



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



## **RESUMEN**

El propósito de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es emplear las nuevas tecnologías de diseño para crear un clarinete con un nuevo sistema de llaves que facilite la digitación, orientado a niños que están empezando con el aprendizaje del instrumento. El diseño de estas llaves estaría inspirado en un sistema de llaves cerradas parecido a los que emplean la flauta travesera o el saxofón. Para validar la solución diseñada se realizarán una serie de simulaciones, primero para validar que el modelo virtual del clarinete se comporta como un modelo real, y luego para evaluar el efecto de este tipo de llaves en la afinación clarinete. El objetivo final será decidir si este tipo de solución es válida para el posterior desarrollo completo del sistema.

**Palabras Clave:** clarinete, acústica, resonancia, calidad sonora, CAD, CAE.

## RESUM

El propòsit d'aquest Treball Fi de Grau (TFG) és emprar les noves tecnologies de disseny per crear un clarinet amb un nou sistema de claus que faciliti la digitació, orientat a nens que estan començant amb l'aprenentatge de l'instrument. El disseny d'aquestes claus estaria inspirat en un sistema de claus tancades semblant als que fan servir la flauta travessera o el saxòfon. Per validar la solució dissenyada es realitzaran una sèrie de simulacions, primer per validar que el model virtual del clarinet es comporta com un model real, i després per avaluar l'efecte d'aquest tipus de claus en l'afinació clarinet. L'objectiu final serà decidir si aquest tipus de solució és vàlida per al posterior desenvolupament complet del sistema.

**Paraules clau:** clarinet, acústica, ressonància, qualitat sonora, CAD, CAE.

## **ABSTRACT**

The purpose of this Final Project (TFG) is to use the new design technologies to create a clarinet with a new key system that facilitates fingering, aimed at children who are starting with learning the instrument. The design of these keys would be inspired by a closed system keys like those used by the flute or saxophone. To validate the solution designed, a series of simulations will be conducted, first to validate that the virtual model of the clarinet behaves like a real model, and then to evaluate the effect of this type of keys on the clarinet tuning. The ultimate goal will be to decide if this type of solution is valid for the subsequent complete system development.

**Keywords:** clarinet, acoustics, resonance, sound quality, CAD, CAE.

# ÍNDICE DEL DOCUMENTO

- **MEMORIA**
- **PRESUPUESTO**
- **PLANOS**

# MEMORIA

## **ÍNDICE DE LA MEMORIA**

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objeto y objetivos del proyecto .....	1
1.2. Justificación y motivación del proyecto .....	2
CAPÍTULO 2: ENCUESTA A MÚSICOS, ANÁLISIS DE MERCADO Y PATENTES .....	3
2.1. Introducción .....	3
2.2. Estructura de la encuesta .....	3
2.3. Respuestas.....	6
2.4. estudio de mercado y patentes.....	12
2.5. Conclusiones.....	16
CAPÍTULO 3: ACÚSTICA DEL CLARINETE .....	17
3.1. Introducción .....	17
3.2. Historia del clarinete .....	17
3.3. El clarinete como tubo sonoro .....	18
3.4. Obtención de la Escala temperada.....	20
3.5. Obtención de la escala en el clarinete .....	21
3.5.1. Orificios tonales.....	21
3.5.2. Orificio de registro.....	23
CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL DISEÑO .....	24
4.1. Introducción .....	24
4.2. Software empleado .....	24
4.3. Validación del modelo .....	25
4.3.1. Introducción .....	25
4.3.2. Condiciones de contorno .....	25
4.3.3. Resultados de la validación .....	27
4.4. Diseño del sistema de orificios tonales .....	29
4.5. Diseño de las llaves.....	31
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....	33
5.1. Grado de cumplimiento de los objetivos .....	34
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	35



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: CLARINETE MODELO E11 DE BUFFET PARA ESTUDIANTES .....	12
FIGURA 2: CLARINÉO DE LA MARCA NUVO .....	12
FIGURA 3: EXTENSIÓN LLAVE A .....	13
FIGURA 4: SISTEMA DE LLAVES SUPERIOR DEL CLARINETE .....	13
FIGURA 5: SISTEMA DE REGULACIÓN DE LA AFINACIÓN .....	14
FIGURA 6: SISTEMA PARTES INTERCAMBIABLES DEL BARRILETE .....	14
FIGURA 7: SISTEMA SUJECIÓN CLARINETE .....	15
FIGURA 8: DISEÑO DE ABRAZADERA .....	15
FIGURA 9: PARTES DEL CLARINETE .....	17
FIGURA 10: CLARINETE COMO TUBO CERRADO .....	18
FIGURA 11: MODOS RESONANCIA TUBO CERRADO .....	19
FIGURA 12: LONGITUD DE ONDA EFECTIVA PARA DIFERENTES DIÁMETROS DE ORIFICIO .....	21
FIGURA 13: ORIFICIOS TONALES DEL CLARINETE .....	22
FIGURA 14: EFECTO LLAVE DE REGISTRO EN EL CLARINETE .....	23
FIGURA 15: LLAVE DE REGISTRO .....	23
FIGURA 16: MODELO DE CLARINETE.....	25
FIGURA 17: DETALLE DEL MALLADO DEL CLARINETE .....	26
FIGURA 18: PRESIÓN ACÚSTICA (SPL).....	27
FIGURA 19: DETALLE DE LOS ORIFICIOS DE UN CLARINETE .....	29
FIGURA 20: DIGITACIÓN PARA $Si_2$ .....	30
FIGURA 21: DETALLE DEL SISTEMA DE LLAVES DE UN SAXO SOPRANO .....	31
FIGURA 22: DISEÑO DE LLAVE 10MM.....	31
FIGURA 23: DETALLE DEL MALLADO DE LAS LLAVES .....	32
FIGURA 24: POSICIÓN DE LAS LLAVES PARA $Mi_3$ A 5MM .....	33
FIGURA 25 DESPIECE DEL CLARINETE .....	33

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: FRECUENCIAS DE LA ESCALA TEMPERADA .....	20
TABLA 2: FRECUENCIAS DE RESONANCIA .....	28
TABLA 3: POSICIÓN Y FRECUENCIAS DE LOS ORIFICIOS TONALES.....	30
TABLA 4: FRECUENCIAS A DIFERENTES DISTANCIAS DE LA LLAVE.....	32

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

## **1.1. OBJETO Y OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El objeto del presente trabajo final de grado es el diseño de un clarinete con un nuevo sistema de llaves inspirado en los que utilizan instrumentos como la flauta travesera o el saxofón, con el objetivo de facilitar el uso y aprendizaje de este. Para ello se utilizarán las nuevas tecnologías del diseño, de manera que se ahorra en tiempo y costes, ya que estas técnicas permiten probar diferentes modelos sin fabricarlos.

Para ello, se deberán abordar estos objetivos:

- Identificar los diferentes problemas que se puedan tener al inicio del aprendizaje del instrumento.
- Diseñar un clarinete que dé solución a esos problemas.
- Obtener los parámetros acústicos derivados de la relación entre el cuerpo del clarinete y los orificios y mecanismos circundantes, con el objetivo de validar las simulaciones.
- Validar que el sistema simulado se comporta de acorde con lo esperado.

Se va a acotar el objeto de estudio al efecto de las llaves de platos cerrados, similar al utilizado tanto en la flauta travesera como en el saxofón, en el sonido del clarinete, con el objetivo de decidir si es viable este tipo de solución para el instrumento. Por lo tanto, el diseño completo del mecanismo se dejará para futuros proyectos, siempre y cuando el resultado de este TFG sea favorable.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La evolución del clarinete lleva estancada más de un siglo. Cabe destacar además que estas evoluciones se realizaban siempre bajo un proceso artesanal de ensayo y error, y por lo tanto muchas de las ideas se descartaban ante este tedioso procedimiento.

Si bien es cierto que se han realizado multitud de investigaciones centradas en el clarinete, estas suelen abordar únicamente la física de la acústica, ya sea mediante el análisis de señales acústicas grabadas de la ejecución del instrumento por un intérprete, como al análisis mediante elementos finitos de los modos de vibración, tanto del cuerpo del clarinete como de la caña.

Este proyecto pretende ir un paso más allá y utilizar esos estudios para desarrollar un método mediante el cual probar diferentes mejoras en el clarinete utilizando las nuevas herramientas de ingeniería que permiten predecir el comportamiento que tendrá el instrumento sin la necesidad de construirlo, con el consecuente ahorro de tiempo y dinero.

Además, este TFG tiene el añadido de proponer una mejora de carácter pedagógico, motivada tras entrevistar a profesores que enseñan a niños a tocar el clarinete, y que son los que día a día perciben la existencia de diversas dificultades, ya que los músicos suelen olvidar los problemas que tuvieron al empezar a tocar un instrumento, aceptándolos como algo normal dentro del proceso de aprendizaje, sin pensar que podrían ser subsanados mediante un diseño del instrumento más enfocado a la enseñanza.

Este trabajo también pretende abrir una nueva línea de innovación introduciendo la simulación por elementos finitos como piedra angular para el desarrollo de nuevos modelos en una industria fuertemente tradicional y artesanal. Esta unión entre la música y la ingeniería es de gran interés para el autor del presente TFG debido a que, como músico, ha dedicado gran parte de su vida a actividades relacionadas con la música, y sería de gran interés combinar ambas disciplinas, ya que pueden complementarse fuertemente.

## **CAPÍTULO 2: ENCUESTA A MÚSICOS, ANÁLISIS DE MERCADO Y PATENTES**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

Para ayudar a concretar los aspectos de diseño, se ha elaborado un cuestionario, a través del cual se intentará extraer conclusiones útiles para el desarrollo del trabajo y ayudar a su justificación.

El cuestionario se elaboró a partir del software online para la edición de formularios de Google Docs (<http://goo.gl/forms/qCkKGiXHWgdnJJd2>), debido a su facilidad de uso a la hora de difundirla mediante redes sociales y mensajería instantánea, y estuvo dirigido a músicos de clarinete.

La encuesta fue completada por 177 músicos, considerando una muestra suficiente para extraer conclusiones válidas. En rasgos generales, la mayoría de los encuestados tocan Sib y han completado estudios en Enseñanzas Profesionales.

### **2.2. ESTRUCTURA DE LE ENCUESTA**

En las preguntas donde aparece como opción “otro”, esta se podía rellenar con el caso particular.

#### Pregunta 1:

##### **¿Cuál es tu nivel como clarinetista?**

- Enseñanzas Elementales
- Enseñanzas Profesionales (Grado Medio)
- Enseñanzas Superiores
- Profesional
- Otro

#### Pregunta 2:

##### **¿Qué instrumento/s tocas?**

- Clarinete en Sib
- Clarinete en La
- Clarinete Bajo
- Clarinete Bajo
- Clarinete Contrabajo
- Otro

Pregunta 3:

**¿Cuántas boquillas usas?**

- 1
- 2
- 3
- Más de 3

Pregunta 4:

**¿Cuál es la marca de esas boquillas?**

- Vandoren
- Selmer
- Yamaha
- Buffet
- Backun
- Ernst Schreiber
- Pomarico
- La que venía con el clarinete
- Desconozco la marca de mi boquilla
- Otro

Pregunta 5:

**¿Cuántas veces has cambiado de boquilla desde que empezaste a tocar?**

- Ninguna
- 1
- 2
- 3
- Más de 3

Pregunta 6:

**¿Por qué usas tu boquilla actual?**

- Suena mejor
- Es más cómoda
- Permite una mejor emisión del sonido
- Me la recomendó mi profesor
- Me la recomendaron mis compañeros
- La vi y me gustó su color, forma, etc.
- Me permite tocar otros estilos (jazz, etc.)
- Otro

Pregunta 7:

**¿En qué te fijas a la hora de comprar una boquilla?**

- Precio
- Fabricante
- Material
- Calidad del sonido
- Cañas que sean aptas para esa boquilla
- Abertura
- Otro

Pregunta 8:

**¿Has usado boquillas de materiales no convencionales?**

- No
- Sí, de plástico
- Sí, de cristal
- Sí, de madera
- Sí, de metal
- Otro

Pregunta 9:

**¿Se te cansa la mandíbula después de estar tocando durante un periodo de tiempo no demasiado largo?**

- Sí, siempre
- Sí, con bastante frecuencia
- Sí, a veces
- Sí, pero muy de vez en cuando
- No, nunca

Pregunta 10:

**¿Utilizas compensador en la boquilla?**

- Sí
- No

Pregunta 11:

**¿Utilizas aros de afinación entre las diferentes partes del clarinete?**

- Sí
- No

Pregunta 12:

**¿Recuerdas algún problema cuando empezaste a tocar?**

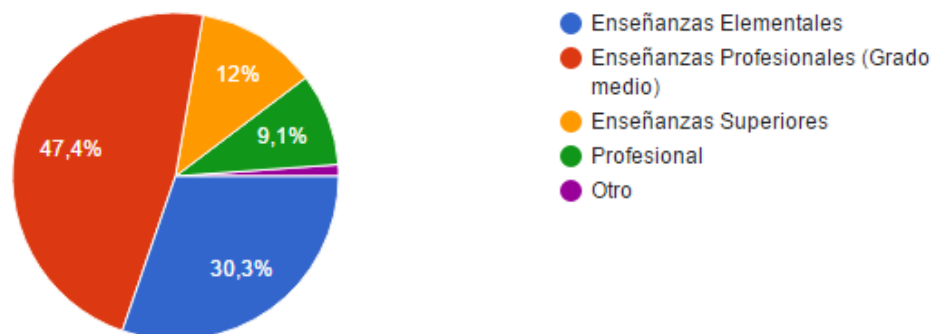
- Problemas para tapar bien los orificios
- Cansancio excesivo en mandíbula y mofletes
- Peso excesivo del clarinete
- No
- Otro

Además de estas preguntas, se incluyó un apartado para que la gente pudiese exponer cualquier cuestión sobre su experiencia con el clarinete o aportar sus propias ideas.

## 2.3. RESPUESTAS

### Pregunta 1:

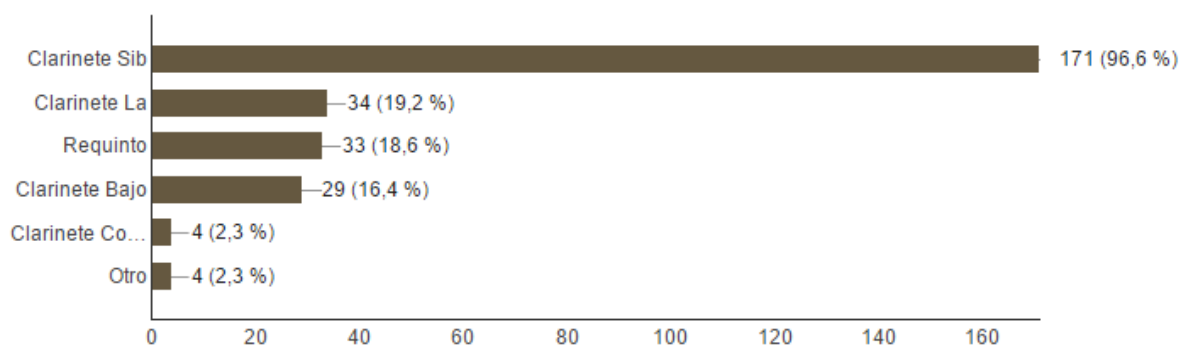
¿Cuál es tu nivel como clarinetista? (175 respuestas)



Observamos que más del 50% de los que respondieron a la encuesta tienen al menos Enseñanzas Profesionales y por tanto llevan años tocando el clarinete, siendo esa experiencia clave para detectar problemas y saber identificarlos adecuadamente.

### Pregunta 2:

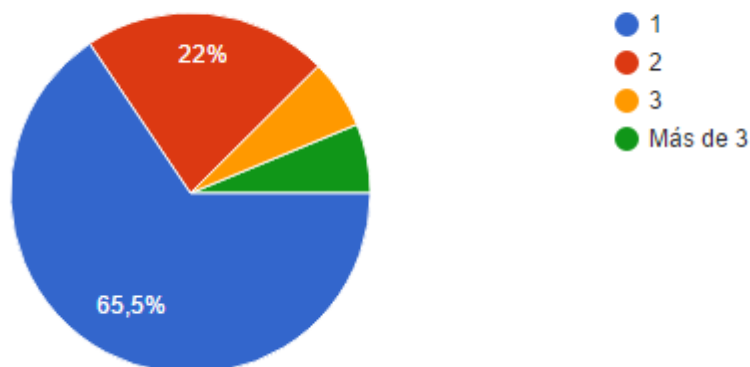
¿Qué instrumento/s tocas? (177 respuestas)



Dado que la inmensa mayoría toca Clarinete en Sib, el TFG se construirá en base a un clarinete en Sib, de manera que sea compatible con otros accesorios.

Pregunta 3:

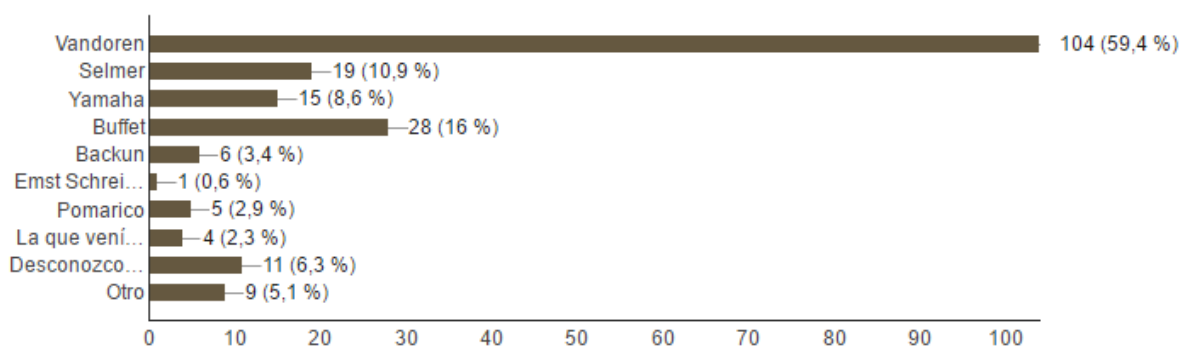
¿Cuántas boquillas usas? (177 respuestas)



Es destacable observar que la mayoría solo usa una boquilla habitualmente, aunque haya cambiado varias veces de boquilla, como se puede observar en las respuestas de la pregunta 5.

Pregunta 4:

¿Cuál es la marca de esas boquillas? (175 respuestas)



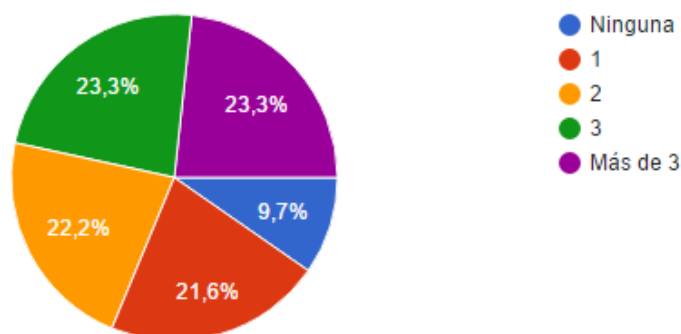
Vandoren copa las respuestas como el principal fabricante de boquillas para clarinete entre los encuestados. Tras consultar su catálogo, vemos que Vandoren solo fabrica boquillas en ebonita, confirmando así el resultado obtenido de la pregunta 8.



Pregunta 5:

¿Cuántas veces has cambiado de boquilla desde que empezaste a tocar?

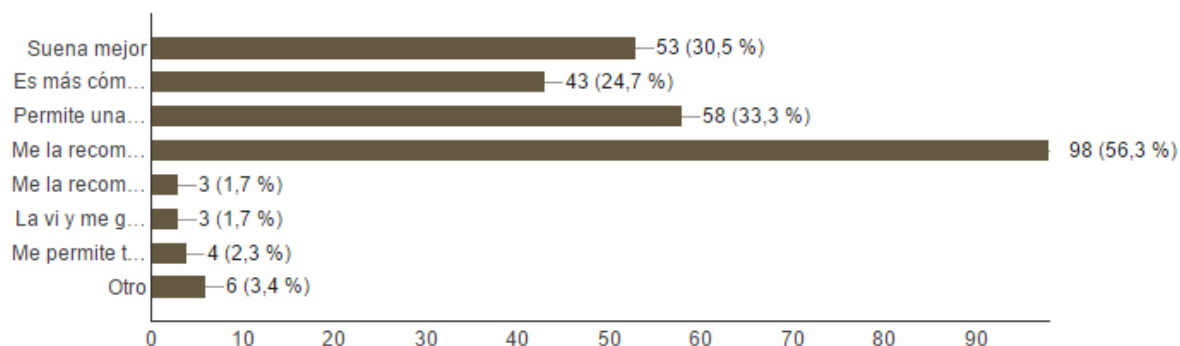
(176 respuestas)



Más del 90% de los encuestados ha cambiado de boquilla al menos una vez desde que empezó a tocar.

Pregunta 6:

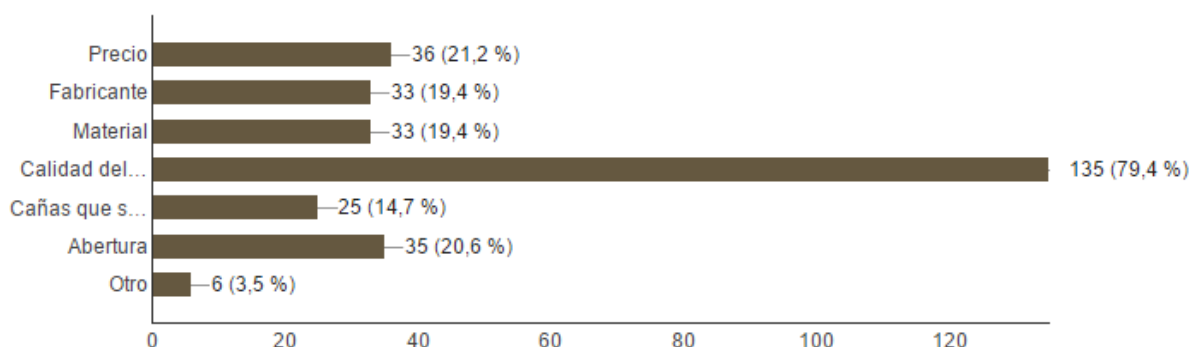
¿Por qué usas tu boquilla actual? (174 respuestas)



La mayoría de la gente confía su decisión de la boquilla a su profesor, y los parámetros más decisivos están relacionados con la calidad del sonido y la ejecución de éste.

Pregunta 7:

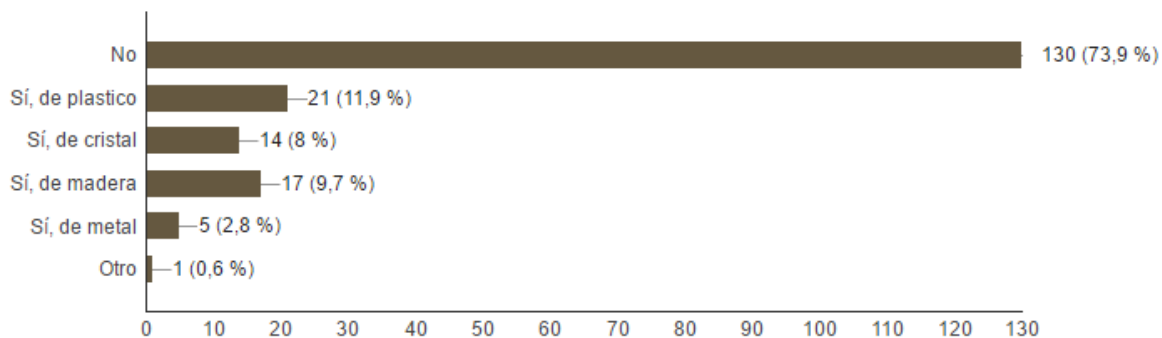
¿En qué te fijas a la hora de comprar una boquilla? (170 respuestas)



La principal razón a la hora de decidir qué boquilla comprar es la calidad de sonido que obtienes con la boquilla. Esto refuerza la conclusión obtenida de la pregunta 6.

Pregunta 8:

¿Has usado boquillas de otros materiales no convencionales? (176 respuestas)

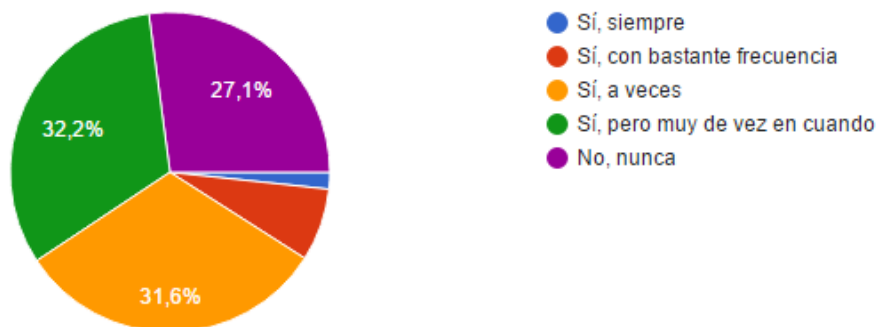


Casi un 75% de los encuestados no utiliza boquillas fabricadas en materiales no convencionales, como plásticos como el ABS, cristal o metal entre otros.

Pregunta 9:

¿Se te cansa la mandíbula después de estar tocando durante un periodo de tiempo no demasiado largo?

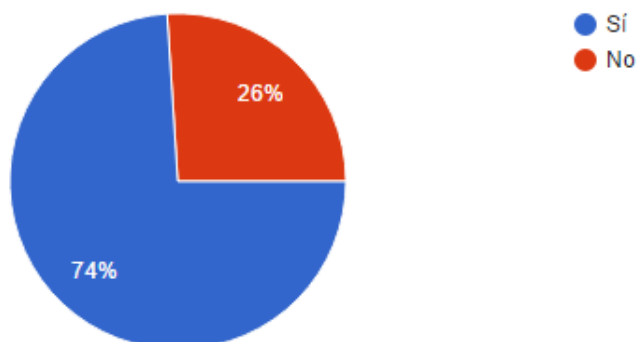
(177 respuestas)



Parece ser que este no es un problema muy relevante, aun así, sería interesante tenerlo en cuenta en el desarrollo.

Pregunta 10:

¿Utilizas compensador en la boquilla? (173 respuestas)

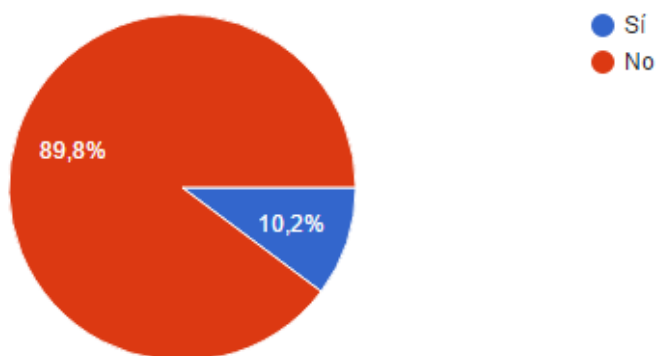


La gran mayoría usa compensador en la boquilla, debido a que el plástico usado para fabricar la mayoría de boquillas no ofrece una sujeción suficiente y pueden resbalar los dientes en ella. Además, el tacto del plástico en los dientes suele resultar desagradable a mucha gente.

Pregunta 11:

¿Utilizas aros de afinación entre las diferentes partes del clarinete?

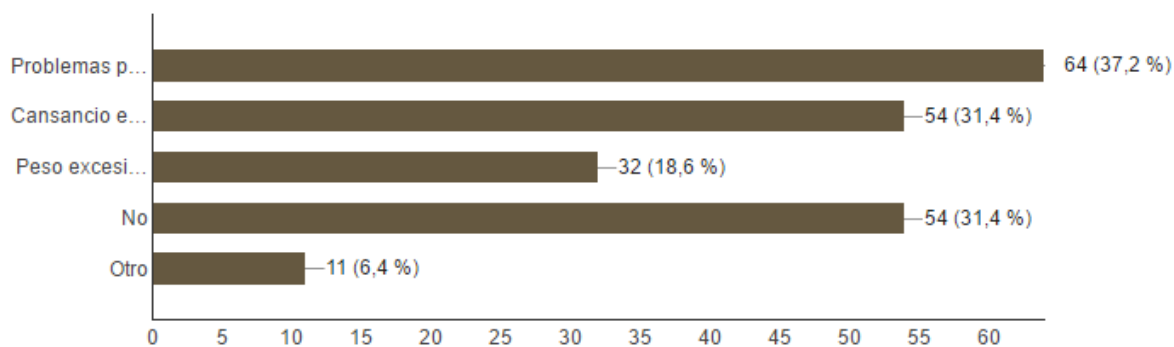
(176 respuestas)



La mayoría de gente no usa aros de afinación, ya sea por desconocimiento o porque no le resulta interesante.

Pregunta 12:

¿Recuerdas algún problema cuando empezaste a tocar? (172 respuestas)



Esta es la pregunta más relevante para el objetivo de este TFG, ya que se trata de diseñar un clarinete que facilite el aprendizaje, sobre todo en niños pequeños. Cabe destacar que sólo 54 de los 171 encuestados afirman no haber tenido ningún problema reseñable al inicio del aprendizaje. Esto denota la importancia de solucionar estos problemas.

## 2.4. ESTUDIO DE MERCADO Y PATENTES

Si nos dirigimos a las principales marcas del mercado, como por ejemplo Buffet, Jupiter o Yamaha, los modelos que ofrecen dirigidos a estudiantes difieren con los profesionales en cuanto a la calidad de los materiales empleados, fabricados en ABS en lugar de madera, y la calidad de sus acabados, pero no ofrecen ningún tipo de solución específica para aquellos que estén empezando a tocar el instrumento, más allá de un precio más ajustado.



**Figura 1:** Clarinete modelo E11 de Buffet para estudiantes

**Fuente:** Buffet Crampon

Si salimos de las marcas más habituales, podemos encontrar algunas soluciones diferentes, como por ejemplo la marca Nuvo, una marca británica especializada en instrumentos orientados a aprendices. De esta marca es destacable el clarinete diseñado llamado Clarinéo, ya que este sí intenta dar soluciones a algunos de los problemas presentados durante el aprendizaje, además de emplear plástico para su construcción y utilizar un sistema de llaves más simple. El problema es que viene afinado en Do, por lo que para tocar con otros clarinetes afinados en Sib deberían transportar la pieza a interpretar, lo que dificulta tareas comunes como las audiciones en grupo durante el aprendizaje.



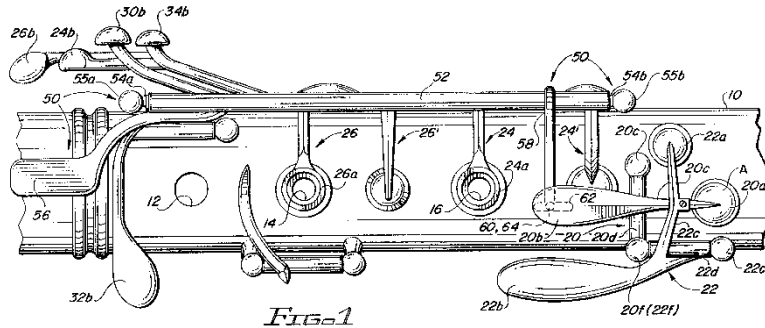
**Figura 2:** Clarinéo de la marca Nuvo

**Fuente:** Nuvo Instruments

Además, se ha realizado un estudio de patentes para recabar información sobre posibles innovaciones en el sector. Se ha buscado en las bases de patentes americana, española y europea. Las patentes encontradas podrían clasificarse en tres grupos: Patentes relativas al sistema de llaves, patentes relativas al ajuste de la afinación del instrumento y patentes de accesorios.

De las patentes que hacen referencia al sistema de llaves podríamos destacar las siguientes:

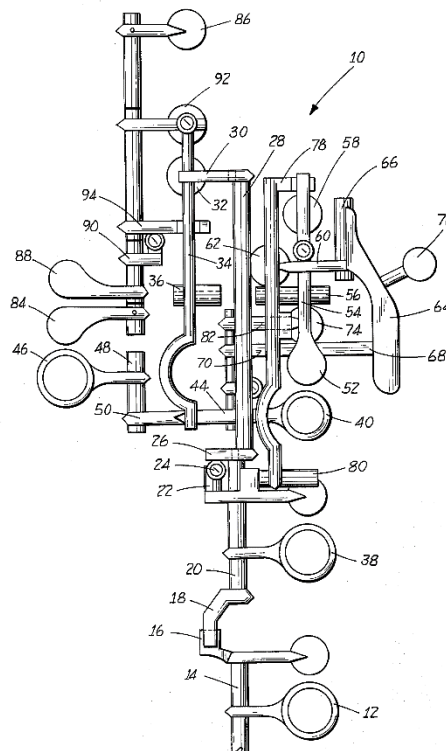
- Patente US 5477766 A, publicada en 1994, añade una llave de extensión al sistema Boehm para poder accionar la llave del La con la mano derecha



**Figura 3:** Extensión llave A

Fuente: Patente US 5477766 A

- Patente US 3941026 A, publicada en 1976, presenta un sistema de llaves que separa el orificio de registro del orificio del Sib, solucionando uno de los problemas de afinación del clarinete.

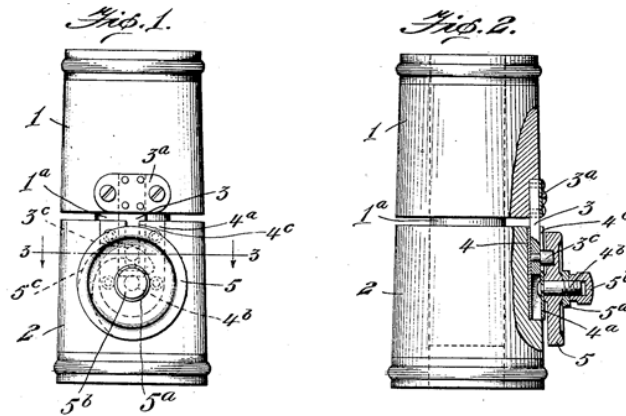


**Figura 4:** Sistema de llaves superior del clarinete

Fuente: Patente US 3941026 A

El ajuste de la afinación del clarinete se realiza variando la longitud de este, sobre todo mediante la pieza del barrilete, lo que se consigue sacando ligeramente las distintas partes del clarinete. Algunas patentes encontradas tratan de implementar una solución que haga este proceso más preciso, como:

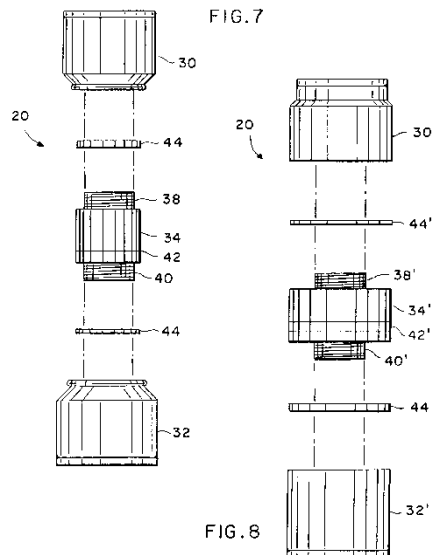
- La patente US 1163222 A, publicada en 1915, plantea variar la longitud del barrilete mediante un mecanismo de rosca o similares.



**Figura 5:** Sistema de regulación de la afinación

Fuente: Patente US 1163222 A

- La patente US 6054644 A, publicada en el año 2000, presenta un diseño de barrilete con partes intercambiables para variar la longitud y el diámetro de este.

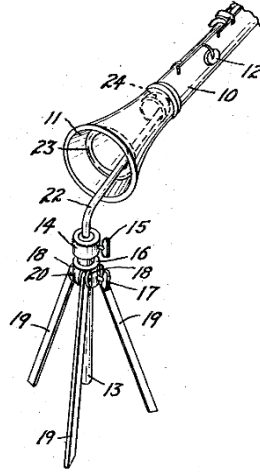


**Figura 6:** Sistema partes intercambiables del barrilete

Fuente: Patente US 6054644 A

Sobre las patentes de accesorios, abundan los diseños de soportes para el instrumento y de abrazaderas para la boquilla:

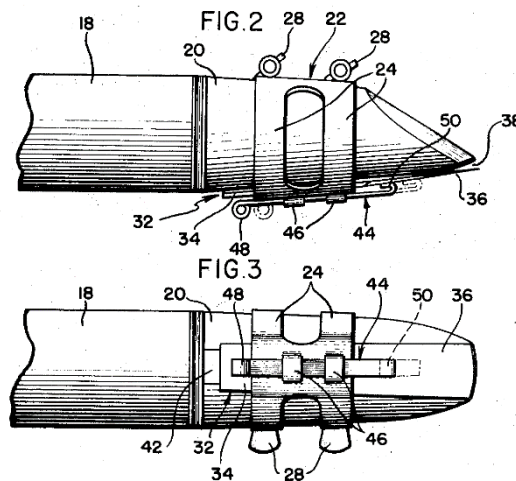
- La patente US 3357666 A, publicada en 1967, muestra un trípode plegable que sujeta el clarinete mientras se es tocado. La sujeción al clarinete se realiza mediante dos aros.



**Figura 7:** Sistema sujeción clarinete

Fuente: Patente US 3357666 A

- La patente US 3791253 A, publicada en 1974, revela un diseño de abrazadera a la que se le ha añadido una barra con un punto de presión ajustable, mediante el cual se puede realizar un ajuste de la vibración de la caña.



**Figura 8:** Diseño de abrazadera

Fuente: Patente US 3791253 A



## 2.5. CONCLUSIONES

Una vez expuestas las preguntas y respuestas realizadas en el cuestionario, se puede proceder a extraer una serie de conclusiones que ayuden al desarrollo y justificación del proyecto. Además de la encuesta, esta se ha reforzado con entrevistas a profesores de clarinete, sobre todo aquellos que enseñan en grado elemental, ya que ellos identifican en su día a día los problemas que tiene la gente durante el proceso de aprendizaje del instrumento.

En primer lugar, cabe destacar que el clarinete en Sib con el sistema de llaves Boehm, también conocido como sistema francés, es el más utilizado, y por lo tanto el clarinete diseñado deberá seguir este esquema, para facilitar el posterior paso a un clarinete profesional.

Luego se puede concluir que este clarinete de diseño pedagógico debe introducir soluciones a los principales problemas detectados, como son los problemas para tapar correctamente los orificios como el cansancio excesivo en mofletes. El problema con el peso excesivo sería automáticamente solucionado con el uso de materiales más ligeros en la construcción del clarinete.

La conclusión más importante es que existen ciertos problemas generalizados que el diseño actual del clarinete no contempla, ya que este fue introducido el año 1843, y apenas ha habido cambios en su diseño, la mayoría de estos son la inclusión de una llave adicional para facilitar la articulación de algunas notas.

Por lo tanto, podemos extraer cuales son las demandas de los usuarios para posteriormente ligarlas a las características técnicas relacionadas con estas, con tal de realizar un diseño que cumpla con los requisitos demandados.

Del análisis de mercado y patentes se extrae que, si bien se han realizado avances y hay innovación en el sector, todavía hay espacio para un gran número de mejoras, sobre todo en aquellas enfocadas a facilitar el aprendizaje del instrumento.

## **CAPÍTULO 3: ACÚSTICA DEL CLARINETE**

### **3.1. INTRODUCCIÓN**

Este capítulo trata de introducir los fundamentos de la generación del sonido en un instrumento como el clarinete y los parámetros relacionados con este. Este proceso es crucial para la realización de este TFG debido a que durante el grado no se ha recibido ningún tipo de formación sobre este aspecto. Se ha realizado un extenso proceso de documentación para desarrollar este capítulo y poder abordar el posterior desarrollo de la solución propuesta en los objetivos.

Para poder obtener parámetros cuantificables sobre los cuales desarrollar una serie de conclusiones, primero se deberá desarrollar conceptos relacionados con la física del sonido, como la teoría de tubos sonoros, la generación de armónicos o la influencia de los orificios tonales.

### **3.2. HISTORIA DEL CLARINETE**

El clarinete pertenece a la familia de los instrumentos de viento madera de lengüeta simple hecha de caña. El cuerpo del clarinete se fabrica tradicionalmente en madera (ébano o granadillo), aunque en los últimos años han aparecido modelos en plástico, como el ABS o la ebonita, siendo este último el material más habitual para la fabricación de la boquilla. El clarinete se divide en cinco partes, citados a partir de la parte superior: boquilla, barrilete, cuerpo superior, cuerpo inferior y campana.



**Figura 9:** Partes del clarinete

Fuente: Yamaha

El clarinete actual procede del chalumeau barroco, instrumento creado en Europa y especialmente popular en Francia en los siglos XV y XVI, el cual constaba de ocho orificios y dos llaves para las notas altas. Al no tener llave de registro, sólo podía ser tocado en su registro fundamental, limitando su

registro a una octava y media. A finales del siglo XVII, es modificado para que una de las llaves funcionara como llave de registro para producir armónicos a una doceava. Este cambio está atribuido a Johann Christoph Denner, considerando este hecho como el nacimiento del clarinete tal cual lo conocemos.

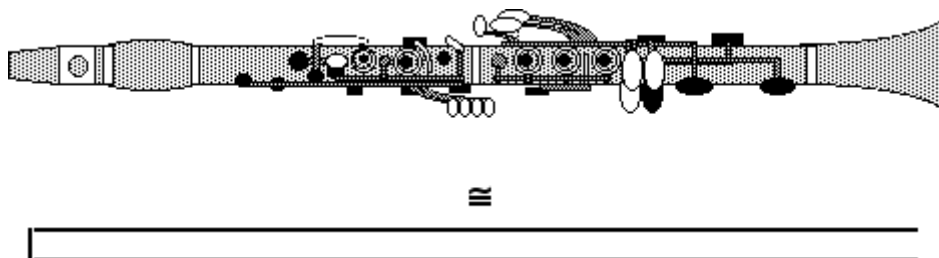
El clarinete elaborado por Denner tenía pocas llaves, de modo que le faltaban notas entre el registro grave (original del chalumeau) y el registro agudo, por tanto, las siguientes mejoras fueron la introducción de nuevas llaves para llenar el paso entre ambos registros, llegando por primera vez en 1791 a completar un registro cromático de más de dos octavas y media mediante ocho orificios y cinco llaves. Este tipo de clarinete es para el que Mozart escribió su famoso Concierto para clarinete en La mayor, K. 622.

A partir de este momento la evolución da lugar a dos tipos de clarinetes según su mecanismo. Por un lado, tenemos el sistema Öhler o alemán, usado en Alemania, Austria y algunos países del este. Por otro lado, se desarrolla el sistema Boehm o francés, usado en el resto del mundo.

El sistema Boehm debe su nombre a Theobald Boehm debido a que este se inspira en el sistema de mecanismos de anillos móviles de la flauta por él. Fue desarrollado por el clarinetista Hyacinthe Klosé y el constructor de instrumentos Auguste Buffet entre 1839 y 1843. El sistema de anillos móviles permite evitar posiciones horquilla, además se duplican algunas llaves para ciertas notas con el objeto de evitar el deslizamiento de los dedos. Este clarinete, el cual consta de 17 llaves y 6 anillos, da forma al clarinete actual. La única innovación de este diseño que se ha impuesto es la duplicación de una llave para poder ejecutar esta con la mano izquierda, al igual que ya tenían las otras tres que funcionan en grupo.

### 3.3. EL CLARINETE COMO TUBO SONORO

El clarinete es el único instrumento de la familia de viento madera que se comporta acústicamente de manera diferente, debido a que su funcionamiento se asemeja al de un tubo cilíndrico cerrado (tubo cerrado por un extremo, algunos autores utilizan el término semicerrado), a través del cual se considera que la onda viaja como una onda plana, aunque no de manera exacta por varias razones: las paredes del tubo tienen flexibilidad, la velocidad de la onda no es constante, y por último, suele haber

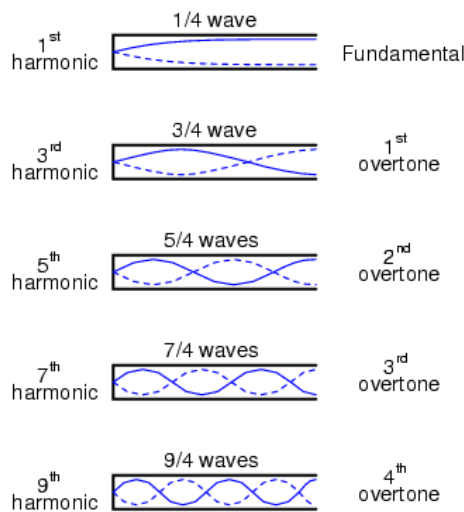


**Figura 10:** Clarinete como tubo cerrado

Fuente: AL-MAJDALAWI ÁLVAREZ, Amir. *Acústica Musical* (2006)

disipación de la energía en forma de intercambios de calor entre el gas y las paredes. Las ondas longitudinales se reflejan en los extremos originando zonas de máxima presión, llamados *vientres*, y zonas de presión cero, denominados *nodos*.

Debido a que el clarinete funciona como tubo cerrado, el clarinete solo emite las resonancias que siguen los armónicos impares de una serie armónica, además de algunos componentes pares debidos a la vibración de la lengüeta, las resonancias del tracto vocal y las zonas ampliadas del tubo. En los tubos cerrados se produce un nodo en el extremo cerrado y un vientre en el extremo abierto. El sonido fundamental tiene lugar con un solo nodo y un solo vientre; el nodo para completar la onda estacionaria se forma fuera del tubo.



**Figura 11:** Modos resonancia tubo cerrado

**Fuente:** Michael Stutz (2001)

Si como hemos dicho hasta ahora en el extremo cerrado se produce un nodo, y en todo extremo abierto se produce un vientre, en el tubo solo se formará una cuarta parte del ciclo de la onda ( $\lambda$ ), o lo que es lo mismo,  $\lambda/4$ , para una longitud de tubo  $L = \lambda/4$ , de donde  $\lambda = 4L$ . Siendo  $c$  la velocidad de propagación de la onda, la frecuencia fundamental  $f_0$  sería calculada como:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4L}$$

**Ecuación 1:** Frecuencia fundamental

**Fuente:** JOE WOOLF, *Clarinet acoustics: an introduction* (2007)

Si tenemos  $\lambda/2 + \lambda/4 = L$ , la longitud será  $L = 3\lambda/4$  y podemos deducir la longitud de onda de la siguiente frecuencia de resonancia,  $\lambda = 4L/3$ . Por tanto, expresado en función de la frecuencia fundamental,  $f_1 = 3f_0$ . Generalizando tenemos que  $f_n = (2n+1)f_0$ , por tanto, en tubos cerrados no se generan armónicos pares, exceptuando los generados por causas mencionadas anteriormente.

### 3.4. OBTENCIÓN DE LA ESCALA TEMPERADA

El sistema temperado es el más utilizado actualmente en la música occidental, y se basa en dividir una octava en doce semitonos separados por la misma distancia. Por lo tanto, el intervalo en frecuencias entre dos semitonos adyacentes es del orden de la raíz doceava de dos. Para desarrollar toda la serie de frecuencias para cada nota, se toma como referencia el La<sub>3</sub> (según la notación internacional A4) a 440Hz, y se extraen las sucesivas mediante la siguiente relación:

$$F_{n+1} = F_n \sqrt[12]{2}$$

**Ecuación 2:** Relación de frecuencias

Fuente: NEEDHAM Joseph (1962)

Mediante esta ecuación se extraen las frecuencias para cada nota, expresadas en la Tabla 1. En la escala temperada se divide la octava en 12 intervalos de semitono de 100 cents cada uno. Por lo tanto, el cent se revela como una unidad practica para comparar intervalos pequeños de menos de un semitono. La razón de proporcionalidad de frecuencias de 1 cent es de  $\sqrt[1200]{2}$ , que es la 1200ava parte geométrica de la octava.

Nota	Frecuencia (Hz)	Nota	Frecuencia (Hz)	Nota	Frecuencia (Hz)	Nota	Frecuencia (Hz)
Mi2	146.83	Mi3	293.66	Mi4	587.33	Mi5	1174.66
Fa2	155.56	Fa3	311.13	Fa4	622.25	Fa5	1244.51
Fa#2	164.81	Fa#3	329.63	Fa#4	659.26	Fa#5	1318.51
Sol2	174.61	Sol3	349.23	Sol4	698.46	Sol5	1396.91
Sol#2	185.00	Sol#3	369.99	Sol#4	739.99	Sol#5	1479.98
La2	196.00	La3	392.00	La4	783.99	La5	1567.98
La#2	207.65	La#3	415.30	La#4	830.61	La#5	1661.22
Si2	220.00	Si3	440.00	Si4	880.00	Si5	1760.00
Do3	233.08	Do4	466.16	Do5	932.33	Do6	1864.66
Do#3	246.94	Do#4	493.88	Do#5	987.77	Do#6	1975.53
Re3	261.63	Re4	523.25	Re5	1046.50	Re6	2093.00
Re#3	277.18	Re#4	554.37	Re#5	1108.73	Re#6	2217.46

**Tabla 1:** Frecuencias de la escala temperada

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. OBTENCIÓN DE LA ESCALA EN EL CLARINETE

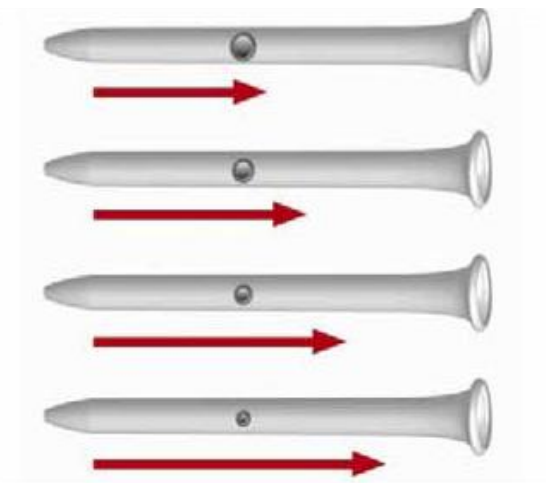
Para conseguir todas las notas de la escala es necesario disponer de orificios tonales, ubicados en el tubo y accionados ya sea directamente con los dedos o mediante algún mecanismo, cuya función consiste en dividir la columna de aire del tubo en varios segmentos con frecuencias propias para producir una escala; y uno o varios orificios de registro para obtener armónicos superiores y ampliar la escala a octavas superiores.

El desarrollo de estos orificios y los mecanismos circundantes ha sido comentado en el 3.2. Historia del clarinete. En este punto vamos a analizar los sucesos físicos subyacentes a la generación del sonido.

#### 3.5.1. Orificios tonales

Los orificios tonales son perforados con el diámetro adecuado y dispuestos convenientemente y dividen la columna de aire en segmentos con frecuencias propias. Las aberturas funcionan como extremos abiertos, al igual que la campana. Cuando el orificio más bajo se abre, la frecuencia se va incrementando hasta que estén todos los agujeros abiertos, completando así la escala. Para seguir incrementando la frecuencia se utiliza un orificio de registro, del cual hablaremos más adelante, que inhibe el primer armónico y permite al siguiente armónico -el tercero en el clarinete- ser el armónico dominante a partir del cual se construye la escala.

La longitud acortada por el orificio es eficaz si el diámetro del orificio es similar al diámetro interior del tubo. Como los orificios deben funcionar obteniendo las diferentes longitudes de onda para cada una de las resonancias armónicas del instrumento y el diámetro es limitado, el efecto para cada armónico es diferente. En el caso de ser más pequeños, la onda efectiva se alarga pasando el orificio.



**Figura 12:** Longitud de onda efectiva para diferentes diámetros de orificio

Fuente: V. PASTOR GARCÍA. *Revista de Acústica* Nº42 (2011)

El número y forma de los orificios que se requieren para construir una escala temperada depende de la naturaleza del tubo, en nuestro caso un cilindro cerrado, y deberá cubrir una octava más una quinta, esto es 20 semitonos. Por tanto, para ejecutar una escala cromática se requerirán al menos 19 orificios.

Para obtener la distribución y dimensiones de esos orificios es necesario realizar un detallado estudio sobre las propiedades acústicas del instrumento. En la flauta los orificios son de diámetro constante, debido a que el diámetro del tubo es constante en toda su longitud. En el caso del clarinete, las alteraciones de la geometría de su tubo y la obertura exponencial de la campana afectan directamente a la acústica de la columna de aire.



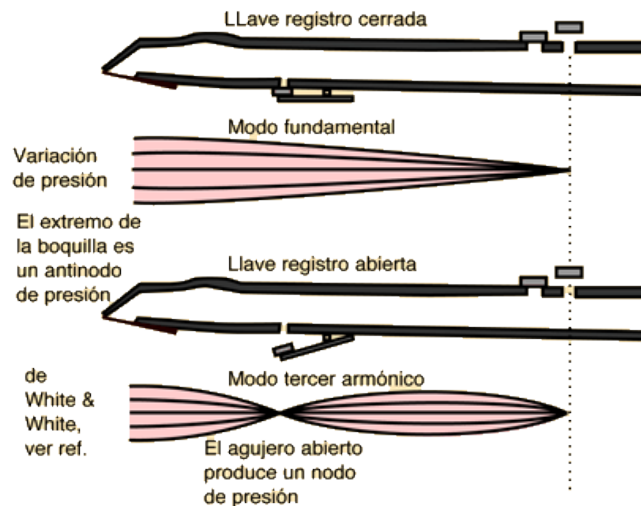
**Figura 13:** Orificios tonales del clarinete

Fuente: Yamaha

Considerando estos matices, los orificios no deben estar igualmente espaciados a lo largo del tubo. El espaciado de los orificios aumenta con la distancia a la boquilla. El incremento de longitud efectiva del tubo debe ser de un 6% (Ridgen, 1977), correspondiendo al valor del semitono temperado. Además, para satisfacer este incremento en el clarinete, el diámetro de los orificios va creciendo gradualmente a medida que bajamos por la escala.

### 3.5.2. Orificio de registro

Cuando el orificio está cerrado, la columna de aire vibra con normalidad en el modo fundamental. Al abrirse se libera una cantidad mínima de aire, formando un nodo de presión, induciendo a que el modo superior se perciba como el tono predominante (Nederveen, 1969).



**Figura 14:** Efecto llave de registro en el Clarinete

**Fuente:** White, Harvey E.; White, Donald H., *Physics and Music*, Saunders College (1980)

En el clarinete, la llave de registro está en realidad diseñada como orificio tonal para el  $Sib_3$  del registro medio. Esto hace que se deba encontrar una solución de compromiso para el diámetro de este orificio, dado que como orificio tonal interesa un mayor diámetro, al contrario de lo que ocurre en un orificio de registro. Por esta razón surgen desafinaciones en las doceavas de los extremos del tubo. Esto es resuelto practicando alteraciones en la forma interior del tubo. Esto podría solucionarse separando ambas funciones y practicando un orificio para cada uno (sistemas McIntyre, Mazzeo y Stubbins entre otros), pero esto llevaría a cambios de digitación, los cuales no suelen ser aceptados por los músicos.



**Figura 15:** Llave de registro

**Fuente:** Selmer



## **CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL DISEÑO**

### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo pasaremos a exponer los pasos llevados a cabo en el proceso de verificación de los diseños propuestos. Para ello, primero, se verificará que el modelo virtual responde de una manera similar a un modelo real. Luego, sobre el modelo verificado, se comprobará el funcionamiento de los diferentes diseños.

### **4.2. SOFTWARE EMPLEADO**

Dadas las diferentes opciones disponibles de software para realizar el diseño del clarinete, entramos a detallar cuáles han sido los criterios empleados en la elección.

Para realizar el modelo en tres dimensiones del clarinete había varias opciones de software CAD disponibles. De entre las diferentes opciones de paquetes de CAD disponibles en el mercado, se ha decidido utilizar el software Inventor 2016 de Autodesk debido a que se ha aprendido su uso durante el grado, y ha demostrado ser una herramienta óptima para el cometido de este TFG.

En cuanto al software de simulación, se ha llegado a la conclusión de que los módulos de elementos finitos de los que dispone el paquete de software de Inventor no eran lo suficientemente potentes para desarrollar las simulaciones con las características deseadas, por ello se ha optado por emplear el software ANSYS 17 para realizar las simulaciones. ANSYS es un paquete de software muy completo, que además cuenta con multitud de extensiones, entre ellas la extensión *Acoustics ACTx R170*, que contiene las herramientas necesarias para realizar un análisis acústico del modelo, siendo esto fundamental para el desarrollo del TFG.

En resumen, se ha utilizado el paquete CAD Inventor Professional 2016 de Autodesk para diseñar los modelos de estudio, y el software ANSYS 17 como software para realizar las simulaciones basadas en el método de los elementos finitos.

### 4.3. VALIDACIÓN DEL MODELO

#### 4.3.1. Introducción

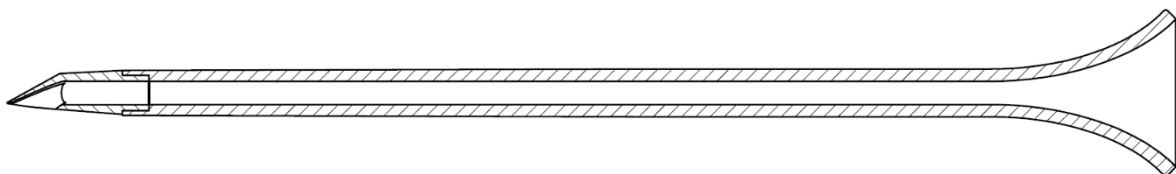
El objetivo de esta etapa del diseño es el de comprobar que el clarinete diseñado se comporta como se un clarinete real. Para ello, se llevará a cabo una serie de simulaciones que realicen un barrido de frecuencias al modelo y permitan extraer una serie de gráficos que permiten conocer las frecuencias resonantes del modelo. Comparando estas frecuencias con las de la escala temperada, se podrá verificar si el modelo es válido.

#### 4.3.2. Condiciones de contorno

Para todas las pruebas de aquí en adelante, se usará la escala temperada tomando como nota de referencia el  $La_3$  a 440Hz. Como el clarinete se encuentra afinado en Sib, las notas se encuentran un tono por debajo en relación a un instrumento afinado en Do, como puede ser el piano o la flauta, por lo tanto, la frecuencia de 440Hz corresponde a un  $Si_3$  del clarinete. En adelante las frecuencias estarán referidas a las notas del clarinete en Sib a no ser que se indique lo contrario.

El clarinete diseñado es completamente cilíndrico, mientras que el clarinete tradicional es ligeramente cónico en el cuerpo inferior. Aun así, se ha considerado adecuado tomar como base las medidas de un clarinete real. Por tanto, habrá que realizar posteriormente algunas iteraciones para conseguir la medida exacta en la cual el modelo responda adecuadamente.

El modelo en tres dimensiones ha sido creado mediante el software CAD Autodesk Inventor 2016. Este modelo lo introducimos en el software de simulación ANSYS 17, al que previamente le hemos instalado la extensión Acoustics ACTx R170 para la realización de análisis acústicos.



**Figura 16:** Modelo de clarinete

Fuente: Elaboración propia

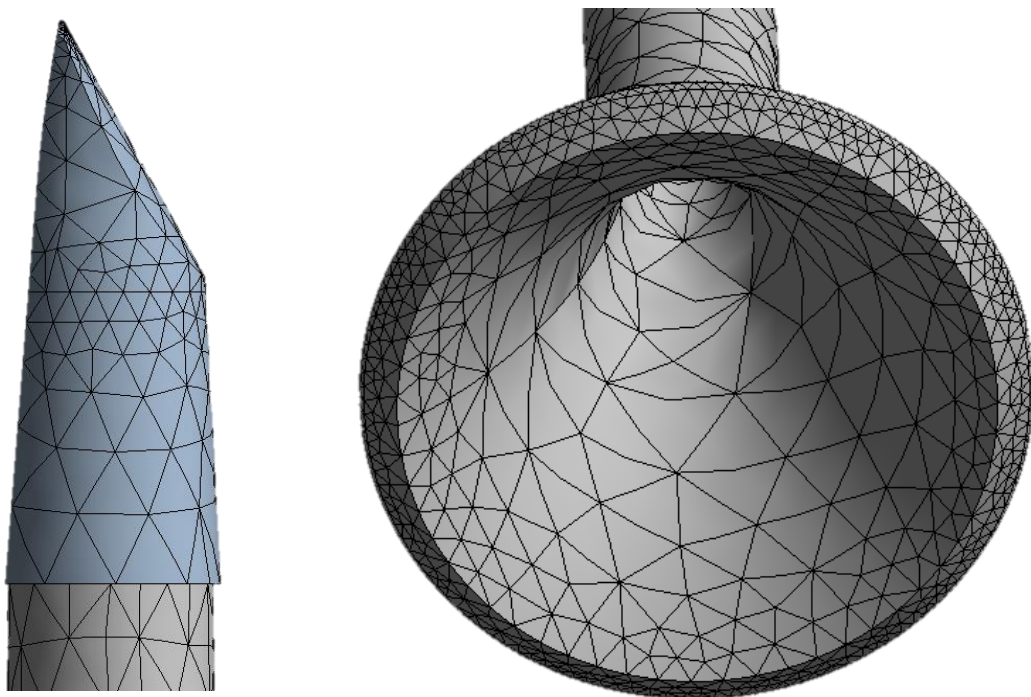
Como fuente de excitación se ha utilizado una “mass source”. Esta fuente de excitación aplicada a una superficie produce una onda plana que recorre el tubo del instrumento. Para el cálculo de este valor se ha tomado el área posterior de la caña, dado que es la fuente de excitación, que son  $4,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ . El flujo de aire es de  $3,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  (Fletcher, 1979). Tomamos la densidad del aire de  $1,2041 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

$$Q_s = \frac{\Phi \rho}{A} = \frac{3.8 \cdot 10^{-4} \times 1.2041}{4.5 \cdot 10^{-4}} = 1.051 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

**Ecuación 3**

Fuente: Elaboración propia

Para el mallado, según la documentación adjunta con el módulo de acústica de ANSYS, además de que el mallado debe tener un tamaño mínimo suficiente para distinguir las formas del modelo, debe haber al menos 12 elementos por longitud de onda, y este es el que utiliza el programa para calcular el tamaño de mallado óptimo. Se han probado distintos tamaños de mallado, llegando a la conclusión de que un mallado demasiado fino repercute demasiado en el tiempo de cálculo, sin obtener mejoras apreciables en la precisión de los resultados. Por tanto, se concluye que lo mejor es usar la función de mallado por defecto de ANSYS, utilizando el ajuste del mallado por curvatura, ya que provee resultados óptimos con tiempos de cálculo ajustados.



**Figura 17:** Detalle del mallado del clarinete

Fuente: Elaboración propia

La presión acústica se mide mediante la herramienta de ANSYS “*Acoustic Far Field Microphone*”, la cual simula un micrófono puntual que situamos a un metro de la campana, mediante el cual registraremos

los picos de presión acústica (SPL) producidos por la resonancia de los distintos armónicos. Podemos utilizar las frecuencias de estos picos como un indicador de calidad de la afinación del instrumento.

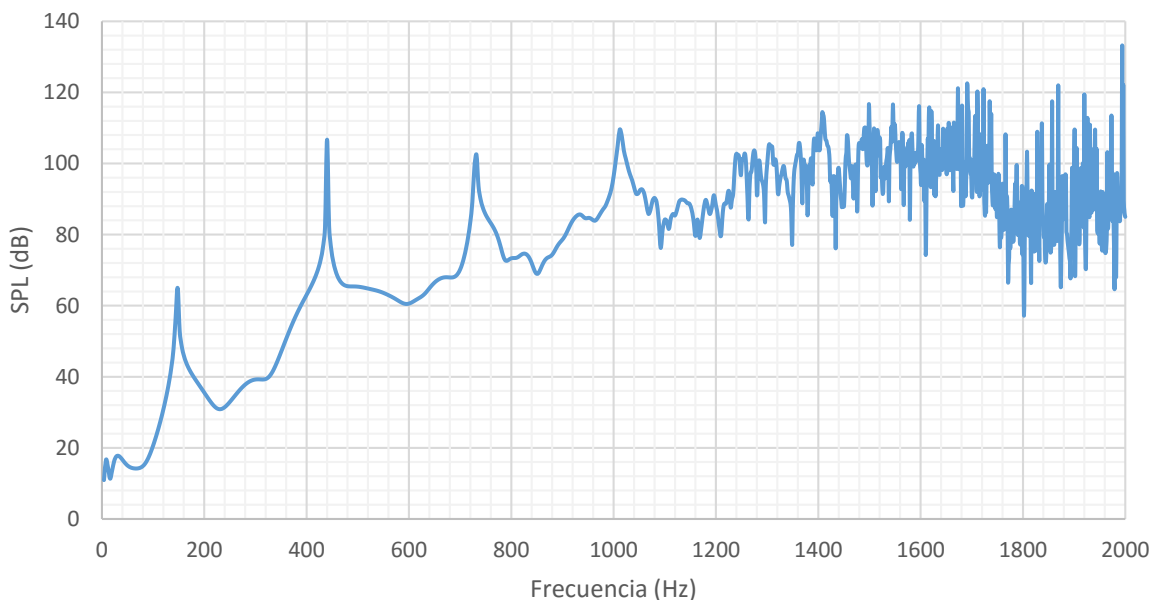
El medio acústico que rodea a la geometría importada tiene que ser modelado. Este es el dominio en el que se propagan las ondas acústicas; una malla de elementos acústicos debe rodear los cuerpos. Se crea además un segundo dominio que rodea al primero, el cual se mallará con elementos del tipo PML ("*perfectly matched layer*", capa perfectamente emparejada), que absorberán toda la radiación acústica sin reflexión. Servirá en efecto como un "límite infinito" que representa la presencia del medio acústico que se extiende infinitamente lejos de los límites del modelo. A este segundo dominio se le aplica la condición de presión cero en las superficies exteriores, asegurándonos así la absorción de las ondas.

El ensayo se basa en un barrido de frecuencias hasta los 2000Hz, ya que dentro de este rango de frecuencias se encuentran los primeros armónicos del clarinete, los cuales son útiles en la generación del sonido.

Por último, los resultados obtenidos de la simulación se han exportado a una hoja de cálculo para elaborar una serie de gráficas y tablas que permitan determinar si la simulación se ha realizado de manera coherente.

### 4.3.3. Resultados de la validación

Una vez diseñada la simulación y ajustadas todas las condiciones de contorno que intervienen en su funcionamiento, se ha obtenido la siguiente gráfica:



**Figura 18:** Presión Acústica (SPL)

Fuente: Elaboración propia

Partiendo de una longitud del clarinete real de 67 cm, las frecuencias de estos picos quedaban un poco bajas respecto a las teóricas, por lo que se han realizado una serie de iteraciones para ajustar la longitud del clarinete diseñado para que esté afinado, llegando a una longitud final de 65 cm.

En la Figura 18 podemos observar claramente los cuatro picos correspondientes con los cuatro primeros armónicos generados a partir de la fundamental del instrumento. Analizamos las frecuencias asociadas a estos picos en la Tabla 2 comparándolas con las frecuencias teóricas de esas notas.

NOTA	ARMÓNICO	FR SIMULACIÓN (HZ)	FR TEÓRICA (HZ)	ERROR (CENTS)
<b>MI<sub>2</sub></b>	1º	146.8	146.83	0.34
<b>SI<sub>3</sub></b>	3º	440	440	0
<b>SOL<sub>4</sub></b>	5º	733.5	740	22
<b>RE<sub>5</sub></b>	7º	1012	1046.52	58

**Tabla 2:** Frecuencias de resonancia

**Fuente:** Elaboración propia

Los más importantes son los dos primeros picos, ya que estos corresponden a las dos notas que se ejecutan en esa posición mediante el orificio de registro. Podemos observar cómo para la nota de referencia de la afinación en la escala temperada, el Si<sub>3</sub> a 440Hz mencionado anteriormente, la coincidencia es absoluta.

Los armónicos más altos se desvían más del modelo teórico, y a partir del 7º armónico el sistema se vuelve inestable. Esto explica por qué las notas asociadas a esas frecuencias no se ejecutan en la misma posición que la fundamental. Además, es interesante observar en la gráfica cómo se cancelan los armónicos pares debido al funcionamiento del tubo cerrado según la teoría de los tubos sonoros.

Tras analizar estos resultados, podemos concluir que el modelo realizado se comporta de manera adecuada, y por tanto es válido.

#### 4.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE ORIFICIOS TONALES

Dado que, aunque se vaya a respetar la distribución original de orificios y llaves del sistema Boehm, la geometría difiere un poco a la de un clarinete en Sib estándar, es necesario calcular la posición y diámetro de los orificios tonales. Además, como posteriormente se implementará un sistema de llaves de plato para cerrarlos, por tanto, se eliminan problemas como por ejemplo que puedan tener un diámetro excesivo, o que algún orificio este demasiado separado, ya que se podrá colocar una extensión para presionar la llave, como por ejemplo ocurre en instrumentos como el saxofón.



**Figura 19:** Detalle de los orificios de un clarinete

Fuente: JP Musical Instruments

Sólo se han tenido en cuenta los orificios que en un clarinete estándar se encuentran abiertos y son necesarios los dedos para taparlos, junto con los pequeños orificios auxiliares que se accionan mediante un aro colocado alrededor del orificio. Además, no se va a diseñar llave para los dos orificios inferiores, ya que estos ya vienen accionados por llaves en el clarinete clásico.

Para determinar la posición y diámetro de cada uno de los orificios, se ha mantenido fijo uno de los dos parámetros mientras se variaba el otro. Tras obtener una pareja de datos, se han realizado interpolaciones lineales sucesivas para encontrar la solución más ajustada dentro de unos parámetros razonables.

Se ha considerado una precisión máxima a efectos constructivos de 0,2mm para la distancia del centro de los orificios a la parte superior, y de 0,5mm para el diámetro de los orificios, ya que mayores precisiones encarecerían la fabricación del instrumento.

Se ha dado por bueno el diseño cuando la diferencia entre la frecuencia de la simulación y la frecuencia teórica de la nota fuese menos de 0,5Hz, ya que es una diferencia pequeña para ser perceptible, sobre todo en el registro en el que se está trabajando. Además, cabe destacar que la ejecución del clarinetista hace que estas frecuencias varíen.

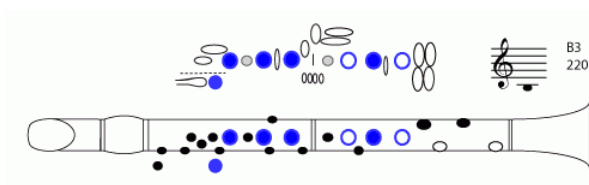
Siguiendo este método se ha elaborado la siguiente tabla con los resultados:

NOTA	DISTANCIA (mm)	DIÁMETRO (mm)	FREC. SIM. (Hz)	FREC. TEÓRICA (Hz)
FA <sub>2</sub>	529.8	8	155.4	155.56
SOL <sub>2</sub>	459.8	8	174.6	174.61
LA <sub>2</sub>	402	7	196	196
SI <sub>b2</sub>	377	6	207.4	207.65
DO <sub>3</sub>	334	7/5.5 <sup>1</sup>	233.3	233.08
RE <sub>3</sub>	294	7	261.5	261.63
MI <sub>3</sub>	259	7/4.5 <sup>1</sup>	293.5	293.66
FA <sub>3</sub>	237	5	311.1	311.12

**Tabla 3:** Posición y frecuencias de los orificios tonales

Fuente: Elaboración propia

Prueba para analizar la validez del diseño se ha probado el Si<sub>2</sub>, ya que este se ejecuta tapando solamente el orificio central de los correspondientes al cuerpo inferior del clarinete.



**Figura 20:** Digitación para Si<sub>2</sub>

Fuente: Pastor García, Vicente (2011). "El clarinete: acústica, historia y práctica"

Tras realizar la consiguiente simulación, obtenemos que el Si<sub>2</sub> suena a 220,1Hz, ajustándose satisfactoriamente a la frecuencia teórica de este, que son 220Hz.

Con esto, damos como válido el diseño obtenido de orificios tonales, y pasamos al diseño de las llaves que se encargarán de cerrar estos orificios.

<sup>1</sup> Para ejecutar esta nota entran en juego dos orificios. Los diámetros son primero el del orificio inferior, luego el del orificio superior, el cual es accionado por una llave ligada al orificio inferior.

## 4.5. DISEÑO DE LAS LLAVES

Una vez obtenidas las frecuencias para cada orificio, pasamos a diseñar las llaves y a calcular a partir de qué distancia no tienen influencia sobre la afinación del clarinete.

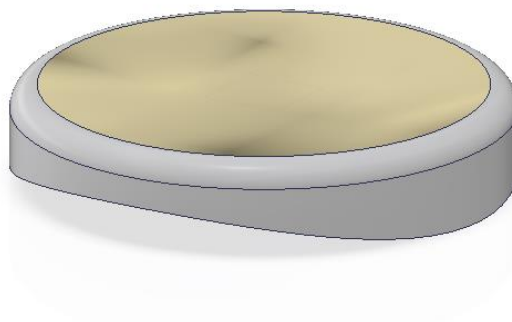
El diseño de este sistema de llaves se inspira en el del saxo soprano, debido a que la distribución es muy similar. Aunque el tamaño de los orificios del saxofón es mucho mayor, y por ello incluyen un pequeño disco donde apoyar el dedo, en el caso del clarinete, la llave serviría de apoyo mismo para el dedo.



**Figura 21:** Detalle del sistema de llaves de un saxo soprano

Fuente: gear4music.es

Se han diseñado dos modelos de llave, uno de 10mm para orificios de diámetro mayor, usado en orificios de diámetro comprendido entre 7 y 9 milímetros, y otro de 8mm para orificios con un diámetro inferior a 7 mm, abaratando así el proceso de producción.



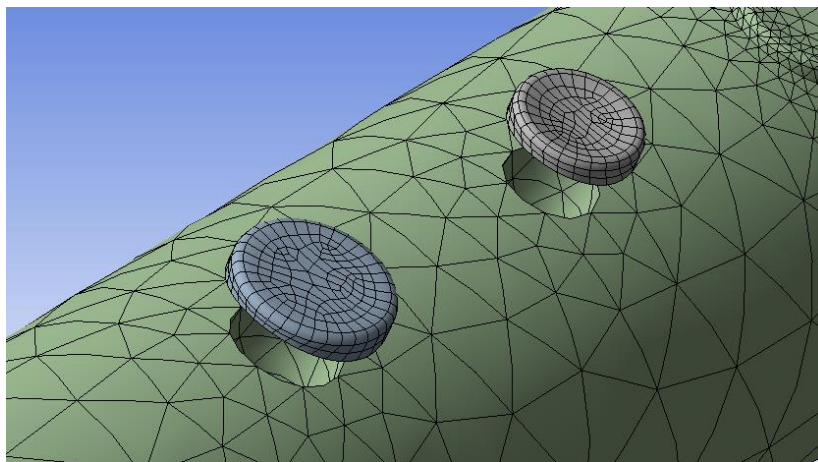
**Figura 22:** Diseño de llave 10mm

Fuente: Elaboración propia



Las llaves están formadas por un pequeño disco de los diámetros mencionados anteriormente, los cuales acoplan por la parte inferior al clarinete de manera tangente, cubriendo completamente el orificio. En la parte superior del disco se ha realizado un rebajado para que sea más intuitivo al tacto con los dedos. El modelo real debería llevar algún tipo de goma o fieltro para asegurar que el cierre es hermético, pero para el caso de las simulaciones, dado que es perfectamente tangente al cuerpo del clarinete el cierre ya es completamente hermético.

Para realizar estos ensayos ha sido necesario utilizar un mallado más fino, ya que las piezas de las llaves son de pequeño tamaño en comparación, y mallados más grandes provocaban una distorsión considerable de la geometría de estas. A consecuencia de esto, el tiempo de cálculo para cada simulación se ha visto ampliamente incrementado, y por ello sólo se han probado 4 notas, las cuales han sido escogidas porque cada una usa los dos tipos diferentes de llaves.



**Figura 23:** Detalle del mallado de las llaves

Fuente: Elaboración propia

Para comprobar como interaccionan estas llaves, se comparan los efectos sin llave y con estas aumentado progresivamente la separación sobre el cuerpo del clarinete en diversas notas.

NOTA	1 mm (Hz)	2 mm (Hz)	3 mm (Hz)	4 mm (Hz)	5 mm (Hz)	6 mm (Hz)	10 mm (Hz)	ABIERTO (Hz)
<b>Sib<sub>2</sub></b>	206.3	206.4	206.8	206.85	206.9	207	207.15	207.4
<b>Do<sub>3</sub></b>	232.2	232.4	232.5	232.7	232.8	232.9	233.1	233.3
<b>Re<sub>3</sub></b>	260	260.4	260.6	260.75	260.85	261	261.2	261.5
<b>Mi<sub>3</sub></b>	291.8	292.25	292.5	292.7	292.8	292.9	293.2	293.5

**Tabla 4:** Frecuencias a diferentes distancias de la llave

Fuente: Elaboración propia

Observando el caso extremo de 10mm, el cual no sería práctico, llegamos a la conclusión de que no se podría llegar a igualar el caso perfectamente abierto.

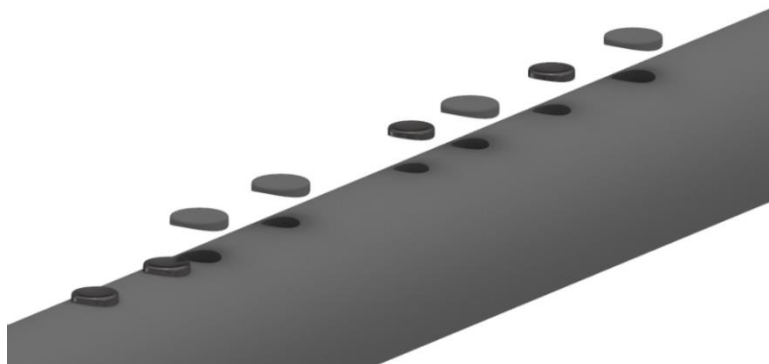
La Tabla 5 expresa el error frente al caso abierto medido en cents.

NOTA	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	10 mm
<b>Sib2</b>	9	8	5	5	4	3	2
<b>DO3</b>	8	7	6	5	4	3	2
<b>RE3</b>	10	8	6	5	4	4	2
<b>MI3</b>	10	8	6	5	4	4	2

**Tabla 5:** Error en cents

Fuente: Elaboración propia

La máxima diferencia que encontramos podemos encontrar es de 10 cents, el cual es un intervalo realmente pequeño. Aun si, se optará por la solución de 5mm, con un error de 4 cents despreciable, por ser una más solución factible en términos de fabricación.



**Figura 24:** Posición de las llaves para Mi<sub>3</sub> a 6mm

Fuente: Elaboración propia

Tras finalizar el diseño del clarinete, se ha dividido este en 4 tramos, como habitualmente se desmonta un clarinete, para facilitar el transporte de este. Además, se ha practicado una acanaladura al barrilete que permita acoplar cualquier boquilla con medidas estándar.



**Figura 25** Despiece del clarinete

Fuente: Elaboración propia

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

### **5.1. GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS**

El primer objetivo marcado era el de identificar los problemas acarreados durante el aprendizaje, sobre todo en niños. Para este cometido fue determinante la entrevista con profesores de clarinete, los cuales tenían perfectamente identificados los problemas, pero ninguna solución para ellos. Este tipo de problemas se ven confirmados posteriormente con los resultados de la encuesta realizada a músicos de clarinete.

Después de haber identificado y acotado el problema a solucionar, se ha acometido el proceso de diseñar un modelo de clarinete que se comporte como un clarinete real, sobre el cual aplicar la solución diseñada. Este es el punto más importante en cuanto al objeto del TFG, ya que gracias a la tecnología de simulación por elementos finitos se ha podido realizar la validación de un nuevo diseño sin la necesidad de fabricar prototipos. Este punto se vuelve todavía más crítico en la parte del diseño de los orificios tonales, ya que sin este tipo de herramientas seguramente habría sido necesario fabricar muchos modelos para probar el desempeño de cada orificio.

Para evaluar el desempeño del sistema de llaves diseñado sería adecuado fabricar un prototipo para probar su funcionamiento. Este prototipo podría fabricarse mediante tecnología de impresión en 3D, una tecnología que actualmente se encuentra en auge, y que se muestra como una solución excelente para este tipo de propósitos. De hecho, aunque no se vaya a fabricar, se ha pedido presupuesto a una reprografía 3D en Valencia y se incluirá en el presupuesto.

Aunque se ha considerado que la solución diseñada es válida y viable, hay mucho margen para mejorarla y realizar distintas variaciones, aparte de quedar pendiente el diseño del mecanismo completo, el cual se decidió que no formaría parte de este TFG debido a su complejidad. Esto deja abierto todo un abanico de posibilidades para seguir desarrollando este proyecto en el futuro. Además, los avances en la tecnología permitirán cada vez simulaciones más precisas y con un tiempo de computación menor, además de los estudios sobre acústica y generación del sonido en clarinete, los cuales, aunque se hayan sentado las bases, todavía puede haber un gran desarrollo en ese campo.

Por todo esto, este TFG demuestra los beneficios del uso de herramientas de ingeniería en un campo tan tradicional y artesano como es la fabricación de instrumentos musicales, abriendo las puertas a emplear estos métodos más ampliamente en el futuro.

## **CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA**

### **ARTÍCULOS CONSULTADOS**

- Pastor García, Vicente (2011). "Aproximación a la Acústica del Clarinete", Revista de Acústica de la Sociedad Española de Acústica, nº 42, 2011. ISSN: 0210-3680
- Pastor García, Vicente (2011). "El clarinete: acústica, historia y práctica", Rivera editores Valencia, ISBN: 978-84-96882-85-0
- Harvey Elliott White, Donald H. White (1980). "Physics and music: the science of musical sound", Saunders College Pub. ISBN: 978-00-30452-46-8
- Paul Dickens, Ryan France, John Smith, Joe Wolfe (2007). "Clarinet acoustics: introducing a compendium of impedance and sound spectra". Acoustics Australia, 35, 17-24.
- Needham, Joseph (1962). "Science and Civilisation in China: Volume 4", Cambridge University Press. ISBN: 978-05-21058-02-5
- Valerio Lorenzoni, Daniele Ragni (2012). "Experimental investigation of the flow inside a saxophone mouthpiece by particle image velocimetry", The Journal of the Acoustical Society of America, PMID: 22280693
- W. Li, A. Almeida, J. Smith, J. Wole (2014). "Tongue Control and Its Coordination with Blowing Pressure in Clarinet Playing", University of New South Wales, 2052 Sydney, Australia
- Ana María de Diego Beade, Jesús Mariano Merino de la Fuente (1988). "Fundamentos Físicos de la Música", ICE-Universidad de Valladolid, ISBN: 84-7762-049-0

## ENLACES WEB CONSULTADOS

- Encuesta: <http://goo.gl/forms/qCkKGiXHWgdnJJd2>
- Amir Al-Majdalawi Álvarez (2005), “Fundamentos físicos de los instrumentos musicales”: [http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_05\\_06/io2/public\\_html/index.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/index.html)
- Bernardo Zagalaz Lijarcio, “Física de los tubos sonoros”: <http://www.csmcordoba.com/revista-musicalia/musicalia-numero-3/198-fisica-de-los-tubos-sonoros>
- Joe Wolfe, “Clarinet acoustics: an introduction”: <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/clarinetacoustics.html>
- Woodwind Instrumental Acoustics: <http://slideplayer.com/slide/5715901/>
- Enlaces a la Wikipedia:
  - En español:
    - <https://es.wikipedia.org/wiki/Clarinete#Historia>
    - [https://es.wikipedia.org/wiki/Temperamento\\_igual](https://es.wikipedia.org/wiki/Temperamento_igual)
    - <https://es.wikipedia.org/wiki/Cent>
  - En inglés:
    - <https://en.wikipedia.org/wiki/Clarinet#History>
    - [https://en.wikipedia.org/wiki/Boehm\\_system\\_\(clarinet\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Boehm_system_(clarinet))
    - [https://en.wikipedia.org/wiki/Musical\\_temperament](https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_temperament)
    - [https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic\\_resonance#Cylinders](https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_resonance#Cylinders)

**PRESUPUESTO**

# ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN
2. MEDICIONES Y PRESUPUESTO
3. PRESUPUESTO TOTAL

## 1. INTRODUCCIÓN

Para la elaboración de este presupuesto se han valorado los equipos informáticos empleados, las licencias del software utilizado, la impresión en 3D de un prototipo y los honorarios del autor del TFG.

## 2. MEDICIONES Y PRESUPUESTO

A continuación se ha elaborado una tabla con una programación orientativa sobre cuánto tiempo y en qué se ha invertido.

Fases	Tiempo (h)
Búsqueda de información y documentación	50
Realización de la encuesta y tratamiento de los resultados	20
Análisis de la información	60
Modelado del clarinete	20
Simulaciones	120
Redacción de la memoria y elaboración de los planos	100
<b>Total</b>	<b>360</b>

Nº	CONCEPTO	COSTE UNITARIO (€)	UNIDADES	TOTAL (€)
----	----------	--------------------	----------	-----------

**Capítulo 1**

INVENTARIO				
1.1	Equipo informático	591,00	3 meses	147,75
1.2	Licencia Autodesk Inventor 2016	2.060,00	3 meses	515,00
1.3.	Licencia Office 2016	149,00	3 meses	37,25
1.4	Licencia ANSYS 17	28.500,00	3 meses	7.125,00
1.5	Impresión 3D	86,00	1	86,00
<b>Coste Cap. 1</b>				<b>7.911,00 €</b>

**Capítulo 2**

	HONORARIOS	Tarifa Horaria (€)		
2.1.	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	15,00	360 h	5.400,00
<b>Coste Cap. 2</b>				<b>5.400,00 €</b>

**3. PRESUPUESTO TOTAL**

RESUMEN			
Capítulo 1	Inventario	7911,00	€
Capítulo 2	Honorarios	5.400,00	€
<b>TOTAL COSTES DIRECTOS</b>		<b>13.311,00</b>	<b>€</b>
COSTES INDIRECTOS (25%)		3.327,75	€
IVA 21%		3.494,14	€
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>		<b>20.132,89</b>	<b>€</b>

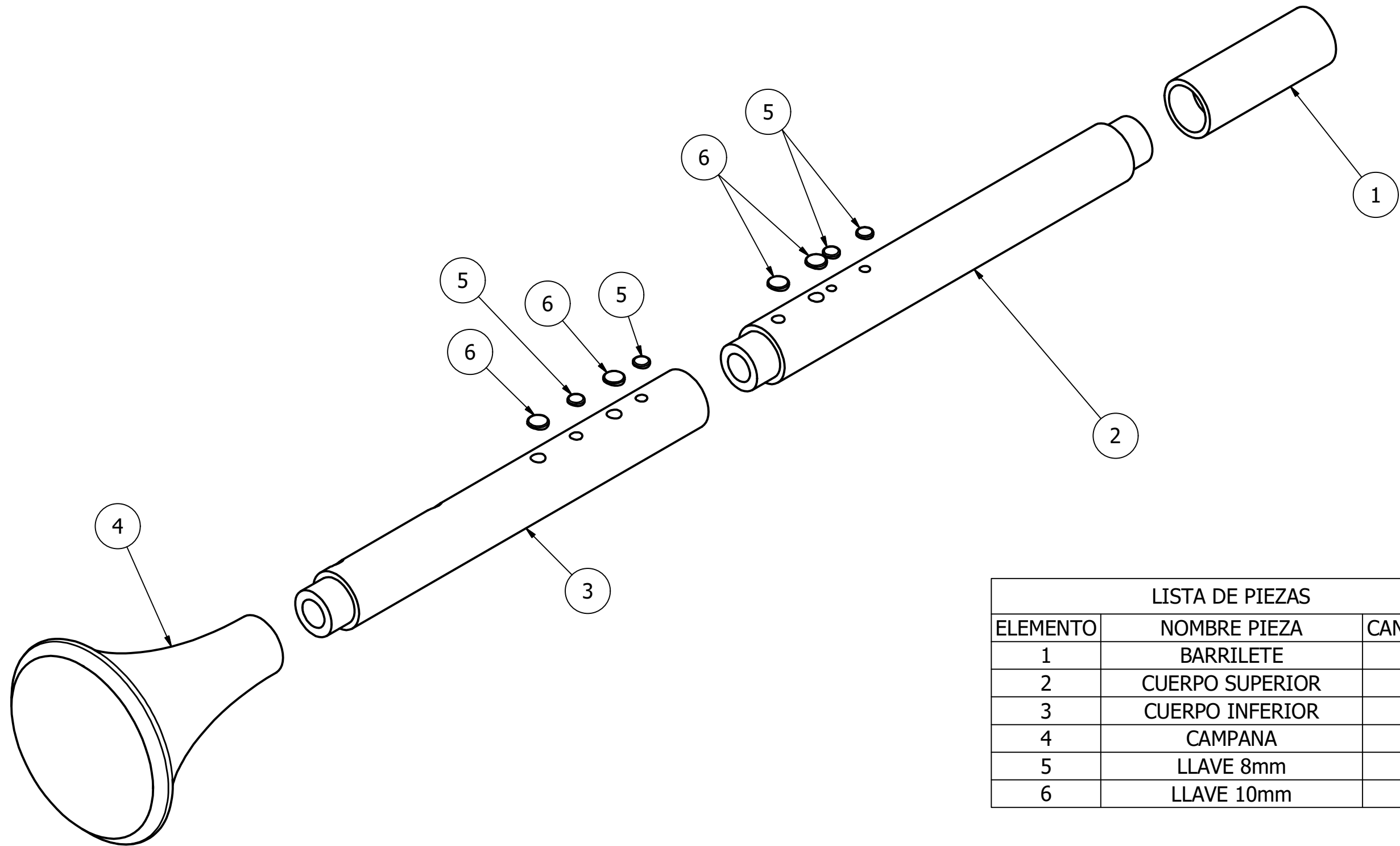
El presente presupuesto asciende a la suma de VEINTEMIL CIENTO TREINTA Y DOS CON OCHEINTA Y NUEVE CENTIMOS



**PLANOS**

# ÍNDICE DE PLANOS

1. PLANO DE CONJUNTO
2. PIEZAS DEL CLARINETE
3. CUERPO SUPERIOR DEL CLARINETE
4. CUERPO INFERIOR DEL CLARINETE



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	NOMBRE PIEZA	CANTIDAD
1	BARRILETE	1
2	CUERPO SUPERIOR	1
3	CUERPO INFERIOR	1
4	CAMPANA	1
5	LLAVE 8mm	4
6	LLAVE 10mm	4

