



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Análisis y propuesta de mejora de boquillas de trompeta
fabricadas en impresión 3D

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Jiménez Jover, Jorge

Tutor/a: Naya Sanchis, Fernando

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUOLA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

Curso Académico:

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar estas líneas para dar las gracias a todas aquellas personas que han hecho posible la elaboración de este TFG.

En primer lugar, a mi tutor Ferran Naya, por su apoyo y dedicación en este proyecto, y por su paciencia a la hora de ayudarme y de explicarme todo lo necesario para poder realizar este trabajo. Desde el primer día que empezamos a hablar despertó en mí el interés por el estudio de los instrumentos de viento metal, para comprender mejor cómo funcionan, los fallos que tienen, mejorarlos, y sacarles el mejor partido posible. Como músico de viento metal que soy al igual que él, me siento muy afortunado de haber podido trabajar bajo su tutelaje.

En segundo lugar, quisiera agradecer también a mi familia y amigos todo el apoyo que me han dado siempre, no solamente durante la elaboración de este trabajo, sino también durante estos años estudiando para ser ingeniero. Por estar siempre ahí, en los buenos y en los malos momentos, y animarme siempre en la consecución de mis metas y objetivos. Teneros a mi lado ha hecho más fácil el camino.

Por último, quisiera dar las gracias especialmente a mis padres por haberme apuntado a la Escuela de Música cuando era muy pequeño, a mis profesores por haberme enseñado a tocar dos bellos instrumentos como son la trompa y la trompeta, y a todos los amigos y compañeros que me han ayudado a ser mejor músico y con los que disfruto cada vez que tocamos juntos. Gracias por compartir conmigo esta gran pasión: la música.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

La afinación es uno de los parámetros más importantes en la interpretación musical. En la fabricación de la trompeta, al igual que en el resto de los instrumentos de viento metal, se siguen procesos artesanales que producen unos ligeros defectos en este parámetro que el músico debe corregir personalmente, siendo la boquilla una pieza clave en la afinación del instrumento. En este contexto, en el presente trabajo se han introducido herramientas del ámbito de la ingeniería para diseñar boquillas de trompeta que ayuden a mejorar su afinación. Además, para su fabricación, se ha utilizado la tecnología de impresión 3D con el fin de fabricarlas en plástico como sustituto del metal.

Palabras Clave: boquilla, trompeta, análisis acústico, diseño, plástico, impresión 3D.

RESUM

L'afinació és un dels paràmetres més importants a la interpretació musical. A la fabricació de les trompetes, igual que a la resta dels instruments de vent metall, segueixen processos artesanals que produeixen uns lleugers defectes en aquest paràmetre que el músic ha de corregir personalment, sent la boquilla una peça clau en l'afinació de l'instrument. En aquest context, en aquest treball s'han introduït eines de l'àmbit de l'enginyeria per dissenyar boquilles de trompeta que ajuden a millorar la seua afinació. A més, per a la seua fabricació, s'ha utilitzat la tecnologia d'impressió 3D per fabricar-les en plàstic com a substitut del metall.

Paraules Clau: boquilla, trompeta, anàlisi acústic, disseny, plàstic, impressió 3D.

ABSTRACT

Tuning is one of the most important parameters in musical performance. In manufacture of trumpets, as in the rest of the brass instruments, artisanal processes produce slight defects in this parameter that the musician must correct personally, and mouthpiece is a very important piece in the tuning of the instrument. In this context, in this project engineering tools have been introduced to design trumpet mouthpieces that help improve their tuning. In addition, for its manufacture, 3D printing technology has been used to make them in plastic replacing metal.

Keywords: mouthpiece, trumpet, acoustic analysis, design, plastic, 3D printing.

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Presupuesto
- Planos



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

MEMORIA

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	6
1.1 Objetivo del proyecto.....	6
1.2 Motivación y justificación del proyecto	6
CAPÍTULO 2 – ENCUESTA A MÚSICOS DE VIENTO METAL	7
2.1 Introducción	7
2.2 Encuesta y resultados.....	7
2.3 Conclusiones.....	14
CAPÍTULO 3 – ESTUDIO DE MERCADO Y PATENTES.....	16
3.1 Introducción	16
3.2 Estudio de mercado	16
3.3 Estudio de patentes.....	22
3.4 Conclusiones.....	25
CAPÍTULO 4 – GENERACIÓN DEL SONIDO EN LA TROMPETA	26
4.1 Introducción	26
4.2 El sonido y sus propiedades en la música	26
4.3 Generación de las notas musicales en la trompeta	33
4.4 Conclusiones.....	37
CAPÍTULO 5 – ESTUDIO DE LA AFINACIÓN Y PROPUESTAS DE DISEÑO	38
5.1 Introducción	38
5.2 Modelado 3D de trompeta y boquilla	38
5.3 Validación del modelo.....	40
5.4 Propuestas de diseño	46
5.5 Diseño de boquilla de trompeta 1.....	47
5.6 Diseño de boquilla de trompeta 2.....	48
5.7 Diseño de boquilla de trompeta 3.....	49
5.8 Conclusiones.....	51
CAPÍTULO 6 – IMPRESIÓN 3D DE BOQUILLAS DE TROMPETA	52
6.1 Introducción	52
6.2 Impresión 3D y otros procesos de fabricación con plástico.....	52
6.3 Impresión 3D de los diseños de boquilla de trompeta	54
6.4 Conclusiones.....	57
CAPÍTULO 7 – CONCLUSIONES	58
7.1 Grado de cumplimiento del objetivo	58
CAPÍTULO 8 – BIBLIOGRAFÍA.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Resultados de la pregunta 1 de la encuesta.....	8
Figura 2.2: Resultados de la pregunta 2 de la encuesta.	8
Figura 2.3: Resultados de la pregunta 3 de la encuesta.....	9
Figura 2.4: Resultados de la pregunta 4 de la encuesta.....	10
Figura 2.5: Resultados de la pregunta 5 de la encuesta.....	10
Figura 2.6: Resultados de la pregunta 6 de la encuesta.....	11
Figura 2.7: Resultados de la pregunta 7 de la encuesta.....	12
Figura 2.8: Resultados de la pregunta 8 de la encuesta.....	12
Figura 2.9: Resultados de la pregunta 9 de la encuesta.....	13
Figura 3.1: Partes de una boquilla de viento metal	16
Figura 3.2: Boquillas de trompeta marca Kelly	18
Figura 3.3: Boquilla y trompeta de plástico “pTrumpet” marca pBone.....	19
Figura 3.4: Boquilla de plástico modelo “The Perfect G” marca Brand	20
Figura 3.5: Boquilla fija de metacrilato de Stomvi	21
Figura 3.6: Boquillas de instrumentos de viento metal de material transparente.....	22
Figura 3.7: Boquilla desmontable personalizable por tramos y secciones	23
Figura 3.8: Boquilla asimétrica	23
Figura 3.9: Trompeta de plástico	24
Figura 3.10: Trombón de plástico	24
Figura 4.1: Descomposición de una onda sonora en sus armónicos	31
Figura 4.2: Descomposición del timbre de instrumentos musicales en sus armónicos.....	32
Figura 4.3: Tubo abierto produciendo su frecuencia fundamental	34
Figura 4.4: Longitudes de onda de frecuencias de resonancia	34
Figura 4.5: Sección transversal del pistón de una trompeta.....	35
Figura 4.6: Pistones de una trompeta.....	37
Figura 5.1: Trompeta Stomvi Zenith.....	39
Figura 5.2: Diseño de trompeta Stomvi Zenith en posición al aire	39
Figura 5.3: Boquilla Kelly 7C.....	39
Figura 5.4: Diseño de boquilla Kelly 7C.....	40
Figura 5.5: Mallado en la campana de la trompeta	43
Figura 5.6: Frecuencias de resonancia del modelo trompeta + boquilla con mallado de tamaño de elemento 0,1 m	44
Figura 5.7: Diseño de boquilla de trompeta 1.....	47
Figura 5.8: Diseño de boquilla de trompeta 2.....	48
Figura 5.9: Diseño de boquilla de trompeta 3.....	49

Figura 6.1: Impresora 3D.....	53
Figura 6.2: Máquina de moldeo por inyección	53
Figura 6.3: Diseño de boquilla de trompeta 1 impresa en impresora 3D	54
Figura 6.4: Diseño de boquilla de trompeta 2 impresa en impresora 3D	54
Figura 6.5: Diseño de boquilla de trompeta 3 impresa en impresora 3D	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Modelos de boquillas de trompeta Kelly.....	18
Tabla 3.2: Modelos de boquillas de trompeta pBone	19
Tabla 3.3: Modelos de boquillas de trompeta Brand.....	20
Tabla 4.1: Notación latina y anglosajona de las notas musicales	27
Tabla 4.2: Nomenclaturas anglosajona y latina de las notas musicales de una octava y sus frecuencias	27
Tabla 4.3: Distancias entre frecuencias de notas musicales en distintas octavas	28
Tabla 4.4: Matices musicales de intensidad del sonido	30
Tabla 4.5: Frecuencias de resonancia de la trompeta en posición al aire	36
Tabla 5.1: Frecuencias teóricas de notas de la trompeta	40
Tabla 5.2: Frecuencias de las notas en posición al aire de la trompeta Stomvi Zenith con la boquilla Kelly 7C	41
Tabla 5.3: Frecuencias de los tres mallados.....	45
Tabla 5.4: Duración de las simulaciones	45
Tabla 5.5: Valores de las frecuencias de las notas medidas en la trompeta y en la simulación con mallado de tamaño de elemento 0,06 m	46
Tabla 5.6: Resultados de la simulación con el diseño de boquilla de trompeta 1	48
Tabla 5.7: Resultados de la simulación con el diseño de boquilla de trompeta 2	49
Tabla 5.8: Resultados de la simulación con el diseño de boquilla de trompeta 3	50
Tabla 5.9: Comparación de los errores en cents de las frecuencias de las notas medidas en la trompeta y con los diseños de boquilla	50
Tabla 6.1: Comparación de frecuencias obtenidas con el diseño de boquilla de trompeta 1....	55
Tabla 6.2: Comparación de frecuencias obtenidas con el diseño de boquilla de trompeta 2....	56
Tabla 6.3: Comparación de frecuencias obtenidas con el diseño de boquilla de trompeta 3....	56

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo del proyecto

El objetivo del presente trabajo consiste en estudiar y mejorar la afinación de la trompeta. Para ello, se ha realizado un estudio para analizar la afinación del instrumento y, a partir de los resultados obtenidos, se han propuesto diseños de boquilla de trompeta basados en su geometría que permitan mejorarlos. Además, se ha utilizado la tecnología de impresión 3D como método de fabricación alternativo para fabricarlas en plástico como sustituto del metal.

1.2 Motivación y justificación del proyecto

Con el propósito de cumplir el objetivo del presente trabajo, se presenta un método donde se analiza la afinación del instrumento al realizar cambios en la geometría de la boquilla.

Es necesario mencionar, que las empresas musicales llevan años realizando estudios e investigaciones sobre los materiales de fabricación de las boquillas y de los instrumentos de viento metal. No obstante, muchas casas de fabricantes hoy en día siguen fabricando sus instrumentos y sus boquillas siguiendo unos procesos basados en métodos artesanales utilizados desde hace muchos años. Por tanto, la posibilidad de poder aplicar conceptos de ingeniería aprendidos por el autor del presente trabajo para contribuir a ayudar a mejorar la afinación de la trompeta a través de su boquilla ha sido la principal motivación y justificación para la realización del presente trabajo.

Por otra parte, otro motivo por el cual se ha decidido trabajar en el proyecto de *Diseño y propuesta de mejora para boquillas de trompeta fabricadas en impresión 3D* es el hecho de que el autor del trabajo toca la trompeta y la trompa, y utiliza una boquilla de plástico con su trompeta. Cuando la probó, pudo apreciar una serie de ventajas relevantes sobre las boquillas de metal, pretendiendo así desde la ingeniería, analizar y mejorar este tipo de boquillas de plástico alternativas, para que permitan conseguir una mejor calidad del sonido del instrumento.

CAPÍTULO 2 – ENCUESTA A MÚSICOS DE VIENTO METAL

2.1 Introducción

Con el fin de conocer las opiniones de los músicos de viento metal respecto a las boquillas de metal y de plástico, se ha realizado una encuesta para enfocar con mayor precisión y amplitud el siguiente trabajo. Los resultados de esta encuesta son una fuente de información muy importante, ya que los músicos son los usuarios finales del producto, y sus experiencias y opiniones son los mejores indicativos para saber las necesidades que buscan satisfacer a la hora de elegir un producto u otro.

La encuesta ha sido lanzada a todos los músicos de viento metal en general, ya que, a pesar de que el presente trabajo se va a centrar sólo en las boquillas de trompeta, las características y propiedades que estos músicos buscan en sus boquillas son muy similares, y en muchas ocasiones, son las mismas, independientemente del instrumento que toquen.

Para la realización del cuestionario se ha utilizado la herramienta *Formularios de Google*, y para su difusión se han utilizado las redes sociales, al ser el mejor método para llegar al mayor número de músicos de viento metal posibles. Con la ayuda de músicos y de profesores de diferentes escuelas de música y conservatorios, se han conseguido 140 respuestas de músicos de distintos niveles de estudios musicales.

2.2 Encuesta y resultados

A continuación, se procede a exponer los resultados de la encuesta, explicando cada una de sus preguntas y sus correspondientes respuestas, así como la información que se pretende obtener con cada una de ellas y un breve comentario.

Pregunta 1: *¿Qué instrumento tocas?*

- *Tuba*
- *Bombardino*
- *Trombón*
- *Trompa*
- *Trompeta*
- *Fliscorno*

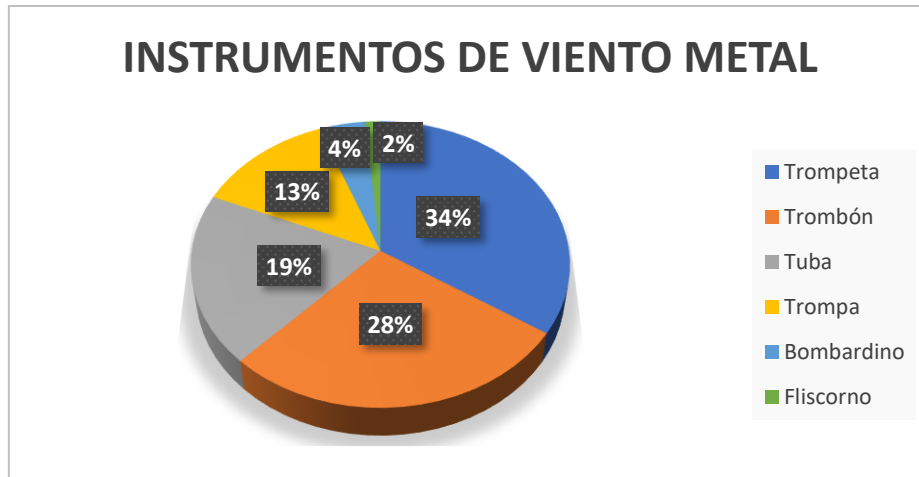


Figura 2.1: Resultados de la pregunta 1 de la encuesta

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: el objetivo de esta pregunta era conocer los diferentes tipos de instrumentos de viento metal que tocan los músicos encuestados. La mayoría de los encuestados (34%) son músicos que tocan la trompeta, seguidos del trombón (28%), la tuba (19%), y la trompa (13%).

Pregunta 2: ¿Cuál es tu nivel de estudios musicales?

- *Amateur*
- *Grado Elemental*
- *Grado Medio*
- *Grado Superior*

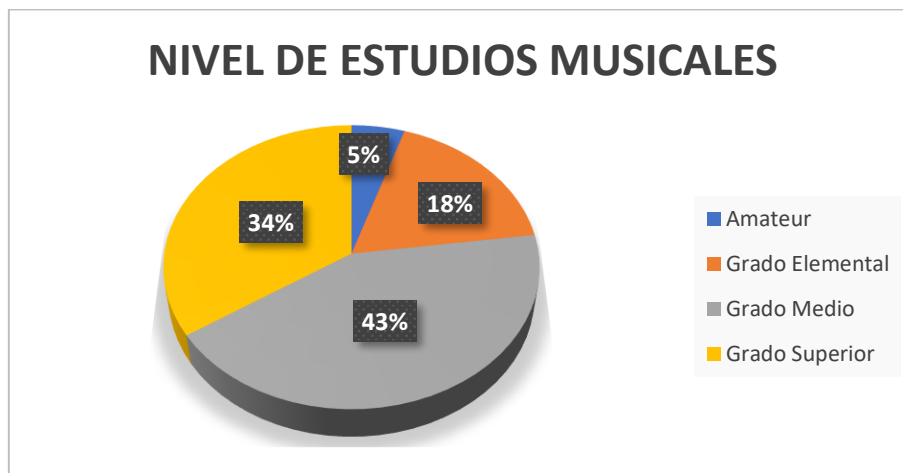


Figura 2.2: Resultados de la pregunta 2 de la encuesta.

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: El objetivo de esta pregunta era conocer el nivel de estudios musicales de los músicos encuestados. Observamos que el 95% tiene estudios musicales, de los cuales el 43%

tiene estudios de Grado Medio o Profesional, y el 34% tiene estudios de Grado Superior, el nivel de estudios musicales más alto.

Pregunta 3: *¿Cuántas boquillas utilizas actualmente?*

- 1
- 2
- 3
- Más de 3

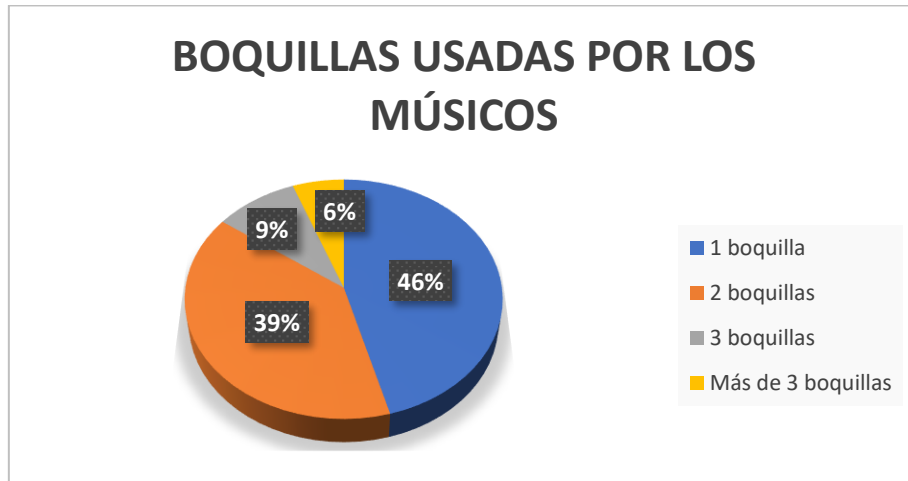


Figura 2.3: *Resultados de la pregunta 3 de la encuesta*

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: el objetivo de esta pregunta era conocer el número de boquillas que utilizan los músicos encuestados, ya que es bastante común que los músicos utilicen más de una boquilla para diferentes situaciones. El 46% respondió que sólo utiliza una boquilla. Del 54% restante, un 39% respondió que utiliza dos boquillas, un 9% tres, y un 6% que utiliza más de tres.

Pregunta 4: *¿De qué marca son esas boquillas? En el caso de usar boquillas de marcas diferentes, indícalo.*

- Courtois
- Bach
- Denis Wick
- Yamaha
- Holton
- Jk
- Schilke
- Stomvi
- Otra

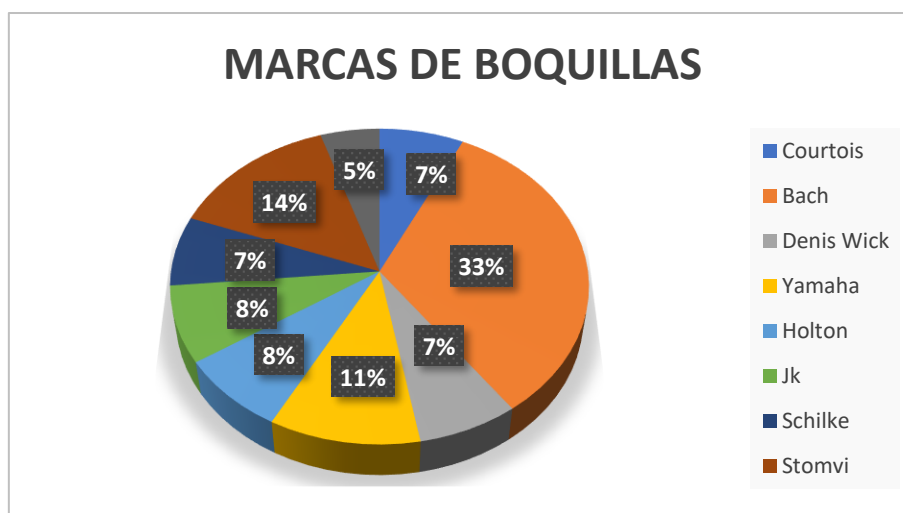


Figura 2.4: Resultados de la pregunta 4 de la encuesta

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: el objetivo de esta pregunta era conocer las diferentes marcas de boquillas que utilizan los músicos encuestados, y conocer cuáles son las marcas más utilizadas por ellos. La marca más utilizada por todos los músicos de viento metal es Bach (33%), seguida de Stomvi (14%) y de Yamaha (11%).

Pregunta 5: Indica los motivos por los cuales utilizas tu boquilla actual.

- Mejora mi sonido
- Mejora mis registros
- Mejora mi comodidad
- Me la recomendó mi profesor

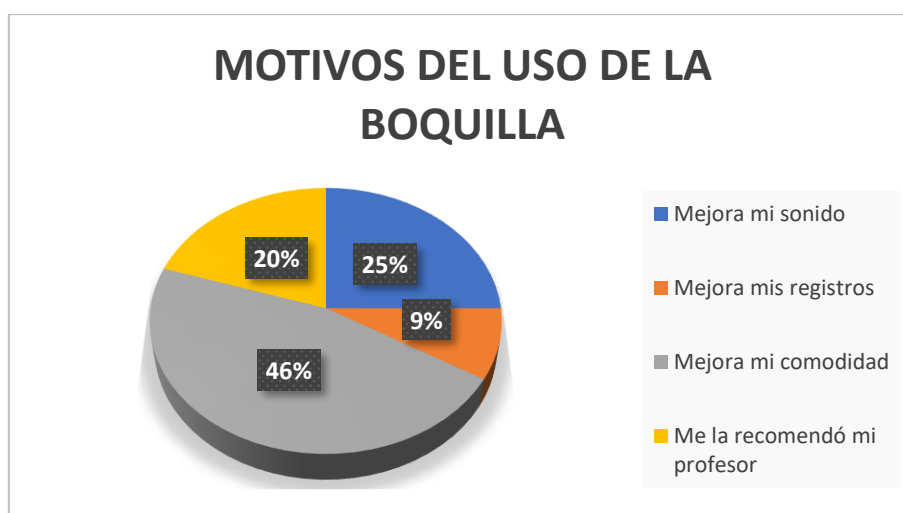


Figura 2.5: Resultados de la pregunta 5 de la encuesta

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: el objetivo de esta pregunta era conocer en qué se fijan los músicos a la hora de elegir un modelo de boquilla u otro. La mayoría de los encuestados respondió “Mejora mi comodidad” (46%) como motivo principal de utilizar su boquilla, junto a “Mejora mi sonido” (25%) y “Me la recomendó mi profesor” (20%), una circunstancia muy común entre los músicos en general, como consecuencia de haber pasado por la Escuela de Música para su formación básica.

Pregunta 6: *¿Alguna vez has utilizado una boquilla de plástico?*

- Sí
- No

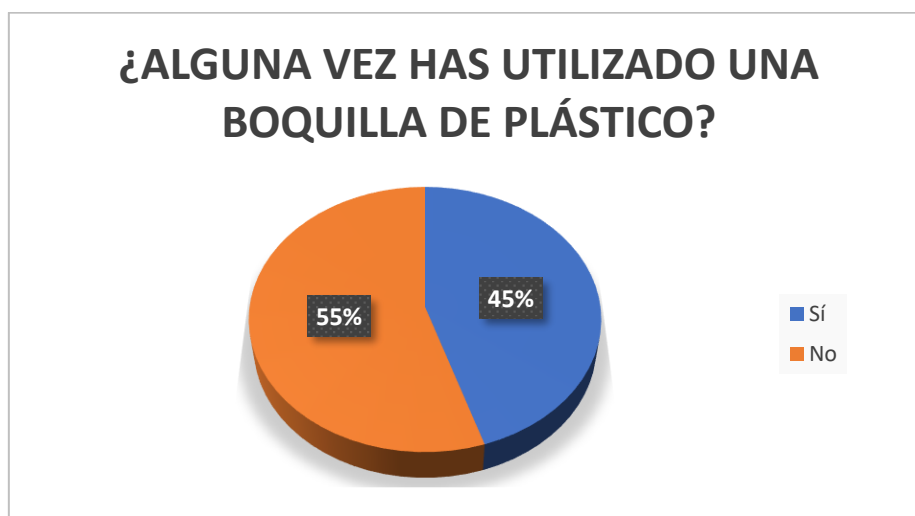


Figura 2.6: Resultados de la pregunta 6 de la encuesta

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: el objetivo de esta pregunta era conocer si los músicos de viento metal encuestados habían utilizado alguna vez una boquilla de plástico. El 45% contestó “Sí” frente a un 55% que contestó “No”.

Pregunta 7: *Si alguna vez has utilizado boquillas de plástico, indica los motivos.*

- Porque son más cómodas
- Porque son más baratas
- Porque no empeoran la afinación
- Para ver diferencias con las de metal

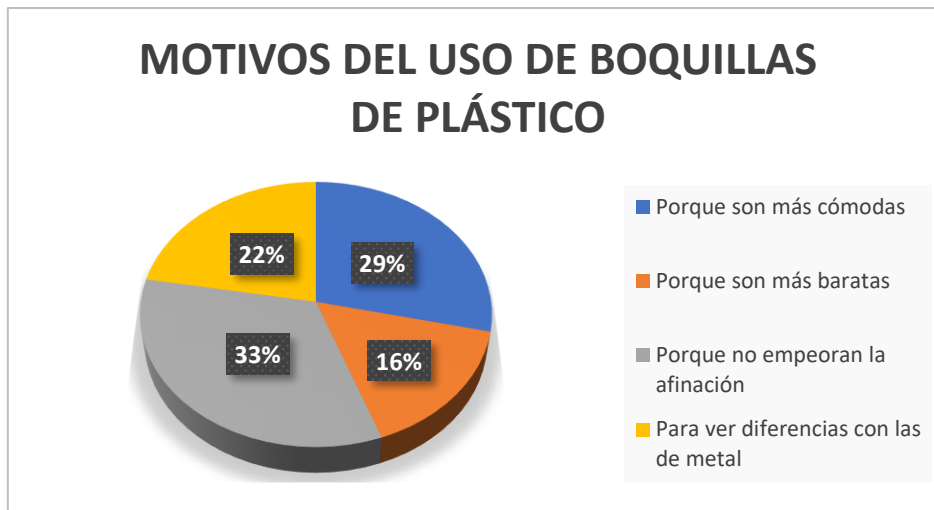


Figura 2.7: Resultados de la pregunta 7 de la encuesta

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: el objetivo de esta pregunta era conocer los motivos por los cuáles los músicos utilizan boquillas de plástico. El 33% respondió “Porque no empeoran la afinación” y el 29% “Porque son más cómodas”, lo cual está relacionado con los motivos indicados por los que los músicos utilizan sus boquillas, expuestos en la pregunta 5 de la encuesta.

Pregunta 8: ¿Dónde utilizas boquilla de plástico?

- Para estudiar en casa
- Para tocar en conciertos
- Para tocar por la calle (pasacalles, procesiones, moros y cristianos...)

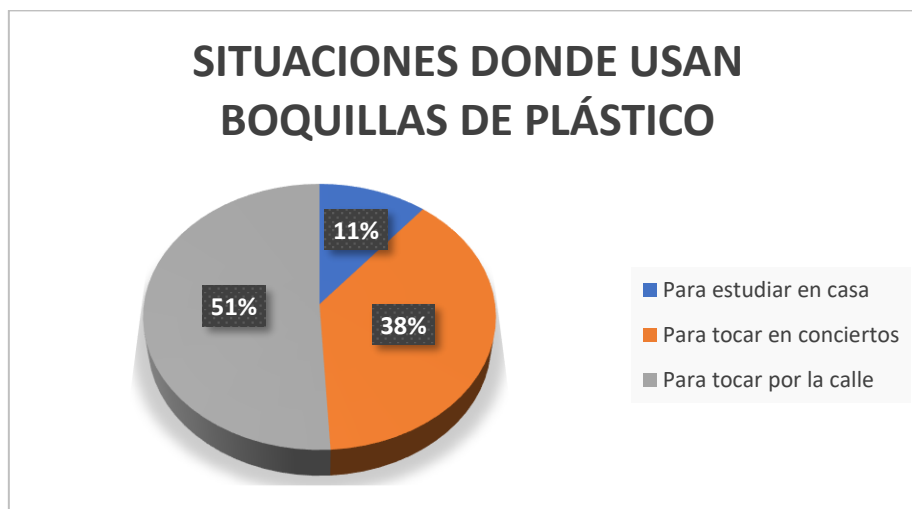


Figura 2.8: Resultados de la pregunta 8 de la encuesta

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: el objetivo de esta pregunta era conocer en qué situaciones utilizan boquillas de plástico los músicos encuestados. Prácticamente la mitad de ellos, el 51%, ha contestado “Para tocar por la calle” en festividades como pasacalles, procesiones, moros y cristianos, etc.

Pregunta 9: *Si pudieras personalizar e imprimir en una impresora 3D un modelo de boquilla de plástico que no alterase la afinación del instrumento, ¿la utilizarías?*

- Sí
- Tal vez
- No

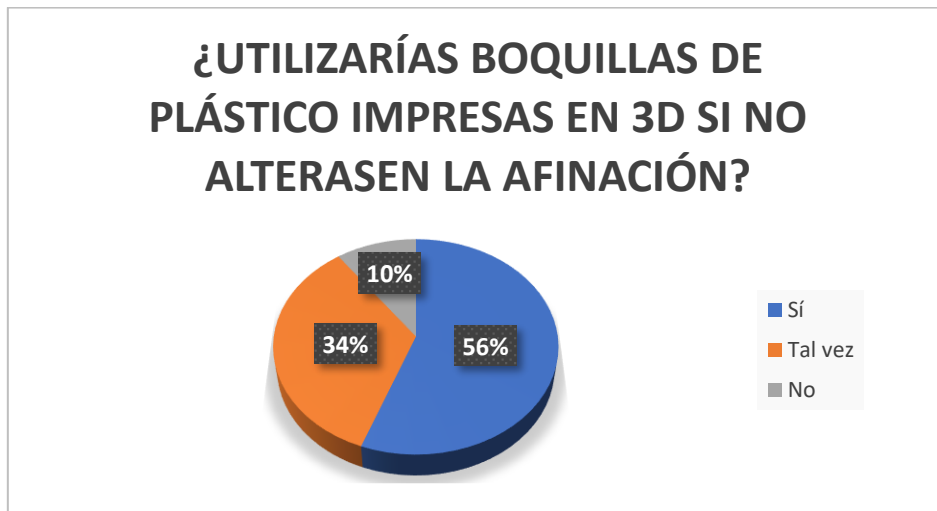


Figura 2.9: Resultados de la pregunta 9 de la encuesta

Fuente: Elaboración propia

Comentarios: el objetivo de esta pregunta era conocer la intención de todos los músicos encuestados ante la posibilidad de poder personalizarse un modelo de boquilla de plástico, que no altere la afinación del instrumento, y que pueda ser fabricada fácilmente gracias a la impresión 3D. Más de la mitad de los encuestados (56%) respondió que sí que las utilizaría.

Pregunta 10: *Si consideras oportuno exponernos alguna información u opinión más sobre las boquillas, por favor, escríbela a continuación.*

Pregunta 11: *Si estás interesado/a en recibir información sobre el desarrollo de la investigación, puedes facilitarnos tu correo electrónico.*

En las dos últimas preguntas de la encuesta se ofreció a los músicos la opción de añadir alguna información o comentario sobre las boquillas, y de adjuntar su correo electrónico si estaban interesados en recibir información sobre el desarrollo de la investigación. Se consiguieron un total de 120 comentarios y 103 correos electrónicos, de entre los 140 encuestados.

Respecto a los comentarios y opiniones, varios de ellos resaltaban la importancia de la elección personal de la boquilla a utilizar por cada músico, insistiendo en que hay músicos profesionales que siguen con la misma boquilla con la que empezaron, y que el hecho de que, aunque algunos músicos profesionales utilicen un determinado modelo o marca, eso no significa que a todo el mundo le sirva y le vaya igual de bien a la hora de tocar, de estar cómodo, y de obtener un buen sonido.

Otros han dedicado su comentario a destacar la importancia de la afinación y del brillo del sonido en los instrumentos de viento metal, y la sensación que les produce el hecho de que al cambiar a las boquillas de plástico se puedan perder todas esas características tan importantes del sonido del instrumento.

Por último, algunos músicos han valorado de forma importante el hecho de que las boquillas de plástico son una alternativa muy interesante, debido a que proporcionan buena calidad de sonido, comodidad, y que además son mucho más baratas que las boquillas de metal.

Han destacado también la importancia de que se sigan investigando las boquillas de plástico, han valorado positivamente que se utilice la impresión 3D para fabricarlas, y han comentado algunas aplicaciones interesantes que podrían instaurarse más en el mercado, como por ejemplo, fabricar boquillas con plástico transparente que permitan ayudar a la hora de que el profesor vea cómo los alumnos colocan sus labios a la hora de hacer sonar los instrumentos, para corregir errores típicos de cuando se está empezando a aprender a tocar un instrumento de viento y para un mejor aprendizaje.

2.3 Conclusiones

Una vez analizadas las opiniones de los músicos de viento metal encuestados sobre las boquillas de metal y de plástico, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

La encuesta ha servido para reflejar varios factores en los que se fijan los músicos de viento metal a la hora de utilizar sus boquillas. Los más destacados han sido la comodidad y la calidad del sonido.

Por otra parte, los músicos encuestados que han utilizado boquillas de plástico han indicado que lo han hecho porque las consideran cómodas y que no empeoran la afinación del instrumento. Desde siempre el metal se ha considerado intocable en este sector como material de fabricación de boquillas, pero ha quedado reflejado que, poco a poco, conforme los músicos han ido probando las boquillas de plástico, se ha ido instaurando su uso.

Además, la mayoría de los músicos encuestados que utilizan boquillas de plástico las utilizan para tocar en conciertos y en actos y festividades por la calle, con la banda de música, charanga, orquesta o grupo de música. Por tanto, las consideran apropiadas dentro de las distintas actividades musicales que desempeñan.

Las empresas que se dedican a la fabricación de boquillas de plástico se han tenido en cuenta en el estudio de mercado, para conocer cómo están implantadas actualmente estas boquillas en el mercado.

Es necesario destacar también el porcentaje de músicos que ha indicado que nunca han utilizado boquillas de plástico, y que podrían hacerlo si se les presentan como una alternativa que no perjudique la afinación del instrumento.

Por último, se ha valorado positivamente el hecho de que se puedan personalizar boquillas de plástico sin que alteren la afinación del instrumento y que se puedan fabricar fácilmente gracias a la impresión 3D.

CAPÍTULO 3 – ESTUDIO DE MERCADO Y PATENTES

3.1 Introducción

Para conocer mejor cómo están implantadas actualmente las boquillas de plástico en la industria de los instrumentos de viento metal, se ha realizado un estudio de mercado sobre el producto objeto del proyecto, en el que se ha recopilado información del producto y de sus distintos fabricantes.

En este estudio se ha realizado un análisis del producto como tal, para tener conocimiento previo de las características del producto a la hora de estudiarlo en el mercado, y se han buscado fabricantes de boquillas de plástico para instrumentos de viento metal, con el fin de conocer qué tipo de producto ofrecen al consumidor.

Además, se ha investigado acerca de cómo han evolucionado las innovaciones en el producto a través de la búsqueda de patentes relacionadas con la trompeta, las boquillas, el plástico como material de fabricación, y los instrumentos de viento metal en general. El análisis de patentes es una herramienta muy útil de cara a conocer cuáles son las líneas de investigación actuales alrededor del producto, cómo se está innovando, y qué posibles mejoras ya existen, pero se desconocían a la hora de iniciar el presente trabajo.

3.2 Estudio de mercado

Antes de exponer las marcas de fabricantes de boquillas de plástico encontradas, es importante analizar las partes más importantes de una boquilla de instrumento de viento metal, ya que sus dimensiones marcan la diferencia de cara a elegir un modelo u otro.

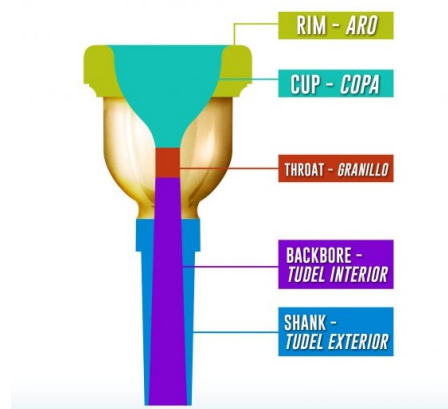


Figura 3.1: Partes de una boquilla de viento metal

Fuente: <https://romerabrass.com/las-partes-de-una-boquilla/>

Aro

El aro es la parte de la boquilla donde se produce la vibración. La medida de este diámetro influye directamente en la facilidad a la hora de ejecutar notas en diferentes registros musicales. Un diámetro mayor facilitará la ejecución de notas más graves, y un diámetro menor, la de las notas agudas. Se recomienda que el diámetro interior de la boquilla sea proporcional al tamaño de los labios del músico, para su mayor comodidad.

Copa

La forma y dimensiones de la copa influyen directamente en la sonoridad del instrumento. Las formas de copas más empleadas en las boquillas de instrumentos de viento metal son las copas en V y en U. Una copa en V, al ser más profunda y proyectar el sonido de forma más directa, facilita la ejecución de notas graves y medias. Por el contrario, una copa en U, al ser menos pronunciada y proyectar el sonido de una forma más redonda, facilitan la ejecución de notas agudas. En el mercado existen muchas gamas con esta morfología y de morfologías intermedias, y cada músico escoge la que más se ajusta a su forma de tocar, a la forma de sus labios, al sonido que busca, y al estilo de música que quiere interpretar.

Granillo

Es la zona de la boquilla donde se regula la presión de la columna de aire. Sus estrechas dimensiones también influyen en la facilidad a la hora de ejecutar notas de distintos registros. Un granillo más estrecho facilita los agudos y un granillo más ancho facilita los medios y graves.

Tudel interior y exterior

El tudel es la parte que engrana la boquilla con el instrumento. No hay una clasificación exacta de los tudeles, pero todos ellos conectan el granillo con la pared interna del instrumento de forma cónica.

Durante los últimos años han ido apareciendo nuevas marcas y casas de fabricantes que se dedican a la fabricación de boquillas de plástico para instrumentos de viento metal. De hecho, durante el estudio de mercado, se han encontrado algunas marcas que además se dedican a la fabricación de instrumentos enteros fabricados con plástico.

También se ha observado que no hay tantas marcas y fabricantes como en el caso de las boquillas de metal, debido a que todos estos cambios e innovaciones en los materiales de fabricación de los instrumentos de viento metal y de sus boquillas llevan relativamente poco tiempo en el mercado.

Las principales marcas de boquillas de plástico encontradas se exponen a continuación.

Kelly

Situada en Estados Unidos, dispone en su catálogo de modelos de boquillas para todos los instrumentos de diferentes tamaños y colores. El material que utilizan para la fabricación de sus boquillas es la resina de policarbonato “lexan”, un termoplástico técnico amorfo caracterizado por sus excepcionales propiedades térmicas, eléctricas, ópticas y mecánicas. Además del *lexan*, esta casa de fabricantes también fabrica boquillas de instrumentos de viento metal en otros materiales como acero inoxidable quirúrgico.



Figura 3.2: Boquillas de trompeta marca Kelly

Fuente: <https://www.kellymouthpieces.com/kmtrumpet/index.asp>

A continuación, en la siguiente tabla se muestran los modelos de boquilla de trompeta que figuran en el catálogo de esta marca, junto a su correspondiente precio. Todos ellos además están disponibles en diez colores diferentes.

MODELO	DIÁMETRO DE LA COPA	TALLA DEL GRANILLO	PROFUNDIDAD DE LA COPA	PRECIO
Screamer	0,66 inch (16 mm)	S	Poco profunda	\$28 (26,52€)
Pro	0,68 inch (17,22 mm)	L	Medio profunda	\$26 (24,63€)
7C	0,65 inch (16,51 mm)	S	Poco profunda	\$23 (21,79€)
5C	0,66 inch (16,76 mm)	M	Medio profunda	\$23 (21,79€)
3C	0,67 inch (17,01 mm)	L	Medio profunda	\$23 (21,79€)

Tabla 3.1: Modelos de boquillas de trompeta Kelly

Fuente: <https://www.kellymouthpieces.com/kmtrumpet/index.asp>

pBone

Se trata de una marca de instrumentos de viento metal que, además de fabricar boquillas de plástico, también fabrica instrumentos enteros fabricados con plástico. Situada en Reino Unido, esta casa de fabricantes tiene en su catálogo trompetas, cornetas y trombones fabricados íntegramente con plástico, además de modelos de boquillas de plástico para todos estos instrumentos. Aunque estos instrumentos de plástico están enfocados principalmente a gente que quiere aprender a tocar, su económico precio y buenas referencias los convierten en una interesante opción de cara a empezar a aprender a tocar un instrumento de viento metal sin que ello conlleve un elevado coste económico.



Figura 3.3: Boquilla y trompeta de plástico “pTrumpet” marca pBone

Fuente: <https://pbone.co.uk/products/>

A continuación, en la siguiente tabla, se muestran los modelos de boquilla de trompeta de plástico que hay en el catálogo de esta marca. Todos sus modelos tienen una profundidad de copa media, un diámetro de granillo de 3,66 mm, su precio es de 9,95€, y están disponibles en color negro.

MODELO	DIÁMETRO DE LA COPA
1.5C	17,00 mm
3C	16,30 mm
5C	16,25 mm
7C	16,20 mm

Tabla 3.2: Modelos de boquillas de trompeta pBone

Fuente: <https://pbone.co.uk/products/>

Brand

Se trata de una empresa situada en Alemania que fabrica boquillas de plástico para trompetas, fliscornos, trombones y tubas. Esta marca, creada por un antiguo director de ventas de una

empresa de ingeniería que además es trompetista, ha estado desarrollando boquillas de plástico profesionalmente para que sean aceptadas en el mercado. Ofrece una amplia variedad de boquillas de diferentes tamaños y colores y, además, ofrece la posibilidad de hacer una reproducción de la boquilla de metal que el músico quiera en plástico, con sólo contactar con ellos por correo electrónico y enviarles las medidas del aro y de la copa.



Figura 3.4: Boquilla de plástico modelo “The Perfect G” marca Brand

Fuente: <https://www.thomann.de/es/index.html>

A continuación, en la siguiente tabla, se muestra el catálogo de boquillas de trompeta de esta marca. Todos sus modelos tienen un diámetro de granillo de 3,66 mm y, aunque sus precios no figuran como tal en sus catálogos, buscando los modelos de boquillas en distintas páginas web, se ha observado que su precio está en torno a los 55€, un precio mayor comparado con los precios vistos en los modelos de las otras marcas. Además, todos sus modelos están disponibles en rojo, azul, verde, negro, dorado y transparente.

MODELO	DIÁMETRO DE LA COPA	PROFUNDIDAD DE LA COPA
1 1/4C	17,00 mm	Muy profunda
1 1/2C	16,80 mm	Medio profunda
3C	16,60 mm	Medio profunda
5C	16,60 mm	Medio profunda
7C	16,70 mm	Medio profunda
1 FS	16,60 mm	Poco profunda
Jazz	16,70 mm	Medio profunda
Groove	16,20 mm	Poco profunda
Lead	15,80 mm	Poco profunda
Scream	16,00 mm	Poco profunda
Perfect	16,50 mm	Medio profunda

Tabla 3.3: Modelos de boquillas de trompeta Brand

Fuente: <http://www.mundstuecke.ch/produkt/trompeten/>

Respecto a los fabricantes de boquillas de metal, consultando los catálogos de empresas como *Bach*, *Stomvi* o *Yamaha*, las marcas más utilizadas por los músicos de viento metal encuestados en el capítulo 2, únicamente se ha encontrado un modelo de boquilla de plástico en el catálogo de la marca *Stomvi*. Esta empresa valenciana es conocida por sus investigaciones e innovaciones tecnológicas en la fabricación de boquillas y de instrumentos de viento metal. Por ejemplo, además de la boquilla de metacrilato, *Stomvi* permite a sus clientes comprar boquillas con piezas como el aro o la copa intercambiables.

Boquilla fija de metacrilato de Stomvi

Se trata de una boquilla con las mismas características que su boquilla modelo *Classic*, de una pieza, pero fabricada en metacrilato. Esta boquilla se define en el catálogo como una boquilla “perfecta para utilizarla en días de mucho frío y también válida para personas con alergias.”



Figura 3.5: *Boquilla fija de metacrilato de Stomvi*

Fuente: <https://stomvi.com>

Por tanto, se puede concluir que las principales casas de fabricantes de boquillas y de instrumentos de viento metal no incluyen boquillas de plástico en sus catálogos.

Esto se debe fundamentalmente a que este sector en su mayoría no es partidario de realizar cambios significativos en sus procesos de fabricación. Como se ha explicado anteriormente, muchas marcas y casas de fabricantes hoy en día siguen fabricando sus instrumentos y sus boquillas siguiendo unos procesos basados en métodos artesanales que se aplicaban desde hace muchos años.

Además, se ha observado que los precios de las boquillas de metal oscilan entre los 60€ y 100€, teniendo algunos modelos con precios por encima de los 100€. Por tanto, a todo lo expuesto anteriormente, hay que añadir que los precios de las boquillas de plástico en su mayoría son menores que los de las boquillas de metal.

3.3 Estudio de patentes

Para completar el estudio de mercado se ha realizado una búsqueda de patentes con el propósito de conocer cuáles han sido los avances que se han producido a lo largo de la historia reciente en este campo de estudio.

Para el presente trabajo, la búsqueda se ha realizado sobre patentes relacionadas con las trompetas y con las boquillas de viento metal, para poder abarcar un campo de conocimiento lo más amplio posible. Utilizando palabras clave como “trumpet” (trompeta), “plastic” (plástico) o “mouthpiece” (boquilla), se han encontrado algunas patentes relacionadas con las innovaciones en los materiales de fabricación y en los diseños de las boquillas. Las patentes más destacadas, incluyendo la fecha en que se patentaron, son las siguientes:

US4658697A (21 de abril de 1987)

La innovación en esta patente está en el uso de un plástico transparente para la fabricación de la boquilla. Esta novedad permite que tanto el alumno como el profesor puedan ver la vibración de los labios, y si están bien posicionados para una ejecución correcta.

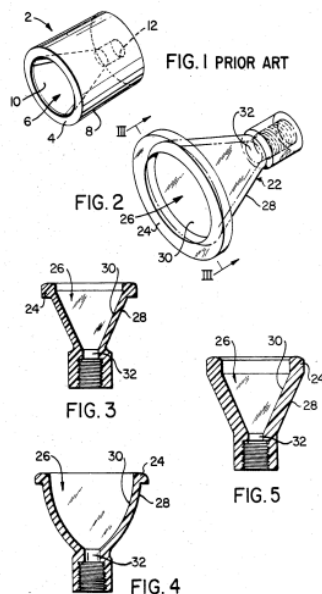


Figura 3.6: Boquillas de instrumentos de viento metal de material transparente

Fuente: Google Patents

US7179977B1 (20 de febrero de 2007)

Siguiendo en la línea de nuevos materiales, esta patente registra el uso de material polimérico para la fabricación de boquillas de viento metal. Estas boquillas se fabrican mediante moldeo por inyección hasta obtener sustancialmente el tamaño y la forma deseados, junto a un proceso de mecanizado secundario para eliminar las imperfecciones.

US20050120861A1 (9 de junio de 2009)

En esta patente se describen boquillas desmontables. Estas boquillas son personalizables por partes, y en la patente se describen distintos métodos para construir dichas boquillas por tramos y secciones, con tal de poder personalizar cada una de las partes principales de la boquilla y sus respectivos tamaños, todo ello enfocado para poder hacerse en todos los tipos de boquilla en función del instrumento de viento metal.

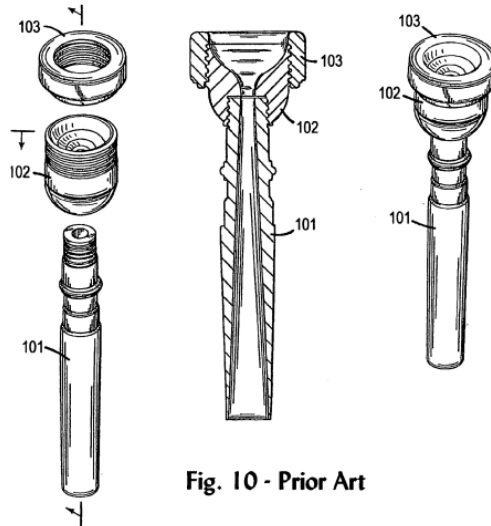


Fig. 10 - Prior Art

Figura 3.7: Boquilla desmontable personalizable por tramos y secciones

Fuente: Google Patents

US5353673A (11 de octubre de 1994)

Respecto a la línea de las modificaciones de la geometría de la boquilla o del instrumento, esta patente describe una boquilla asimétrica, con la copa deformada, de tal forma que restringe el labio inferior, lo cual facilita la ejecución de agudos sin afectar a la calidad del sonido.

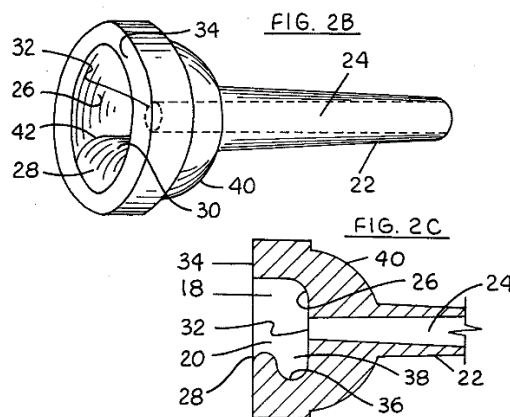


Figura 3.8: Boquilla asimétrica

Fuente: Google Patents

Además de las patentes descritas anteriormente, se han encontrado dos patentes relacionadas con el plástico como material alternativo a la fabricación de instrumentos de viento metal, pero en estos casos, con respecto a la fabricación del propio instrumento.

CN103928015A (16 de julio de 2017)

En esta patente se presenta el diseño de una trompeta íntegramente fabricada con plástico. En él se abordan problemas como la estructura compleja del instrumento, su alto coste de producción y mantenimiento (que con el plástico quedaría drásticamente reducido), su elevado peso, etc. Sirve como ejemplo de cómo las innovaciones con nuevos materiales en la fabricación de estos instrumentos van más allá de su aplicación únicamente en las propias boquillas de los instrumentos, sino que también se están investigando estos materiales en su fabricación íntegra.

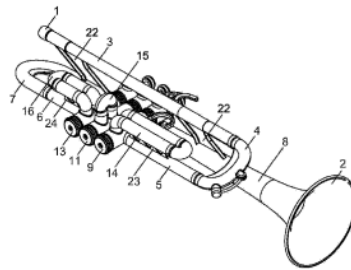


Figura 3.9: *Trompeta de plástico*

Fuente: Google Patents

US20120024127A1 (2 de febrero de 2012)

En esta patente encontramos un diseño como el de la patente anterior de la trompeta de plástico, pero en este caso se trata de un trombón de plástico. Hay una gran similitud en los problemas que se abordaban en la patente de la trompeta de plástico, como el elevado coste de producción y el excesivo peso, y sirve también como ejemplo de que el uso de plástico en instrumentos de viento metal puede ir más allá de las boquillas de dichos instrumentos.

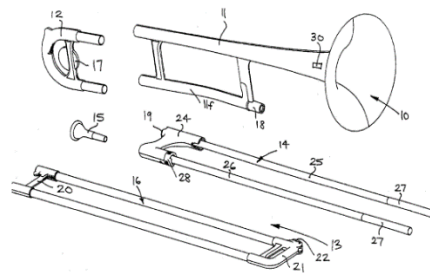


Figura 3.10: *Trombón de plástico*

Fuente: Google Patents

Observando las distintas patentes expuestas, se aprecia que no hay ninguna que lo haga siguiendo la línea de innovación del presente trabajo. Por tanto, se observa una oportunidad dar un paso adelante en el diseño y fabricación de boquillas de trompeta con plástico, que mejoren la afinación del instrumento, y utilizando una tecnología actualmente al alza como es la impresión 3D.

Además, la mayoría de las patentes datan de principios de los años 2000 en adelante, por lo que también queda reflejado que sus propietarios son, en su mayoría, investigadores que llevan poco tiempo investigando y desarrollando todas estas innovaciones.

3.4 Conclusiones

Tras analizar con detalle el mercado actual de las boquillas de plástico, compuesto por el producto como tal, los fabricantes, y las patentes, podemos extraer las siguientes conclusiones.

La importancia de la boquilla en los instrumentos de viento metal se fundamenta en la función que desempeña a la hora de generar el sonido en estos instrumentos, como se explica en el capítulo 4.

Las partes más importantes de las boquillas de viento metal están relacionadas con su tamaño y geometría, y son influyentes a la hora de que los músicos elijan un modelo de boquilla u otro. Estos parámetros geométricos son los que se han tenido en cuenta a la hora de realizar la propuesta de diseño explicada en el capítulo 5.

Con respecto al uso de plástico como material de fabricación alternativo, se han encontrado nuevas marcas y casas de fabricantes que se dedican exclusivamente a la fabricación de boquillas de plástico, y de instrumentos enteros fabricados con plástico.

De las casas de fabricantes de boquillas y de instrumentos de viento metal, únicamente la empresa valenciana Stomvi se desmarca del resto, incluyendo un modelo de boquilla de metacrilato en su catálogo. Además, se ha observado que el precio de las boquillas de plástico en su mayoría es menor que el de las boquillas de metal, principalmente debido a que el cambio de material hace que sus costes de fabricación sean menores.

Por tanto, si se continúan investigando y desarrollando, pueden ser una opción interesante y accesible si los recursos económicos del músico son limitados, o para que los alumnos de las escuelas de música las utilicen cuando están empezando a aprender a tocar sus instrumentos, entre otras posibilidades de uso.

Por último, con respecto a las patentes, se han encontrado referencias al plástico como material alternativo de fabricación para boquillas de instrumentos de viento metal, e incluso se han encontrado patentes sobre instrumentos de viento metal fabricados con plástico. No obstante, no existe ninguna patente actualmente que se preocupe de una mejora de la afinación y el sonido de la trompeta mediante el uso de simulaciones acústicas por ordenador. Por tanto, hay un posible nicho de mercado, o una línea de innovación abierta en la que se han realizado pocos avances significativos en los últimos años.

CAPÍTULO 4 – GENERACIÓN DEL SONIDO EN LA TROMPETA

4.1 Introducción

A la hora de analizar la afinación de la trompeta, es necesario entender cómo se generan las notas musicales en este instrumento. Para ello, se ha realizado previamente un estudio del sonido y de sus propiedades en la música, con el fin de comprender qué es el sonido, cómo se produce, cuáles son sus propiedades esenciales, y qué información nos aportan.

4.2 El sonido y sus propiedades en la música

El sonido se define como una perturbación de energía mecánica que tiene su origen en el movimiento vibratorio de los cuerpos, y que se propaga a través de un medio físico como una onda, que puede ser percibida por los seres humanos por medio del sentido del oído.

Las ondas sonoras se producen por un cambio de presión que ocasiona en el cuerpo elástico una vibración. Para poder generar el sonido es necesaria una fuente de vibración llamada foco y un medio físico para su propagación. Como explican A. Tamir y Francisco Ruiz Beviá (2007), el sonido se caracteriza por las propiedades de las ondas, como son la frecuencia, la longitud de onda, la amplitud, y la velocidad en el aire, que es el medio físico a través del cual más comúnmente se mueve.

En el presente trabajo, la propiedad del sonido que nos aporta más información es el tono, pero conviene tener en cuenta otras propiedades como son la intensidad, el timbre y la duración.

Tono

El tono viene dado por la frecuencia del sonido. Representa el número de vibraciones por segundo, y su unidad en el Sistema Internacional es el hercio (Hz).

Para que los humanos puedan percibir un sonido, éste debe estar comprendido en un rango de audición que va desde los 20 a los 20.000 Hz. A este rango se le denomina rango de frecuencia audible, y por debajo de este rango tenemos los infrasonidos y por encima los ultrasonidos.

Las notas musicales son sonidos cuya frecuencia no varía. Cada nota musical tiene asociada una frecuencia, de tal forma que las notas musicales serán más agudas cuanto mayor sea su frecuencia, y más graves cuanto menor sea ésta. Este sistema define las notas musicales con dos tipos de nomenclaturas: la anglosajona, en la que a cada nota le corresponde una letra del abecedario, y la latina, en la que cada nota tiene un nombre propio.

NOMENCLATURA LATINA	Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si
NOMENCLATURA ANGLOSAJONA	C	D	E	F	G	A	B

Tabla 4.1: Notación latina y anglosajona de las notas musicales

Fuente: Elaboración propia

En música, una octava es el intervalo o distancia que separa dos notas musicales cuyas frecuencias están en relación 2 a 1, es decir, una es el doble de la otra. Cada octava se divide en 12 notas y, matemáticamente hablando, dos notas forman una octava cuando la frecuencia de una de las dos notas es el doble que la otra, como aparece indicado en el ejemplo de la Tabla 4.2, en la que la frecuencia del Do5 (523,26 Hz) es el doble de la del Do4 (261,63 Hz).

NOMENCLATURA ANGLOSAJONA	NOMENCLATURA LATINA	FRECUENCIA (Hz)
C4	Do4	261,63
C#4 o Eb4	Do#4 o Reb4	277,18
D4	Re4	293,66
D#4 o Eb4	Re# o Mib4	311,13
E4	Mi4	329,63
F4	Fa4	349,23
F#4 o Gb4	Fa#4 o Solb4	369,99
G4	Sol4	392,00
G#4 o Ab4	Sol# o Lab4	415,30
A4	La4	440,00
A#4 o Bb4	La#4 o Sib4	466,16
B4	Si4	493,88
C5	Do5	523,26

Tabla 4.2: Nomenclaturas anglosajona y latina de las notas musicales de una octava y sus frecuencias

Fuente: Elaboración propia

Como se ha comentado anteriormente, en este sistema, dividimos cada octava en 12 notas, estableciendo una progresión geométrica r asociada a la frecuencia de cada una de ellas.

La distancia entre dos notas consecutivas se denomina semitono. En términos matemáticos, dada una nota determinada de frecuencia f , vemos que la frecuencia de cualquier otra nota f' separada una distancia de n semitonos de la primera es:

$$f' = f \cdot r^n \quad (4.1)$$

El valor de r puede deducirse basándose en el hecho de que, en cada octava, formada por $n = 12$ semitonos, se duplica la frecuencia. Por tanto:

$$2f = f \cdot r^{12} \quad (4.2)$$

$$r = \sqrt[12]{2} \quad (4.3)$$

Es importante entender el semitono como una magnitud relativa, ya que dividimos físicamente una octava en 12 partes iguales, pero la relación de frecuencias de las notas no es lineal. La distancia en hercios que separa dos semitonos sucesivos es mayor cuanto más agudas sean las notas, o lo que es lo mismo, conforme su frecuencia es mayor.

Por tanto, hay que tener en cuenta que no es lo mismo desafinar 1 Hz en una nota grave que en una nota aguda, ya que la distancia entre las notas no es la misma, como se indica en la Tabla 4.3, donde se aprecia que la distancia en Hz de una nota con respecto a su nota anterior (semitono) aumenta conforme más agudas son las notas.

NOTAS MUSICALES (NOMENCLATURA LATINA)	FRECUENCIA (Hz)	DISTANCIA RESPECTO SEMITONO ANTERIOR (Hz)
Do3	130,81	-
Do#3 o Reb3	138,59	7,88
Do4	261,63	-
Do#4 o Reb4	277,18	15,55
Do5	523,25	-
Do#5 o Reb5	554,37	31,12

Tabla 4.3: Distancias entre frecuencias de notas musicales en distintas octavas

Fuente: Elaboración propia

Por tanto, para poder cuantificar correctamente desafinaciones en las frecuencias de las notas medidas en los instrumentos musicales, necesitamos disponer de una unidad de medida más pequeña que el semitono, y es aquí donde entra en juego el concepto de cent.

Propuestos por el matemático y filólogo inglés Alexander John Ellis, un cent es la menor unidad que se emplea para medir intervalos musicales, y equivale a la centésima parte de un semitono.

Esto quiere decir que, si antes una octava estaba dividida en 12 notas formando 12 semitonos entre ellas, ahora cada semitono se divide en 100 partes para expresarlos en cents. Por tanto, cada octava estará dividida en 1200 cents, quedando la relación geométrica y definiendo el cent de la siguiente manera:

$$2f = f \cdot r^{1200} \quad (4.4)$$

$$r = \sqrt[1200]{2} \rightarrow cent = c = \sqrt[1200]{2} = 1,00057779... \quad (4.5)$$

Lo que resulta más interesante a efectos de cálculo es poder calcular cuántos cents de diferencia hay entre dos determinadas frecuencias. Considerando dos notas, de frecuencia f y f' , la distancia c en cents entre dos frecuencias es:

$$|c| = \left| 1200 \cdot \frac{\ln\left(\frac{f'}{f}\right)}{\ln 2} \right| \quad (4.6)$$

Esta fórmula es especialmente útil, ya que nos permite cuantificar la desafinación de una nota calculando la distancia en cents que existe entre la frecuencia de esta nota medida en un instrumento, y la frecuencia teórica de la nota medida. Cuanto mayor sea esta distancia en cents, mayor será su desafinación. Con el uso de cents también se pueden comparar errores de desafinación en notas que tengan frecuencias muy distintas.

Intensidad y Nivel de Presión Sonora

La intensidad sonora se define como la potencia acústica transferida por una onda sonora por unidad de área normal a la dirección de propagación. La percepción de un sonido se produce cuando llegan a nuestros oídos las ondas sonoras producidas por las variaciones de presión respecto a la presión atmosférica. Estas variaciones de presión se producen cuando el cuerpo elástico vibra, moviendo la masa de aire a su alrededor, y generando una sobrepresión y una depresión en el tiempo a la vez que oscila.

Esta variación de la presión se denomina presión sonora. La presión sonora varía muy bruscamente en el tiempo, y estas variaciones bruscas son percibidas por el oído humano, creando la sensación auditiva. La sonoridad, o intensidad del sonido, está relacionada con la amplitud de estas variaciones de presión, y éstas dependen de la amplitud de la vibración.

Las presiones sonoras a las cuales el oído humano es sensible varían en un intervalo muy grande. El umbral inferior de la audición humana, es decir, el valor mínimo de presión sonora que provoca una sensación auditiva es de $2 \cdot 10^{-5} Pa$, y el umbral superior de audición humana se encuentra en $20 Pa$.

Debido a este rango tan grande de valores de presiones sonoras, se recurre a una escala logarítmica y a otra unidad equivalente. De este modo, se define el nivel de presión sonora (en inglés *Sound Pressure Level*, SPL) como la magnitud logarítmica que mide la intensidad sonora mediante la fórmula 4.7:

$$SPL (dB) = 20 \log\left(\frac{P}{P_0}\right) = 10 \log\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \quad (4.7)$$

Siendo P la presión sonora que se está midiendo, y definiendo $P_0 = 0 dB = 2 \cdot 10^{-5} Pa = 2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2}$ como el valor de referencia de la presión sonora, que representa la menor presión acústica audible por el oído humano.

El nivel de presión sonora SPL comúnmente se mide en decibelios (dB) en honor al científico e inventor Alexander Graham Bell. Se utilizan normalmente los decibelios y no los Pascales debido a que el oído humano no percibe los sonidos de forma lineal. Por tanto, aplicando el cambio de unidades, los sonidos que percibimos a través del oído deben superar el umbral de 0 dB para ser audibles, y no llegar al umbral de dolor del oído humano, establecido en 120 dB.

En el ámbito de la música, la intensidad del sonido de una orquesta suele estar entre 40 y 100 dB aproximadamente. En la tabla 4.4 se muestran las intensidades aproximadas correspondientes a los matices de dinámica de los sonidos, señalados en las partituras empleadas para interpretar obras musicales.

MATICES DE INTENSIDAD DE LOS SONIDOS EN LAS PARTITURAS	INTENSIDAD DEL SONIDO (dB)
<i>pp</i> – <i>pianissimo</i> (muy suave)	40
<i>p</i> – <i>piano</i> (suave)	50
<i>mp</i> – <i>mezzopiano</i> (muy suave)	60
<i>mf</i> – <i>mezzoforte</i> (medio fuerte)	70
<i>f</i> – <i>forte</i> (fuerte)	80
<i>ff</i> – <i>fortissimo</i> (muy fuerte)	90 - 100

Tabla 4.4: *Matices musicales de intensidad del sonido*

Fuente: Elaboración propia

Timbre

Si el tono permite diferenciar sonidos graves y agudos por su frecuencia, y la intensidad permite diferenciar los sonidos fuertes de los débiles, el timbre es la cualidad del sonido que permite diferenciar los sonidos que producen los diferentes instrumentos musicales, basándose en la composición de las ondas sonoras que emiten.

Más concretamente, el timbre es la característica que nos permite distinguir una nota de la misma frecuencia e intensidad producida por diferentes instrumentos. Una misma nota suena distinta si la toca una flauta, un violín o una trompeta, debido a que cada instrumento crea o produce el sonido de una manera diferente. Cada instrumento tiene un timbre que lo identifica o lo diferencia de los demás.

El sonido característico que emite un instrumento no es una onda pura, sino que está formada por múltiples componentes senoidales denominados armónicos. Cada uno de estos armónicos vibra a una frecuencia distinta, que a su vez es múltiplo de la primera frecuencia del sonido, su frecuencia más baja, también llamada frecuencia fundamental o primer armónico.

En la Figura 4.1 se puede observar un ejemplo de una onda sonora que está formada por tres armónicos: el primero o fundamental (f), el segundo ($2f$) y el tercero ($3f$). Además, se puede apreciar que, a diferencia de los sonidos puros (senoidales), una onda sonora compleja, tras la superposición, muestra una periodicidad respecto al tiempo sin llegar a ser senoidal.

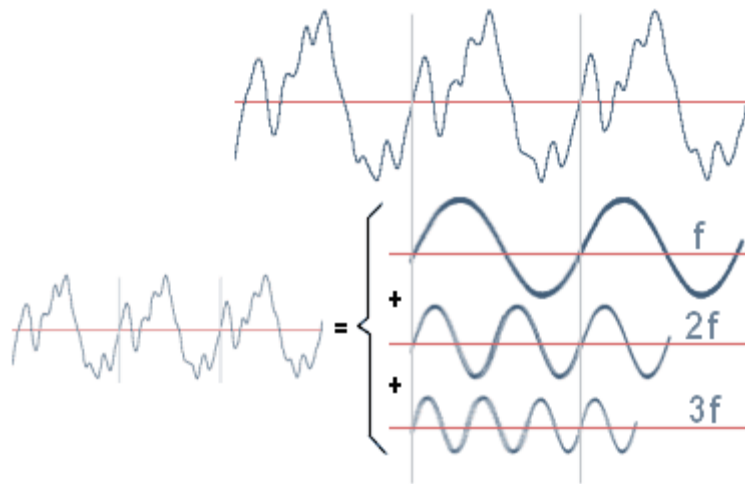


Figura 4.1: Descomposición de una onda sonora en sus armónicos

Fuente: <http://cpms-acusticamusical.blogspot.com/>

Todo esto se enuncia en el teorema del matemático y físico francés Jean-Baptiste Joseph Fourier, el cual establece lo siguiente:

“Cualquier forma de onda que sea periódica (que se repita siempre igual) se puede descomponer en una serie más o menos larga (quizás infinita) de ondas puras (senoidales) llamadas armónicos, cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental o primer armónico de la onda, y su combinación o mezcla dan lugar de nuevo al sonido original.”

De este modo, según este teorema, los armónicos son ondas puras que no se pueden descomponer en ondas más simples.

Como explica María Quintanilla (2009), según la lógica del teorema de Fourier, los armónicos ya no se pueden descomponer más en otros sonidos distintos, ya que son puros. Un timbre puro (una onda senoidal) consta de un solo sonido. Un timbre complejo (una forma de onda periódica distinta a la senoidal) consta de una serie de ondas senoidales mezcladas, sumadas o combinadas entre sí. Todos estos sonidos nos llegan fundidos en uno solo, de forma que normalmente no podemos distinguir unos de otros.

No obstante, si escuchamos lo suficientemente concentrados la nota de un piano, de una trompeta, o de cualquier instrumento musical, se pueden llegar a apreciar, identificar, o aislar, los armónicos que componen dicho timbre. Algunos ejemplos de la descomposición espectral de los armónicos del timbre de algunos instrumentos musicales aparecen en forma de gráfico en la Figura 4.2.

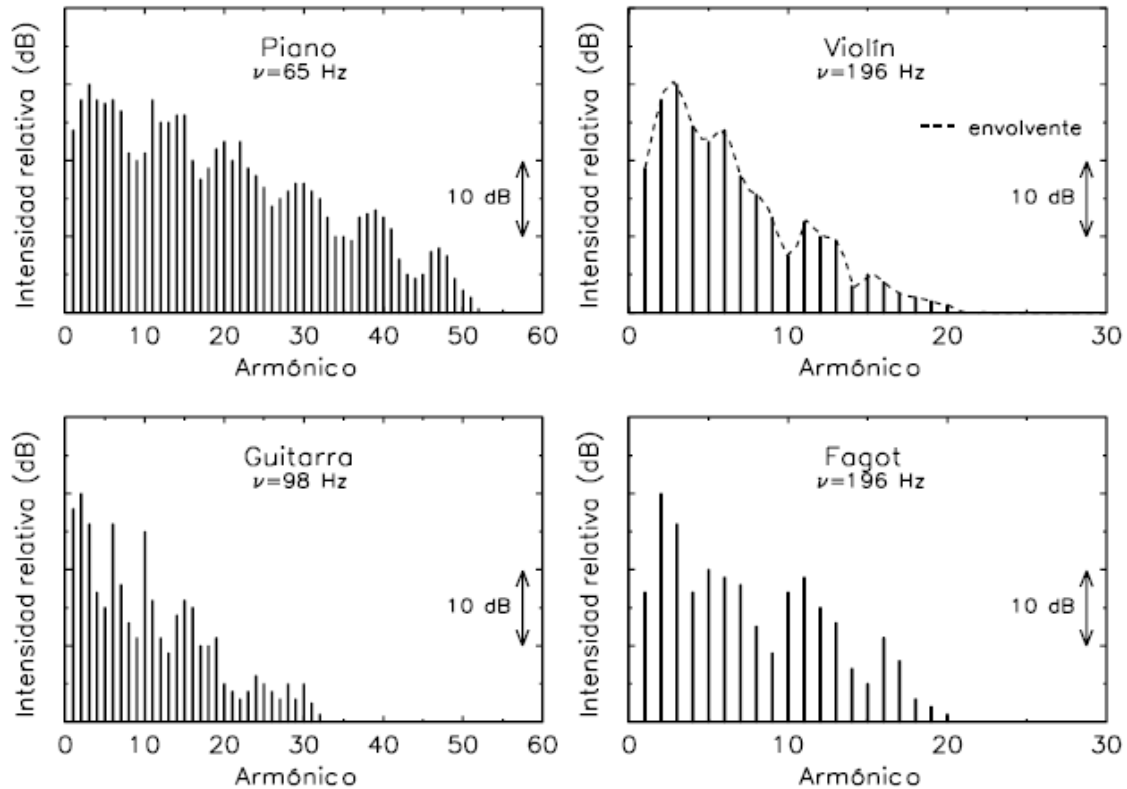


Figura 4.2: Descomposición del timbre de instrumentos musicales en sus armónicos

Fuente: <https://www.lpi.tel.uva.es>

Por otra parte, mientras que los sonidos producidos por los instrumentos musicales se construyen a partir de una frecuencia fundamental o primer armónico y una serie de armónicos de frecuencias múltiples, existen otros sonidos que no siguen patrones armónicos y que crean un impacto violento en su audición, produciendo sensaciones desagradables al ser escuchados. Estos sonidos son conocidos comúnmente como ruido.

Duración

La duración física de un sonido se define como el tiempo durante el cual la onda sonora permanece, pudiendo clasificarse los sonidos según su duración en cortos o largos. En música es necesario saber cuánto dura cada sonido para saber el tiempo que se necesita para tocar cada nota musical. La duración de una nota musical es la cantidad de tiempo en que ésta se mantiene sonando.

4.3 Generación de las notas musicales en la trompeta

Todos los instrumentos de viento generan sonido por medio de la vibración que se induce en la columna de aire emitida en su interior. Esta vibración dentro del tubo sonoro genera una resonancia a partir del paso del flujo de aire por su interior.

Las ondas que se generan en su interior se denominan ondas estacionarias, y están formadas por la superposición de dos ondas con la misma amplitud y frecuencia, pero que se desplazan en sentidos opuestos. Además, aquellos puntos de la onda estacionaria que vibran con amplitud máxima se denominan vientres, y los puntos en los que la onda no vibra se denominan nodos.

La trompeta, como instrumento de viento metal, pertenece al grupo de instrumentos que emplean una boquilla para producir la vibración, realizándose ésta a partir de los labios del músico.

Los instrumentos también se clasifican por el tipo de tubos sonoros que tienen. En el caso de la trompeta, al igual que la trompa, el trombón o la tuba, sus extremos son abiertos. En estos instrumentos, debido al fenómeno de la reflexión, las ondas vuelven a su interior yendo de un extremo al otro del tubo sonoro, produciéndose la onda estacionaria.

Cuando se ejecuta una nota en un instrumento musical se genera una onda sonora debido al cambio de presión de la columna de aire. A partir del tubo sonoro de extremos abiertos, se genera en su interior una resonancia que se ajusta a una serie armónica de frecuencias de resonancia de valores $f, 2f, 3f, 4f \dots$ y a la longitud de onda λ , es decir, al espacio que recorre la onda en su movimiento de ida y vuelta a través del tubo sonoro.

La frecuencia fundamental se corresponde con la frecuencia de la nota más baja o grave que puede sonar en el instrumento, cuya onda está formada por dos vientres en los extremos y un nodo en el centro, siendo la longitud de onda el doble de la longitud del tubo. Esta frecuencia fundamental se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

$$f = \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = 2L \rightarrow f_1 = \frac{c}{2L} \quad (4.8)$$

Siendo λ la longitud de onda y c la velocidad de propagación del medio que, al tratarse de un instrumento musical de viento, es el aire y toma un valor de $c = 340 \frac{m}{s}$.

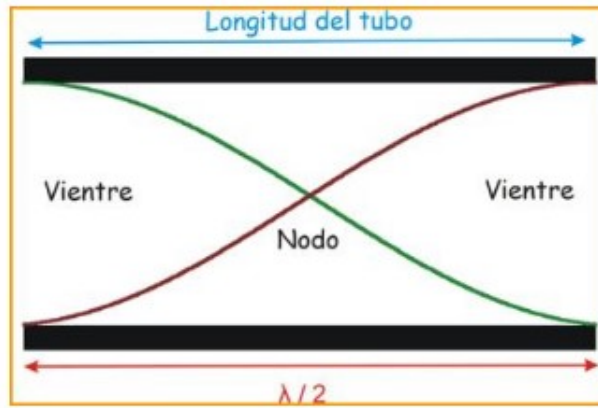


Figura 4.3: *Tubo abierto produciendo su frecuencia fundamental*

Fuente: <https://www.lpi.tel.uva.es>

De la expresión anterior se puede obtener la expresión general para obtener las sucesivas frecuencias de resonancia del instrumento.

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (4.9)$$

Donde f_n es la frecuencia de resonancia del múltiplo n de f_1 , que es la frecuencia fundamental. La longitud de onda aumentará o disminuirá conforme se obtenga una frecuencia menor o mayor respectivamente, o lo que es lo mismo, un tono más grave o agudo.

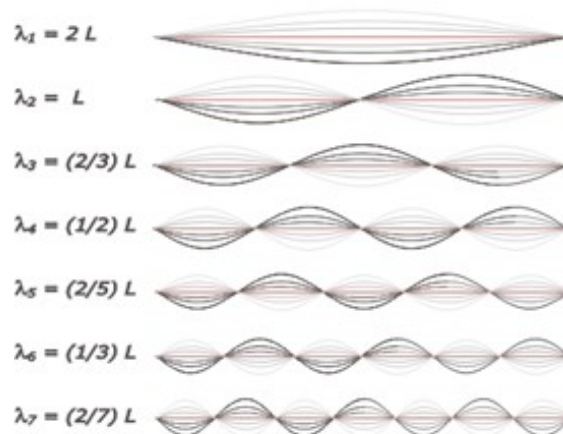


Figura 4.4: *Longitudes de onda de frecuencias de resonancia*

Fuente: ricuti.com.ar

Las fórmulas explicadas anteriormente las expuso el matemático, médico y filólogo suizo Johann Bernoulli, que enunció una serie de leyes aplicables a los tubos abiertos. Las leyes de Bernoulli son las siguientes:

- I. La frecuencia del sonido producido por un tubo, tanto abierto como cerrado, es directamente proporcional a la velocidad de propagación.
- II. La frecuencia del sonido producido por un tubo, tanto abierto como cerrado, es inversamente proporcional a la longitud del tubo.
- III. A igualdad de longitud entre un tubo abierto y otro cerrado, el abierto produce un sonido de frecuencia doble que el cerrado, es decir, el abierto produce un sonido a la octava del cerrado.
- IV. Los tubos abiertos producen la serie completa de armónicos, mientras que los cerrados sólo los armónicos de frecuencia impar de la fundamental.

Por otra parte, tal y como explica Vicente Pastor (2009), profesor del Conservatorio Superior de Música Joaquín Rodrigo de Valencia, para conseguir diferentes notas (o frecuencias) en un tubo sonoro, se recurren básicamente a dos métodos para conseguir variar la longitud de la columna de aire que lo atraviesa.

El primer método consiste en realizar una serie de perforaciones a lo largo del tubo, de tamaño y posición convenientes, que se pueden tapar con los dedos (es el caso de las flautas) o con llaves (es el caso de saxofones, clarinetes, etc.).

El segundo método consiste en añadir secciones de tubo que se conectan al principal mediante pistones (como es el caso de las trompetas), llaves (como en las trompas), o tubos deslizantes (es el caso de los trombones de varas).

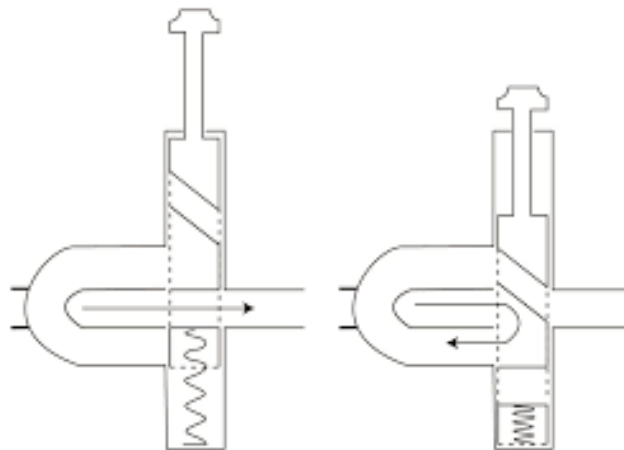


Figura 4.5: Sección transversal del pistón de una trompeta

Fuente: <https://latrompetasonara.com/2019/11/28/sonido-teoria/>

En el caso de la trompeta, existen tres pistones que abren tres secciones de tubos. Accionándolos, permiten añadir respectivamente tres secciones distintas al tubo sonoro principal del instrumento, junto a las distintas combinaciones de todas ellas. De esta forma, el

trompetista es capaz de hacer sonar todas las notas posibles de la trompeta en todos sus registros, existiendo también diferentes posiciones con las que se puede realizar la misma nota por equivalencia de longitudes, en uno o en varios registros musicales.

A modo de ejemplo, en la Tabla 4.5 se detallan las notas que se pueden realizar sin añadir secciones de tubo al tubo sonoro principal, o lo que es lo mismo, sin accionar ningún pistón. Esta posición se denomina “al aire”, y en ella el flujo de aire únicamente recorre el tubo sonoro principal.

Las frecuencias de estas notas en posición al aire se corresponden con la frecuencia de la nota Sib2, de valor $f_1 = 116.54 \text{ Hz}$, y una serie de múltiplos de ésta. En cada posición de los pistones de la trompeta se puede realizar una nota que es la más grave que se puede tocar en esa posición, y las frecuencias del resto de notas son múltiplos de ésta.

NOTA	FRECUENCIA DE RESONANCIA (Hz)
Sib2 (A#2)	$f_1 = 116,54$
Sib3 (A#3)	$f_2 = 2f_1 = 233,08$
Fa4 (F4)	$f_3 = 3f_1 = 349,23$
Sib4 (A#4)	$f_4 = 4f_1 = 466,16$
Re5 (D5)	$f_5 = 5f_1 = 587,33$
Fa5 (F5)	$f_6 = 6f_1 = 698,46$
Lab5 (G#5)	$f_7 = 7f_1 = 830,61$
Sib5 (A#5)	$f_8 = 8f_1 = 932,33$

Tabla 4.5: Frecuencias de resonancia de la trompeta en posición al aire

Fuente: Elaboración propia

Con el accionamiento de los pistones, estas frecuencias se desvían en uno (pistón 2), dos (pistón 1) o tres semitonos (pistón 3). Si se aprieta un pistón concreto, se desvía el aire por el conducto correspondiente, aumentando de esta manera la longitud del tubo sonoro. De este modo, junto a la presión que el músico realiza con sus labios a la hora de hacerlos vibrar cuando emite el flujo de columna de aire, se pueden tocar todas las notas musicales en todos sus diferentes registros.

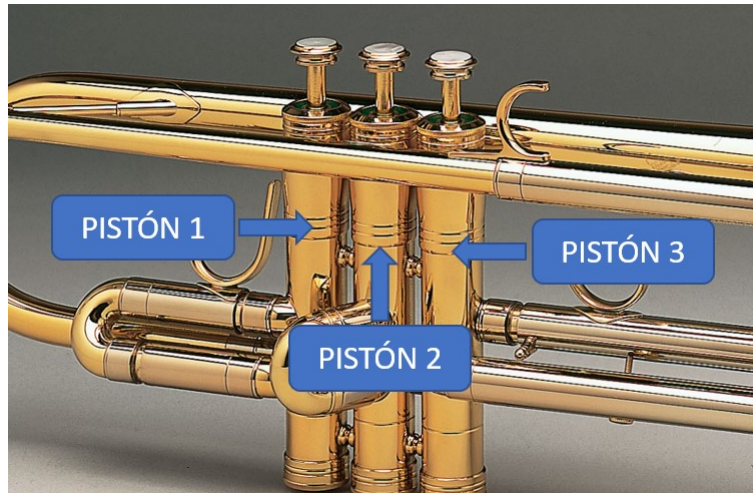


Figura 4.6: Pistones de una trompeta

Fuente: Elaboración propia

4.4 Conclusiones

Una vez explicadas las cualidades esenciales del sonido, la información que nos aportan, y cómo se generan las notas musicales en la trompeta, podemos extraer las siguientes conclusiones.

La propiedad esencial del sonido que más información nos aporta a la hora de realizar el estudio de la afinación de la trompeta es el tono, que viene determinado por la frecuencia del sonido. Debido a que la distancia en hercios que separa dos semitonos sucesivos es mayor cuanto más agudas sean las notas, recurrimos a los cents para cuantificar la desafinación de una nota, comparando el valor de la frecuencia de dicha nota medida en el instrumento con su frecuencia teórica o ideal.

La trompeta, como todos los instrumentos de viento metal, generan el sonido por medio de una vibración que se induce en la columna de aire emitida en el interior del instrumento a través de la boquilla por medio de los labios, produciéndose una onda sonora formada por una serie de armónicos que le dan al instrumento su timbre particular.

En el caso de la trompeta, existen tres pistones que añaden respectivamente tres secciones al tubo sonoro principal del instrumento. De esta forma, es posible hacer sonar todas las notas en sus diferentes registros. Las frecuencias de estas notas se denominan frecuencias de resonancia, y serán el objeto de estudio en el análisis acústico, para cuantificar en cents la desafinación de estas notas con respecto a sus frecuencias teóricas o ideales.

CAPÍTULO 5 – ESTUDIO DE LA AFINACIÓN Y PROPUESTAS DE DISEÑO

5.1 Introducción

Una vez se ha expuesto cómo se genera el sonido en la trompeta, se procede al estudio y análisis de su afinación.

Para ello, por un lado, se han tomado medidas de las frecuencias de las notas en posición al aire explicadas en el capítulo 4 en un modelo de boquilla y trompeta real. Por otro lado, se ha modelado en 3D el conjunto de boquilla y trompeta, y se ha realizado un barrido de frecuencias mediante simulaciones acústicas, para obtener las frecuencias de resonancia del modelo.

Si las frecuencias simuladas del modelo 3D y las frecuencias en la trompeta real coinciden con un margen de error pequeño, entonces el diseño habrá sido el adecuado y, de este modo, el modelo 3D quedará validado para poder ser utilizado posteriormente para el diseño de boquillas de trompeta que permitan mejorar los valores de afinación obtenidos.

Para realizar las operaciones necesarias con el fin de alcanzar el objetivo del presente trabajo, se necesitan dos softwares distintos. Por un lado, un programa de diseño CAD 3D paramétrico que permita modelar la trompeta y boquilla que se va a estudiar y, por otro lado, un software que permita la obtención de las frecuencias de resonancia de la trompeta modelada mediante simulaciones acústicas. Para el software de diseño de los modelos se ha utilizado el programa Autodesk Inventor, y para las simulaciones acústicas se ha utilizado el programa ANSYS.

5.2 Modelado 3D de trompeta y boquilla

El primer paso para realizar el estudio consiste en modelar en CAD una trompeta que se ajuste a las dimensiones de un modelo real. Para ello, se tomaron las medidas del modelo de trompeta Stomvi Zenith.

La longitud y diámetros de los tubos diseñados coinciden con los de dicho instrumento. Para su modelado únicamente se ha tenido en cuenta la posición al aire, es decir, sin apretar ningún pistón y sin añadir longitudes extras de tubos sonoros al principal, explicada en el capítulo 4.

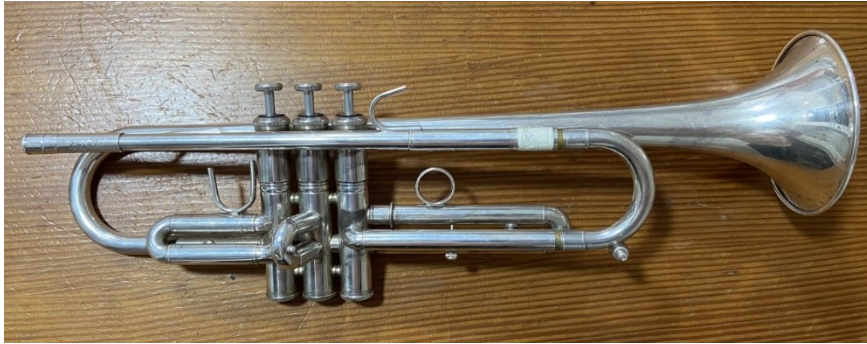


Figura 5.1: *Trompeta Stomvi Zenith*

Fuente: Elaboración propia

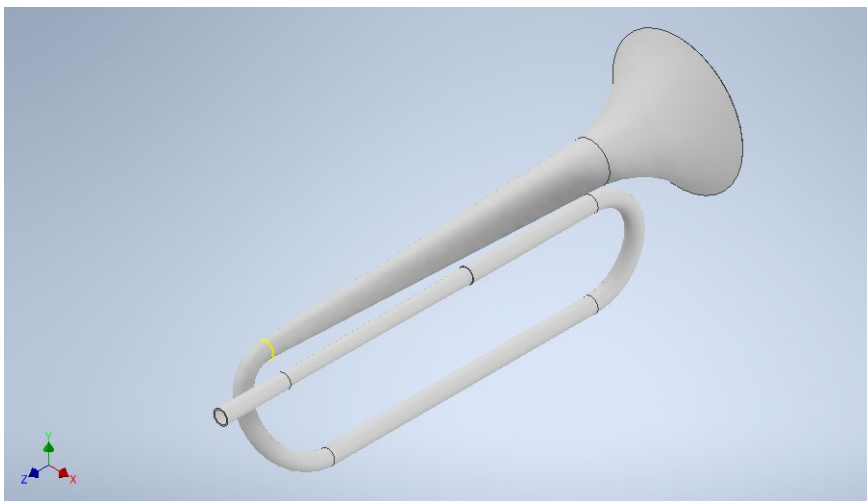


Figura 5.2: *Diseño de trompeta Stomvi Zenith en posición al aire*

Fuente: Elaboración propia

Para la boquilla se ha diseñado el modelo de boquilla Kelly 7C. Una vez diseñada, se realizó el ensamblaje para unirla a la trompeta modelada.



Figura 5.3: *Boquilla Kelly 7C*

Fuente: Elaboración propia



Figura 5.4: *Diseño de boquilla Kelly 7C*

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.1 se detallan las frecuencias teóricas de las notas que se pueden realizar en la posición al aire de la trompeta, que se corresponden con las dos octavas más empleadas por los trompetistas, desde el A#3 o Sib grave al A#5 o Sib agudo. Estas notas serán objeto de estudio en el análisis acústico.

NOTA	FRECUENCIA TEÓRICA (Hz)
Si b grave (A#3)	233,08
Fa (F4)	349,23
Si b (A#4)	466,16
Re agudo (D5)	587,33
Fa agudo (F5)	698,46
La b agudo (G#5)	830,61
Si b agudo (A#5)	932,33

Tabla 5.1: *Frecuencias teóricas de notas de la trompeta*

Fuente: Elaboración propia

5.3 Validación del modelo

Una vez diseñado el modelo de boquilla y trompeta con el programa Autodesk Inventor, se procede a utilizar el programa ANSYS para obtener las frecuencias de resonancia del modelo para su validación, comparando las frecuencias de resonancia obtenidas en las simulaciones acústicas sobre el modelo con las medidas en la trompeta real.

En primer lugar, se tomaron medidas de las frecuencias de las notas en posición al aire de la trompeta Stomvi Zenith, con un afinador que medía dichas frecuencias con una precisión de

0.1 Hz, y utilizando la boquilla de plástico Kelly 7C, obteniendo los siguientes resultados y cuantificando su desafinación con respecto a las frecuencias teóricas de dichas notas utilizando los cents, indicado en la Tabla 5.2.

NOTA	FRECUENCIA TEÓRICA (Hz)	FRECUENCIA TROMPETA (Hz)	ERROR EN CENTS
Si b grave (A#3)	233,08	235,30	17,88
Fa (F4)	349,23	333,60	78,27
Si b (A#4)	466,16	446,00	76,53
Re agudo (D5)	587,33	568,00	57,94
Fa agudo (F5)	698,46	716,00	42,94
La b agudo (G#5)	830,61	821,60	18,88
Si b agudo (A#5)	932,33	935,30	5,51

Tabla 5.2: Frecuencias de las notas en posición al aire de la trompeta Stomvi Zenith con la boquilla Kelly 7C

Fuente: Elaboración propia

Tras haber cuantificado la desafinación de cada nota medida en la trompeta real utilizando la fórmula 4.6, observamos que algunas mediciones de frecuencias de algunas notas se desvían muchos cents respecto a su frecuencia teórica o ideal, llegando en algunos casos casi a los 80 cents de error.

Esto supone una desafinación para tener en cuenta, ya que, como se explicó en el capítulo 3, un semitono, la distancia que separa dos notas diferentes consecutivas, está dividido en 100 cents. Por tanto, tener un error de casi 80 cents indica que el grado de desafinación de estas notas medidas es importante.

Una vez conseguidos los valores de las frecuencias de las notas de la trompeta real, el siguiente paso consiste en la obtención de las frecuencias de resonancia del modelo 3D.

Para ello, se ha importado el modelo a ANSYS y se han establecido las condiciones de contorno para poder realizar las simulaciones acústicas.

De la superficie interior de la boquilla debe salir un flujo de aire que simule la vibración de los labios del músico que emiten la columna de aire que recorre el tubo sonoro del instrumento. Para determinar cuál es el flujo de aire que recorre una trompeta, se ha recurrido a la bibliografía existente.

En este caso, se consultaron los estudios de M. Zicari (2013), que investigan las relaciones entre la boquilla y la calidad del sonido de una trompeta. Es estos estudios se establecen unos valores para el flujo de la columna de aire que oscilan entre 80 y 300 $\frac{ml}{s}$.

Para realizar los cálculos, se ha tomado un valor de flujo de $175 \frac{ml}{s}$ como valor de caudal de referencia, siendo este valor considerado como un valor medio aproximado, debido a que este valor varía en función de la nota tocada y de la intensidad con la que se toque.

Una vez obtenido, se introdujo el valor del flujo de aire que circulará por el interior del modelo de trompeta en forma de caudal másico. Para ello, se toma el valor de caudal de aire de $175 \frac{ml}{s}$ y se convierte a las unidades requeridas, que en este caso son $\frac{kg}{s \cdot m^2}$.

Tomando como valor de densidad del aire $1,225 \frac{kg}{m^3}$ y como sección de paso la que se obtiene con el diámetro interior del anillo de la boquilla, de valor 17 mm, obtenemos un caudal másico de $0,9284 \frac{kg}{s \cdot m^2}$.

La precisión se estableció en 0,1 Hz debido a que un error de desviación de 0,1 Hz equivale a 0,74 cents en el caso más desfavorable, que es el de la nota más grave a estudiar, el Sib grave. Este valor es muy pequeño, teniendo en cuenta que la distancia entre dos semitonos consecutivos es de 100 cents como se ha explicado anteriormente.

Las simulaciones por ordenador se utilizan ampliamente para realizar análisis y mejorar la calidad de los productos. La mayoría de estos análisis se llevan a cabo mediante el uso de softwares que utilizan el método de los elementos finitos, el cual permite obtener respuestas para numerosos problemas de ingeniería.

Además de permitir realizar análisis acústicos, este método puede ser aplicado en la resolución y diagnóstico de problemas de análisis estructural para la obtención de desplazamientos, deformaciones y tensiones, evaluar el rendimiento de productos frente a criterios de resistencia, rigidez o fatiga, o para la realización de análisis térmicos, dinámicos, electromagnéticos o de fluidos entre otros.

El método de los elementos finitos consiste en la división de la geometría de la pieza en partes más pequeñas llamadas elementos, que representan el dominio continuo de la pieza y que dividen geometrías complejas en pequeñas partes más simples.

Estas divisiones pueden tener diferentes formas, como triangular o cuadrangular entre otras, dependiendo del tipo y tamaño de la pieza. Como el número de elementos es limitado, por eso se les llama "elementos finitos".

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos llamados nodos, y al conjunto de elementos y nodos se le denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, utilizando este método numérico, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resuelven de manera exacta, sino aproximada.

La precisión de los elementos finitos depende de la cantidad de nodos, elementos, y de su tamaño. Por tanto, cuanto menor sea el tamaño de los elementos y mayor el número de elementos de una malla, más precisos serán los resultados de los análisis.

La discretización tiene que ser lo suficientemente buena y precisa como para que los resultados obtenidos sean lo más parecidos posibles a los reales. Es por esto por lo que es necesario conseguir una malla en la que se reduzca lo máximo posible el error entre los valores reales y los de la simulación. Por todos estos motivos, se ha seguido el siguiente procedimiento.

Para definir el mallado correctamente se ha creado una malla con una densidad suficiente como para lograr resultados razonables en las simulaciones con un número de elementos bajo, o lo que es lo mismo, con un tamaño de elemento grande. Tras obtener los primeros resultados, se realizaron simulaciones con una serie de mallados cada vez más densos, incrementando gradualmente la densidad del mallado y reduciendo el tamaño de elemento, y se compararon los resultados obtenidos.

Este procedimiento es el más fiable de cara a conseguir unas aproximaciones correctas a los valores reales. En total se probaron 3 mallados diferentes que se detallarán más adelante.

También es necesaria una herramienta que mida los resultados de la simulación. Para ello, se ha simulado un micrófono que obtiene los valores de los decibelios emitidos en un rango de frecuencias determinado. Este micrófono se ha situado a una distancia de 2 metros de la campana de la trompeta, distancia considerada suficiente para poder medir correctamente los resultados.

Tras haber realizado esto último, quedando establecidas todas las condiciones de contorno, se pueden realizar las primeras simulaciones.

El primer tamaño de elemento empleado para realizar las primeras simulaciones fue de 0,1 m. Con este tamaño, se ha procedido a la obtención de los resultados en el intervalo de frecuencias que se desea validar, que en nuestro caso va desde los 200 hasta los 1.000 Hz. En la Figura 5.5 puede apreciarse el detalle de la malla en la campana de la trompeta del modelo.

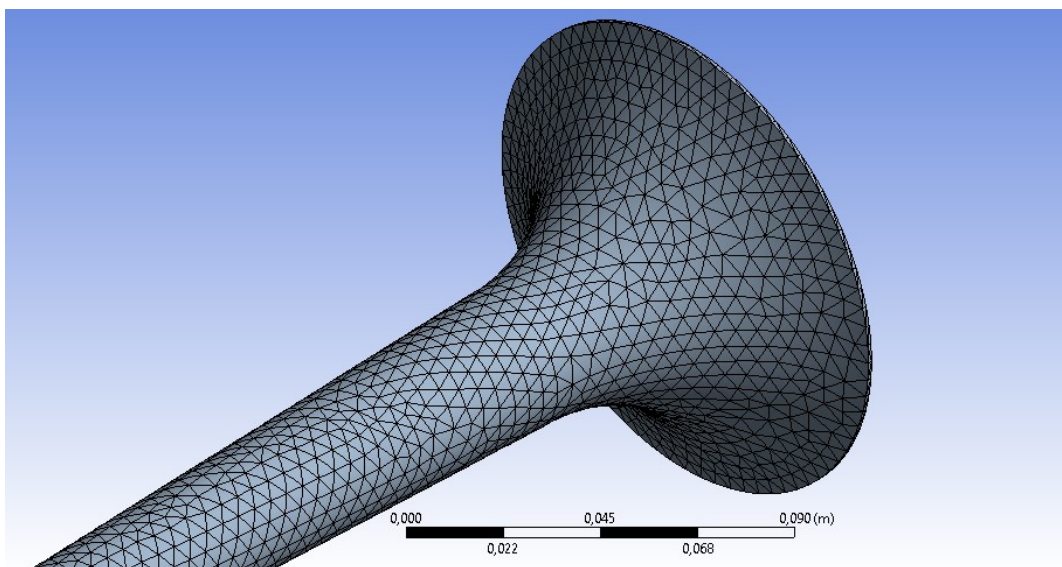


Figura 5.5: *Mallado en la campana de la trompeta*

Fuente: Elaboración propia

Tras realizar la simulación, ANSYS devuelve los resultados en forma de gráficos y de tablas. En la Figura 5.6 aparecen representados en forma de gráfica los resultados de la primera simulación con el mallado de tamaño de elemento 0,1 m. En esta gráfica aparecen en el eje vertical los valores de SPL (*Sound Pressure Level*) en dB para cada una de las frecuencias del intervalo estudiado, y en el eje horizontal aparecen representados los valores de las frecuencias de resonancia simuladas en el modelo.

Los picos que aparecen en la gráfica se corresponden con las frecuencias de resonancia de la trompeta modelada, que son aquellas frecuencias que registran un mayor nivel de SPL en la gráfica, o lo que es lo mismo, aquellas que suenan con mayor intensidad.

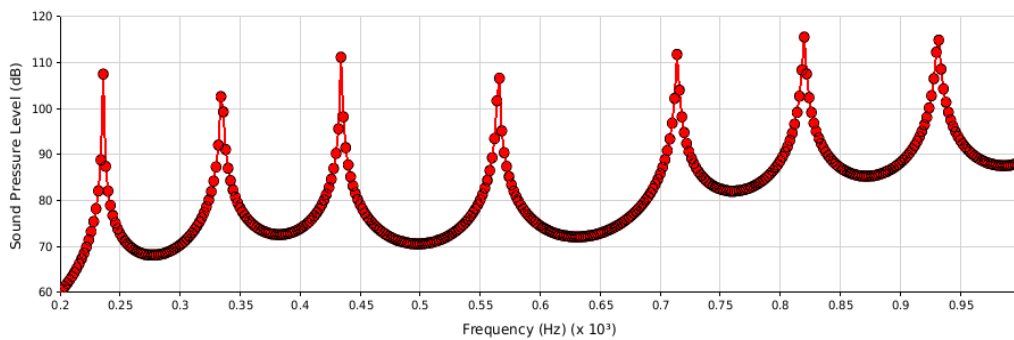


Figura 5.6: Frecuencias de resonancia del modelo trompeta + boquilla con mallado de tamaño de elemento 0,1 m

Fuente: Elaboración propia

Tras haber realizado la primera simulación con un tamaño de elemento de 0,1 m, se procede a realizar la segunda simulación con un tamaño de elemento de 0,06 m (0,04 m más pequeño que el primero). El rango de frecuencias y el resto de los parámetros se mantuvieron constantes.

Después, se redujo el tamaño de elemento para el tercer mallado hasta 0,02 m, reduciéndose en la misma proporción que del primero al segundo, 0,04 m menos, y con los mismos rangos de frecuencias y parámetros que la simulación anterior.

Se valoró disminuir el tamaño de elemento hasta 0,01 m, pero teniendo en cuenta que los resultados en los dos últimos mallados eran prácticamente idénticos, se descartó este cuarto mallado.

Los resultados de las tres simulaciones con los tres mallados descritos anteriormente se recogen en la Tabla 5.3.

NOTA	FRECUENCIA TROMPETA (Hz)	FRECUENCIA TAMAÑO DE ELEMENTO 0,1 m (Hz)	FRECUENCIA TAMAÑO DE ELEMENTO 0,06 m (Hz)	FRECUENCIA TAMAÑO DE ELEMENTO 0,02 m (Hz)
Si b grave (A#3)	235,30	235,80	235,30	235,00
Fa (F4)	333,60	334,80	333,10	333,10
Si b (A#4)	446,00	444,30	445,00	445,00
Re agudo (D5)	568,00	565,30	567,60	567,60
Fa agudo (F5)	716,00	714,30	716,60	716,60
La b agudo (G#5)	821,60	820,00	821,10	821,10
Si b agudo (A#5)	935,30	931,50	935,10	935,50

Tabla 5.3: Frecuencias de los tres mallados

Fuente: Elaboración propia

Duración de las simulaciones		
0,1 m	0,06 m	0,02 m
5 horas	6,5 horas	8 horas

Tabla 5.4: Duración de las simulaciones

Fuente: Elaboración propia

Una vez simulado el modelo de trompeta con los tres mallados, se debe decidir cuál será el tamaño de elemento idóneo a utilizar en las simulaciones posteriores.

La malla de 0,1 m simplifica demasiado la morfología de la trompeta diseñada y sus resultados son menos precisos, por lo que se descartó.

La malla de 0,02 m, exceptuando una ligera variación en los valores de las frecuencias de las notas graves y agudas, ofrece resultados prácticamente idénticos a los de la malla de 0,06 m.

Por tanto, se optó por utilizar la malla de tamaño de elemento de 0,06 m. En la Tabla 5.5 se puede observar con detalle el error entre las frecuencias medidas en la trompeta real y los valores obtenidos en la simulación con el mallado seleccionado.

NOTA	FRECUENCIA TROMPETA (Hz)	FRECUENCIA TAMAÑO DE ELEMENTO 0,06 m (Hz)	ERROR EN HZ	ERROR EN CENTS
Si b grave (A#3)	235,30	235,30	0,00	0,00
Fa (F4)	333,60	333,10	0,50	2,59
Si b (A#4)	446,00	445,00	1,00	3,88
Re agudo (D5)	568,00	567,60	0,40	1,22
Fa agudo (F5)	716,00	716,60	0,60	1,45
La b agudo (G#5)	821,60	821,10	0,50	1,05
Si b agudo (A#5)	935,30	935,10	0,20	0,37

Tabla 5.5: Valores de las frecuencias de las notas medidas en la trompeta y en la simulación con mallado de tamaño de elemento 0,06 m

Fuente: Elaboración propia

La máxima diferencia de valores que encontramos en la malla de tamaño de elemento 0,06 m se produce en el Sib (A#4) (445 Hz) y el valor de esa nota medido en la trompeta real (446 Hz).

El error entre estas frecuencias es de 3,88 cents, un error muy pequeño, teniendo en cuenta una vez más que la distancia entre dos semitonos consecutivos es de 100 cents.

Por tanto, como las mediciones de las frecuencias de la trompeta real y las obtenidas en las simulaciones acústicas son prácticamente iguales con un error muy pequeño, podemos concluir que el modelo de trompeta ha quedado validado, para poder ser utilizado en futuras simulaciones con las condiciones de contorno establecidas.

5.4 Propuestas de diseño

Tras haber validado el modelo de trompeta diseñado, se han propuesto diseños de boquilla de trompeta que mejoren los resultados de los valores de frecuencias de resonancia obtenidos en las simulaciones acústicas.

Para conseguir estos diseños, se realizaron una serie de pruebas y modificaciones de la geometría de la boquilla original. Es decir, el diseño inicial fue modificado varias veces hasta conseguir que los resultados arrojaran unos valores más afinados para las frecuencias de resonancia estudiadas. De todas las pruebas y simulaciones realizadas, finalmente se han seleccionado tres diseños de boquillas, los que mejores resultados han ofrecido en las simulaciones acústicas, de cara a mejorar los valores de afinación obtenidos en el modelo original. En cuanto a la geometría elegida, se han tenido en cuenta los parámetros geométricos

de la copa y el granillo, descritos en el capítulo 3. El diámetro interno de la boquilla se ha mantenido constante.

La primera boquilla ha sido diseñada con copa en forma de U, con un diámetro de copa menor y con un granillo ligeramente más estrecho, para mejorar el registro agudo.

La segunda boquilla ha sido diseñada con copa en forma de V, con un diámetro de copa mayor y un granillo un poco más ancho, para mejorar el registro medio y grave.

La tercera boquilla ha sido diseñada con una geometría de copa intermedia entre U y V, con un diámetro de copa intermedio y con el diámetro de granillo del prototipo 2, para mejorar proporcionalmente todos los registros.

Las propuestas de diseño de boquillas de trompeta se describen a continuación, adjuntando una figura con una vista seccionada del diseño, sus parámetros geométricos, y una tabla indicando los valores de las frecuencias de resonancia obtenidas en el modelo utilizando el diseño nuevo de boquilla, junto al error en cents de desafinación de las frecuencias obtenidas respecto a la frecuencia teórica de cada nota.

5.5 Diseño de boquilla de trompeta 1

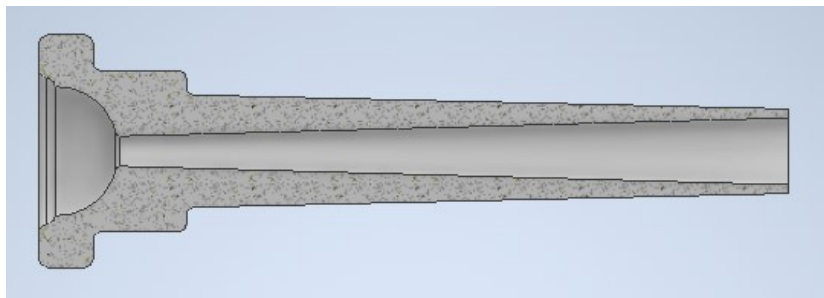


Figura 5.7: *Diseño de boquilla de trompeta 1*

Fuente: Elaboración propia

Parámetros geométricos

- Longitud: 87 mm
- Diámetro interior del anillo: 8,5 mm
- Ancho del anillo: 5 mm
- Forma de la copa: U
- Diámetro de la copa: 7 mm
- Diámetro del granillo: 3,5 mm

NOTA	FRECUENCIA TEÓRICA (Hz)	FRECUENCIA DISEÑO 1 (Hz)	ERROR EN CENTS
Si b grave (A#3)	233,08	237,5	32,52
Fa (F4)	349,23	339,3	49,94
Si b (A#4)	466,16	450,8	58,00
Re agudo (D5)	587,33	575,1	36,43
Fa agudo (F5)	698,46	705,3	16,87
La b agudo (G#5)	830,61	825,8	10,05
Si b agudo (A#5)	932,33	932,4	0,13

Tabla 5.6: Resultados de la simulación con el diseño de boquilla de trompeta 1

Fuente: Elaboración propia

5.6 Diseño de boquilla de trompeta 2

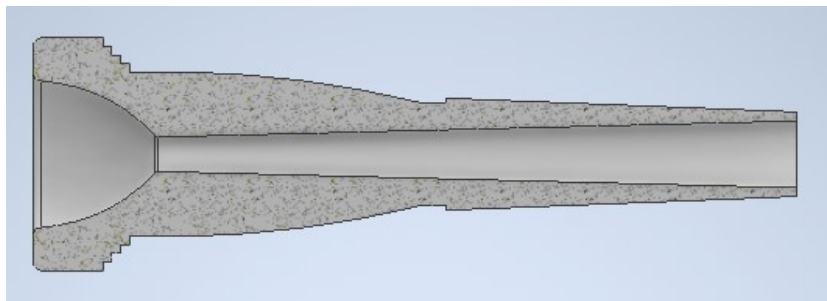


Figura 5.8: Diseño de boquilla de trompeta 2

Fuente: Elaboración propia

Parámetros geométricos

- Longitud: 87 mm
- Diámetro interior del anillo: 8,5 mm
- Ancho del anillo: 5 mm
- Forma de la copa: V
- Diámetro de la copa: 18 mm
- Diámetro del granillo: 4 mm

NOTA	FRECUENCIA TEÓRICA (Hz)	FRECUENCIA DISEÑO 2 (Hz)	ERROR EN CENTS
Si b grave (A#3)	233,08	234,2	8,29
Fa(F4)	349,23	342,5	33,68
Si b(A#4)	466,16	456,8	35,11
Re agudo (D5)	587,33	578,0	27,72
Fa agudo (F5)	698,46	715,6	41,97
La b agudo (G#5)	830,61	818,6	25,21
Si b agudo (A#5)	932,33	936,6	7,91

Tabla 5.7: Resultados de la simulación con el diseño de boquilla de trompeta 2

Fuente: Elaboración propia

5.7 Diseño de boquilla de trompeta 3

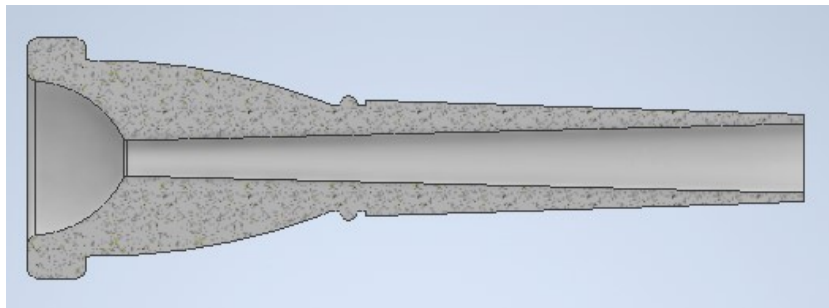


Figura 5.9: Diseño de boquilla de trompeta 3

Fuente: Elaboración propia

Parámetros geométricos

- Longitud: 87 mm
- Diámetro interior del anillo: 8,5 mm
- Ancho del anillo: 5 mm
- Forma de la copa: Intermedia
- Diámetro de la copa: 12 mm
- Diámetro del granillo: 4 mm

NOTA	FRECUENCIA TEÓRICA (Hz)	FRECUENCIA DISEÑO 3 (Hz)	ERROR EN CENTS
Si b grave (A#3)	233,08	234,0	6,82
Fa(F4)	349,23	340,0	46,37
Si b(A#4)	466,16	454,9	42,33
Re agudo (D5)	587,33	575,7	34,62
Fa agudo (F5)	698,46	710,4	29,34
La b agudo (G#5)	830,61	822,1	17,83
Si b agudo (A#5)	932,33	935,0	4,95

Tabla 5.8: Resultados de la simulación con el diseño de boquilla de trompeta 3

Fuente: Elaboración propia

Tras haber obtenido las frecuencias de resonancia del modelo utilizando los diseños de boquilla, se han comparado los errores de afinación obtenidos con cada uno de los diseños, para comprobar en qué grado la afinación ha mejorado con respecto al modelo original.

NOTA	ERROR EN CENTS TROMPETA REAL	ERROR EN CENTS DISEÑO 1	ERROR EN CENTS DISEÑO 2	ERROR EN CENTS DISEÑO 3
Si b grave (A#3)	17,88	32,52	8,29	6,82
Fa (F4)	78,27	49,94	33,68	46,37
Si b (A#4)	76,53	58,00	35,11	42,33
Re agudo (D5)	57,94	36,43	27,72	34,62
Fa agudo (F5)	42,94	16,87	41,97	29,34
La b agudo (G#5)	18,88	10,05	25,21	17,83
Si b agudo (A#5)	5,51	0,13	7,91	4,95

Tabla 5.9: Comparación de los errores en cents de las frecuencias de las notas medidas en la trompeta y con los diseños de boquilla

Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados se concluye que el diseño de boquilla 3 es la que mejor afinación ofrece. Todos los valores de las frecuencias de las notas utilizando este diseño presentan unos valores de afinación mejores respecto a los valores obtenidos con el modelo original.

A pesar de que el diseño de copa en V del prototipo de boquilla 2 mejora en mayor medida la afinación en el rango de notas medio y grave, lo hace a costa de empeorar ligeramente el registro agudo.

Por otra parte, el prototipo de boquilla 1 con copa en forma de U ofrece mejores valores de afinación especialmente en el registro agudo. Este modelo de boquillas podría ser el más apropiado si se desea tocar música en unos registros que sean especialmente agudos, ya que el registro grave y medio también lo mejora, pero en menor medida que los diseños de boquillas 2 y 3 por la forma de la copa que presenta, y con la excepción del Sib grave, cuya frecuencia empeora respecto al modelo original.

Por tanto, el diseño de boquilla 3, de copa intermedia, ofrece mejores resultados en comparación con los otros dos diseños, ya que mejora compensatoriamente todas las notas analizadas en sus diferentes registros, a pesar de que esta mejora general se produce a costa de perder un poco de afinación en registro grave y medio.

5.8 Conclusiones

Tras haber analizado los resultados obtenidos en las simulaciones y en los diseños de boquillas de trompeta, podemos obtener las siguientes conclusiones.

Los valores de las frecuencias obtenidos en las simulaciones se aproximan lo suficiente a los valores medidos en la trompeta real como para dar por validado el modelo de trompeta diseñado.

Observando los resultados obtenidos en las medidas de las frecuencias de las notas y observando el nivel de desafinación del modelo de trompeta validado, se ha obtenido una idea más o menos aproximada de las necesidades que deben centrar el diseño de boquillas, con tal de mejorar los valores obtenidos en las simulaciones, así como de las medidas de los parámetros que definan estos diseños y las partes que definan su geometría.

Partiendo de esta base, se han seleccionado tres diseños de boquillas de trompeta de entre todos los probados, los que mejores resultados han proporcionado, para imprimirse en plástico mediante la impresión 3D. Modificando diferentes formas de copa y diámetros de granillo, se han obtenido tres modelos que ofrecen una buena respuesta en las mediciones del parámetro de estudio: la afinación. Además, uno de los diseños mejora la afinación de todas las notas, y los otros dos modelos se pueden considerar competitivos.

Para finalizar, el hecho de haber conseguido diseños de boquillas que mejoran los valores de afinación de un modelo de boquilla de plástico existente en el mercado confirma que la línea de innovación del presente trabajo es factible.

CAPÍTULO 6 – IMPRESIÓN 3D DE BOQUILLAS DE TROMPETA

6.1 Introducción

Tras haber estudiado la afinación de la trompeta y haber diseñado los modelos de boquilla de trompeta en el capítulo anterior, se procede a la fabricación de estos diseños de boquilla utilizando la tecnología de impresión 3D, para probarlos posteriormente en una trompeta real, medir los valores de las frecuencias de las notas estudiadas con un afinador, y corroborar que los valores de frecuencias obtenidos en las simulaciones coinciden con los reales.

6.2 Impresión 3D y otros procesos de fabricación con plástico

La impresión 3D, también denominada *fabricación aditiva*, es una familia de procesos que genera objetos añadiendo material a las capas que corresponden a secciones transversales sucesivas de un modelo 3D a partir de un archivo digital. Es un método de fabricación y prototipado rápido, ampliamente utilizado en la industria desde hace más de 20 años. Las aleaciones de plástico y metal son los materiales más utilizados para la impresión 3D.

Según explica Emily Suzuki (2021), dentro de la producción de piezas de plástico, dos de las tecnologías más importantes del mundo industrial son la impresión 3D y el moldeo por inyección. Hoy en día, ambas son herramientas esenciales para los diseñadores e ingenieros, y son tecnologías que se utilizan para desarrollar una gran variedad de productos. Sin embargo, a pesar de compartir algunas similitudes, estos procesos difieren en aspectos claves.

En general, en la impresión 3D existen múltiples metodologías, tipos de equipo y aplicaciones de software asociadas que agilizan mucho el proceso de fabricación, y que han hecho que se vuelva cada vez más popular entre los usuarios, sobre todo a la hora de producir productos más pequeños o de bajo volumen. Su precio es mucho menor que el de otras máquinas empujadas en la fabricación de piezas de plástico, y por ello los diseñadores cada vez más recurren a la impresión 3D para la fabricación de prototipos.

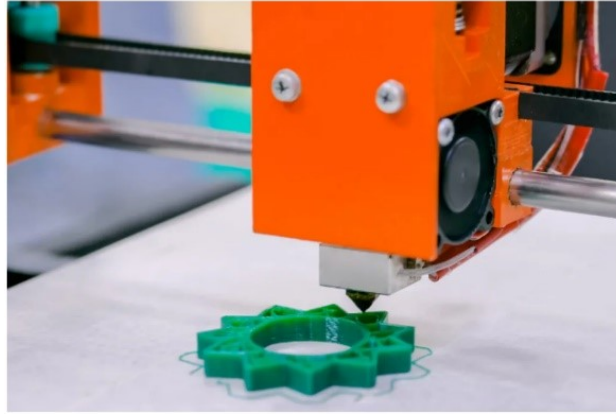


Figura 6.1: *Impresora 3D*

Fuente: Fusion 360 Blog

Por otra parte, la tecnología de moldeo por inyección se encuentra fundamentalmente en el ámbito de la fabricación a gran escala, ya que las máquinas y sus componentes son más grandes. El moldeo por inyección permite la creación de componentes con el máximo nivel de precisión. La producción final de productos es una aplicación más adecuada para el moldeo por inyección, y en ella se pueden fabricar grandes lotes de piezas de todos los tamaños y complejidades. La producción de lotes de alto volumen es más fácil con el moldeo por inyección debido a que los moldes son duplicables y producen resultados consistentes.



Figura 6.2: *Máquina de moldeo por inyección*

Fuente: Fusion 360 Blog

Por tanto, tanto la impresión 3D como el moldeo por inyección son soluciones ideales para diferentes ámbitos dentro de los procesos de fabricación. La impresión 3D está más enfocada a la producción de prototipos y piezas pequeñas o pequeños lotes de piezas, mientras que la inyección por moldeo se enfoca más hacia la producción masiva de grandes lotes de piezas de todos los tamaños y complejidades.

6.3 Impresión 3D de los diseños de boquilla de trompeta

Las boquillas de plástico para trompeta y demás instrumentos de viento metal se fabrican principalmente por moldeo por inyección, pero recientemente la impresión 3D se ha ido instaurando como método alternativo para su fabricación. Debido a la novedad y fácil acceso que supone poder utilizar esta tecnología, se decidió utilizar este método de fabricación para fabricar en plástico los diseños de boquilla expuestos en el capítulo 5.

Para ello, se empleó una impresora 3D modelo Prusa i3 MK3S+, y como material se empleó filamento de polímero ácido poliláctico o PLA de 1.75 mm de color morado.

Los resultados de las impresiones se exponen en las siguientes imágenes:



Figura 6.3: *Diseño de boquilla de trompeta 1 impresa en impresora 3D*

Fuente: Elaboración propia



Figura 6.4: *Diseño de boquilla de trompeta 2 impresa en impresora 3D*

Fuente: Elaboración propia



Figura 6.5: *Diseño de boquilla de trompeta 3 impresa en impresora 3D*

Fuente: Elaboración propia

Tras haber impreso los tres diseños de boquilla, se realizaron sobre éstas un lijado como operación de acabado superficial, para corregir las pequeñas imperfecciones que se habían producido a causa de la impresión.

A continuación, se procede a la medición de las notas estudiadas en las simulaciones con el modelo de trompeta real utilizado, usando como boquillas los diseños impresos, y a la comparación de dichas mediciones en la trompeta real con las obtenidas en las simulaciones.

NOTA	FRECUENCIA SIMULACIÓN DISEÑO 1 (Hz)	FRECUENCIA REAL DISEÑO 1 (Hz)	ERROR EN CENTS
Si b grave (A#3)	237,5	235,2	3,64
Fa (F4)	339,3	340,0	3,57
Si b (A#4)	450,8	451,5	2,68
Re agudo (D5)	575,1	575,7	1,80
Fa agudo (F5)	705,3	704,1	2,94
La b agudo (G#5)	825,8	823,6	4,61
Si b agudo (A#5)	932,4	933,1	3,52

Tabla 6.1: *Comparación de frecuencias obtenidas con el diseño de boquilla de trompeta 1*

Fuente: Elaboración propia

NOTA	FRECUENCIA SIMULACIÓN DISEÑO 2 (Hz)	FRECUENCIA REAL DISEÑO 2 (Hz)	ERROR EN CENTS
Si b grave (A#3)	234,2	234,0	1,47
Fa (F4)	343,5	343,0	2,52
Si b (A#4)	458,8	458,5	1,13
Re agudo (D5)	578,0	579,2	3,59
Fa agudo (F5)	710,6	709,2	3,41
La b agudo (G#5)	820,6	822,0	2,95
Si b agudo (A#5)	936,6	938,1	2,77

Tabla 6.2: Comparación de frecuencias obtenidas con el diseño de boquilla de trompeta 2

Fuente: Elaboración propia

NOTA	FRECUENCIA SIMULACIÓN DISEÑO 3 (Hz)	FRECUENCIA REAL DISEÑO 3 (Hz)	ERROR EN CENTS
Si b grave (A#3)	234,2	233,7	3,70
Fa (F4)	340,0	340,6	3,05
Si b (A#4)	454,9	455,0	0,38
Re agudo (D5)	575,7	575,2	1,50
Fa agudo (F5)	710,4	710,0	0,97
La b agudo (G#5)	822,1	820,5	3,37
Si b agudo (A#5)	935,0	936,2	2,22

Tabla 6.3: Comparación de frecuencias obtenidas con el diseño de boquilla de trompeta 3

Fuente: Elaboración propia

Observando los resultados de las mediciones y comparando los valores de frecuencias obtenidos, vemos que los valores de las frecuencias medidas con el modelo de trompeta real utilizando las boquillas impresas han dado unos resultados muy parecidos a los de las simulaciones, con un margen de error muy pequeño, por debajo de los 5 cents.

Por tanto, todos los procedimientos del presente trabajo se han realizado de manera correcta, y se han conseguido tres modelos de boquilla de trompeta que mejoran la afinación del instrumento en los registros musicales estudiados.

6.4 Conclusiones

La impresión 3D es un proceso de fabricación moderno, implantado en el mercado desde hace poco tiempo, y que está enfocado sobre todo a la producción de prototipos, a diferencia de otras tecnologías de fabricación de plásticos como el moldeo por inyección, enfocado más hacia la producción masiva de grandes lotes de piezas de todos los tamaños y complejidades.

Utilizando esta tecnología de impresión 3D, se han fabricado los tres diseños de boquilla de trompeta propuestos para mejorar la afinación del instrumento en las simulaciones acústicas anteriores.

Comparando los valores obtenidos en las simulaciones con los diseños de boquilla con los medidos en la trompeta real utilizando los diseños de boquilla impresos en plástico, se concluye que el procedimiento del presente trabajo se ha realizado correctamente, debido a que todos los valores de frecuencias han coincidido entre si con un margen de error en cents muy pequeño.

Los tres diseños de boquilla han cumplido los objetivos de mejorar los diferentes registros de notas musicales para los cuales estaban diseñados, mejorando de este modo la afinación de la trompeta.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSIONES

7.1 Grado de cumplimiento del objetivo

La realización del presente trabajo surge de la necesidad de mejorar los problemas de afinación existentes en la trompeta a través de la boquilla como pieza clave en la afinación del instrumento, pero también de la motivación personal que suponía para su autor, como músico de viento metal que toca la trompeta y la trompa, el hecho de poder juntar dos de sus pasiones, la ingeniería y la música, en la elaboración de su trabajo de fin de grado.

En este contexto, se ha propuesto un método alternativo para el estudio de los instrumentos musicales, sin la necesidad de tener que fabricarlos, donde se ha estudiado la afinación de la trompeta mediante simulaciones acústicas para, finalmente, proponer tres propuestas de mejora para su boquilla basadas en su geometría para ayudar a mejorar la afinación del instrumento.

Tras obtener unos resultados en las simulaciones que arrojaban una mejora en la afinación, se imprimieron los diseños utilizando la tecnología de impresión 3D y se comprobó en una trompeta real que los valores de afinación obtenidos en las simulaciones coinciden con los reales.

De este modo, se ha demostrado exitosamente que es posible aplicar conceptos y herramientas del ámbito de la ingeniería en el ámbito de la música y de los instrumentos musicales para contribuir a mejorar lo existente, consiguiendo de este modo cumplir el objetivo del presente trabajo: mejorar la afinación de la trompeta, utilizando diferentes herramientas del ámbito de la ingeniería.

CAPÍTULO 8 – BIBLIOGRAFÍA

ARTÍCULOS MENCIONADOS EN EL TEXTO

1. A. Tamir, Francisco Ruiz Beviá (2007), *“Ciencia y arte: el sonido”*, University of Negev, Universidad de Alicante.
2. María Quintanilla (2009), *“Análisis armónico: el Teorema de Fourier”*, Blogger de Acústica Musical.
3. Vicente Pastor (2009), *“Introducción a la acústica de los instrumentos de viento-metal”*. Revista de Acústica de la Sociedad Española de Acústica, nº 40.
4. M Zicari, J. Macritchie, L. Ghirlanda, A. Vanchieri, D. Mntorfano, M. C. Barbato, E. Soldini (2013), *“Trumpet mouthpiece manufacturing and tone quality”*, Universidad de Ciencias Aplicadas y Artes del Sur de Suiza.
5. Emily Suzuki (2021), *“3D Printing vs. Injection Molding: What You Need to Know”*, Fusion360 Blog

OTROS ARTÍCULOS CONSULTADOS

- N. Giordano (2018), *“Physical modeling of a conical lip reed instrument”*, The Journal of the Acoustical Society of America 143, 38
- Robin Tournemenne, Jean-François Petiot, Bastien Talgorn, Joël Gilbert, Michael Kokkolaras (2019), *“Sound simulation-based design optimization of brass wind instruments”*, The Journal of the Acoustical Society of America 145, 3795
- Kees H Woldendorp , Hans Boschma, Anne M Boonstra, Hans J Arendzen, Michiel F Reneman (2016), *“Fundamentals of Embouchure in Brass Players: Towards a Definition and Clinical Assessment”*, Medical Problems Of Performing Artists
- Saranya Balasubramanian, Vasileios Chatziioannou, Wilfried Kausel (2019), *“Analysis of Axisymmetric Structural Vibrations in Brass Instruments”*, Acta Acustica united with Acustica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

PRESUPUESTO

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. Introducción	2
2. Distribución temporal por fases.....	2
3. Precios unitarios.....	3
4. Mediciones y presupuesto parcial	6
6. Presupuesto total	8

1. Introducción

En todo proyecto de ingeniería es necesario valorar económicamente los recursos empleados.

En el presente presupuesto se valora el hardware y software empleado, así como los honorarios correspondientes al autor del trabajo y al tutor. Además, se incluyen los costes del equipo y material necesario para la fabricación de las boquillas de trompeta mediante impresión 3D.

2. Distribución temporal por fases

En primer lugar, se cuantificarán las horas empleadas para la realización de cada una de las fases del proyecto.

FASES	TIEMPO (h)
Definición de los objetivos y organización del proyecto	10
Búsqueda de información	50
Realización de la encuesta y análisis de la información	50
Estudio de mercado y patentes	20
Diseño y validación del modelo	100
Diseño de boquillas	80
Fabricación de las boquillas en impresión 3D	3
Pruebas y mediciones	1
Elaboración de los planos	20

Redacción de la memoria	80
Impresión y encuadernado de los documentos	1
Tutorías para revisión de avances y revisión de dudas	80
TOTAL	495

3. Precios unitarios

En este apartado del presupuesto, se expondrán a partir de cuadros de precios las diferentes tareas necesarias para la elaboración del proyecto.

Debido a que el autor del presente trabajo es un estudiante de grado y no un profesional, se estimará para su salario un valor de 25€ la hora y, a su vez, al tutor, al ser ingeniero industrial, se le asignará un valor de 50€ la hora.

Como para la elaboración del presente trabajo se ha requerido del empleo de software, y teniendo en cuenta que el plazo de realización del trabajo son 3 meses, se contabiliza un 25% del precio estimado para una licencia anual de cada uno de los programas: Autodesk Inventor, ANSYS y Microsoft Office. También se ha incluido el coste de adquirir una impresora 3D, los materiales de fabricación de las boquillas, y unos costes directos complementarios del 2% donde se incluyen gastos como la electricidad, internet, etc.

Además, se introduce un apartado destinado a contabilizar el coste de las mejoras del equipo informático. Se considera que la inversión se amortiza en un año, y se contabiliza el gasto correspondiente a un período de 3 meses.

CUADROS DE PRECIOS 1: Trabajo previo

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	RDTO.	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)
1.1	Definición de los objetivos y organización del proyecto: búsqueda y planteamiento de los principales problemas de afinación de la trompeta				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50
1.2	Búsqueda de información: investigación acerca de las boquillas de trompeta, de las trompetas, y de la generación del sonido en la trompeta				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50

				Coste total	25,50
1.3	Realización de la encuesta y análisis de la información: elaboración de la encuesta, obtención y análisis de los resultados				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50
1.4	Estudio de mercado y patentes: búsqueda de empresas competidoras y de patentes relacionadas con el producto				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50

CUADROS DE PRECIOS 2: Diseño de boquillas de trompeta

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	RDTO.	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)
2.1	Diseño y validación del modelo: diseño de la trompeta y validación del modelo a partir de los programas requeridos mediante simulaciones acústicas				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50
2.2	Diseño de boquillas: diseño de prototipos de boquillas de trompeta que mejoren los resultados obtenidos en las simulaciones acústicas				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50
2.3	Equipamiento informático: hardware y licencias de software				
	Año	Mejoras en el equipo informático	1	200	200
	Año	Licencia Autodesk Inventor	1	3000	3000
	Año	Licencia Microsoft Office 365 Personal	1	69	69
	Año	Licencia ANSYS Workbench 17.0	1	26400	26400
	%	Costes directos complementarios	0,02	29669	593,38
				Coste total	30262,38

CUADROS DE PRECIOS 3: Fabricación de boquillas de trompeta

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	RDTO.	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)
3.1	Impresora 3D: modelo de impresora 3D				
	Ud.	Impresora 3D Original Prusa i3 MK3S+	1	850	850
				Coste total	850
3.2	Material de fabricación: bobina de plástico para la impresora 3D				
	g	Filamento de PLA 1.75 mm color morado	1	0,023	0,023
				Coste total	0,023
3.3	Fabricación de las boquillas en impresión 3D: fabricación de los prototipos de boquillas de trompeta mediante impresión 3D				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50
3.4	Pruebas y mediciones: pruebas de los prototipos de las boquillas fabricadas y comprobaciones de calidad y de afinación				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50

CUADROS DE PRECIOS 4: Planos

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	RDTO.	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)
4.1	Elaboración de los planos: confección de los planos de los prototipos de boquillas de trompeta diseñadas				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50

CUADROS DE PRECIOS 5: Memoria

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	RDTO.	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)
5.1	Memoria: redacción de la memoria del trabajo				
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	25	0,50
				Coste total	25,50

CUADROS DE PRECIOS 6: Impresión y encuadernado

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	RDTO.	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)
6.1	Impresión y encuadernado de los documentos: impresión y encuadernado de todos los documentos del trabajo				
	Ud.	Impresión y encuadernado	1	10	10
	%	Costes directos complementarios	0,02	10	0,2
				Coste total	10,20

CUADROS DE PRECIOS 7: Participación del tutor

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	RDTO.	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)
7.1	Tutorías para revisión de avances y resolución de dudas: tutorías presenciales o a través de Microsoft Teams, con el fin de guiar y ayudar al autor del TFG, revisar su trabajo y resolver dudas				
	h	Ingeniero Industrial	1	50	50
	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	1	25	25
	%	Costes directos complementarios	0,02	75	1,50
				Coste total	76,50

4. Mediciones y presupuesto parcial

Una vez calculados todos los precios unitarios, se han analizado las mediciones y presupuestos correspondientes para cada capítulo para, finalmente, obtener el coste total del presupuesto.

CAPÍTULO 1: Trabajo previo

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE (€)
1.1	h	Definición de los objetivos y organización del proyecto	25,50	10	255
1.2	h	Búsqueda de información	25,50	50	1275
1.3	h	Realización de la encuesta y análisis de la información	25,50	50	1275
1.4	h	Estudio de mercado y patentes	25,50	20	510
				Coste total	3315

CAPÍTULO 2: Diseño de boquillas de trompeta

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE (€)
2.1	h	Diseño y validación del modelo	25,50	100	2550
2.2	h	Diseño de boquillas	25,50	80	2040
2.3	Ud.	Equipamiento informático	30262,38	0,25	7565,60
				Coste total	12155,60

CAPÍTULO 3: Fabricación de boquillas de trompeta

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE (€)
3.1	Ud.	Impresora 3D	850	1	850
3.2	g	Material de fabricación	0,023	30	0,69
3.3	h	Fabricación de las boquillas en impresión 3D	25,50	3	76,50
3.4	h	Pruebas y mediciones	25,50	1	25,50
				Coste total	952,69

CAPÍTULO 4: Planos

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE (€)
4.1	h	Elaboración de los planos	25,50	20	510
				Coste total	510

CAPÍTULO 5: Memoria

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE (€)
5.1	h	Redacción de la memoria	25,50	80	2040
				Coste total	2040

CAPÍTULO 6: Impresión y encuadernado

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE (€)
6.1	h	Impresión y encuadernado de los documentos	10,20	1	10,20
				Coste total	10,20

CAPÍTULO 7: Participación del tutor

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	MEDICIÓN	IMPORTE (€)
7.1	h	Tutorías para revisión de avances y resolución de dudas	76,50	80	6120
				Coste total	6120

6. Presupuesto total

PRESUPUESTO TOTAL	IMPORTE (€)
Capítulo 1: Trabajo previo	3315
Capítulo 2: Diseño de boquillas de trompeta	12155,60
Capítulo 3: Fabricación de boquillas de trompeta	952,69
Capítulo 4: Planos	510
Capítulo 5: Memoria	2040
Capítulo 6: Impresión y encuadernado	10,20
Capítulo 7: Participación del tutor	6120
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	25103,49

13% GASTOS GENERALES	3263,45
6% BENEFICIO INDUSTRIAL	1506,21
TOTAL, PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	29873,15
21% IVA	6273,36
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	36146,51

Asciende el presupuesto base de licitación a la expresada cantidad de **TREINTA Y SEIS MIL CIENTO CUARENTA Y SEIS CON CINCUENTA Y UN CÉNTIMOS.**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

PLANOS

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1: Prototipo de boquilla de trompeta 1	
Plano 2: Prototipo de boquilla de trompeta 2	
Plano 3: Prototipo de boquilla de trompeta 3	

