96b5308cb7a3aa3e1269f7b45_NOM%C3%89S%20HO%20SAP%20EL%20VENT%20UVIC.pdf)
11. Blocs.xtec.cat. 2019. *El so musical* – Visitat el 20 de Juliol 2023 amb l'enllaç:  
<https://blocs.xtec.cat/musica25a/2009/10/12/el-so-musical/>
12. BERBIS, Javier. 2018. *Estudio acustico de los sonidos articulados en la flauta travessera* – Visitat el 23 de Juliol 2023 amb l'enllaç:  
[https://www.researchgate.net/profile/Javier-Berbis-Lopez/publication/344351726\\_ESTUDIO\\_ACUSTICO\\_DE\\_LOS\\_SONIDOS\\_ARTICULADOS\\_EN\\_LA\\_FLAUTA\\_TRAVESERA/links/5f6b3737299bf1b53ee9f60a/ESTUDIO-ACUSTICO-DE-LOS-SONIDOS-ARTICULADOS-EN-LA-FLAUTA-TRAVESERA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Javier-Berbis-Lopez/publication/344351726_ESTUDIO_ACUSTICO_DE_LOS_SONIDOS_ARTICULADOS_EN_LA_FLAUTA_TRAVESERA/links/5f6b3737299bf1b53ee9f60a/ESTUDIO-ACUSTICO-DE-LOS-SONIDOS-ARTICULADOS-EN-LA-FLAUTA-TRAVESERA.pdf)
13. *Acustica: la ciencia del sonido* – Visitat el 5 d'Agost 2023 amb l'enllaç:

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=HMWtf1RTo4kC&oi=fnd&pg=PA14&dq=fisica+sonido+&ots=MQlwwAGl4R&sig=pkkq0mAUT4m5D6eLppw7BnQg7-Q#v=onepage&q=fisica%20sonido&f=false>

14. MARIANO, Jesús. La percepción acústica: Física de la audición – Visitat el 10 d'Agost 2023 amb l'enllaç:

<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/11466/REVISTA-DE-CIENCIAS-2013-2-LaPercepcionAcustica.pdf?sequence=1>

## 7. ANNEXOS

### 7.1. Mecanismes de la flauta

Al llarg de la memòria s'han anat mencionant i mostrant els diferents components dels sistemes de claus de la flauta. Seguidament es troben un seguit de diagrames i imatges per fer la comprensió del treball més agradable i fàcil.

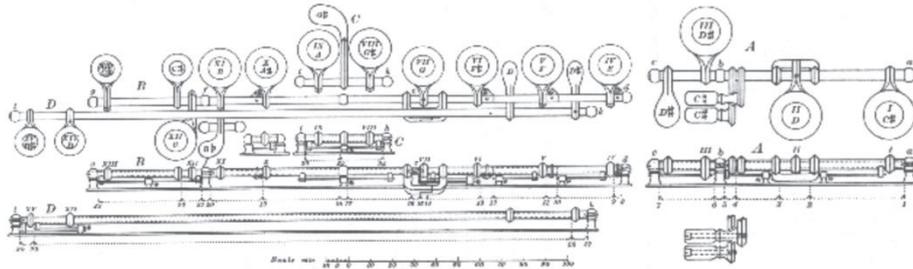


Figura 57: Diagrama de claus i mecanismes fet per Böhm. Font: Sávido Araujo.

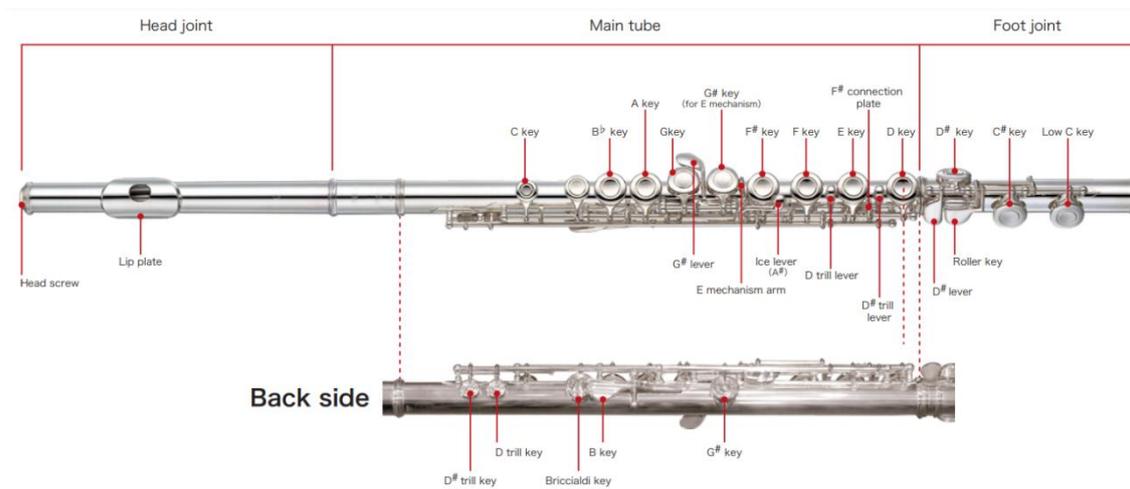


Figura 58: Esquema en anglès que conté el nom de totes i cada una de les claus. Font: Viquipèdia.

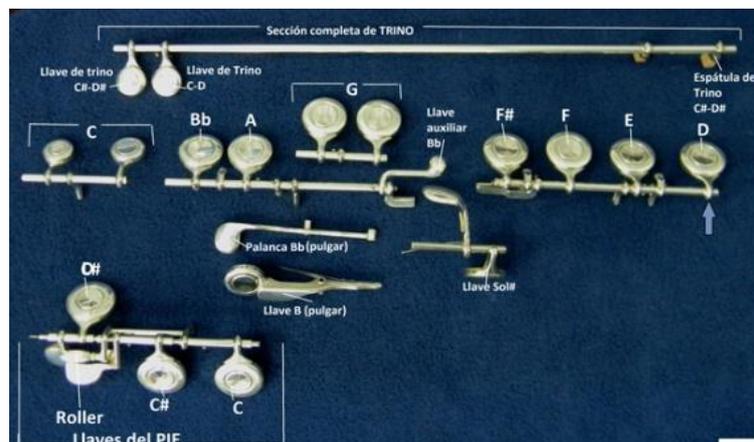


Figura 59: Descomposició dels mecanismes d'una flauta. Font: "El hogar de la flauta".

## 7.2. Família de la flauta travessera

La família de les flautes travesseres comprèn els instruments següents:

### La flauta de Boehm

És la flauta travessera “normal”. Està afinada en *do*.



Figura 60: Il·lustració flauta travessera de Böhm. Font: “Tipos de flautas”.

### El flautí o flauta piccolo

És la meitat de petita que una flauta normal i sona una octava més alta, però també està afinada en *do*. El seu tub és generalment de fusta o plàstic, a vegades de metall. Aquestes flautes es componen de dues peces: el cap i el cos. La mecànica d'un flautí té un aspecte una mica diferent del de les flautes normals. Els dits es col·loquen sobre palanques per a tocar.



Figura 61: Il·lustració flauta piccolo. Font: “Tipos de flautas”.

### La flauta alt

És més gran que la normal i sona quatre tons més avall. Està afinada en sol. És tan llarga que els braços han de quedar molt estesos per a tocar-la, és per això que algunes d'aquestes flautes es fabriquen amb caps torçats.



Figura 62: Il·lustració flauta alt. Font: “Tipos de flautas”.

### La flauta baix

És el doble de gran que una flauta normal i sona una octava més greu. Degut a la seva grandària, sempre tenen el cap arquejat i requereixen de botons addicionals i palanques per poder arribar a les claus tan distanciades entre si.



Figura 63: Il·lustració flauta baix. Font: “Tipos de flautas”.

### **Les flautes per nens**

Permeten tocar la flauta a nens petits. És una flauta especial més petita que facilita arribar a totes les claus, ja que la flauta normal pot resultar massa pesada i gran per manejar. Alguns fabricants fins i tot renuncien al peu quan fabriquen aquesta flauta, cosa que els ajuda a reduir encara més el pes.



Figura 64: Il·lustració flauta travessera per nens. Font: "Tipos de flautas".

### **La flauta de tambor**

És un xiulet travesser que prové de l'Edat Mitjana. Té una construcció totalment cilíndrica i abraça tres octaves senceres. Té un cos de níquel i s'acostuma a construir d'una sola peça, sense claus. Només conté 7 forats i un sistema de digitació una mica diferent del de la flauta travessera.



Figura 65: Il·lustració flauta de tambor. Font: "Tipos de flautas".

### 7.3. Dissenys 3D de la flauta travessera

#### 4.3.1. Disseny de la part central de la flauta

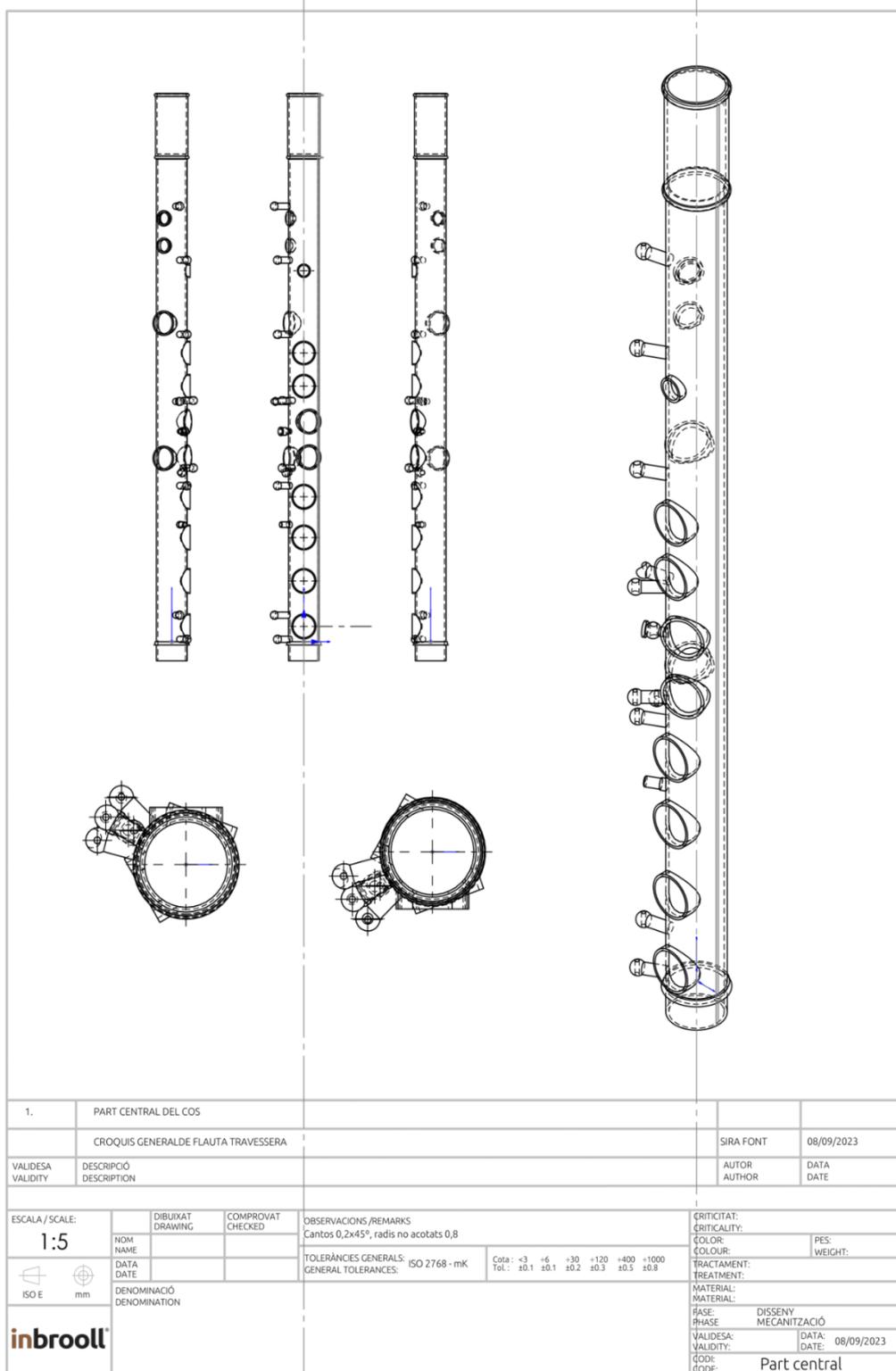


Figura 66: Disseny 3D de la part central de la flauta travessera. Font: pròpia.

**4.1.5. Disseny de la part inferior de la flauta**

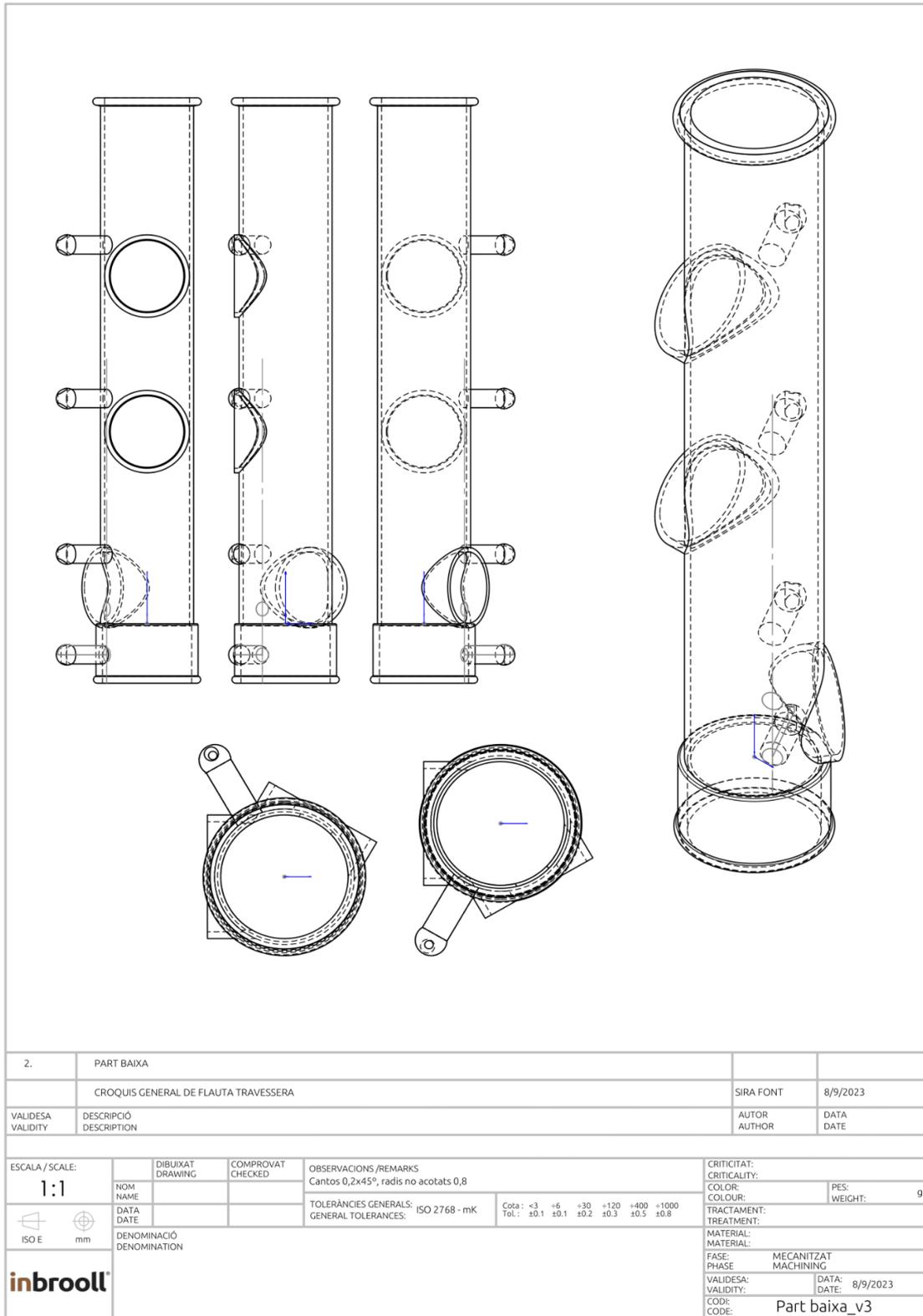


Figura 67: Disseny 3D de la part inferior de la flauta travessera. Font: pròpia.

## 7.4. Assajos acústics

### 7.4.1. Instrumentació per comparar ones sonores

La instrumentació que vaig utilitzar per comparar el so van ser:

- Analitzador d'espectre: *Bruel & Kjaer*, tipus 2270, classe 1.
- Sonòmetre: *Bruel & Kjaer*, tipus 4189.
- Calibrador sonor: *Bruel & Kjaer*, tipus 4231, classe 1.

### 7.4.2. Comprovació: la flauta travessera, instrument de tub obert als dos extrems.

La flauta travessera és un tub amb els dos extrems oberts, per tant en els dos extrems l'amplitud de la vibració de les molècules és màxima, però la pressió és nul·la, l'aire no està comprimit. En aquests extrems tenim doncs antinodes o ventres (marcat amb vermell a la figura 68). Per oposició, els punts de màxima pressió reben el nom de nodes (marcat amb negre).

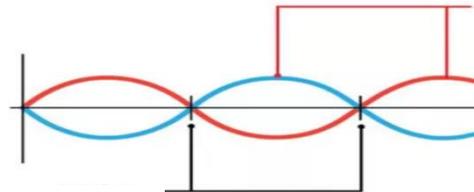


Figura 68: Imatge d'una ona estacionària generada en una flauta travessera. Font: pròpia.

En tancar i obrir els forats de la flauta modifiquem la longitud del tub en el qual es forma l'ona estacionària i es generen sobretons o harmònics. Si observem l'ona estacionària es pot deduir la relació entre les freqüències dels harmònics:

Estat de vibració	Imatge	Longitud d'ona	Nombre de nodes	Freqüència
Mode fonamental (primer harmònic)		$\lambda_1 = 2L$	$n = 1$	$f_1 = \frac{v}{2L}$
Segon harmònic		$\lambda_2 = L$	$n = 1, 2$	$f_1 = \frac{v}{L}$
Tercer harmònic		$\lambda_3 = \frac{2}{3}L$	$n = 1, 2, 3$	$f_1 = \frac{3v}{2L}$
Quart harmònic		$\lambda_4 = \frac{L}{2}$	$n = 1, 2, 3, 4$	$f_1 = \frac{2v}{L}$

Per tant podem deduir de la taula que per trobar la freqüència per  $n = 1, 2, 3, \dots$ , podem utilitzar l'expressió:

$$f_1 = n \frac{v}{2L}$$

I també (comparant l'última columna de la taula o partint de l'anterior expressió) deduïm la relació entre els valors de les freqüències dels diferents harmònics.

$$f_2 = f_1 \cdot 2$$

$$f_3 = f_1 \cdot 3$$

$$f_4 = f_1 \cdot 4$$

...

Observant l'espectre de freqüències obtingut en la figura 54 de l'apartat 4.2, es dedueix que és un instrument de tub obert, i es confirma la veracitat de l'experiment perquè:

Estat	Freqüències metall	Càlcul teòric	Freqüències resina	Càlcul teòric
Primer harmònic	565,6 Hz	$f_1 = 565,6$	568,1 Hz	$f_1 = 568,1$
Segon harmònic	1128,1 Hz	$f_2 = 565,6 \cdot 2 = 1131,2$	1136,3 Hz	$f_2 = 568,1 \cdot 2 = 1136,2$
Tercer harmònic	1696,9 Hz	$f_3 = 565,6 \cdot 3 = 1696,8$	1713,8 Hz	$f_3 = 568,1 \cdot 3 = 1704,3$
Quart harmònic	2265,6 Hz	$f_4 = 565,6 \cdot 4 = 2262,4$	2300,1 Hz	$f_4 = 568,1 \cdot 4 = 2287,4$
Cinquè harmònic	2825,0 Hz	$f_5 = 565,6 \cdot 5 = 2827,5$	2796,9 Hz	$f_5 = 568,1 \cdot 5 = 2800,5$

Es veu clarament que, amb alguna aproximació, el càlcul teòric dels resultats de les freqüències dels harmònics coincideix amb les freqüències reals de l'instrument (tant fet de resina com de metall). Si calculo l'error en tot els casos és inferior o igual a un 1%.

Si fos un instrument de vent de tub obert només per un extrem la relació entre les freqüències dels harmònics seria una altra, per això es diu que l'espectre de freqüències és l'empremta digital d'un instrument perquè ens permet identificar-lo.

### 7.4.3. Altres gràfiques

A continuació hi ha una memòria de totes les gràfiques extretes amb l'analitzador d'espectres i el sonòmetre.

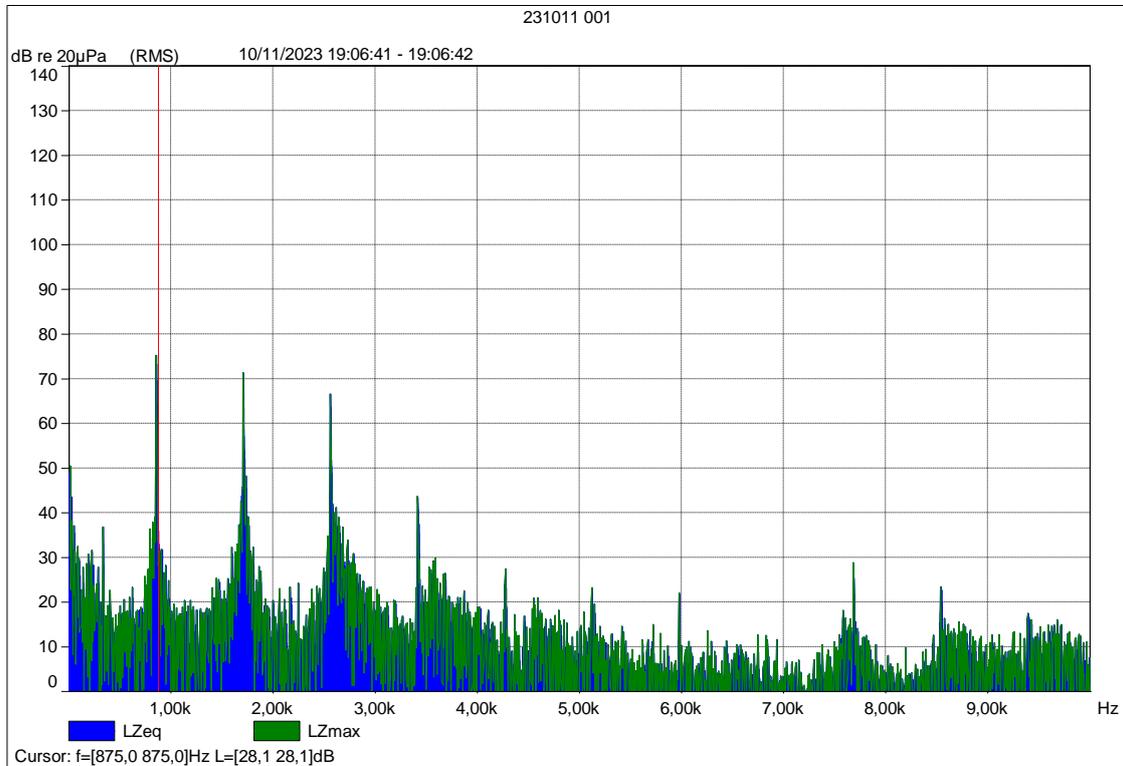


Figura 69: Espectre de l'ona del cap de la flauta metàl·lica. Font: pròpia.

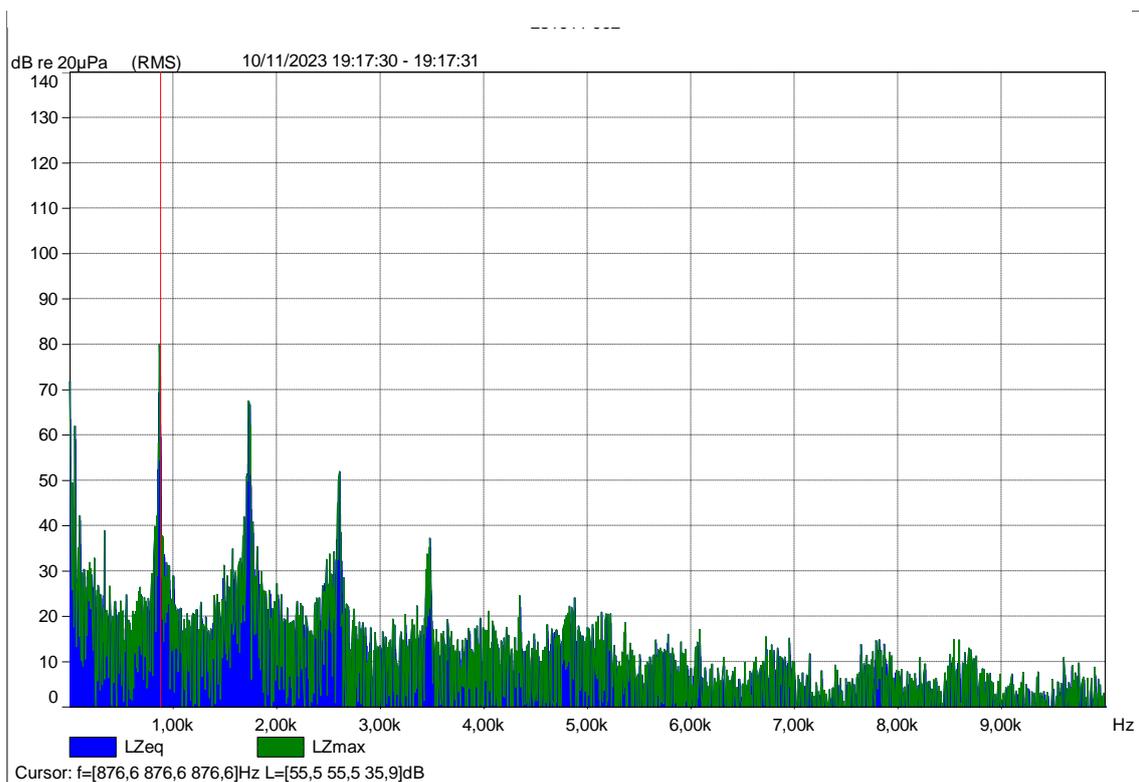


Figura 70: Espectre de l'ona del cap de la flauta de resina. Font: pròpia.

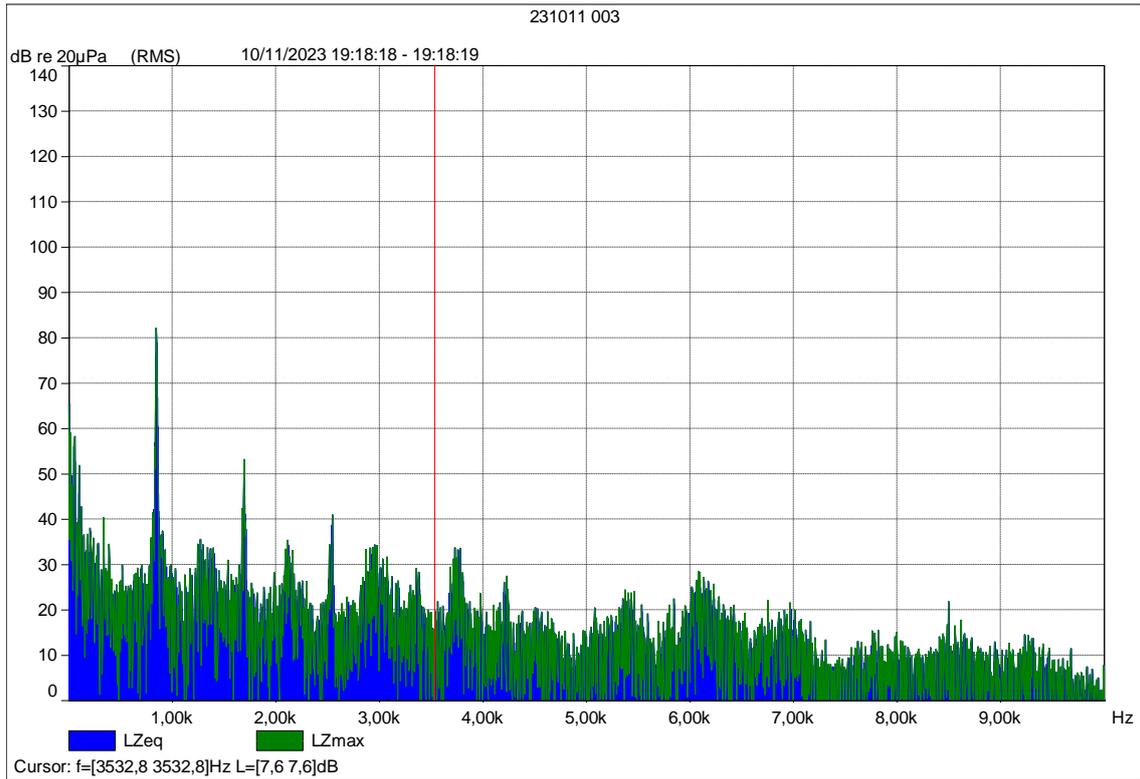


Figura 71: Espectre de l'ona del cap de la flauta de filament de polímers.. Font: pròpia.

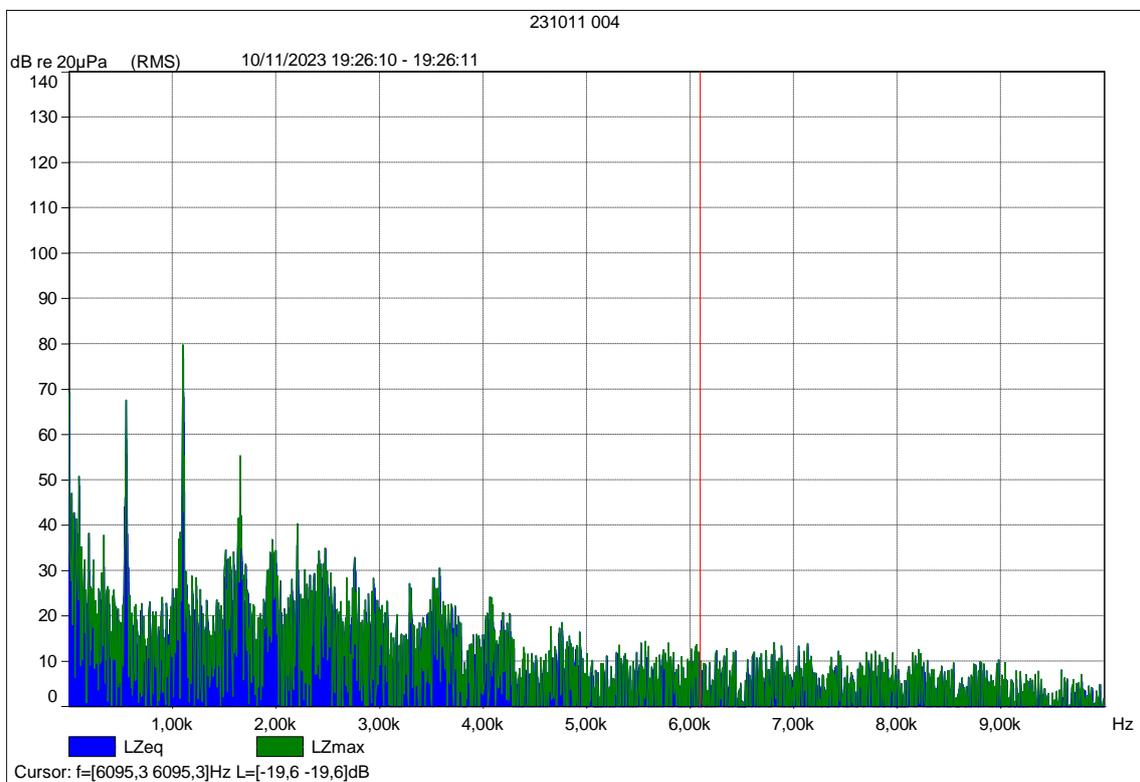


Figura 72: Espectre de l'ona de la nota Do de la flauta metàl·lica. Font: pròpia.

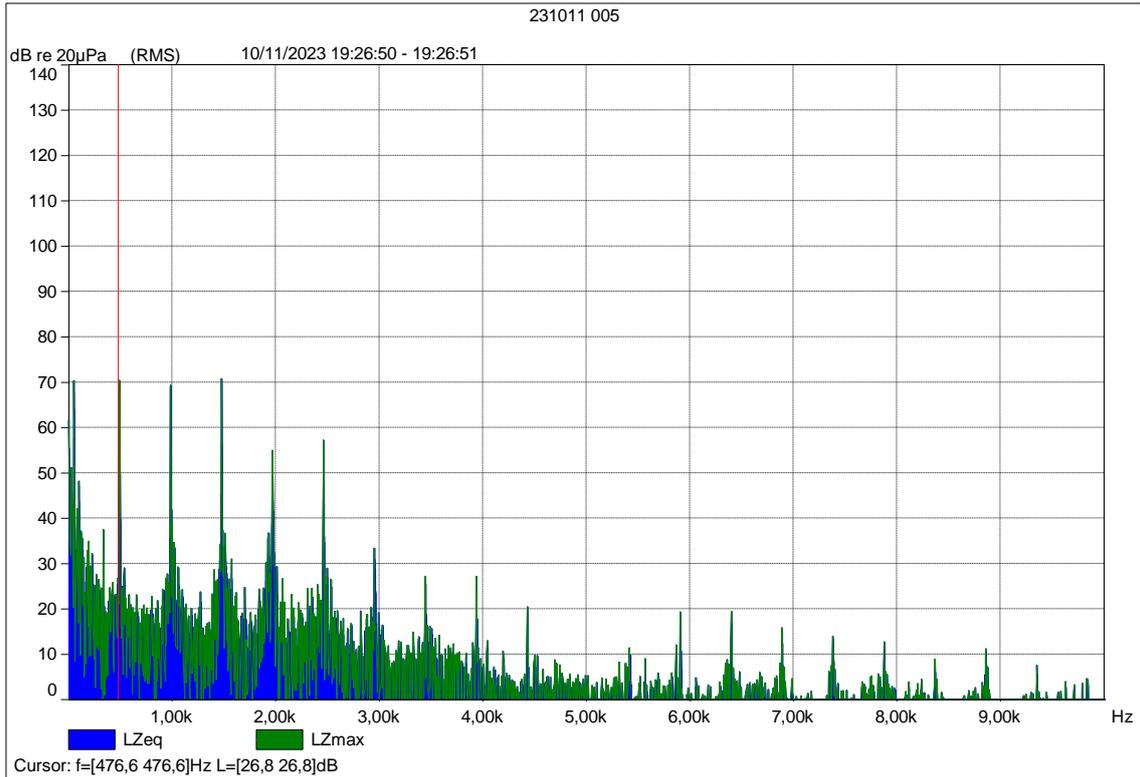


Figura 73: Espectre de l'ona del Si de la flauta metàl·lica. Font: pròpia.

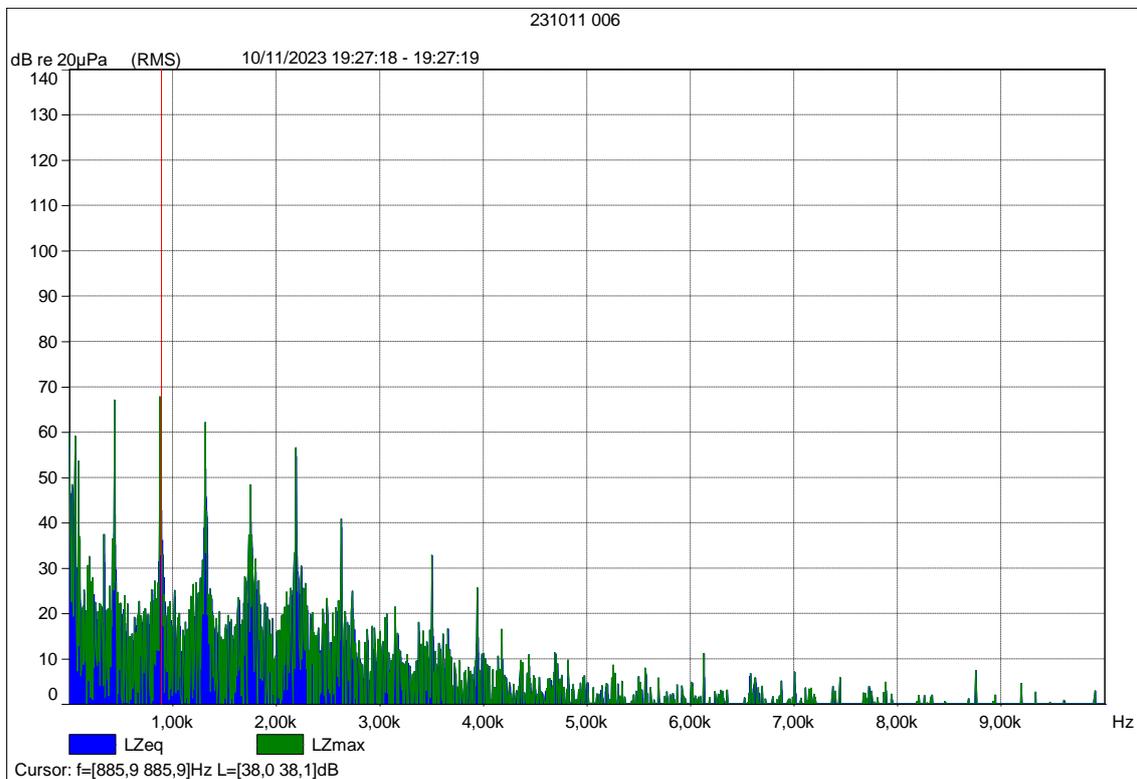


Figura 74: Espectre de l'ona del La de la flauta metàl·lica. Font: pròpia.

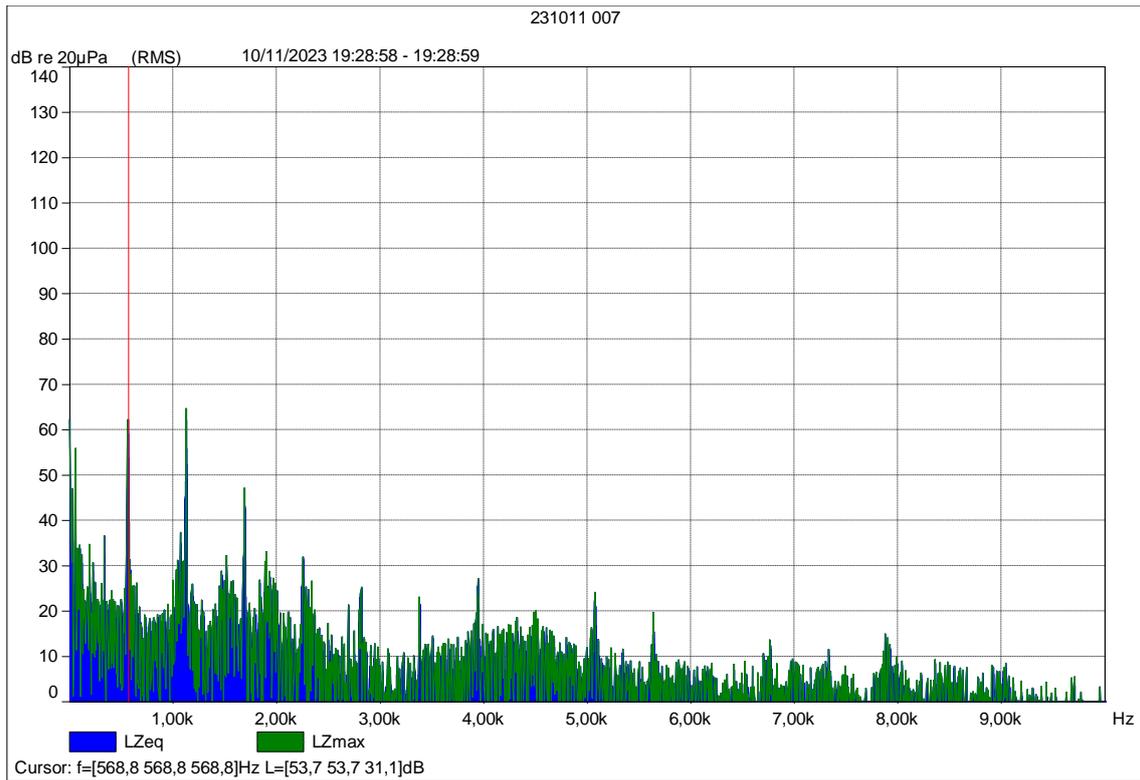


Figura 75: Espectre de l'ona del Do de la flauta de resina. Font: pròpia.

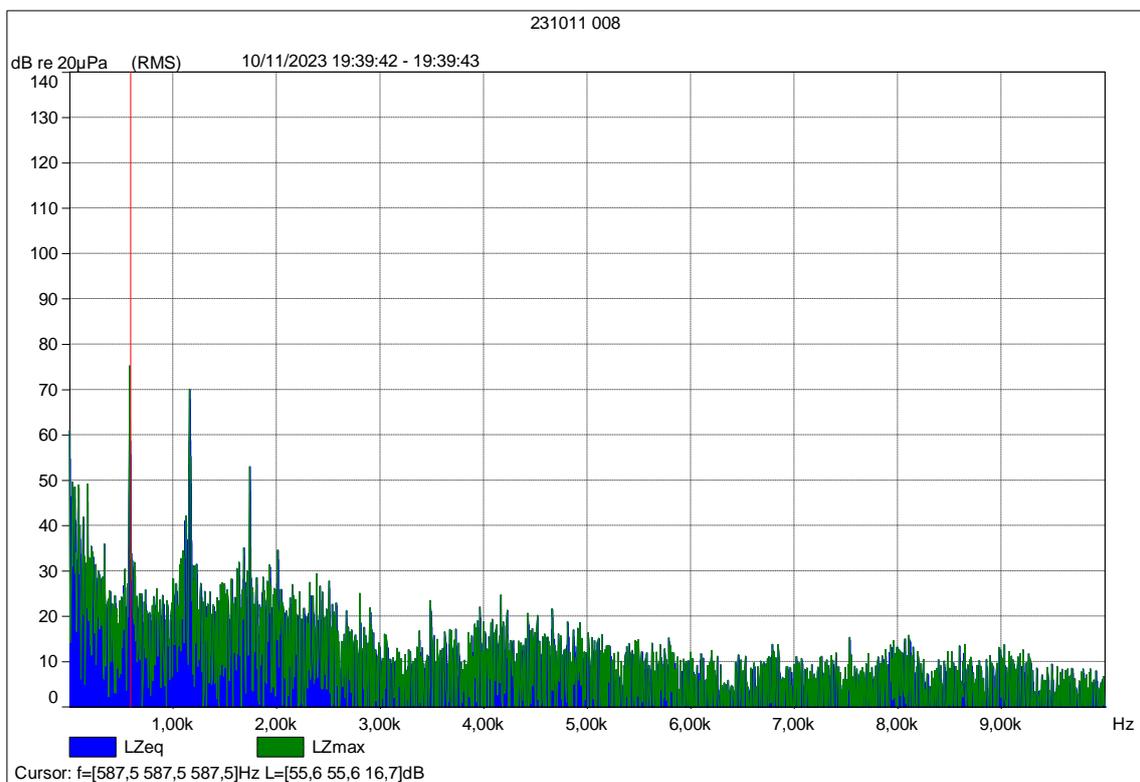


Figura 76: Espectre de l'ona del Si de la flauta de resina. Font: pròpia.

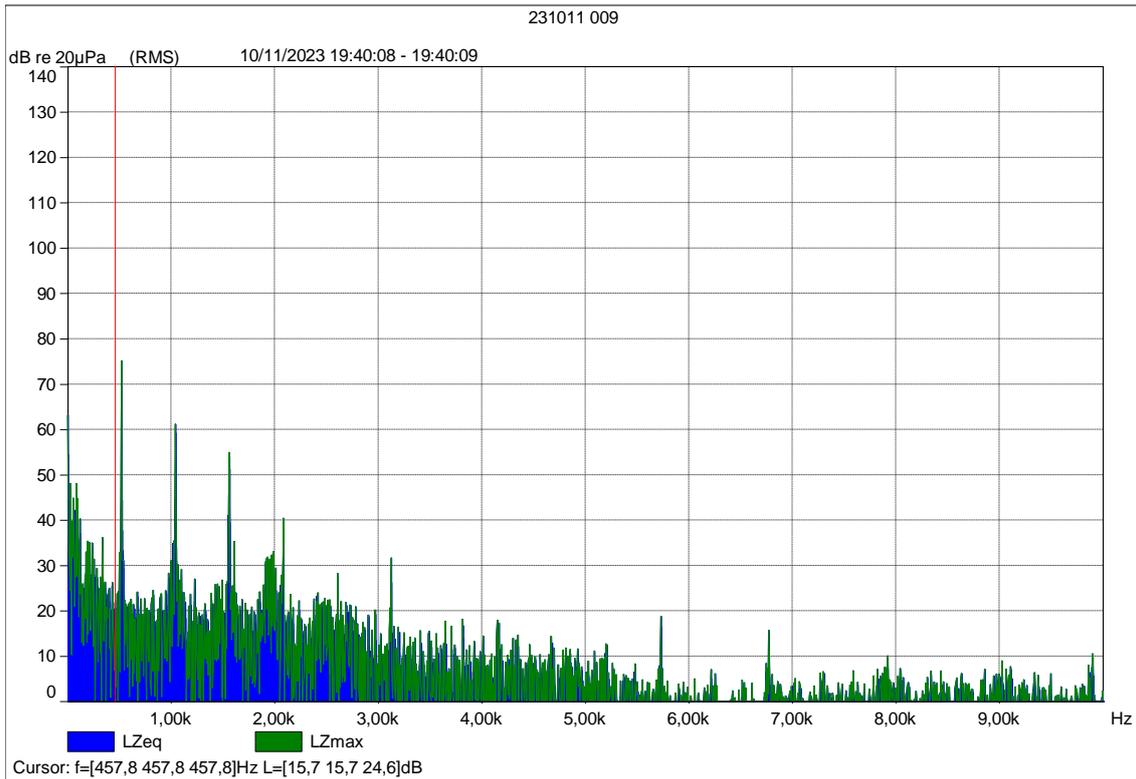


Figura 77: Espectre de l'ona del La de la flauta de resina. Font: pròpia.

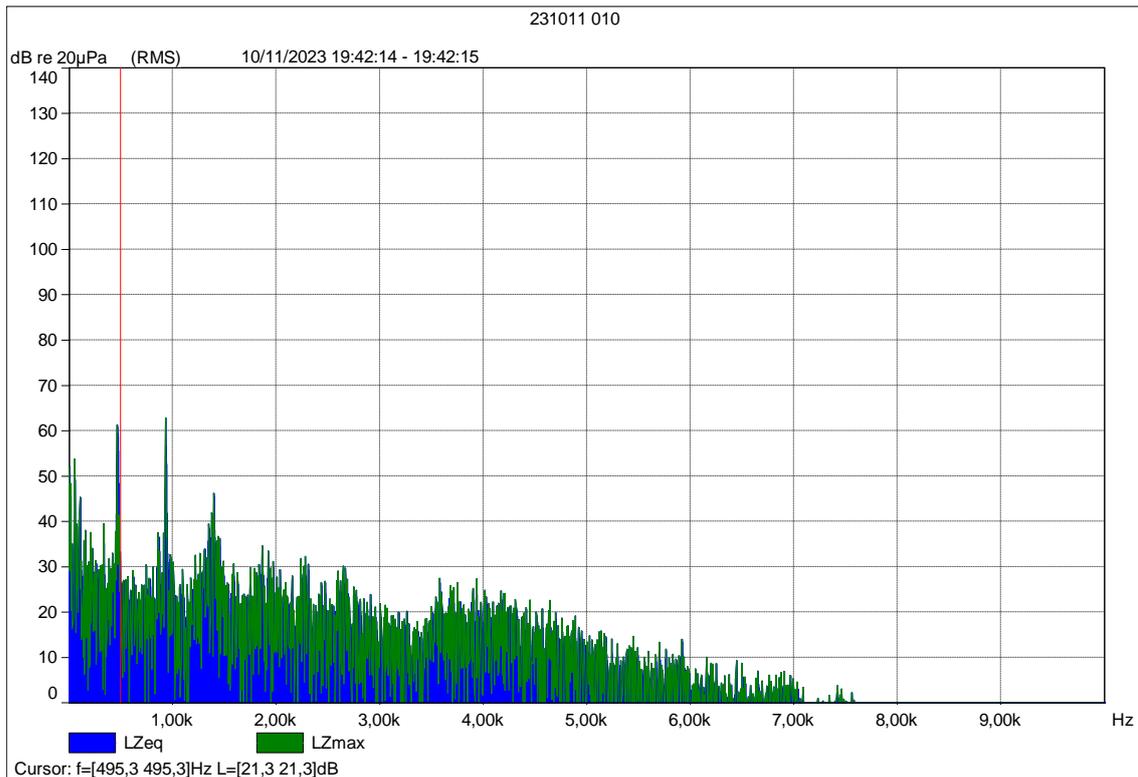


Figura 78: Espectre de l'ona del Sol de la flauta de resina. Font: pròpia.

## 7.5. Aproximació del pressupost de fabricació de la flauta travessera de resina

Un cop acabat el procés de construcció de la flauta, puc fer una comparació del cost que m'ha suposat construir aquesta flauta, amb el que costaria normalment una flauta travessera comercial.

A *Inbrooll* tenen una calculadora per calcular el preu d'impressió de peces. Aquest programa calcula els litres de resina gastats i el temps dedicat a la impressió d'una peça. Utilitzant aquesta calculadora, em surt que una única impressió del disseny de la flauta travessera costa 83,56€. S'ha de tenir en compte que com més models imprimeixes, més reduït és el cost. Per tant, si es volgués comercialitzar aquest model de flauta travessera, sortiria molt més econòmic.

Per altra banda, el material amb el que imprimeixes també és un factor determinant del cost de la peça final. La resina és força cara, ja que és un material professional i d'alta qualitat, però altres materials d'impressió (filament de polímers) tenen un preu molt reduït.

Si tenim en compte costos secundaris, el preu total d'impressió de la flauta amb resina ha estat de 133,56€. S'ha de tenir en compte que he obtingut les molles gratis, ja que me les va regalar en Quim Gibert.

Material	Explicació	Preu
Cos de la flauta travessera	Impressió amb resina	83,56€
Molles	2 metres de corda de piano	0€
Mecanismes	Flauta de segona mà	50€
		<b>133,56€</b>

En definitiva, si es volgués iniciar la comercialització d'aquest producte, s'ha de considerar: en primer lloc la impressió, que ara que s'ha dissenyat i perfeccionat el model, el procés d'impressió depèn del material i de la quantitat d'unitats; en segon lloc cal afegir les molles, que és un filament d'acer molt barat, però aquí s'han de comptar hores de feina manual, que quan es muntessin en sèrie no serien gaires. I finalment afegir els mecanismes, que és el que en el meu cas he reutilitzat els d'una flauta vella i que quedaria pendent de saber-ne el preu, però tal com es veu a la taula de costos hi ha molt marge.

Tenint en compte que el preu de les flautes travesseres del mercat que tenen certa qualitat no baixen dels 400€, puc afirmar que la construcció d'una flauta amb impressió 3D, un cop resolt el tema de les claus, seria **econòmicament rentable**.