



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Guillermo Azuara de Pablo

05 PROYECTO FIN DE CARRERA

INDUSTRIALES

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA ACÚSTICA DE LA BOQUILLA DEL SAXOFÓN Y FABRICACIÓN SEGÚN CARACTERÍSTICAS

SEPTIEMBRE 2016

Guillermo Azuara de Pablo

DIRECTOR DEL PROYECTO:

Julio Muñoz García

PROYECTO FIN DE CARRERA
PARA LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL



POLITÉCNICA

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	4
2.	OBJETIVOS	5
3.	ESTADO DEL ARTE.....	6
3.1.	EL SONIDO.....	6
3.1.1.	MAGNITUDES FÍSICAS DEL SONIDO. ONDA SONORA.....	6
3.1.2.	LAS NOTAS MUSICALES. EL SISTEMA TEMPERADO.....	7
3.1.3.	EL TIMBRE.....	9
3.1.4.	LA SERIE ARMÓNICA.....	10
3.2.	EL SAXOFÓN	12
3.2.1.	CARACTERÍSTICAS DEL SAXOFÓN	13
3.2.2.	MATERIALES DEL SAXOFÓN.....	14
3.2.3.	TIPOS DE SAXOFÓN	15
3.2.4.	DIGITACIÓN, REGISTRO Y PRODUCCIÓN DEL SONIDO EN EL SAXOFÓN ..	16
3.3.	COMPONENTES DEL SAXOFÓN.....	21
3.3.1.	FABRICACIÓN ACTUAL DEL SAXOFÓN Y SUS COMPONENTES	22
3.3.2.	LA CAÑA.....	22
3.3.3.	LA BOQUILLA	24
3.4.	TÉCNICAS DE FABRICACIÓN POR ADICIÓN	27
3.4.1.	LA IMPRESIÓN 3D	27
3.4.2.	LA ESTEREOLITOGRAFÍA	30
4.	DESARROLLO Y RESULTADOS	33
4.1.	ANÁLISIS MODAL	34
4.1.1.	OBJETO DEL ANÁLISIS MODAL.....	34
4.1.2.	PRODUCCIÓN DE VIBRACIONES EN LA CAÑA.....	35
4.1.3.	FRECUENCIAS NATURALES DE LAS CAÑAS (ANÁLISIS TEÓRICO).....	35
4.1.4.	MODOS DE VIBRACIÓN DE LAS CAÑAS (MEF).....	39
4.1.5.	RESULTADOS NUMÉRICOS.....	41
4.2.	ANÁLISIS FRECUENCIAL.....	44
4.2.1.	MÉTODO Y FRECUENCIAS DE GRABACIÓN.....	47
4.2.2.	ANÁLISIS FRECUENCIAL PARA BOQUILLAS COMERCIALES.....	48

4.2.3.	ANÁLISIS FRECUENCIAL PARA BOQUILLAS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN PROPIOS. ESTUDIO DE INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS	59
4.2.4.	CONTRASTE DE RESULTADOS	122
5.	CONCLUSIONES.....	128
6.	LÍNEAS FUTURAS.....	130
7.	PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO	131
7.1.	PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	131
7.2.	PRESUPUESTO DEL PROYECTO	134
7.2.1.	COSTES DE FABRICACIÓN DE LAS BOQUILLAS.....	134
7.2.2.	PRESUPUESTO FINAL DEL PROYECTO.....	136
8.	BIBLIOGRAFÍA	137
9.	ANEXOS.....	139
9.1.	ESTUDIO CON CFD	139
9.1.1.	TIPO DE TECHO EN LA CÁMARA.	141
9.1.2.	COLOCACIÓN DE LA GARGANTA	142
9.1.3.	ABERTURA.....	143
9.1.4.	ANCHURA DE LA CÁMARA	144
9.1.5.	LONGITUD DE LA CÁMARA	145
9.1.6.	POSICIÓN DE LA TABLA.....	146
9.1.7.	TIPO DE GARGANTA.....	147
9.1.8.	IMÁGENES DEL ESTUDIO CFD	148
9.2.	CÓDIGO DE MATLAB	150
9.3.	RELACIÓN DE LAS BOQUILLAS UTILIZADAS EN CADA ESTUDIO SEGÚN SU DENOMINACIÓN.....	151
9.4.	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS BOQUILLAS FABRICADAS	152
9.5.	VARIACIÓN EN LA ESTRUCTURA ARMÓNICA CON EL REGISTRO DEL INSTRUMENTO	153
9.6.	PLANOS	154
10.	ÍNDICE DE ELEMENTOS.....	156
10.1.	ÍNDICE DE TABLAS	156
10.2.	ÍNDICE DE FIGURAS	159
10.3.	ÍNDICE DE GRÁFICOS	161

1. INTRODUCCIÓN

El mundo de la música, sus medios y su interpretación, ha sido históricamente obviado por la ciencia. Si bien sí se ha demostrado la ciencia acústica, no se ha profundizado en el ámbito de la influencia en cada instrumento de dichos parámetros acústicos.

Por esta razón, la música es un ámbito principalmente artesanal, en el que las cualidades de cada instrumento o accesorio dependen principalmente de la habilidad manual del artesano.

Por tanto, la ingeniería mecánica y, dentro de esta rama, la ingeniería acústica, no ha profundizado en exceso en la demostración de muchas cualidades de los sonidos. Una de estas cualidades, y quizás la más importante “musicalmente” hablando es el timbre.

Esta cualidad del sonido permite distinguir, debido a su composición armónica, un instrumento de otro. Pero, además, dentro de un mismo instrumento, se producen variaciones en el timbre debidas al intérprete, a los accesorios emisores de sonido (cuerdas, baquetas, boquillas, cañas, etc.), y a la calidad del instrumento. Bien conocida es la fama de los violines *Stradivarius*, que a pesar de que su morfología y afinación es igual que la de un violín moderno, da un sonido que muchos califican como el mejor de entre los instrumentos de cuerda.



Figura 1. Violín Stradivarius

Por tanto, en este proyecto se demostrarán ciertas cualidades del sonido, centrándose en el saxofón y, particularmente, en las distintas morfologías de la boquilla, acercándose así a una interpretación de como varía el timbre del instrumento.

2. OBJETIVOS

Este proyecto nace como la necesidad de conocer y cuantificar, desde el punto de vista objetivo, los parámetros que influyen en el sonido del saxofón. La generalizada carencia de información por parte de los fabricantes, así como el alto precio de dichos productos, impiden predecir con exactitud cómo influyen las características geométricas de la boquilla en el sonido.

Así, se van a analizar los parámetros geométricos más influyentes en la producción de sonido en el saxofón. Para ello, se van a realizar los siguientes experimentos:

- Análisis modal de la caña: como único elemento vibratorio del saxofón y, por tanto, generador del sonido mediante la vibración de una columna de aire, es necesario conocer los factores que afectan a la capacidad vibratoria de este elemento.
- Análisis frecuencial del sonido: debido a que los sonidos reales son la composición de numerosos sonidos puros o armónicos, se realizará un análisis espectral del sonido de varias boquillas del saxofón. Así, comparando las amplitudes relativas de cada armónico, se realizará un “mapa” del timbre de cada boquilla, pudiendo así saber qué factores geométricos son los más influyentes en la morfología de la boquilla, así como se buscará la relación entre la variación de dicha geometría y la variación en los armónicos más significativos.
- Simulación con un programa CFD del flujo en el interior de la boquilla: la simulación del flujo permitirá conocer donde se produce flujo turbulento, y así, poder evaluar las características que influyen directamente en el caudal y, con ello, en el volumen o amplitud del sonido.

Como se ha dicho anteriormente, el alto precio de los productos hace imposible disponer de un gran abanico de morfologías distintas. Para evitar este obstáculo, se va a proceder a la fabricación de boquillas mediante técnicas de prototipado rápido y fabricación aditiva, como son la impresión 3D y la técnica de la estereolitografía, pudiendo así evaluar, además de las características geométricas, la influencia del material.

Además, gracias a la utilización de procesos de fabricación en constante mejora en la actualidad, se valorará si estas técnicas son competitivas (tanto en aspectos geométricos como en costes de fabricación) con las técnicas tradicionales de fabricación por mecanizado.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. EL SONIDO

El sonido es cualquier fenómeno que involucre la propagación de ondas elásticas longitudinales (sean audibles o no), a través de un medio elástico (generalmente un fluido) que esté generando el movimiento vibratorio de un cuerpo.

El sonido humanamente audible consiste en ondas sonoras que se producen cuando las oscilaciones de la presión del aire, son convertidas en ondas mecánicas en el oído humano y percibidas por el cerebro. La frecuencia de dichas oscilaciones que pueden ser captadas por el ser humano está entre los 20 Hz y los 20 kHz. Por encima de estas frecuencias se tienen los ultrasonidos, y por debajo los infrasonidos.

La propagación del sonido involucra transporte de energía sin transporte de materia, en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de un medio elástico sólido, líquido o gaseoso. Entre los más comunes se encuentran el aire y el agua. No se propagan en el vacío, al contrario que las ondas electromagnéticas.

3.1.1. MAGNITUDES FÍSICAS DEL SONIDO. ONDA SONORA

De la misma manera que el resto de ondas sinusoidales, la onda sonora tiene las siguientes cualidades: longitud de onda (λ), frecuencia (f) o inversa del período (T), amplitud (relacionada con el volumen y la potencia acústica) y fase (φ).

Las cualidades musicales del sonido son:

- La altura, determinada por la frecuencia, que indica si una nota es grave (baja frecuencia) o aguda (alta frecuencia).
- La duración, que determina el tiempo que se mantiene sostenida la nota.
- El volumen, determinado por la amplitud (mayor amplitud, mayor volumen).
- El timbre.

Dichas cualidades (excepto el timbre) se pueden observar en una onda sinusoidal tipo.

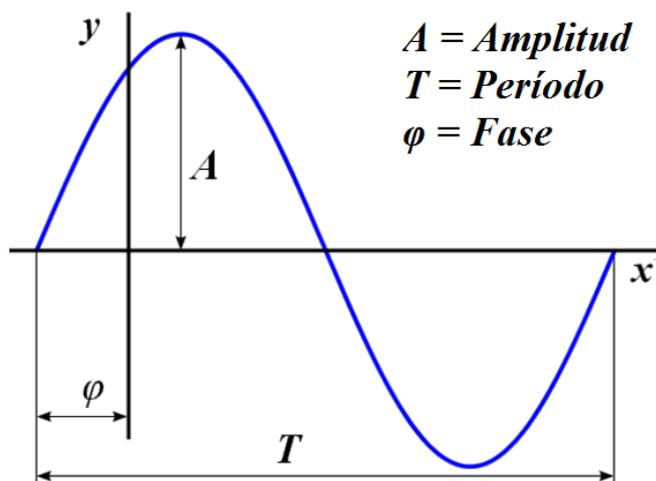


Figura 2. Onda sinusoidal general

El sonido, en la práctica, viene dado como la suma de numerosas ondas sinusoidales de distinta frecuencia, dando así a cada sonido sus características propias en función de la amplitud con la que se presenta cada una de dichas ondas. A esta suma se le llama timbre.

3.1.2. LAS NOTAS MUSICALES. EL SISTEMA TEMPERADO

Cada una de las diferentes notas musicales viene determinada por una vibración cuya frecuencia fundamental es constante. Según el sistema temperado, la distancia entre una nota y la siguiente del mismo nombre es de una *octava*, que corresponde a doblar la frecuencia. Así, se producen doce notas distintas, correspondientes a las siete notas fundamentales y sus notas *alteradas* (dicha alteración sólo se aplica a cinco de ellas).

Por tanto, la distancia frecuencial entre una nota y su consecutiva corresponde a la “doceava” parte de una octava. Este intervalo se conoce como *semitono*. La separación por semitonos no es constante (la progresión de frecuencias no es aritmética, sino geométrica), y su razón es $2^{1/12}$.

Las notas naturales se recogen en la siguiente imagen, correspondiente al teclado de un piano.

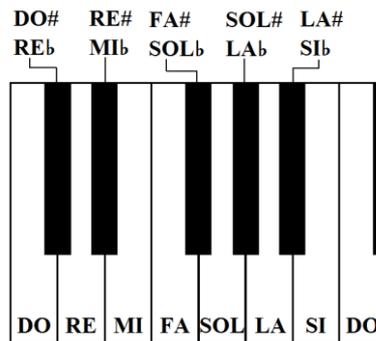


Figura 3. Notas musicales asignadas a un teclado

El carácter “#” indica *sostenido* y “b” indica *bemol*, que están a una distancia de semitono superior o inferior, respectivamente, de la nota a la que acompañan. Las teclas negras corresponden a las notas *alteradas*, pudiéndose nombrar éstas de dos maneras distintas, lo que se llama *enarmonía*, es decir, que a pesar de tener distinto nombre, su entonación o frecuencia es idéntica.

Por tanto, tomando una nota de frecuencia f_1 , para obtener la frecuencia de cualquier nota f_2 se utiliza la siguiente expresión, correspondiendo a una progresión geométrica:

$$f_2 = f_1 \cdot 2^{n/12}$$

De este modo, siendo la frecuencia fundamental o afinación del LA central como $f_0 = 440 \text{ Hz}$, según la norma ISO 16, en la siguiente tabla se recogen las frecuencias de las notas de la octava central del piano.

NOTA	FRECUENCIA [Hz]
DO	261,63
DO# - REb	277,18
RE	293,66
RE# - MIb	311,13
MI	329,63
FA	349,23
FA# - SOLb	369,99
SOL	392,00
SOL# - LAb	415,30
LA	440,00
LA# - SIb	466,16
SI	493,88
DO	523,25

Tabla 1. Frecuencias de las notas centrales del piano

3.1.3. EL TIMBRE

Como se ha dicho anteriormente, los sonidos están compuestos por varias ondas simultáneas de diferentes frecuencias y amplitudes. Por tanto, se puede decir que una nota está compuesta por varios armónicos o tonos puros.

El timbre es la cualidad que caracteriza un sonido, según la cantidad de armónicos presentes en éste y sus frecuencias, y la altura o volumen que alcanza cada uno de ellos. Es decir, una determinada nota estará determinada por un movimiento vibratorio principal, que es el armónico fundamental y determina el nombre de la nota, y varias vibraciones secundarias.

Gracias al número de vibraciones secundarias y a su frecuencia y altura, se puede distinguir los sonidos de la misma frecuencia fundamental o tono y la misma intensidad o volumen, ejecutados por instrumentos totalmente distintos.

Por tanto, el timbre es una cualidad propia de cada instrumento y, en general, de cualquier sistema vibratorio, y viene determinado por sus dimensiones y materiales, e incluso por la forma de tocar el instrumento.

El timbre también está determinado por la envolvente de amplitud del sonido, o envolvente acústico, que constituye una manera de definir, en términos de cuatro parámetros globales, la evolución temporal en amplitud de cualquier sonido.

Está determinado por cuatro principales parámetros:

- Ataque (*attack*): es el tiempo de entrada, es decir, lo que tarda en escucharse el sonido después de haber sido ejecutado el instrumento.
- Decaimiento (*decay*): es el tiempo que tarda la amplitud en reducirse a la de sostenimiento, después de haber alcanzado la amplitud máxima, sin despegar la tecla o punto de inducción vibratoria.
- Sostenimiento (*sustain*): después del decaimiento, es la amplitud que se mantiene constante hasta que se dejar de inducir vibración.
- Relajación (*release*): El tiempo que tarda el sonido en perder toda su amplitud después de despegar la tecla o punto de inducción vibratoria.

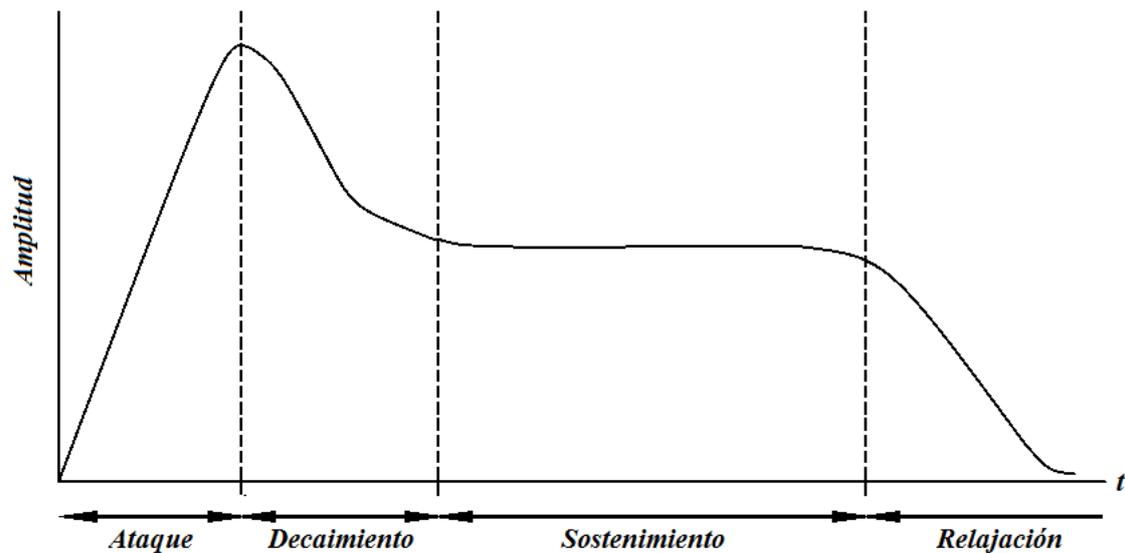


Figura 4. Evolución temporal de la amplitud del sonido

3.1.4. LA SERIE ARMÓNICA

La serie armónica es la sucesión de los sonidos cuyas frecuencias son múltiplos enteros positivos de la frecuencia fundamental. El origen de la serie armónica está en la vibración fraccionada (por mitades, tercios, etc.) de cuerpos vibrantes sencillos y de una dimensión principal, como las cuerdas tensas y las columnas de aire contenidas en tubos sonoros. Cuando se altera el estado de equilibrio de un cuerpo vibrante de este tipo, su forma natural de vibrar es compleja pero se descompone en una serie de movimientos combinados, o modos de vibración. Cada uno de los modos de vibración produce un sonido distinto de la serie.

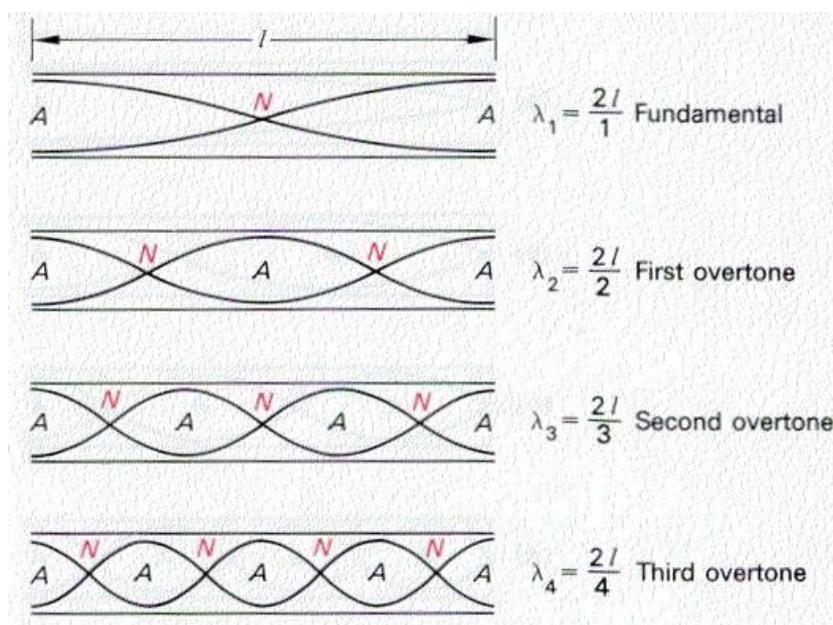


Figura 5. Creación de ondas armónicas en un tubo

En una teoría simplificada del timbre musical, cada uno de los sonidos de la serie armónica es un componente del timbre o *color* del sonido representado por una nota cuya frecuencia es la del sonido fundamental. A los sonidos de la serie armónica, componentes del timbre, se les llama sonidos armónicos. También se han denominado a veces sonidos parciales, alícuotas, acompañantes o concomitantes.

Con alguna licencia, los sonidos de la serie armónica representan los elementos de la serie de Fourier que resulta al aplicar el análisis de Fourier a una forma de onda periódica. Puesto que las formas de onda de los sonidos del mundo real nunca son estrictamente periódicas, el timbre que se analiza por este método se corresponde con el concepto de timbre estático.

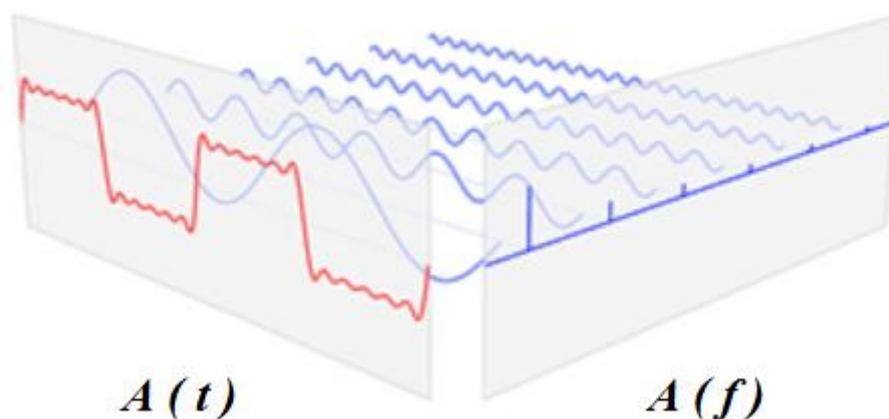


Figura 6. Representación de la transformada de Fourier

La lista de los armónicos (y sus intensidades relativas) constituyen un sonido y determinan el timbre estático de éste. Cualquier modificación en esta lista o en las intensidades de cada armónico, altera el "color" o timbre del sonido.

Desde el punto de vista energético, los armónicos con un índice mayor transportan más energía a igual amplitud de la vibración. El espectro del conjunto de armónicos está limitado en su frecuencia, en función de la energía total. Lo más común, pues, es que los primeros armónicos tengan mayor amplitud y que ésta vaya disminuyendo progresivamente a lo largo de la serie, hasta extinguirse. Sin embargo, al excitar un cuerpo sonoro con una energía mayor, el sonido será más rico en armónicos agudos, sobre todo en el momento del ataque y durante poco tiempo. Esto se cumple en las cuerdas frotadas, pulsadas o percutidas, y en los tubos, tanto de bisel como de lengüeta o boquilla: cuando aumenta la intensidad del ataque, el timbre es más claro y brillante.

3.2. EL SAXOFÓN

El saxofón, conocido también como saxófono o simplemente saxo, es un instrumento musical de forma cónica, de la familia de los instrumentos de viento-madera, generalmente hecho de latón que consta de una boquilla con una caña simple, al igual que el clarinete, instrumento del cual es una evolución. Fue inventado por el belga Adolphe Sax a principios de la década del año 1840. El saxofón se asocia comúnmente con la música popular, la música de big band y el jazz.

Se desconoce el origen de la inspiración que llevó a Adolphe Sax a crear el instrumento, pero la teoría más extendida es que, basándose en el clarinete, instrumento del que él era intérprete, empezó a concebir la idea de construir un instrumento que tuviera la fuerza de uno de metal y las cualidades sonoras y de digitación de uno de madera, por decirlo de alguna manera, una especie de "clarinete de metal". Pero después de un intenso trabajo de pruebas y experimentos sobre modificaciones para lograr una mayor sonoridad y un sonido más metálico, Sax se dio cuenta de que había construido un nuevo instrumento: el saxofón.

A pesar de que el cuerpo del instrumento está fabricado de metal, se considera de viento-madera debido a que la onda sonora es creada por una caña oscilando, a diferencia de los instrumentos de viento-metal, que el sonido es creado por la vibración de los labios del intérprete. Además, el instrumento produce distintas notas al abrir y cerrar agujeros mediante llaves, mientras que en los instrumentos de viento-madera el cuerpo es un tubo cerrado desde la entrada a la salida.

El saxo es un instrumento transpositor, es decir, la altura de la nota que suena no se corresponde con la nota escrita. Así, hay dos familias de saxofones, los que están afinados en *Mi \flat* (sopranino, alto, barítono) y aquellos que están afinados en *Si \flat* (soprano, tenor y bajo).



Figura 7. Familia de saxofones. De izquierda a derecha: soprano, alto, tenor, barítono y bajo

3.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL SAXOFÓN

El cuerpo del saxofón se trata de un tubo cónico y delgado, fabricado habitualmente de latón (aunque modelos de alta gama se fabrican en plata maciza e incluso chapados en oro), que se ensancha en su extremo para formar una campana. A lo largo del tubo existen entre 23 y 24 agujeros de tono de tamaño variable, incluyendo dos agujeros muy pequeños de octava para ayudar a la interpretación del registro superior, aunque éstos no sean esencialmente necesarios para interpretar dicho registro. Estos agujeros están cubiertos por almohadillas, que presionan los agujeros para producir un sello hermético. En reposo, algunos agujeros están abiertos y otros están cerrados por las almohadillas, que se controlan mediante varias llaves con los dedos de ambas manos, mientras que el pulgar derecho se sitúa debajo de un soporte que ayuda a mantener el saxofón equilibrado. La digitación del saxofón es una combinación entre la digitación del oboe y el sistema Boehm, siendo muy similar a la digitación de la flauta travesera o al registro superior del clarinete.

El cuerpo cónico del saxofón le otorga propiedades más similares a las del oboe que al clarinete. El diseño más simple del saxofón es un tubo recto troncocónico, siendo así los saxofones soprano y alto. Sin embargo, como los instrumentos con notas graves serían inaceptablemente largos si fueran totalmente rectos, por motivos ergonómicos los instrumentos más grandes, por lo general, incorporan un recodo en forma de U en la zona de los agujeros de tono más graves (generalmente el cuarto agujero de tono). Este recodo se ha convertido en un rasgo icónico de la familia del saxofón, hasta el punto de que el saxofón alto, e incluso el soprano, a veces están fabricados en el estilo curvo aun cuando no sea estrictamente necesario. Sin embargo, lo más común es que

los saxofones incorporen un recodo curvo encima del agujero de tono más alto, pero debajo de la llave de octava superior, inclinando la boquilla formando un ángulo recto.

Con una digitación sencilla, el saxofón moderno es generalmente considerado un instrumento fácil de aprender, especialmente cuando se procede de otros instrumentos de viento madera, aunque a pesar de esto se requiere una cantidad considerable de práctica y trabajo para alcanzar un sonido con color y correctamente afinado.

3.2.2. MATERIALES DEL SAXOFÓN

La mayor parte de los saxofones están fabricados en latón. El latón es usado para fabricar el cuerpo del instrumento, el soporte de las almohadillas, las barras que unen las almohadillas a las llaves, las propias llaves y los soportes que sostienen las barras y llaves al cuerpo del instrumento. Los tornillos que unen las barras a los soportes y los muelles que hacen que las llaves vuelvan a su posición inicial después de ser liberadas, generalmente están fabricados de acero inoxidable.

Desde 1920, la mayor parte de los saxofones tienen llaves de tacto (que son piezas decorativas lisas colocadas donde los dedos tocan el instrumento) fabricadas de plástico o de nácar.

Se han fabricado saxofones con otros materiales, con distintos grados de éxito, como el saxofón Grafton de plástico de la década de 1950, o los saxofones Yanagisawa de bronce al fósforo. Después de completar el instrumento, los fabricantes por lo general aplican un revestimiento fino de laca acrílica, o son chapados en plata sobre el latón desnudo. La laca o el chapado sirven para proteger el metal de la oxidación y mantienen su aspecto brillante.

Hay quienes argumentan que el tipo de lacado, o su ausencia, puede realzar la calidad sonora de un instrumento. Los posibles efectos de los diferentes acabados sobre el tono son un asunto fuertemente discutido, no menor porque otras variables pueden afectar los timbres de un instrumento, como por ejemplo el diseño de la boquilla y las características físicas del intérprete. En cualquier caso, el hecho de que constituya un tono agradable es un asunto de preferencia personal.

3.2.3. TIPOS DE SAXOFÓN

Como se ha dicho anteriormente, el saxo es un instrumento transpositor, con lo que la nota que suena (con respecto a la afinación universal LA440Hz) no tiene el mismo nombre que la nota que el intérprete quiere hacer sonar. Es decir, produce una traslación de la nota hacia arriba o hacia abajo. Esto no se debe a ningún fenómeno físico, sino, simplemente, a un cambio en el nombre de las notas (y, por ello, de la frecuencia sonora). En el cuadro siguiente queda reflejada dicha transposición.

NOTA SAXOFÓN	NOTA REAL EN SAXO EN MI \flat	NOTA REAL EN SAXO EN SI \flat	FRECUENCIA (HZ)
DO	MI \flat	SI \flat	311,13
DO#	MI	SI	329,63
RE	FA	DO	349,23
RE#	FA#	DO#	369,99
MI	SOL	RE	392,00
FA	SOL#	MI \flat	415,30
FA#	LA	MI	440,00
SOL	SI \flat	FA	466,16
SOL#	SI	FA#	493,88
LA	DO	SOL	523,25
SI \flat	DO#	SOL#	554,37
SI	RE	LA	587,33

Tabla 2. Transposición de notas en los saxofones

Así, se distinguen dos familias de saxofones según la afinación: los afinados en MI \flat , que cuando el intérprete ejecuta la nota DO suena realmente MI \flat (en el estándar de afinación LA440Hz), y los afinados en SI \flat , que realizan la acción análoga.

De este modo, y siendo éstos los más frecuentes en agrupaciones musicales, el sopranino, el alto y el barítono, de la familia del MI \flat , y el soprano, el tenor y el bajo, dentro de la familia de SI \flat , enumerados todos ellos según más grave es el instrumento. Dentro de una misma familia, entre un instrumento y otro están separados en altura de las notas por una octava, es decir, se dobla la frecuencia. Así, cualquier nota tocada por el saxo tenor es una octava más aguda (es decir, con el doble de frecuencia) que la misma nota tocada por el saxo soprano. Éste fenómeno también es consecuencia de la transposición, pues a pesar de estar afinados en distintas octavas, todos se digitan de la misma manera.

3.2.4. DIGITACIÓN, REGISTRO Y PRODUCCIÓN DEL SONIDO EN EL SAXOFÓN

La producción del sonido en el saxofón, consiste en la vibración de una caña, generalmente de madera, a una determinada frecuencia, de modo que a través de la columna de aire que produce el intérprete dicha vibración se desplaza a lo largo del tubo del instrumento. Este tubo tiene taladros a distintas alturas, por lo que según se van cerrando más agujeros, más grave será la nota (menor frecuencia). En la siguiente imagen se recoge la digitación, común a todos los tipos de saxofón.

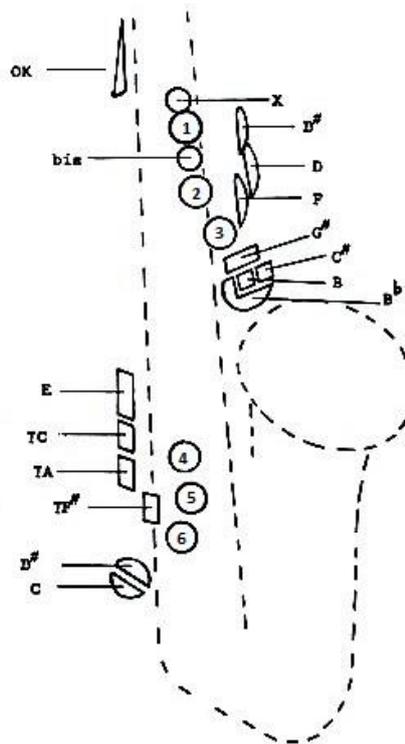


Figura 8. Nomenclatura de las llaves en el saxofón

En esta imagen se puede observar la distribución de las *llaves* o “botones” comunes a todos los tipos de instrumentos. Actualmente, es común incluir alguna llave más para facilitar el registro agudo, y en saxofones de registro más grave, como el barítono o el bajo, se alarga proporcionalmente su longitud para permitir una o dos notas más graves, las cuales tienen su correspondiente llave. De este modo, la cantidad habitual de llaves en un saxofón varía entre 22 y 25 llaves, con las que se pueden realizar, de forma natural, entre 32 y 34 notas distintas.

Las notas que el saxofón puede emitir son desde el $S1b$ grave hasta el $FA\#$ agudo, con una diferencia de dos octavas y media entre dichas notas. Por tanto, el registro del saxofón comprende dos octavas completas y ocho notas adicionales, dos por abajo y seis por arriba. En los siguientes cuadros se corresponden las notas realizadas por el saxofón, con las notas naturales y sus frecuencias para los cuatro saxofones más comunes: soprano, alto, tenor y barítono.

SAXOFÓN SOPRANO EN SI _b	NATURAL	FRECUENCIA
SI _b	SOL#	207,65
SI	LA	220,00
DO	SI _b	233,08
DO#	SI	246,94
RE	DO	261,63
RE#	DO#	277,18
MI	RE	293,66
FA	MI _b	311,13
FA#	MI	329,63
SOL	FA	349,23
SOL#	FA#	369,99
LA	SOL	392,00
LA#	SOL#	415,30
SI	LA	440,00
DO	SI _b	466,16
DO#	SI	493,88
RE	DO	523,25
RE#	DO#	554,37
MI	RE	587,33
FA	MI _b	622,25
FA#	MI	659,26
SOL	FA	698,46
SOL#	FA#	739,99
LA	SOL	783,99
LA#	SOL#	830,61
SI	LA	880,00
DO	SI _b	932,33
DO#	SI	987,77
RE	DO	1046,50
RE#	DO#	1108,73
MI	RE	1174,66
FA	MI _b	1244,51
FA#	MI	1318,51

SAXOFÓN TENOR EN SI _b	NATURAL	FRECUENCIA
SI _b	SOL#	103,83
SI	LA	110,00
DO	SI _b	116,54
DO#	SI	123,47
RE	DO	130,81
RE#	DO#	138,59
MI	RE	146,83
FA	MI _b	155,56
FA#	MI	164,81
SOL	FA	174,61
SOL#	FA#	185,00
LA	SOL	196,00
LA#	SOL#	207,65
SI	LA	220,00
DO	SI _b	233,08
DO#	SI	246,94
RE	DO	261,63
RE#	DO#	277,18
MI	RE	293,66
FA	MI _b	311,13
FA#	MI	329,63
SOL	FA	349,23
SOL#	FA#	369,99
LA	SOL	392,00
LA#	SOL#	415,30
SI	LA	440,00
DO	SI _b	466,16
DO#	SI	493,88
RE	DO	523,25
RE#	DO#	554,37
MI	RE	587,33
FA	MI _b	622,25
FA#	MI	659,26

 Tabla 3: Frecuencias para los saxofones afinados en SI_b

SAXOFÓN ALTO EN Mib	NATURAL	FRECUENCIA
SIb	DO#	138,59
SI	RE	146,83
DO	Mib	155,56
DO#	MI	164,81
RE	FA	174,61
RE#	FA#	185,00
MI	SOL	196,00
FA	SOL#	207,65
FA#	LA	220,00
SOL	LA#	233,08
SOL#	SI	246,94
LA	DO	261,63
LA#	DO#	277,18
SI	RE	293,66
DO	Mib	311,13
DO#	MI	329,63
RE	FA	349,23
RE#	FA#	369,99
MI	SOL	392,00
FA	SOL#	415,30
FA#	LA	440,00
SOL	LA#	466,16
SOL#	SI	493,88
LA	DO	523,25
LA#	DO#	554,37
SI	RE	587,33
DO	Mib	622,25
DO#	MI	659,26
RE	FA	698,46
RE#	FA#	739,99
MI	SOL	783,99
FA	SOL#	830,61
FA#	LA	880,00

SAXOFÓN BARÍTONO EN Mib	NATURAL	FRECUENCIA
SIb	DO#	69,30
SI	RE	73,42
DO	Mib	77,78
DO#	MI	82,41
RE	FA	87,31
RE#	FA#	92,50
MI	SOL	98,00
FA	SOL#	103,83
FA#	LA	110,00
SOL	LA#	116,54
SOL#	SI	123,47
LA	DO	130,81
LA#	DO#	138,59
SI	RE	146,83
DO	Mib	155,56
DO#	MI	164,81
RE	FA	174,61
RE#	FA#	185,00
MI	SOL	196,00
FA	SOL#	207,65
FA#	LA	220,00
SOL	LA#	233,08
SOL#	SI	246,94
LA	DO	261,63
LA#	DO#	277,18
SI	RE	293,66
DO	Mib	311,13
DO#	MI	329,63
RE	FA	349,23
RE#	FA#	369,99
MI	SOL	392,00
FA	SOL#	415,30
FA#	LA	440,00

Tabla 4: Frecuencias para los saxofones afinados en Mib

La frecuencia a la que se emite el sonido no es la frecuencia natural de vibración de la caña, sino que depende directamente de la longitud de la columna de aire y de su frecuencia de resonancia. Dicha longitud se modifica abriendo o cerrando los taladros presentes en el cuerpo del saxofón.

El saxofón se puede considerar un cuerpo aproximadamente cónico. Esto significa que las ondas de sonido se “riegan” a medida que viajan hacia la campana. Esto también significa que la amplitud de las ondas se hace más pequeña a medida que avanzan de la boquilla a la campana. El hecho de que el saxofón está abierto en el extremo inferior significa que la presión total al final del tubo debe ser parecida a la presión atmosférica. En otras palabras, la presión acústica (la variación de presión causada por las ondas de sonido) es cero

Las ondas estacionarias en un cono de longitud L tienen longitudes de onda $2L/n$, donde n es un número entero. La onda con longitud de onda $2L$ es llamada fundamental, la de $2L/2$ se llama segundo armónico y la de $2L/n$ el n -ésimo armónico.

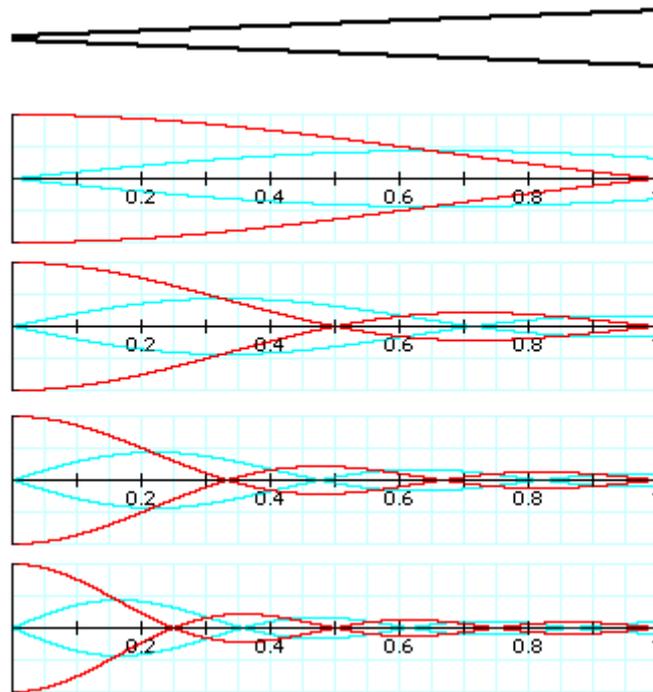


Figura 9. Ondas estacionarias en un tubo cónico

Así, al tratarse de un tubo cerrado por un extremo y abierto por el otro, el saxofón emitirá las frecuencias correspondientes a $f_n = \frac{n}{4L} \cdot v$, siendo v la velocidad del sonido en el medio, según la siguiente expresión:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

Donde:

γ : Coeficiente adiabático del aire = 1.4

R: Constante universal de los gases ideales = $8.314 \text{ J/K} \cdot \text{mol}$

T: Temperatura absoluta del aire

M: Masa molar del aire = 0.029 Kg/mol

De este modo, la expresión de la frecuencia queda, en función de la temperatura:

$$f_n = \frac{n}{4L} \cdot \sqrt{\frac{1.4 \cdot 8.314 \cdot T}{0.029}} = \frac{n}{4L} \cdot 20.03 \cdot \sqrt{T}$$

Que simplificada, resulta, aproximadamente:

$$f_n = \frac{n}{L} \cdot 5.01 \cdot \sqrt{T}$$

Lo que pone de manifiesto que la entonación o afinación del saxofón depende directamente, además de la longitud, que es un factor propio del instrumento, de la temperatura del aire de la sala. Esto es un problema habitual entre los instrumentistas, ya que es necesario controlar la afinación del saxofón según el ambiente en el que se esté tocando (mediante el control de la longitud del tubo, generalmente cambiando de posición la boquilla).

3.3. COMPONENTES DEL SAXOFÓN

Todos los saxofones están compuestos de varias partes, siendo estas las siguientes:

- **Caña:** también llamada lengüeta, se trata de un recorte de madera de caña (generalmente de la especie *Arundo donax* o caña común, caña de Castilla o cañabrava), que gracias a su vibración genera el sonido que se produce en el saxofón a través de la columna de aire.
- **Boquilla:** es donde está unida la caña, y es el punto de contacto del músico y el instrumento, a través de donde entra el aire y donde se produce, debido a su forma interior, el timbre característico del instrumento.
- **Abrazadera:** se trata de un útil que sirve para unir la caña a la boquilla y evitar así que se desplace longitudinal o transversalmente.
- **Tudel:** se trata de la primera “parte curva” del saxofón. Por lo general, es desmontable, permitiendo así el almacenaje más fácil del instrumento, aunque en ocasiones, como por ejemplo en ciertos saxofones sopranos, está unido al cuerpo del saxofón, haciendo así que todo el instrumento sea un único cuerpo.
- **Cuerpo:** es la parte más grande del saxofón, donde se localizan todos los taladros de tono y las llaves del instrumento.



Figura 10. Partes del saxofón

3.3.1. FABRICACIÓN ACTUAL DEL SAXOFÓN Y SUS COMPONENTES

La fabricación de los instrumentos musicales ha sido, y es, un proceso fundamentalmente artesanal. En el caso de los instrumentos de viento metálicos, y, particularmente del saxofón, se da forma al metal mediante procesos de conformado mecánico clásicos tales como laminación, extrusión, embutición y forjado, realizando estos procesos tanto de forma manual como utilizando máquinas específicas para ello.

Sin embargo, para los componentes encargados de “generar” el sonido, siendo éstos la caña y la boquilla, se han producido importantes cambios en su fabricación desde los inicios. Las primeras cañas y boquillas eran fabricadas totalmente a mano. Cabe reseñar, que los principales fabricantes actuales, especialmente de cañas, consiguieron su fama como artesanos a principios del siglo XX debido a que, por aquel entonces, era el propio instrumentista el que modelaba sus propias cañas. Así, la maestría de algunos ha permitido que su técnica para fabricar accesorios de saxofón sea un estándar en la actualidad.

Paulatinamente se comenzaron a introducir técnicas industriales para la fabricación de accesorios del saxofón. Tanto en la fabricación de cañas, con máquinas manuales de corte de madera, como en la de boquillas, con máquinas de mecanizado por arranque de viruta, ya que la creciente demanda obligó a industrializar la producción.

En la actualidad, los procesos de corte mecánico por control numérico permiten una gran precisión dimensional y, además, una producción en serie mayor.

3.3.2. LA CAÑA

La lengüeta o caña es una tira fina de un material, generalmente madera de la planta *Arundo donax*, que por medio del movimiento del aire que se produce cuando el intérprete sopla, vibra produciendo un sonido en un instrumento musical.

En el caso del saxofón se trata de una caña simple, al igual que la del clarinete, teniendo un lado plano (el lado trasero) y un lado superior afilado. Las cañas son rectangulares a excepción de la punta delgada que vibra, que es curva para adaptarse a la forma de la boquilla.

Según el tipo de corte, las dimensiones y el material, cada caña produce un sonido distinto, abriéndose así un abanico de posibilidades a la hora de combinar características.

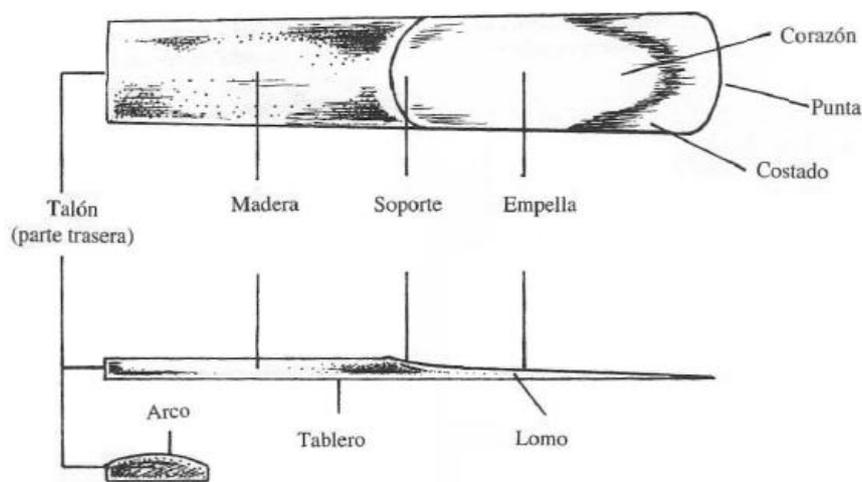


Figura 11. Partes de la caña del saxofón

La característica más relevante y comúnmente proporcionada por los fabricantes es la dureza. Ésta viene determinada por el grosor en la punta de la caña. Habitualmente, los fabricantes las clasifican con una escala de entre 1 y 5, siendo los valores más ampliamente utilizados los comprendidos entre 2 y 4. Sin embargo, esta clasificación no está estandarizada, pudiéndose encontrar cañas con la misma numeración pero distinto grosor, incluso dentro del mismo fabricante.

El material es un aspecto a tener muy en cuenta. A pesar de que la mayoría de las lengüetas se fabrican con madera de caña, se utilizan también ciertos materiales sintéticos como plásticos o fibra de vidrio, que debido a su mayor durabilidad son muy utilizados por músicos de calle. Sin embargo, no ofrecen el mismo sonido que las cañas de *Arundo Donax*.

La forma del corte en el corazón de la caña también es un parámetro que varía según la caña, ofreciendo los fabricantes diferentes cortes que se adaptan a los distintos estilos de música, permitiendo generar un tipo determinado de sonido.

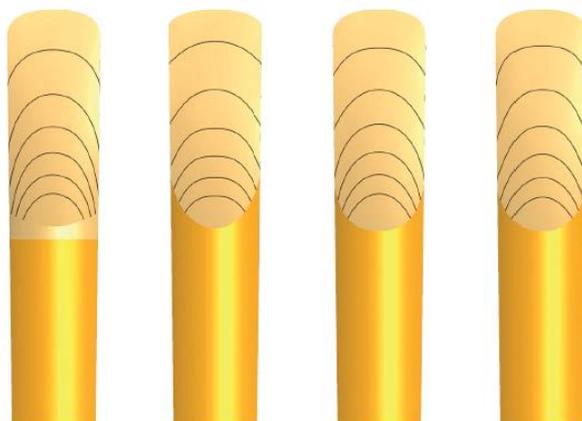


Figura 12. Diferentes cortes de la madera de la caña

3.3.3. LA BOQUILLA

La boquilla del saxofón es el primer elemento que entra en contacto con la boca del instrumentista. Es la encargada de transmitir el flujo del aire hacia el cuerpo del instrumento y de acoplarse con la caña (mediante la abrazadera), para producir el sonido mediante la vibración de ésta.

La búsqueda de una boquilla ideal de acuerdo con el instrumentista continuará mientras se usen los instrumentos de viento, debiéndose entender que no existe una solución universal y absoluta para todos los requerimientos que dicho intérprete busca en una boquilla. Así, la boquilla ideal debe entenderse según el uso y estilo que se le va a conferir a la hora de interpretar.

Es esencial tener en cuenta que no sólo la boquilla influye en la producción de un tipo de sonido. Los factores fisionómicos del intérprete juegan un papel fundamental. Estos factores, como pueden ser la forma y musculatura de la cara, la estructura ósea, la morfología de la dentadura o el grosor de los labios, pueden suponer diferencias importantes en el sonido y en la adecuación de una boquilla al intérprete. Sin embargo, los factores intrínsecos a la propia boquilla se enumeran a continuación.

3.3.3.1. EL MATERIAL

Las boquillas comerciales para saxofón están fabricadas, por lo general, en goma dura en forma de vara (ebonita), metal, y en menor medida cristal y plástico (como por ejemplo, el metacrilato). Algún material también utilizado, pero menos extendido, es, por ejemplo, la madera.

Es ampliamente aceptado que el material utilizado no influye significativamente en el sonido. Sin embargo, se tiene la creencia equivocada que las boquillas de metal suenan radicalmente distintas a las boquillas de ebonita, por ejemplo. Esta es una cuestión de geometría, pues la forma utilizada en las boquillas metálicas es, generalmente, más alargada y estrecha que en las boquillas de ebonita. Así, es comprobado que dos boquillas de iguales dimensiones, pero diferente material, suenan prácticamente igual.

A continuación, se enumeran las cualidades de cada tipo de material más utilizado:

- Cristal: la boquilla de cristal se encuentra en un progresivo desuso, ya que es muy robusta con el paso del tiempo, pero es extremadamente frágil, lo que ocasionaría que con un golpe, por ejemplo en la punta, hiciera que se astillase, dejándola inservible.

- Plástico: la mejora en la calidad de los plásticos ha permitido que se utilice mucho en la actualidad, debido a la mayor resistencia y permanencia de las dimensiones, sobre todo en boquillas para estudiantes, debido a su gran robustez y, sobre todo, a su bajo costo.
- Metal: la gran ventaja de las boquillas metálicas es su gran robustez e indeformabilidad, permitiendo una fabricación con una excelente tolerancia geométrica. Sin embargo, tiene como inconveniente su alto precio, tanto por motivos de material como de fabricación.
- Ebonita: es el material que más se ha utilizado a lo largo de la historia, y aún lo sigue siendo. Es fácilmente “modificable” al gusto del intérprete, tiene un buen precio tanto el material como la fabricación, y mantiene las dimensiones a lo largo del tiempo si se conserva adecuadamente.

3.3.3.2. DISEÑO Y MORFOLOGÍA DE LA BOQUILLA

Como se ha dicho anteriormente, el diseño de la geometría de la boquilla es fundamental para la obtención del sonido deseado. Las características de este sonido son:

- Afinación: la longitud de la boquilla es fundamental, pues a mayor longitud, menor será la frecuencia a la que emite una nota. Además, también se debe tener en cuenta la facilidad para mantener estable una nota con una determinada columna de aire.
- Volumen: viene determinado, principalmente, por la abertura de la boquilla, pero también influye la forma y dimensiones de la cámara.
- Flexibilidad y facilidad: estos factores, que determinan la emisión y mantenimiento de una determinada nota, son influidos, principalmente, por la abertura y el “baffle” de la boquilla.
- Calidad del sonido: este factor, de naturaleza principalmente abstracta, se refiere al estilo requerido para una interpretación y su adecuación al repertorio musical.

Hay que tener en cuenta, que el sonido emitido por el saxofón no se compone de una nota o frecuencia determinada, sino que está conformada por múltiples armónicos.

A continuación se van a describir las características más importantes de una boquilla de saxofón.

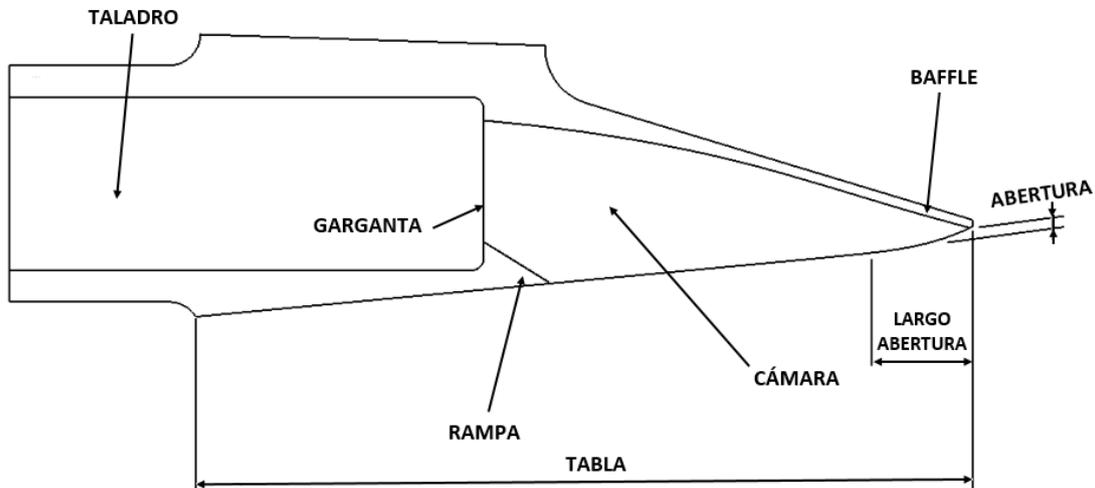


Figura 13. Partes fundamentales de la boquilla del saxofón

- El “baffle” o techo: es el nombre que recibe la primera porción interna de la boquilla, directamente detrás de la punta, y que recibe el primer impacto de las vibraciones una vez abandonan la caña. En general, es la curvatura de la pared interior en la punta de la boquilla, pudiendo haber curvaturas cóncavas, convexas, rectas o con prolongaciones de paso. Si el baffle deja poco espacio entre caña y boquilla, el sonido es más rico en armónicos superiores, dándole un “zumbido” característico, siendo la posible causa de chirridos, además de una proyección buena, pero tosca. Si el baffle deja mucho espacio, produce un sonido oscuro y apagado, sin proyección ni potencia.

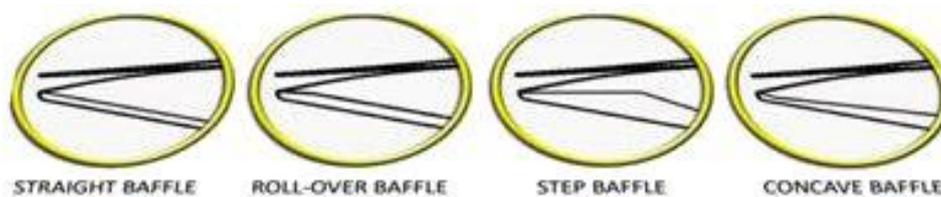


Figura 14. Tipos de baffle

- La punta o borde: la punta ancha se puede describir como “mecanismo de defensa”, ya que es excelente para ejecuciones suaves, pero incapaz de proyectarse, con un sonido puro con ausencia de los armónicos más altos. La punta estrecha es causa principal de chirridos, pero ofrece una gran proyección.
- Abertura: se trata de la curva que deja el plano de la boquilla o tabla hasta el borde de la punta. Su extensión controla la distancia entre la punta de la caña y la punta de la boquilla. La distancia desde la punta al comienzo de la curva se conoce como largo de la abertura. Este factor es muy importante, ya que a mayor largo de la abertura, más presión en la embocadura hará falta para cerrar la caña en el punto donde vibra, mientras que a menor largo de abertura, reduce el control y la flexibilidad en el sonido, entre otros numerosos factores.
- La cámara: la forma de la cámara es el factor determinante para el tipo de sonido que va a emitir el instrumento. Sin embargo, su complejidad geométrica ofrece una gran cantidad de parámetros que modifican el sonido. Una cámara pequeña pero directa dará más volumen y brillo. Las paredes laterales rectas permiten más armónicos, y las paredes curvas un sonido más dulce.

3.4. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN POR ADICIÓN

3.4.1. LA IMPRESIÓN 3D

3.4.1.1. DEFINICIÓN

La impresión 3D es una tecnología de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. También conocido como modelado por deposición fundida, las impresoras 3D son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición, aunque como cualquier proceso industrial, estarán sometidas a un compromiso entre su precio de adquisición y la tolerancia en las medidas de los objetos producidos.

El modelado por deposición fundida utiliza una técnica aditiva, depositando el material en capas, para conformar la pieza. Un filamento plástico o metálico que inicialmente se almacena en rollos, es introducido en una boquilla. La boquilla se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material y puede desplazarse en tres ejes controlada electrónicamente. La boquilla normalmente la mueven motores a pasos o servomotores. La pieza es construida con finos hilos del material que solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla.

3.4.1.2. FUNCIONAMIENTO

El modelado por deposición fundida comienza con un proceso de software, que parte de un fichero estereolitográfico (stl). El fichero es orientado para poder ser imprimido, dividido en capas y se calculan las trayectorias que la boquilla deberá seguir para depositar el material, capa a capa, para conformar la pieza. Si son necesarias, se pueden generar estructuras de soporte que, si la máquina es capaz, imprimirá en otro material que tras finalizar la creación de la pieza, será retirado.

El termoplástico es fundido y depositado por la boquilla en capas del grosor requerido (capas más finas implican mejor calidad en la pieza final) una a una. Las capas se depositan de abajo hacia arriba.

A pesar de que el modelado por deposición fundida es una tecnología muy flexible, y es capaz de realizar piezas muy diversas, existen algunas restricciones sobre las características de lo que se puede fabricar con esta técnica, especialmente en lo referente a la pendiente de los voladizos, ya que necesita de estructuras auxiliares para garantizar su estabilidad.

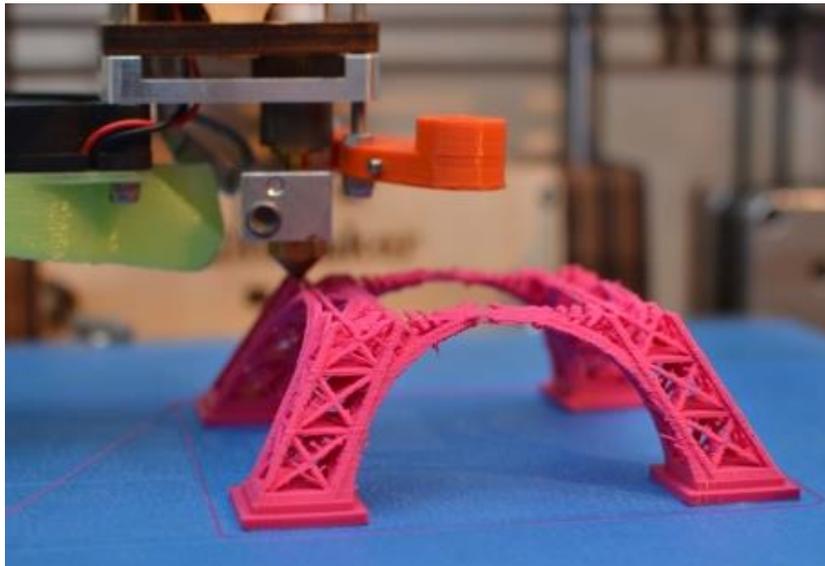


Figura 15. Fabricación de pieza mediante impresión 3D

3.4.1.3. MATERIALES

Actualmente se utilizan varios materiales para este proceso de fabricación.

- Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).
- Poliláctico (PLA).
- Policarbonato.
- Policaprolactona (PCL).
- Polifenilsulfona (PPSU).
- Polietirimida (PEI).
- Ceras.
- Chocolate y otros alimentos para uso en repostería.
- Acetato de polivinilo (PVA) utilizado para soportes hidrosolubles.

3.4.1.4. VENTAJAS E INCONVENIENTES

La impresión 3D es una técnica muy versátil, siendo capaz de realizar infinidad de productos distintos. Además, permite realizar prototipos de productos con facilidad y rapidez, lo que puede implicar una mejora en el diseño de éstos.

Es una forma de fabricación barata, tanto en materiales como en costes de fabricación. Permite la personalización de la fabricación, trasladándola incluso a las casas.

Tiene multitud de aplicaciones múltiples aún por descubrir, como por ejemplo en el campo de la medicina, creándose prótesis e incluso tejidos orgánicos.

Como inconvenientes, cabe reseñar que el acabado superficial es pobre, y la precisión geométrica no es muy fina.

3.4.2. LA ESTEREOLITOGRAFÍA

3.4.2.1. DEFINICIÓN

La estereolitografía (SLA o SL; también conocida como fabricación óptica, fotosolidificación entre otras) es una forma de tecnología de manufactura (o impresión 3D) que, por medio de la adición de capas de pequeño espesor, es utilizada para la producción de modelos, prototipos, patrones, o piezas definitivas.

El término “estereolitografía” fue acuñado en 1986 por Chuck Hull quien lo patentó como un método y equipo para realizar objetos sólidos mediante impresión sucesiva de finas capas de un material que cura mediante luz ultravioleta.

La patente de Hull describía cómo un haz de luz ultravioleta se focalizaba sobre la superficie de una cuba rellena de líquido fotopolimérico. Los rayos de luz dibujan el objeto en la superficie del líquido, capa a capa, usando fotopolimerización (o cross-linking) para crear el sólido. En 1986, Hull fundó la primera compañía que generalizaba y comercializaba esta técnica, 3D Systems Inc., la cual todavía está localizada en Rock Hill, Carolina del Sur.

3.4.2.2. FUNCIONAMIENTO

La estereolitografía es un proceso de fabricación por adición que emplea resina que cura mediante luz ultravioleta en un tanque, y un láser ultravioleta para construir los objetos. Los objetos tridimensionales son obtenidos mediante la adición de finas capas, impresas una encima de otra. Cada capa es una sección transversal del objeto que el láser traza en la superficie de la resina, que es el material consumible. La resina líquida cura y se solidifica mediante la exposición al láser de luz ultravioleta, quedando así la capa recién solidificada pegada a la capa previa que existía debajo.

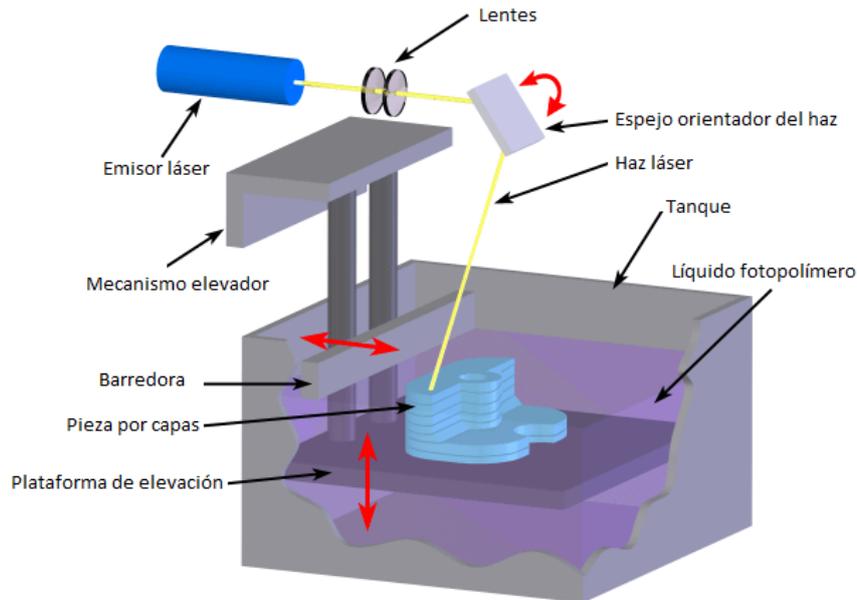


Figura 16. Partes de la máquina de estereolitografía

Una vez que la capa a imprimir ha sido creada, la plataforma de elevación del equipo desciende una distancia equivalente al grosor de una capa de resina solidificada (típicamente entre 0.05 y 0.15 mm). Una hoja barre la pieza dejando una nueva capa de resina líquida en la superficie de la cubeta, lista para la siguiente impresión del láser. De esta forma se va creando, capa a capa una pieza tridimensional. Una vez que la pieza tridimensional se ha completado, ésta se sumerge en un baño químico que retira el exceso de resina y, posteriormente, curada en un horno de luz ultravioleta.

La estereolitografía necesita de estructuras para soportar la pieza a la plataforma de elevación de forma que se evite la deflexión de la pieza por gravedad. También sujeta la sección transversal en el lugar correcto para que no se deslice cuando pasa la hoja de re-aplicación de resina. Los soportes suelen ser generados automáticamente durante la preparación del modelo por ordenador CAD, aunque podrían requerir intervención manual. Los soportes deben ser retirados del modelo final de forma manual.



Figura 17. Piezas fabricadas mediante estereolitografía, con sus correspondientes soportes

3.4.2.3. MATERIALES

Los materiales fotopolimerizables que se utilizan en la estereolitografía son termoplásticos de la siguiente clase:

- Resina blanca opaca tipo ABS Especial (no es ABS realmente).
- Resina blanca ABS Especial con infiltraciones para mejorar sus propiedades mecánicas.
- Resina translúcida.

3.4.2.4. VENTAJAS E INCONVENIENTES

Una de las ventajas de la estereolitografía es su rapidez. Los objetos funcionales pueden ser producidos en menos de un día. La duración del proceso depende de su tamaño y complejidad, que puede variar desde unas simples horas a más de un día. Además, el acabado superficial de las piezas es muy bueno.

Las piezas fabricadas mediante estereolitografía son suficientemente duras como para ser mecanizadas, y pueden también ser usadas en la creación de moldes maestros para moldeo por inyección, termoconformado, moldeo por soplado, y varios procesos de forja.

Los objetos obtenidos mediante esta tecnología son sensibles tanto a la humedad ambiental como a la temperatura, aunque hay procesos posteriores que mitigan dichas debilidades.

Aunque la estereolitografía puede producir una amplia variedad de formas, suele ser de coste elevado. De todas formas, el reciente interés por dicha tecnología ha hecho se produzcan modelos de consumo con precios muy asequibles.

4. DESARROLLO Y RESULTADOS

El desarrollo del proyecto consiste en varios análisis basados en la frecuencia, tanto de vibración de la caña, presente en el análisis modal, y la propia del sonido, correspondiente al análisis frecuencial. Así, esta parte se va a dividir en las siguientes:

- Análisis modal de la caña. Mediante un programa de elementos finitos, se va a calcular las frecuencias de los modos de vibración, y se van a aproximar a los modos teóricos de vibración.
- Análisis frecuencial. Este análisis, en el que se analiza el timbre de un sonido mediante su espectro armónico, consta de dos partes:
 - Estudio de boquillas comerciales o de fabricante.
 - Estudio de boquillas de diseño y fabricación propias.

Así, el estudio comprende los dos elementos productores del sonido en el saxofón: la caña y la boquilla.



Figura 18. Conjunto boquilla - caña - abrazadera, para la boquilla Selmer Super Session D

4.1. ANÁLISIS MODAL

4.1.1. OBJETO DEL ANÁLISIS MODAL

En este primer análisis del conjunto productor de sonido del saxofón, se va a analizar la caña. Este objeto se trata de una lámina de madera de *Arundo Donax*, de longitud menor que la boquilla, que acaba en una punta fina, la cual vibra a una determinada frecuencia, propagándose dicha vibración a lo largo de la columna de aire.

Dentro de las cañas que ofrecen los fabricantes, la variación más importante entre una clase y otra viene dada por el grosor de la punta.

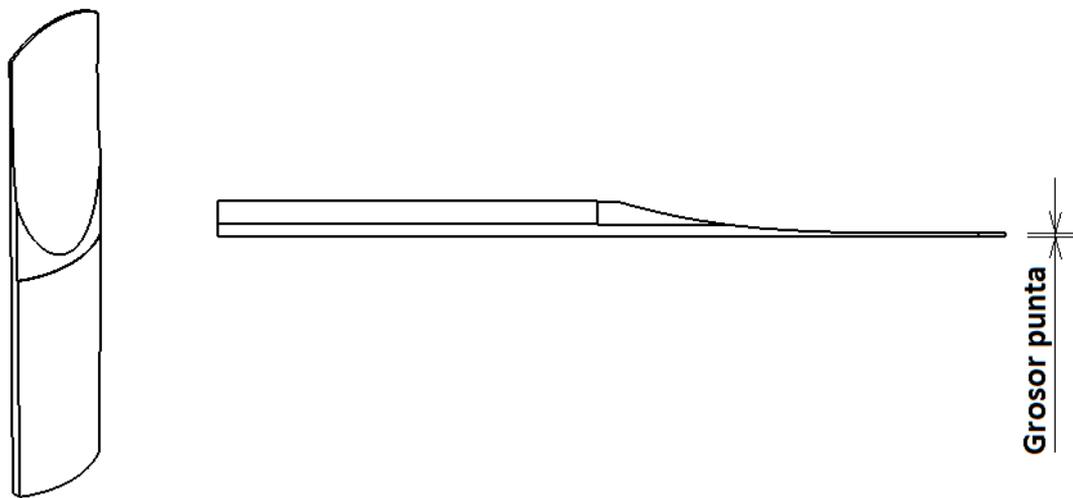


Figura 19. Esquema de una caña

Así, para este análisis, se presentan cinco modelos de cañas, en las que sólo varía el grosor de la punta, manteniéndose el resto de dimensiones iguales. En la siguiente tabla se observan los grosores en punta de cada caña:

TIPO DE CAÑA	Grosor en punta [mm]
Superblanda	0,150
Blanda	0,200
Media	0,250
Dura	0,300
Superdura	0,350

Tabla 5. Tipos de cañas y grosor correspondiente

4.1.2. PRODUCCIÓN DE VIBRACIONES EN LA CAÑA

La tarea principal de la caña es actuar como válvula de aire, que se abre y cierra sobre la boquilla a distintas velocidades. La frecuencia de esta operación controla la afinación del sonido, y es gobernado por la medida y forma de la columna de aire que debe estar en vibración.

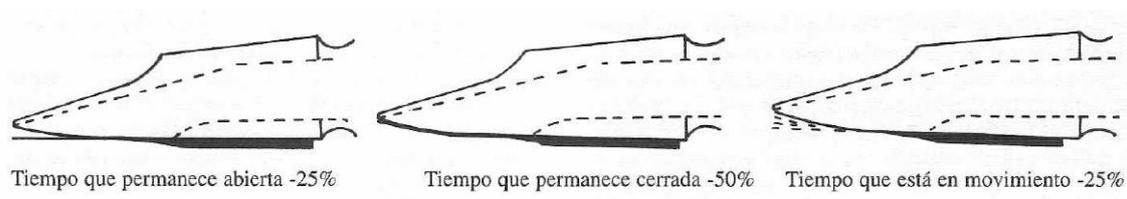


Figura 20. Producción del sonido

Por tanto, en la producción de un sonido de una determinada frecuencia fundamental, la caña vibrará tantas veces como oscilaciones determinan ese sonido, es decir, a su misma frecuencia.

4.1.3. FRECUENCIAS NATURALES DE LAS CAÑAS (ANÁLISIS TEÓRICO)

Para el análisis teórico de las frecuencias naturales de las cañas, se ha asimilado a una barra empotrada con un extremo libre, de longitud L (longitud de la caña, constante para todos los tipos) y sección $a \times b$ (dependiente del grosor en punta).

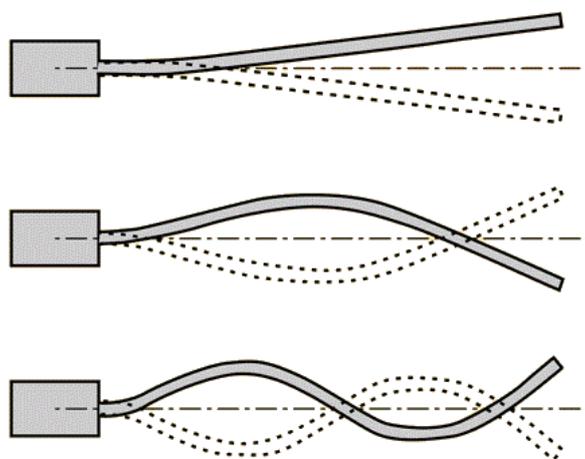


Figura 21. Modos de vibración de una viga empotrada

La ecuación diferencial del movimiento de un elemento de la barra es

$$\frac{\partial^4 \Psi}{\partial x^4} + \frac{\rho ab}{YI} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

Siendo Ψ el desplazamiento trasversal de un punto x de la barra en el instante t .

ρ es la densidad de la barra

Y es el módulo de Young del material de la barra.

$I = ab^3/12$: es el momento de inercia de la sección transversal rectangular de la barra de anchura a y espesor b .

La solución general de la ecuación que describe las vibraciones de una barra es:

$$\Psi(x, t) = y(x) \text{sen}(\omega t)$$

La ecuación diferencial se convierte en:

$$\frac{d^4 \Psi}{dx^4} - \frac{\rho ab}{YI} \omega^2 y = 0$$

Las raíces de la ecuación característica son:

$$r^4 - q^4 = 0$$
$$q = \left(\frac{\rho ab}{YI} \omega^2 \right)^{1/4}$$

La solución de la ecuación diferencial, la amplitud $y(x)$ de la vibración de los puntos x de la barra:

$$y(x) = A1 \text{senh}(q \cdot x) + A2 \text{cosh}(q \cdot x) + A3 \text{sen}(q \cdot x) + A4 \text{cos}(q \cdot x)$$

$$\frac{dy(x)}{dx} = q(A1 \cosh(q \cdot x) + A2 \sinh(q \cdot x) + A3 \cos(q \cdot x) - A4 \sin(q \cdot x))$$

La barra está firmemente sujeta por su extremo izquierdo $x=0$, y la pendiente en este punto es $dy/dx=0$. Así, las condiciones de contorno determinan que:

$$0 = A2 + A4$$

$$0 = A1 + A3$$

En el extremos derecho libre $x=L$, $y(L)$ y su pendiente dy/dx no son cero, pero el momento y la fuerza son cero, lo que implica que $d^2y/dx^2 = 0$ y $d^3y/dx^3 = 0$.

$$A1 \cdot (\sinh(q \cdot L) + \sin(q \cdot L)) + A2 \cdot (\cosh(q \cdot L) + \cos(q \cdot L)) = 0$$

$$A1 \cdot (\cosh(q \cdot L) + \cos(q \cdot L)) + A2 \cdot (\sinh(q \cdot L) - \sin(q \cdot L)) = 0$$

Eliminado A1 y A2 obtenemos una ecuación trascendente en qL .

$$\cosh(qL) \cdot \cos(qL) = -1$$

Las raíces $r_n = q_n \cdot L$ de esta ecuación se calculan por el procedimiento numérico del punto medio, sus primeros valores son:

$$r_n = 1.875, 4.693, 7.855, 10.996, \dots$$

Conocido los valores posibles de q_n se calculan las frecuencias de vibración $\omega_n = 2\pi f_n$:

$$f_n = \frac{r_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{YI}{\rho abL^4}} = \frac{r_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{Y \frac{ab^3}{12}}{\rho abL^4}}$$

Luego la ecuación que determina las frecuencias naturales queda, independiente de la anchura de la barra:

$$f_n = \frac{r_n^2 b}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{Y}{12\rho}}$$

Donde f_n es la frecuencia del modo normal n de vibración. Para el cálculo, se han considerado longitudes de abertura L de 18, 20 y 22 mm, y el valor del grosor se ha realizado una media entre el valor máximo de grosor y el mínimo, que corresponde al grosor en punta. En la tabla siguiente se enumeran los valores utilizados para hallar las 15 frecuencias correspondientes.

Grosor [mm]	L [mm]	bMAX [mm]	Media [mm]
0,15	18	0,45	0,3
	20	0,578	0,364
	22	0,747	0,4485
0,2	18	0,47	0,335
	20	0,593	0,3965
	22	0,757	0,4785
0,25	18	0,49	0,37
	20	0,608	0,429
	22	0,767	0,5085
0,3	18	0,51	0,405
	20	0,623	0,4615
	22	0,777	0,5385
0,35	18	0,53	0,44
	20	0,637	0,4935
	22	0,788	0,569

Tabla 6. Magnitudes utilizadas en el análisis modal

4.1.4. MODOS DE VIBRACIÓN DE LAS CAÑAS (MEF)

Como se ha dicho anteriormente, se ha utilizado el programa comercial ANSYS para la evaluación de los modos de vibración de la caña, mediante el Método de los Elementos Finitos. Previamente al análisis, se ha definido el material *Arundo donax* como material de las cañas, tomando como valores mecánicos básicos los siguientes, extraídos de un promedio de diversas publicaciones:

$$E = 7000 \text{ Mpa}$$

$$\rho = 700 \text{ Kg/m}^3$$

Además, se realizan tres variaciones del apoyo de la caña en la tabla, que depende del largo de la tabla de la boquilla, es decir, de la longitud de la abertura. Los anclajes de la abrazadera no se modifican, ya que se ha comprobado que no influye en el análisis modal. En la siguiente imagen se observa la magnitud que se ha modificado.

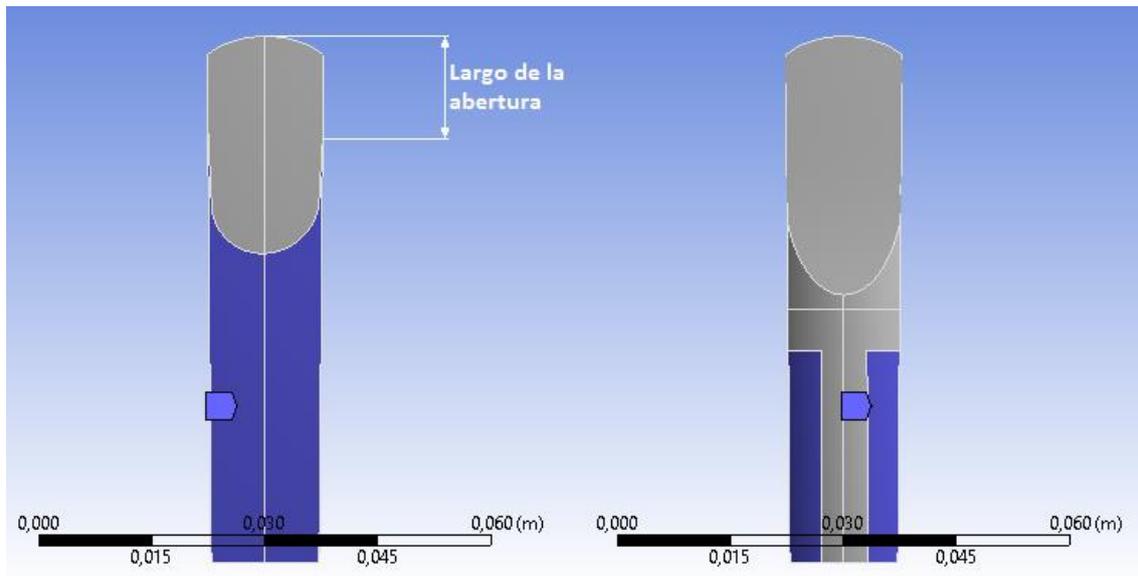


Figura 22. Esquema en 3D de la caña

Así, una vez realizada la simulación por ordenador, se obtuvieron los siguientes tres modos principales de vibración:

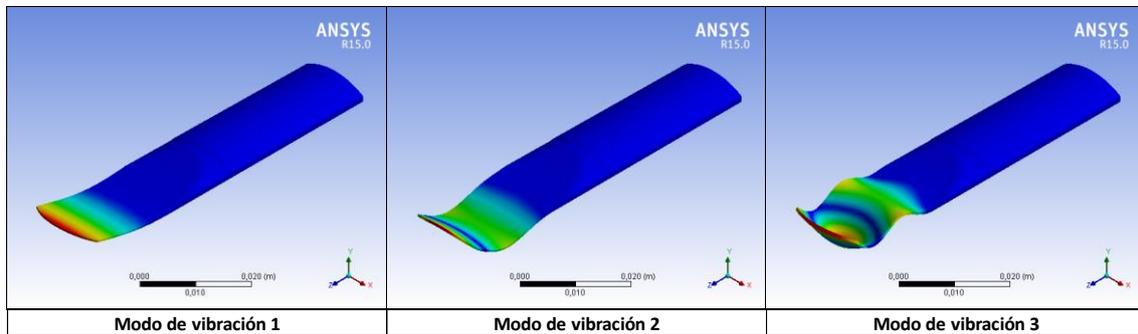


Figura 23. Tres primeros modos de vibración de la caña

Éstos son los modos de vibración de la caña, comunes a todos los grosores. Existían otros modos de vibración a torsión, es decir, alrededor del eje z, los cuales no son El modo de vibración principal es el más importante, pues es el que realiza, como se ha dicho anteriormente, la función de válvula de aire en la boquilla.

4.1.5. RESULTADOS NUMÉRICOS

A continuación se presentan los resultados numéricos, obtenidos tanto por estudio teórico como por el método de elementos finitos, en las tres variaciones de longitud de abertura:

LONGITUD DE ABERTURA DE 18 mm									
Grosor punta (mm)	Primer armónico			Segundo armónico			Tercer armónico		
	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual
	ANSYS	Teórico		ANSYS	Teórico		ANSYS	Teórico	
0,15	648,370	472,942	27,057%	2605,300	2962,831	-13,723%	6356,300	8300,383	-30,585%
0,2	680,270	528,119	22,366%	2976,400	3308,494	-11,158%	7432,000	9268,761	-24,714%
0,25	710,640	583,296	17,920%	3327,400	3654,158	-9,820%	8437,100	10237,139	-21,335%
0,3	739,400	638,472	13,650%	3657,700	3999,822	-9,353%	9382,500	11205,517	-19,430%
0,35	766,940	693,649	9,556%	3969,000	4345,485	-9,486%	10237,000	12173,895	-18,921%

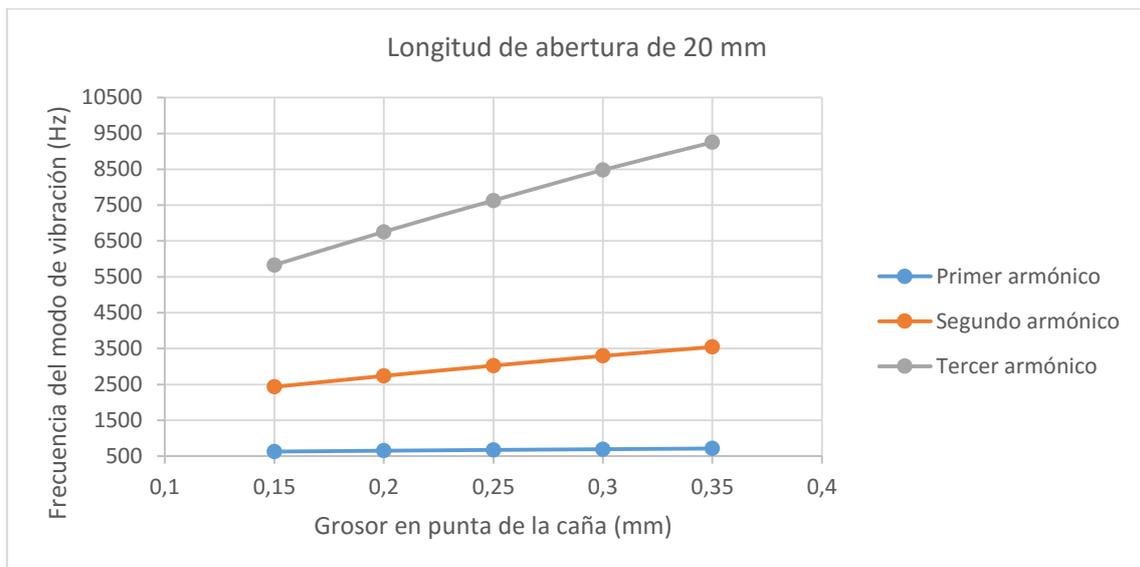
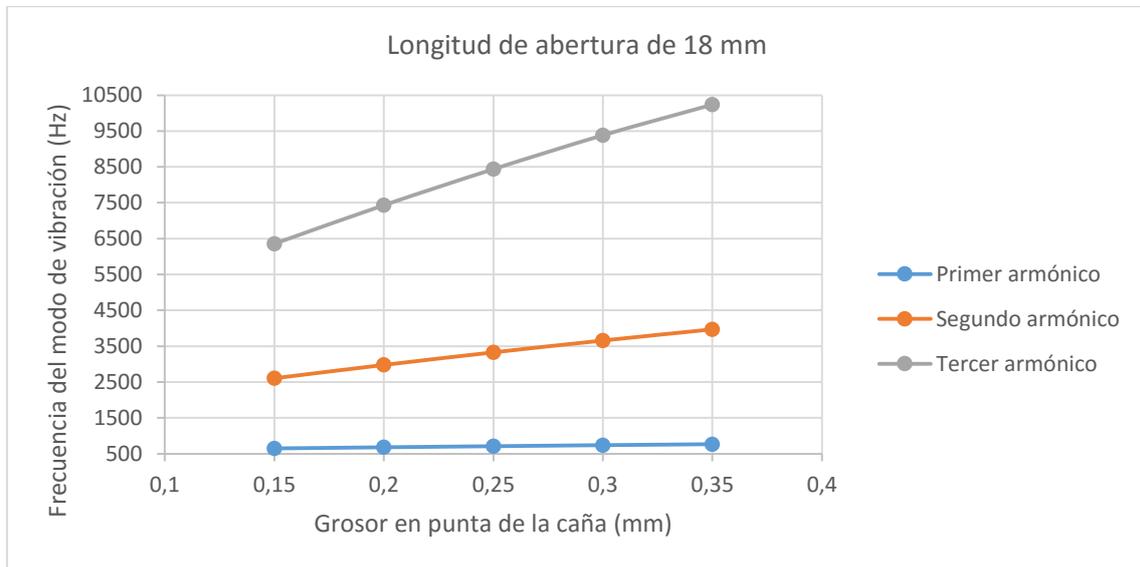
LONGITUD DE ABERTURA DE 20 mm									
Grosor punta (mm)	Primer armónico			Segundo armónico			Tercer armónico		
	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual
	ANSYS	Teórico		ANSYS	Teórico		ANSYS	Teórico	
0,15	627,870	464,808	25,971%	2431,300	2911,870	-19,766%	5831,300	8157,616	-39,894%
0,2	651,780	506,309	22,319%	2738,600	3171,859	-15,820%	6757,200	8885,975	-31,504%
0,25	673,510	547,809	18,664%	3024,400	3431,847	-13,472%	7630,000	9614,334	-26,007%
0,3	693,950	589,310	15,079%	3295,400	3691,835	-12,030%	8480,500	10342,692	-21,959%
0,35	712,640	630,172	11,572%	3544,300	3947,824	-11,385%	9251,700	11059,845	-19,544%

LONGITUD DE ABERTURA DE 22 mm									
Grosor punta (mm)	Primer armónico			Segundo armónico			Tercer armónico		
	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual	Frecuencia (Hz)		Diferencia porcentual
	ANSYS	Teórico		ANSYS	Teórico		ANSYS	Teórico	
0,15	616,560	473,314	23,233%	2317,300	2965,157	-27,957%	5451,000	8306,900	-52,392%
0,2	636,020	504,974	20,604%	2584,300	3163,495	-22,412%	6261,300	8862,545	-41,545%
0,25	652,710	536,633	17,784%	2824,700	3361,834	-19,016%	7015,200	9418,191	-34,254%
0,3	667,580	568,293	14,873%	3047,700	3560,172	-16,815%	7743,600	9973,836	-28,801%
0,35	680,840	600,481	11,803%	3253,000	3761,816	-15,641%	8419,700	10538,742	-25,168%

Tabla 7. Resultados numéricos para las tres longitudes de abertura

De estas tablas se deducen las frecuencias naturales de los tres primeros modos de vibración. Como se puede observar, las frecuencias a las que se encuentra el registro del saxofón no se alejan significativamente de la frecuencia del primer modo de vibración, con lo que hace que la caña pueda actuar fácilmente en todo el registro del instrumento.

En estos gráficos se puede ver el crecimiento de la frecuencia de excitación con el grosor, de relación aproximadamente lineal.



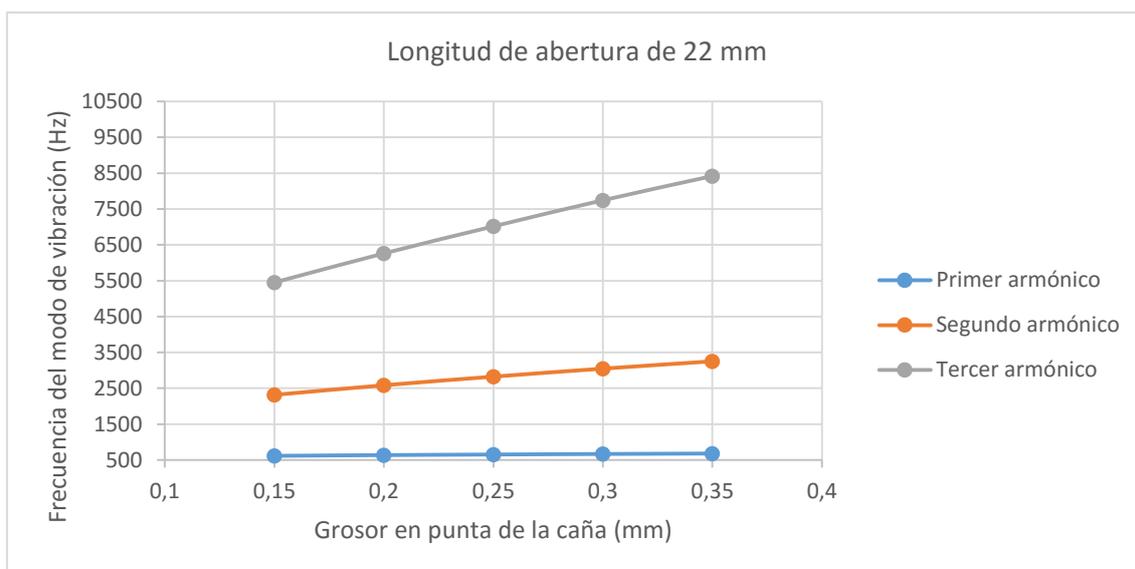


Gráfico 1. Relaciones grosor - frecuencia - armónico

Además, centrándose en el primer modo de vibración, que es el modo fundamental ya que realiza el desplazamiento que permite funcionar a la caña como válvula, se puede observar que cuanto más dura es la caña, es decir, mayor grosor en punta, su frecuencia natural será mayor.

Sin embargo, al aumentar la longitud de abertura, la frecuencia natural disminuye. Esto explica por qué, al escoger boquillas con mayor longitud de abertura, es necesario utilizar cañas más duras, para mantener la frecuencia natural lo más invariable posible.

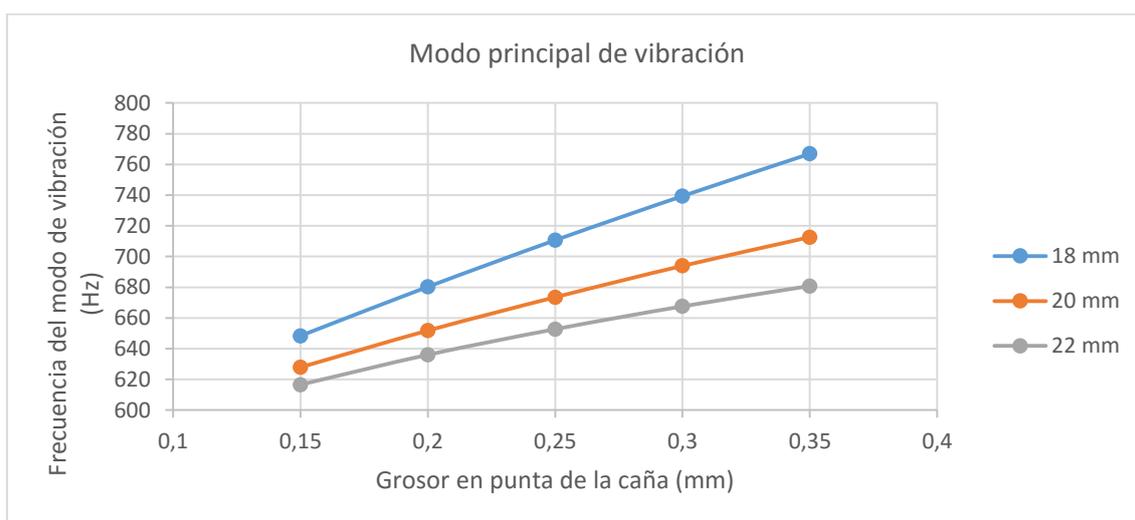


Gráfico 2. Variación de la frecuencia en función del grosor y de la longitud de abertura para el primer armónico

4.2. ANÁLISIS FRECUENCIAL

El análisis frecuencial, parte central de este proyecto, consiste en realizar grabaciones de audio de las boquillas a estudio, aplicando después la Transformada Rápida de Fourier (FFT), para así obtener el espectro armónico o espectro de potencias. Este análisis se realizará con el programa *MATLAB*.

A continuación se muestra el espectro obtenido para una nota emitida por un saxofón, y para otra nota de doble frecuencia, pero emitida por una flauta dulce. Como se puede observar, las amplitudes relativas de los armónicos son diferentes, con lo que su timbre es completamente distinto.

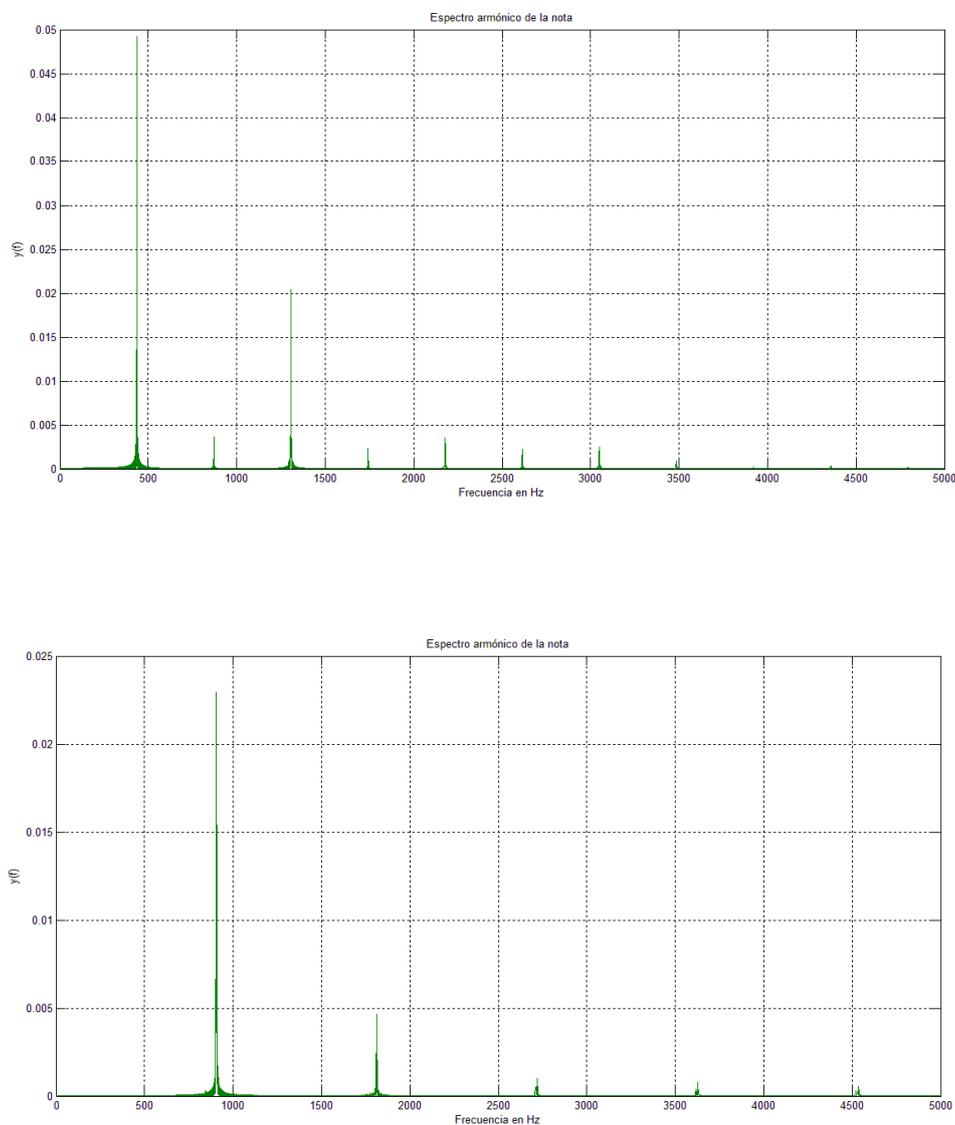


Gráfico 3. Espectros armónicos para una nota de 440 Hz emitida por un saxofón (arriba) y una nota de 880 Hz emitida por una flauta (abajo)

La grabación de sonido se realizará manteniendo una frecuencia fundamental constante, en este caso de 440 Hz, que se corresponde con el LA440 y es nota de referencia para la afinación de los instrumentos musicales. En el caso del saxofón, esta nota corresponde al FA# medio, al tratarse de un instrumento transpositor.

La grabación, de aproximadamente 1 segundo de duración, se realiza en formato .wav (*WAVE form audio file format*), que no comprime el fichero, con una frecuencia de muestreo de 44100 Hz, y a 16 bits. El micrófono utilizado es monocanal.

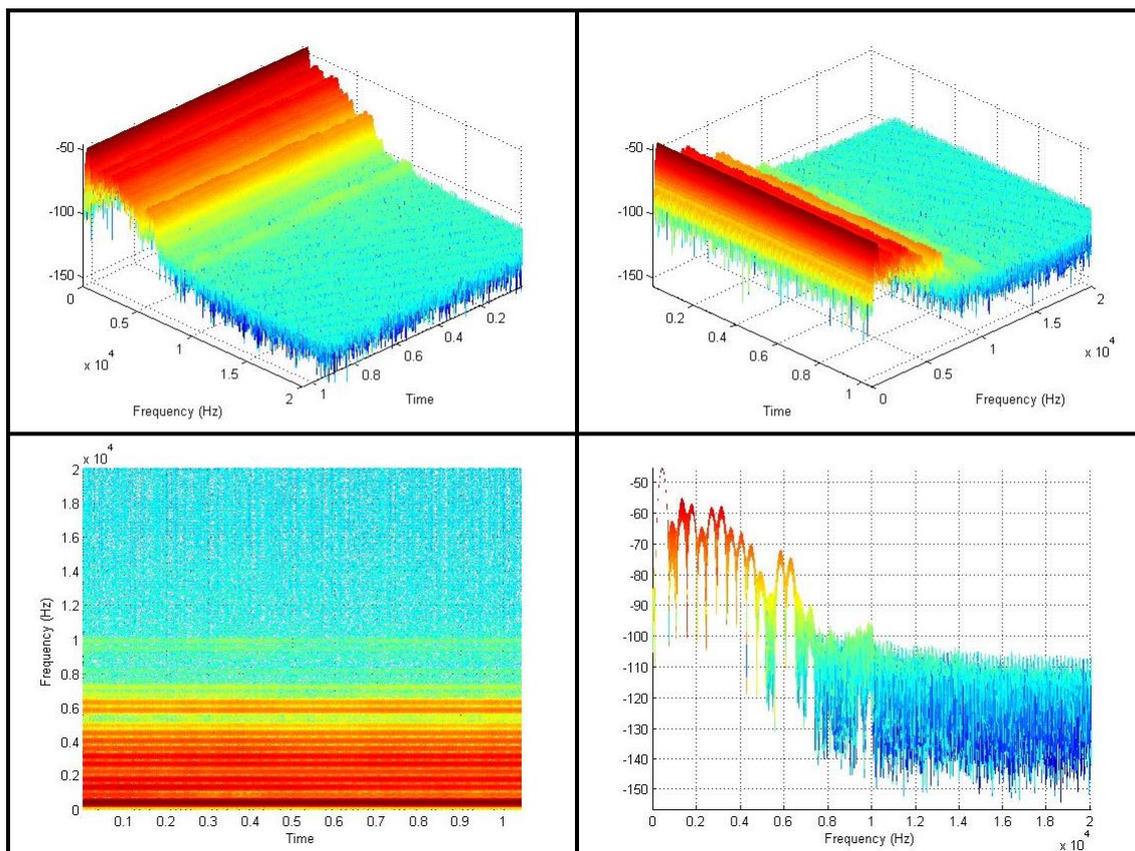


Figura 24. Espectrograma para la boquilla B7

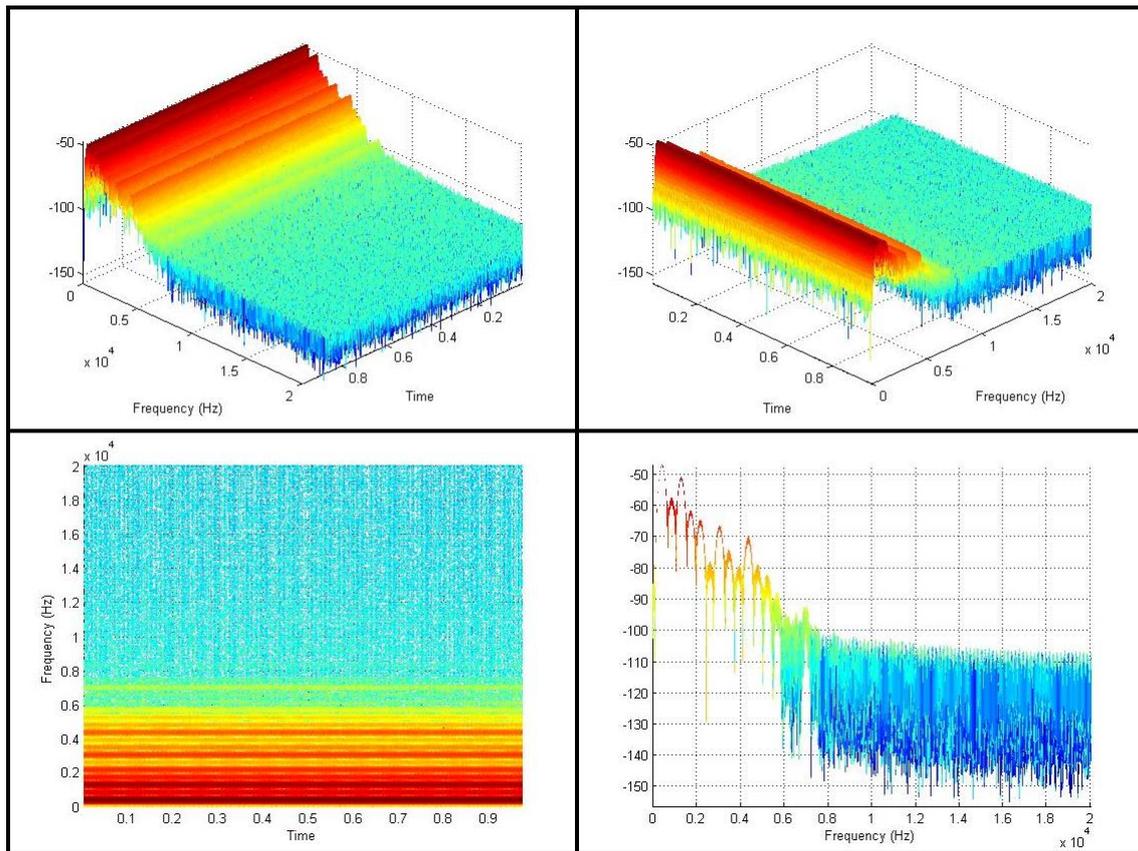


Figura 25. Espectrograma para la boquilla B13

Como se ve en los dos espectrogramas anteriores, correspondientes a la misma nota pero distinta boquilla, se ve como la amplitud de los armónicos naturales de la nota es muy diferente, distribuyéndose los máximos de manera muy distinta (no en frecuencia, la cual es múltiplo de la frecuencia fundamental, sino en la amplitud).

Así, este análisis se basará en comparar, para cada una de las frecuencias múltiplo de la frecuencia fundamental de 440 Hz, comparando sus amplitudes relativas, y determinando cómo influyen éstas en la creación de un determinado timbre para el oído humano.

4.2.1. MÉTODO Y FRECUENCIAS DE GRABACIÓN

La grabación se realiza en una habitación insonorizada del Conservatorio Profesional de Música “Arturo Soria”, en Madrid, colocando el micrófono sobre un trípode, con la rejilla del diafragma del micrófono a una altura de 1 metro, y apuntando a la campana del saxofón.

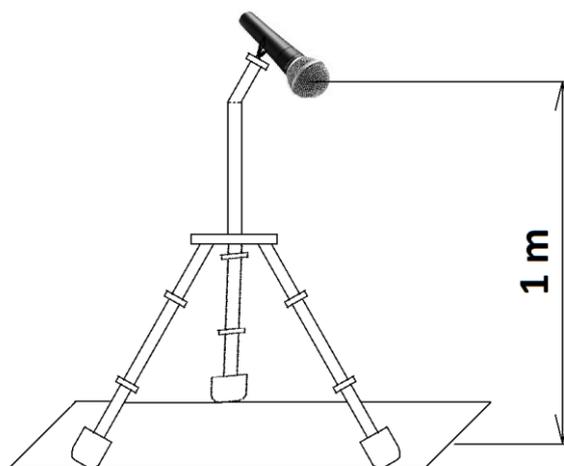


Figura 26. Esquema de colocación del micrófono

Se realizan grabaciones de un segundo de duración, todas a la misma potencia sonora, emitiendo una nota de 440 Hz, que se toma como referencia debido a que es la nota central del saxofón, y la que su espectro armónico es más similar al resto de las notas del registro del instrumento.

Estas condiciones se mantienen para todas las boquillas, excepto para la grabación final de contraste, en la que se usará un micrófono de mayor calidad, y la grabación se realizará en campo abierto, evitando así posibles frecuencias secundarias de nulo interés en el análisis.

4.2.2. ANÁLISIS FRECUENCIAL PARA BOQUILLAS COMERCIALES

En este estudio se van a comparar entre sí 6 boquillas comerciales, de los fabricantes Yamaha, Selmer y Claude Lakey. Dichas boquillas están encuadradas en diversos estilos, y cada una tiene unas determinadas cualidades, recogidas en la tabla siguiente.

	YAMAHA 4C	SELMER SD	SELMER S80C	SELMER SSE	C. LAKEY 5*3	C. LAKEY 6*3
ABERTURA [mm]	1,65	1,87	1,7	2,05	2,1	2,23
ÁREA ABERTURA [mm ²]	19,9758	21,292	19,356	23,341	24,724	26,256
ÁREA GARGANTA [mm ²]	142,978	118,408	108,716	116,831	127,144	127,144
TIPO DE BAFFLE	STRAIGHT	ROLL-OVER	ROLL-OVER	STRAIGHT	ROLL-OVER	ROLL-OVER
LARGO CÁMARA [mm]	45,420	47,300	49,550	45,100	37,200	37,200
VOLÚMEN CÁMARA (mm ³)	4759,800	4620,2	5291,800	5064,300	3123,400	3137,600
RELACIÓN VOLUMEN - GARGANTA	33,290	39,019	48,675	43,347	24,566	24,678
TIPO DE GARGANTA	TRADICIONAL	TRADICIONAL	CUADRADA	REDONDA	TRADICIONAL RECTA	TRADICIONAL RECTA
TIPO DE CÁMARA	CÓNCAVA	CÓNCAVA	CÓNCAVA	CÓNCAVA - CILÍNDRICA	CONVEXA	CONVEXA
ESTILO	CLÁSICO	CLÁSICO	CLÁSICO	CLÁSICO - JAZZ	JAZZ	JAZZ

Tabla 8. Características de las boquillas comerciales

Como se ha dicho anteriormente, el análisis del espectro armónico consistirá en la grabación del sonido emitido por la boquilla, ejecutando una nota de frecuencia aproximada 440 Hz. Posteriormente, se utilizará el programa comercial *MATLAB* para realizar la transformación al dominio de la frecuencia, obteniéndose así los distintos espectros armónicos.

Para la comparación de boquillas, se van a tener en cuenta lo siguiente:

- Distribución gráfica de armónicos: en este caso se realiza inspección visual de la gráfica en la que se enfrentan las amplitudes relativas al armónico fundamental de los 12 primeros armónicos, y su frecuencia correspondiente. De este modo, se puede valorar qué formantes son los que influyen en el timbre, de acuerdo a la siguiente tabla.

NÚMERO	CARACTERÍSTICA A	CARACTERÍSTICA B	CARACTERÍSTICA C
1	REFERENCIA	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; transform: rotate(-90deg); transform-origin: center;"> Más armónicos superiores, menos pobre </div> ↓	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; transform: rotate(-90deg); transform-origin: center;"> Más armónicos superiores REFORZADOS, más brillante </div> ↓
2	REFUERZO ALTURA		
3	REDONDO		
4	REFUERZO ALTURA		
5	REDONDO		
6	NASAL		
7	ASPERO DISON		
8	REFUERZO ALTURA		
9	NASAL		
10	REDONDO		
11	ASPERO DISON		
12	NASAL		

Tabla 9. Características del timbre en función de la predominancia de los distintos armónicos

- Diferencia de afinación con cada armónico teórico: se valorará la diferencia porcentual de cada uno de los formantes con respecto al armónico teórico de la serie. Así, se podrá concluir si la boquilla tiene afinación “baja” o “alta” según la distribución de sus armónicos, y si dicha diferencia de afinación es notable o se puede despreciar, según sea centrado o desafinado. La siguiente fórmula explica la diferencia de afinación para cada “ n ” armónico.

$$Frecuencia_n = \frac{Frecuencia\ medida_n}{n \cdot Frecuencia\ fundamental\ (440\ Hz)}$$

Si Frecuencia < 1 ⇒ Afinación baja

Si Frecuencia > 1 ⇒ Afinación alta

La diferencia de afinación o DAF indica si la diferencia entre una boquilla determinada es notable o indiferente, mediante la diferencia porcentual entre sus frecuencias relativas.

- Diferencia de amplitud: se tiene en cuenta la diferencia porcentual entre las amplitudes relativas de las dos boquillas, y mediante la DAM o diferencia de amplitud, se valora en qué formantes hay una diferencia significativa.
- Posición del armónico: indica la desviación en la frecuencia de cada armónico con respecto a la frecuencia teórica de dicho formante (centrado o desafinado).

Para comparar estos parámetros, se utilizan los siguientes valores de referencia:

Valor límite diferencia afinación	1,01
Valor límite amplitud	1,4
Valor límite afinación teórica	1,02

Tabla 10. Valores límite para el análisis

El primer valor indica la relación máxima para considerarlas similares entre las afinaciones de dos boquillas, y el segundo, la relación máxima entre sus amplitudes. El valor de la afinación teórica indica la máxima desviación con respecto a la frecuencia exacta del armónico.

4.2.2.1. ANÁLISIS FRECUENCIAL SELMER S80 – SELMER SOLOIST D

Estas dos boquillas son utilizadas fundamentalmente para la interpretación clásica. Tienen características similares (cámara cóncava, tipo de baffle, áreas de abertura y garganta semejantes, etc.) y, aunque la forma de la garganta es diferente, no debería influir demasiado.

A continuación se muestra la gráfica con los picos de los armónicos, para una dureza de caña del nº3.

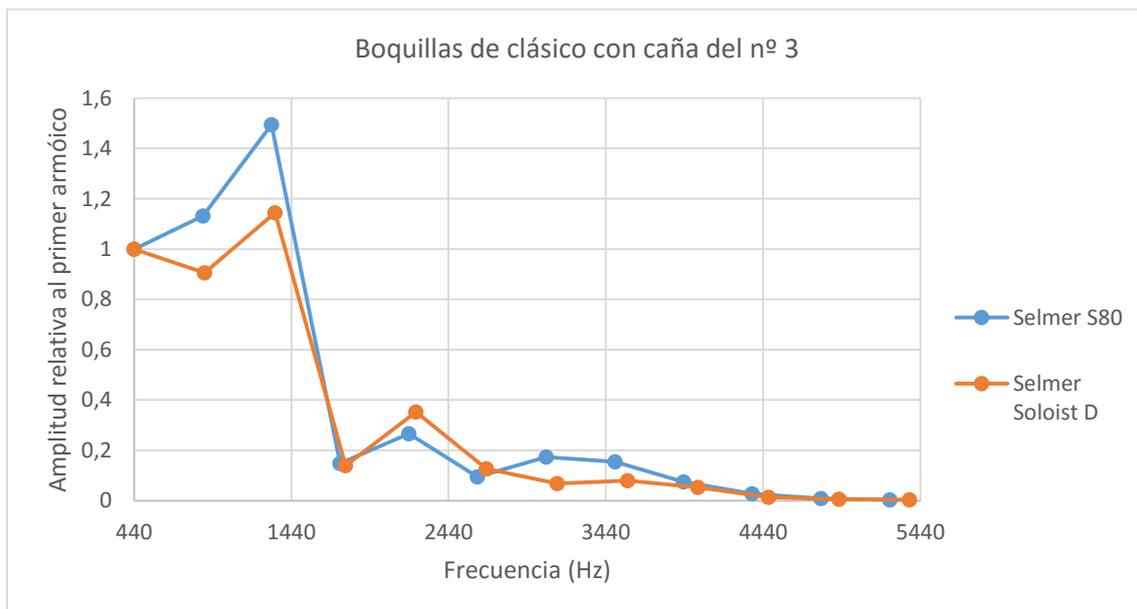


Gráfico 4. Análisis frecuencial a boquillas de clásico con caña nº3

Como se puede observar en la gráfica, la curva de armónicos tiene una forma similar en ambas boquillas, resaltándose en particular la zona del tercer armónico, de mayor amplitud que la fundamental, así como del quinto armónico, siendo éste el de mayor amplitud de los siguientes armónicos al tercero.

Estas características confieren a estas boquillas similares, un timbre redondo reforzado por los armónicos 3 y 5, además de una sensación reforzada de la altura, debido a un segundo armónico muy amplio. Como se puede observar, el séptimo armónico en la boquilla S80 es más amplio que en SSD, con lo que su sonido será más áspero.

En cuanto a la afinación, se puede ver, en la siguiente tabla, que los formantes de la boquilla S80 están ligeramente bajos, mientras que los de la boquilla SSD están ligeramente altos, apareciendo una diferencia de afinación notable. Además, estas boquillas contienen todos sus parciales dentro del rango de afinación temperada, con lo que son unas boquillas bien afinadas.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	S80	SSD	S80	SSD	S80	SSD		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	0,9964	1,0094	CENTRADO	CENTRADO	1,1311	0,9060		
3	0,9952	1,0125	CENTRADO	CENTRADO	1,4948	1,1441		
4	0,9946	1,0141	CENTRADO	CENTRADO	0,1478	0,1389		
5	0,9942	1,0151	CENTRADO	CENTRADO	0,2660	0,3522		
6	0,9940	1,0157	CENTRADO	CENTRADO	0,0949	0,1265		
7	0,9938	1,0161	CENTRADO	CENTRADO	0,1736	0,0682		
8	0,9937	1,0165	CENTRADO	CENTRADO	0,1549	0,0792		
9	0,9936	1,0167	CENTRADO	CENTRADO	0,0748	0,0525		
10	0,9935	1,0169	CENTRADO	CENTRADO	0,0271	0,0140		
11	0,9934	1,0171	CENTRADO	CENTRADO	0,0084	0,0057		
12	0,9934	1,0173	CENTRADO	CENTRADO	0,0029	0,0036		

Tabla 11. Valores obtenidos en boquillas de clásico con caña nº3

En último lugar, cabe reseñar que la diferencia de amplitud entre los formantes de ambas boquillas, como se recoge en el parámetro DAM, no es constante, siendo mayor en los armónicos superiores, donde la amplitud de la boquilla S80 es mayor, con lo que esta boquilla tiene un timbre más brillante.

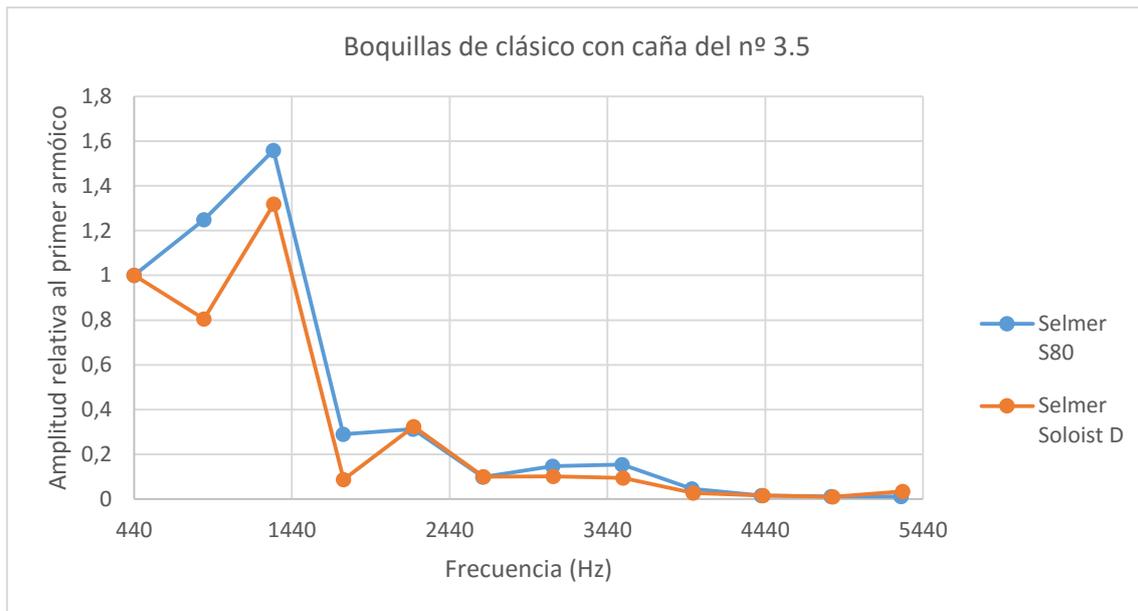


Gráfico 5. Análisis frecuencial a boquillas de clásico con caña nº3.5

En el caso de aumentar la dureza de la caña al número 3.5, la distribución de armónicos no varía significativamente, si bien la potencia de la mayoría de ellos aumenta, ya que una caña de mayor dureza, al ser más rígida, requiere de mayor cantidad de aire y, por tanto, implica mayor volumen.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	S80	SSD	S80	SSD	S80	SSD		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0021	1,0033	CENTRADO	CENTRADO	1,2492	0,8057		
3	1,0030	1,0044	CENTRADO	CENTRADO	1,5588	1,3196		
4	1,0034	1,0048	CENTRADO	CENTRADO	0,2892	0,0864		
5	1,0035	1,0052	CENTRADO	CENTRADO	0,3121	0,3243		
6	1,0037	1,0054	CENTRADO	CENTRADO	0,0985	0,0997		
7	1,0038	1,0055	CENTRADO	CENTRADO	0,1466	0,1007		
8	1,0038	1,0057	CENTRADO	CENTRADO	0,1535	0,0938		
9	1,0039	1,0057	CENTRADO	CENTRADO	0,0455	0,0269		
10	1,0039	1,0060	CENTRADO	CENTRADO	0,0150	0,0155		
11	1,0040	1,0059	CENTRADO	CENTRADO	0,0112	0,0096		
12	1,0040	1,0059	CENTRADO	CENTRADO	0,0113	0,0349		

Tabla 12. Valores obtenidos en boquillas de clásico con caña nº3.5

La diferencia en afinación se corrige, ya que una caña de mayor dureza “estabiliza” la columna de aire, elevando así la afinación en la S80, consiguiendo además mayor amplitud en los primeros armónicos.

4.2.2.2. ANÁLISIS FRECUENCIAL YAMAHA 4C – SELMER SUPER SESSION E

Al igual que las anteriores, estas boquillas se utilizan para la interpretación clásica. Sin embargo, tienen características que se consideran diferentes, aunque el tipo de baffle es el mismo, siendo éste un parámetro muy importante en el sonido.

En la siguiente gráfica observamos la distribución de formantes.

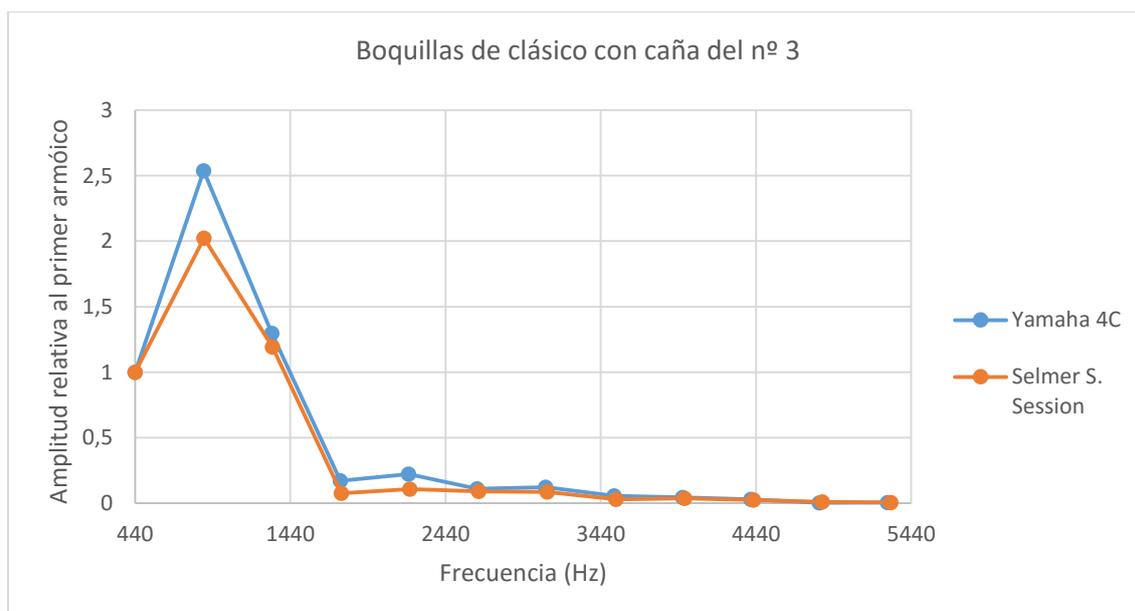


Gráfico 6. Análisis frecuencial a boquillas de clásico con caña nº3

Como se puede observar, la curva de armónicos de ambas boquillas es similar, resaltándose la zona del segundo armónico, con mayor amplitud que la fundamental, que refuerza la sensación de altura, el tercer armónico, de mayor amplitud que la fundamental, así como del quinto armónico, siendo éste el de mayor amplitud de los siguientes armónicos al tercero.

Gracias a esta distribución de armónicos, el sonido es redondo (formantes 3 y 5), con la fundamental muy reforzada gracias al segundo armónico.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	Y4C	SSS	Y4C	SSS	Y4C	SSS		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0007	1,0030	CENTRADO	CENTRADO	2,5377	2,0220		
3	1,0009	1,0040	CENTRADO	CENTRADO	1,2975	1,1906		
4	1,0010	1,0045	CENTRADO	CENTRADO	0,1708	0,0740		
5	1,0011	1,0048	CENTRADO	CENTRADO	0,2203	0,1068		
6	1,0012	1,0051	CENTRADO	CENTRADO	0,1083	0,0904		
7	1,0017	1,0052	CENTRADO	CENTRADO	0,1212	0,0840		
8	1,0017	1,0053	CENTRADO	CENTRADO	0,0552	0,0298		
9	1,0017	1,0054	CENTRADO	CENTRADO	0,0445	0,0357		
10	1,0016	1,0055	CENTRADO	CENTRADO	0,0275	0,0244		
11	1,0019	1,0055	CENTRADO	CENTRADO	0,0019	0,0082		
12	1,0016	1,0056	CENTRADO	CENTRADO	0,0033	0,0047		

Tabla 13. Valores obtenidos en boquillas de clásico con caña nº3

La afinación en las boquillas es prácticamente igual, si bien la SSS es ligeramente más alta, pero las diferencias son mínimas, con lo que son boquillas de buena afinación.

En cuanto a la diferencia de amplitud, la SSS tiene menor amplitud en todo el registro excepto en los armónicos más superiores, con lo que será ligeramente más brillante.

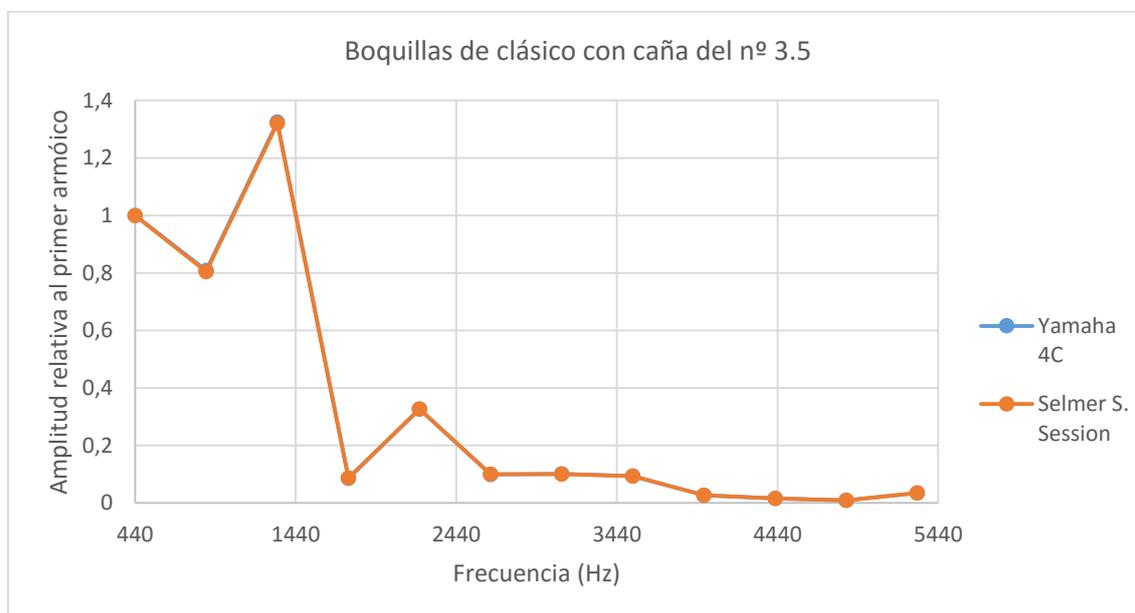


Gráfico 7. Análisis frecuencial a boquillas de clásico con caña nº3.5

El análisis de estas dos boquillas con caña dura es el más sorprendente, ya que tanto frecuencias como amplitudes relativas son prácticamente iguales. Esto ocasiona que el sonido sea muy similar (sólo determinado mínimamente por los armónicos más altos, fuera de este estudio).

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	Y4C	SSS	Y4C	SSS	Y4C	SSS		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0031	1,0032	CENTRADO	CENTRADO	0,8085	0,8042		
3	1,0043	1,0044	CENTRADO	CENTRADO	1,3252	1,3205		
4	1,0048	1,0048	CENTRADO	CENTRADO	0,0863	0,0865		
5	1,0052	1,0052	CENTRADO	CENTRADO	0,3272	0,3264		
6	1,0054	1,0054	CENTRADO	CENTRADO	0,0998	0,0999		
7	1,0055	1,0056	CENTRADO	CENTRADO	0,1011	0,1006		
8	1,0057	1,0057	CENTRADO	CENTRADO	0,0937	0,0935		
9	1,0057	1,0057	CENTRADO	CENTRADO	0,0270	0,0269		
10	1,0059	1,0060	CENTRADO	CENTRADO	0,0155	0,0155		
11	1,0059	1,0059	CENTRADO	CENTRADO	0,0096	0,0096		
12	1,0059	1,0059	CENTRADO	CENTRADO	0,0349	0,0349		

Tabla 14. Valores obtenidos en boquillas de clásico con caña nº3.5

A pesar de los colores de la tabla, se puede observar que en ambas boquillas la afinación y la amplitud son semejantes.

4.2.2.3. ANÁLISIS FRECUENCIAL CLAUDE LAKEY 5 – CLAUDE LAKEY 6

En este caso, son boquillas utilizadas para la interpretación de jazz, así como de otros estilos modernos. Son boquillas exactamente iguales a excepción de la abertura, con lo que se presupone que la distribución de armónicos va a ser muy similar, a excepción de la potencia (mayor abertura, mayor cantidad de aire, mayor potencia de sonido).

A continuación se muestra la distribución de armónicos.

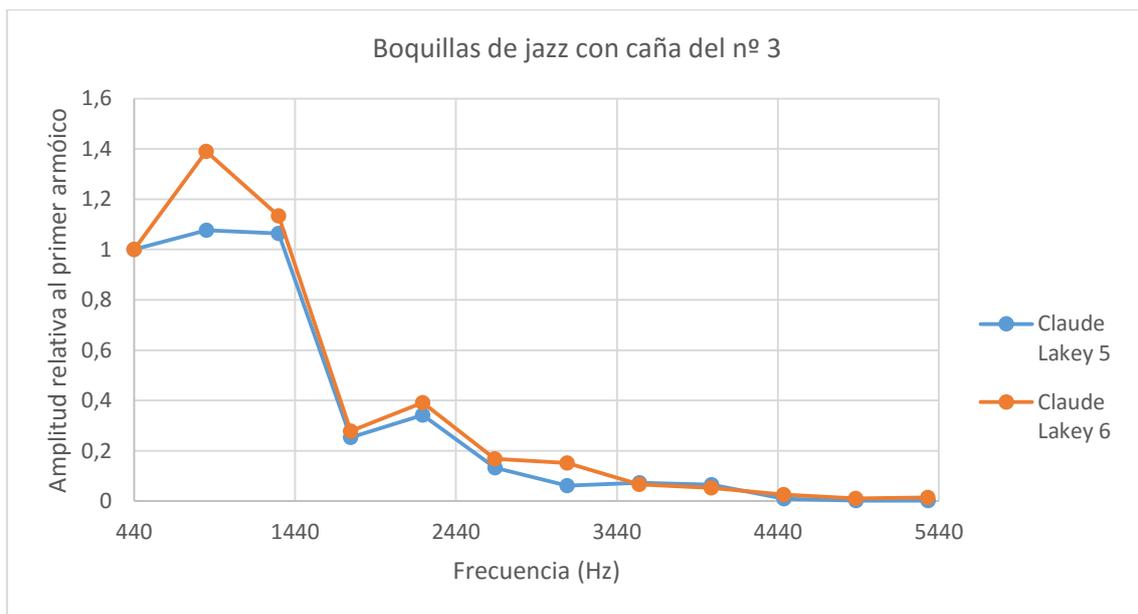


Gráfico 8. Análisis frecuencial a boquillas de jazz con caña nº3

En la gráfica se puede comprobar que ambas curvas son muy similares y, como se decía anteriormente, la curva de la boquilla Claude Lakey 6 tiene mayor amplitud, debido a su mayor abertura. Al ser boquillas muy potentes, los armónicos que refuerzan la sensación de fundamental tienen mayor amplitud, así como el quinto armónico que redondea el sonido. Sin embargo, el séptimo armónico es mayor en la boquilla 6 que en la 5, con lo que el sonido será más áspero.

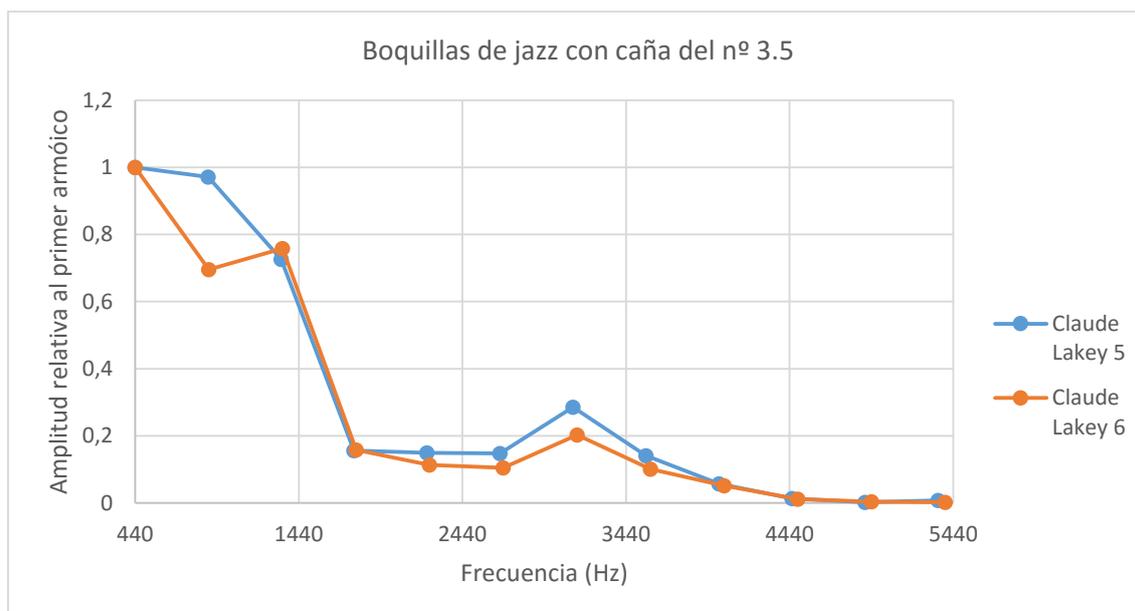
La gran cantidad de armónicos superiores confiere a estas boquillas un timbre brillante, apropiado para los estilos modernos.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	CL5	CL6	CL5	CL6	CL5	CL6		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0097	1,0094	CENTRADO	CENTRADO	1,0772	1,3901		
3	1,0130	1,0125	CENTRADO	CENTRADO	1,0641	1,1336		
4	1,0146	1,0141	CENTRADO	CENTRADO	0,2535	0,2787		
5	1,0155	1,0151	CENTRADO	CENTRADO	0,3417	0,3917		
6	1,0161	1,0157	CENTRADO	CENTRADO	0,1322	0,1675		
7	1,0166	1,0161	CENTRADO	CENTRADO	0,0609	0,1518		
8	1,0170	1,0165	CENTRADO	CENTRADO	0,0724	0,0661		
9	1,0172	1,0167	CENTRADO	CENTRADO	0,0652	0,0532		
10	1,0175	1,0169	CENTRADO	CENTRADO	0,0099	0,0264		
11	1,0177	1,0171	CENTRADO	CENTRADO	0,0024	0,0109		
12	1,0178	1,0173	CENTRADO	CENTRADO	0,0017	0,0141		

 Tabla 15. Valores obtenidos en boquillas de jazz con caña n^o3

En referencia a la afinación, se puede decir que ambas boquillas tienen una afinación exactamente igual, ya que las dimensiones interiores son exactamente iguales. Esta afinación es un poco elevada, con lo que acentúa la sensación de brillantez. Además, son boquillas fáciles de afinar pues su desviación con respecto al armónico teórico no supera el máximo.

En cuanto la amplitud, la boquilla Claude Lakey 6 es más potente que la 5, siendo considerable esta diferencia en el séptimo armónico, así como en los armónicos superiores.


 Gráfico 9. Análisis frecuencial a boquillas de jazz con caña n^o3.5

En el caso de usar la caña dura, al tener una abertura muy grande la boquilla Claude Lakey 6, reduce su potencia (en general). Esta caña, además, acentúa el carácter áspero y disonante de estas boquillas, aumentando considerablemente la potencia del séptimo armónico, así como un sonido más brillante (en el caso de la Claude Lakey 5, mayor brillantez al tener menor abertura) en todos los armónicos.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	CL5	CL6	CL5	CL6	CL5	CL6		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0069	1,0112	CENTRADO	CENTRADO	0,9717	0,6956		
3	1,0091	1,0150	CENTRADO	CENTRADO	0,7263	0,7585		
4	1,0104	1,0169	CENTRADO	CENTRADO	0,1563	0,1582		
5	1,0110	1,0181	CENTRADO	CENTRADO	0,1492	0,1131		
6	1,0115	1,0188	CENTRADO	CENTRADO	0,1476	0,1043		
7	1,0118	1,0197	CENTRADO	CENTRADO	0,2853	0,2030		
8	1,0120	1,0200	CENTRADO	DESAFINADO	0,1406	0,1007		
9	1,0123	1,0203	CENTRADO	DESAFINADO	0,0574	0,0515		
10	1,0124	1,0205	CENTRADO	DESAFINADO	0,0131	0,0113		
11	1,0126	1,0207	CENTRADO	DESAFINADO	0,0021	0,0035		
12	1,0126	1,0211	CENTRADO	DESAFINADO	0,0074	0,0014		

Tabla 16. Valores obtenidos en boquillas de jazz con caña nº3.5

En cuanto a la diferencia de afinación no es notable, sin embargo los armónicos superiores de la CL6 están muy desafinados. La diferencia de amplitud es importante en sextos y séptimo armónicos, así como en el 11 y 12, aumentando así el carácter nasal y disonante de la CL5 sobre la CL6.

4.2.3. ANÁLISIS FRECUENCIAL PARA BOQUILLAS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN PROPIOS. ESTUDIO DE INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS

Este análisis frecuencial es la parte más importante del estudio del sonido de las boquillas de saxofón. Para ello, se ha dividido el trabajo en tres partes:

- Diseño: mediante una modelización paramétrica de las boquillas en un programa CAD (concretamente, *CATIA*), se han obtenido 16 modelos operativos de boquilla, los cuales serán objeto de estudio. Entre dichas boquillas se realizarán las variaciones dimensionales.
- Fabricación: gracias a técnicas de fabricación por adición, como son la impresión 3D y la estereolitografía, se obtienen modelos físicos de las boquillas.
- Grabación y análisis: de igual forma que con las boquillas de fabricante, se procede al estudio de las variaciones entre diversas boquillas.

Para el análisis, se utilizará una boquilla de referencia (señalándose en cada uno de los experimentos a cuál corresponde), que se ha diseñado con los parámetros más comunes en las boquillas que los fabricantes ofrecen en el mercado.

En general, las características exteriores son comunes a todas las boquillas del experimento, con lo que a continuación se relatan las características más importantes que se han considerado, es decir, las interiores:

- Largo de la boquilla y profundidad del taladro.
- Ancho de punta.
- Inclinación de la tabla.
- Dimensiones de la garganta.
- Grosor en punta.
- Ángulo de la rampa.
- Abertura y longitud de abertura.
- Ángulo de las paredes de la cámara.
- Ángulos de entrada y salida de la cámara (tipo de cámara).

Así, modificando estos nueve grupos de dimensiones se comenzarán a diseñar las variaciones de boquillas que permitan analizar el espectro armónico y, con ello, su sonido.

En la siguiente tabla se presentan las dimensiones anteriores con sus valores para la boquilla de referencia:

Parámetro	Valor
Profundidad del taladro [mm]	46,000
Largo total de la boquilla [mm]	90,000
Ancho de la punta [mm]	16,682
Inclinación de la tabla [°]	5,604
Alto total de la garganta [mm]	12,552
Alto lateral de la garganta [mm]	7,745
Ancho de la garganta [mm]	12,200
Distancia al centro [mm]	6,625
Distancia inferior [mm]	3,288
Grosor de la punta [mm]	0,700
Ángulo de la rampa [°]	24,000
Abertura [mm]	2,000
Longitud de la abertura [mm]	20,000
Ángulo lateral cámara [°]	1,200
Ángulo entrada cámara [°]	18,000
Ángulo salida cámara [°]	95,000
Tipo de cámara	Cóncava

Tabla 17. Valores de las magnitudes utilizadas en la boquilla de referencia B9

Estos valores representan la boquilla de referencia de la que a continuación se puede ver una fotografía, así como un boceto de la vista lateral seccionada e inferior. Esta boquilla ha sido nombrada como B9, utilizándose en el estudio boquillas desde la B7 a la B22. En la imagen se puede observar la boquilla de referencia una vez fabricada.



Figura 27. Boquilla de referencia B9 fabricada mediante impresión 3D

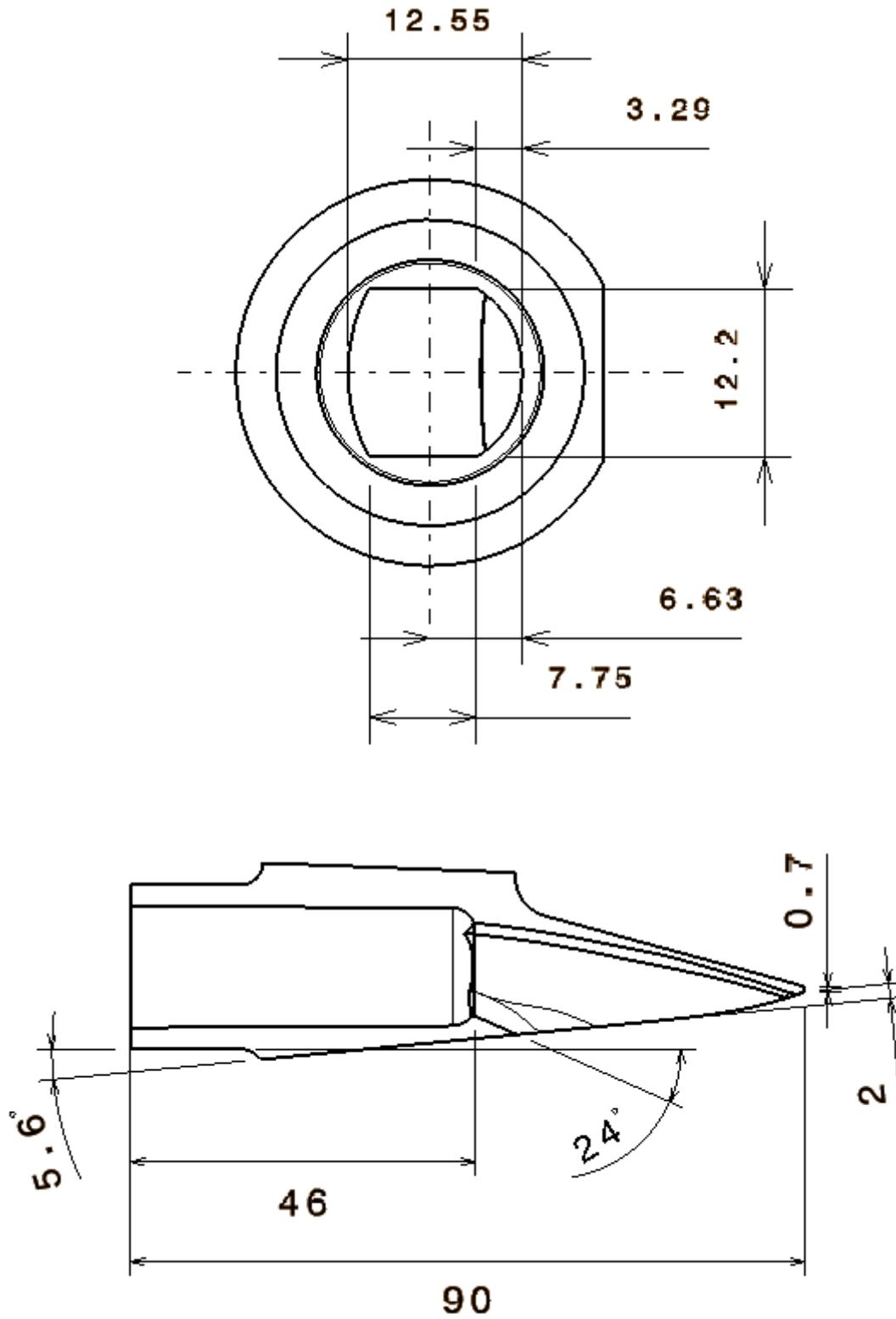


Figura 28. Plano de la boquilla de referencia con las magnitudes fundamentales

En las siguientes gráficas se presentan los resultados de aplicar el análisis frecuencial a dicha boquilla de referencia.

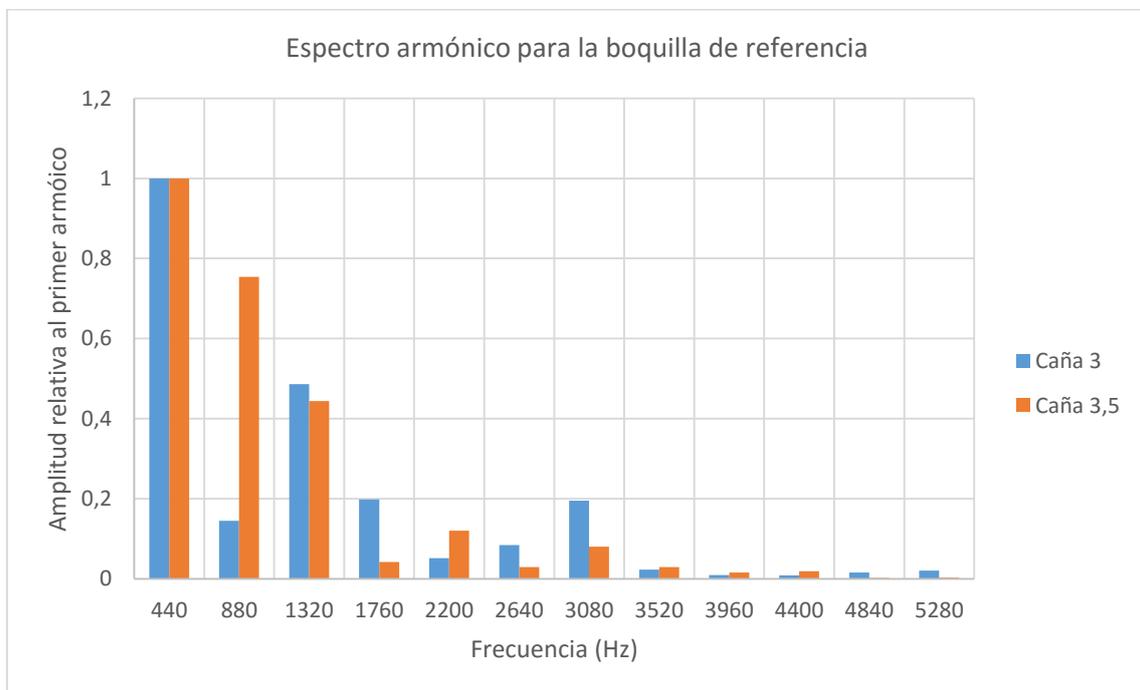
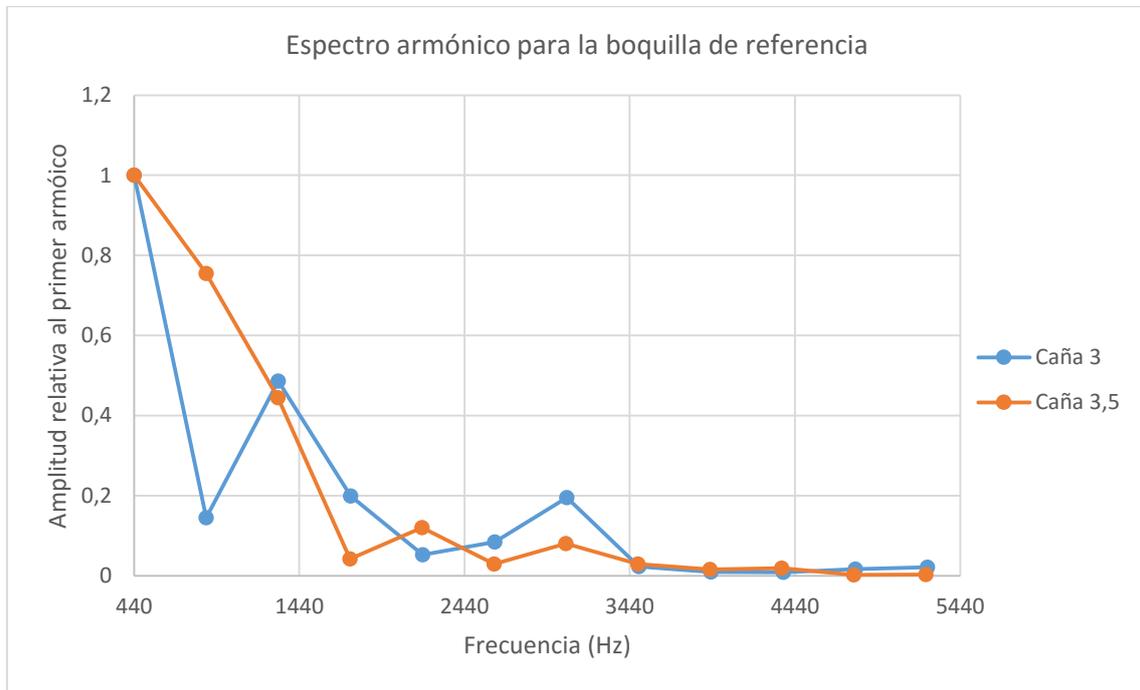


Gráfico 10. Análisis frecuencial a la boquilla de referencia

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	Caña 3	Caña 3,5	Caña 3	Caña 3,5	Caña 3	Caña 3,5		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	0,9961	0,9951	CENTRADO	CENTRADO	0,1448	0,7544		
3	0,9949	0,9934	CENTRADO	CENTRADO	0,4862	0,4443		
4	0,9942	0,9927	CENTRADO	CENTRADO	0,1987	0,0418		
5	0,9938	0,9921	CENTRADO	CENTRADO	0,0521	0,1200		
6	0,9936	0,9918	CENTRADO	CENTRADO	0,0845	0,0292		
7	0,9933	0,9915	CENTRADO	CENTRADO	0,1951	0,0805		
8	0,9932	0,9914	CENTRADO	CENTRADO	0,0229	0,0296		
9	0,9931	0,9912	CENTRADO	CENTRADO	0,0094	0,0158		
10	0,9930	0,9911	CENTRADO	CENTRADO	0,0087	0,0193		
11	0,9930	0,9911	CENTRADO	CENTRADO	0,0161	0,0024		
12	0,9929	0,9910	CENTRADO	CENTRADO	0,0209	0,0028		

Tabla 18. Valores obtenidos en la boquilla de referencia

Como se puede observar en los gráficos y en la tabla, la boquilla sigue una forma típica de clásico, resaltándose el segundo, tercero y quinto armónico. Se resaltan particularmente el segundo y quinto con la caña dura, lo que le confiere mayor potencia. La diferencia en el segundo armónico además es muy apreciable.

La afinación es muy centrada, siendo más centrada con la caña dura, sin embargo no existe una diferencia en la afinación apreciable.

A continuación se van a ir presentando todos los resultados correspondientes a las distintas variaciones dimensionales en las boquillas.

4.2.3.1. VARIACIÓN DEL TECHO DE LA CÁMARA

A igualdad del resto de dimensiones, la diferencia presente en estas dos boquillas se debe a la forma del techo de la cámara, siendo de esta manera convexo o cóncavo, como se puede ver en la siguiente imagen.

Se ha elegido este análisis como el inicial porque es la diferencia más notable entre las boquillas consideradas “de clásico” y las boquillas “de jazz”.

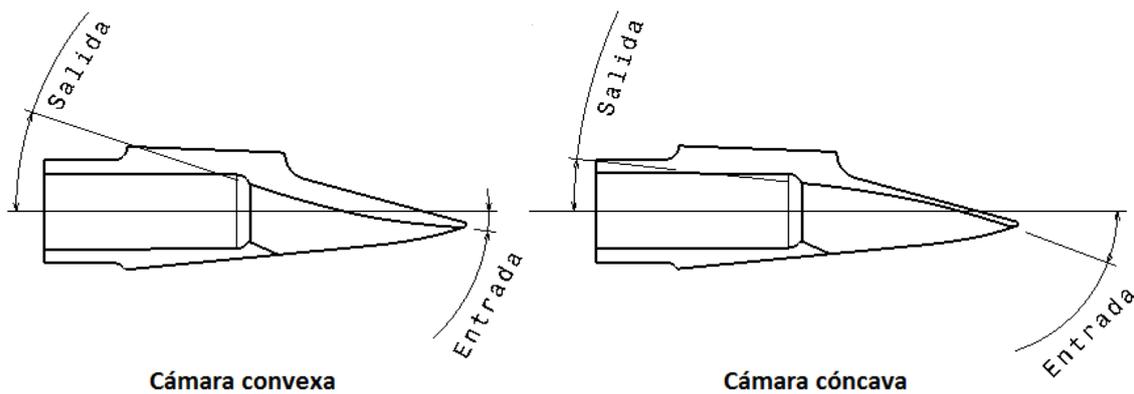


Figura 29. Esquema de la variación del techo de la cámara

El tipo de cámara viene determinado por los ángulos de entrada y salida del perfil de ésta, siendo, en el caso de la convexa, de menor a mayor, y viceversa en el caso de la cóncava.

Los valores de dichos ángulos para ambas configuraciones son los siguientes:

	VARIACIÓN DEL TIPO DE CÁMARA [°]	
	CONVEXA	CÓNCAVA
Ángulo de entrada	5	18
Ángulo de salida	20	5

Tabla 19. Valores de los ángulos utilizados

Así, los resultados obtenidos son los siguientes, para las dos cañas (número 3 y número 3.5, respectivamente) distintas objeto de estudio.

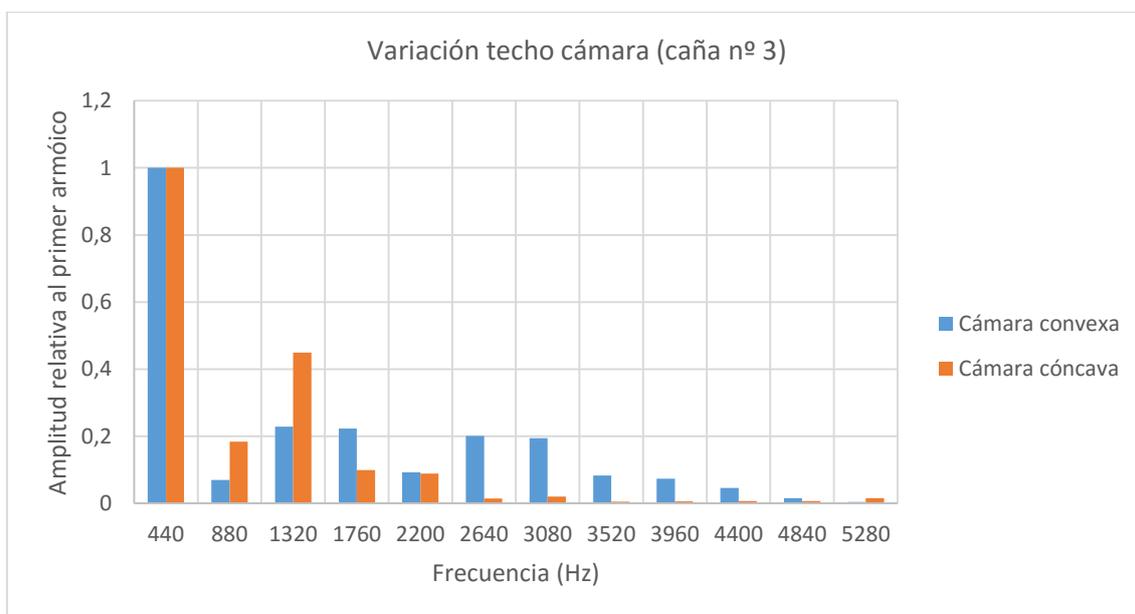
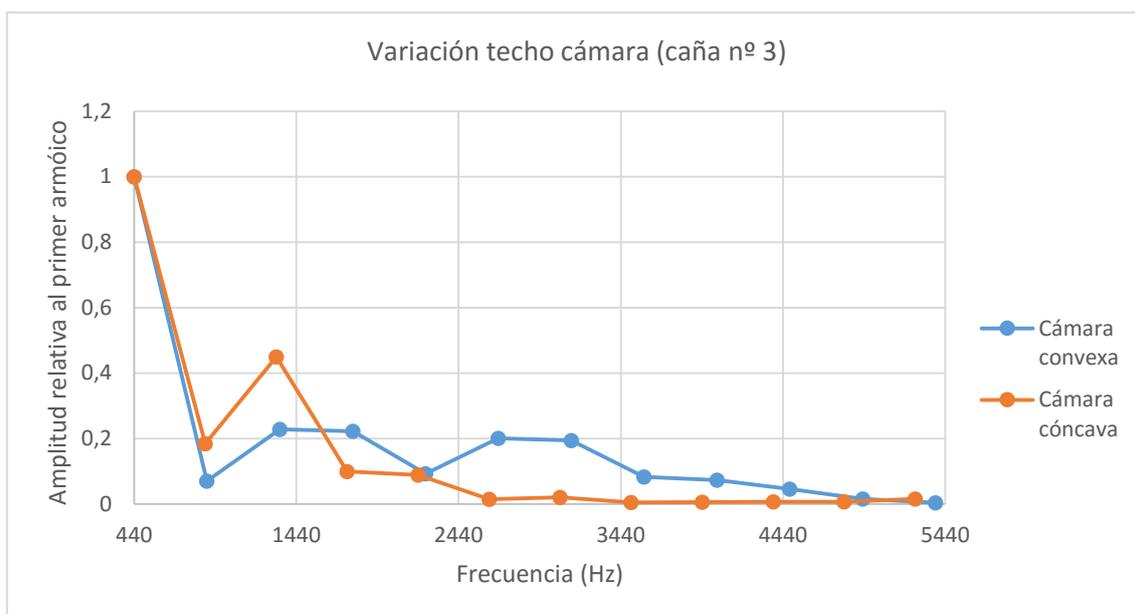


Gráfico 11. Análisis frecuencial con variación del techo de la cámara y caña nº3

Como se observa en la gráfica, la boquilla con cámara cóncava tiene un sonido más redondo debido a su mayor amplitud en el tercer armónico, y un pequeño pico tanto en el cuarto como en el quinto armónico, lo que refuerza la nota fundamental y da al sonido un timbre más redondo, respectivamente.

La boquilla con cámara convexa, a partir del cuarto armónico tiene amplitudes mucho mayores que la anterior, lo que motiva un timbre muy brillante. Además, la presencia del sexto y séptimo armónicos reforzados motiva un timbre nasal y áspero, respectivamente.

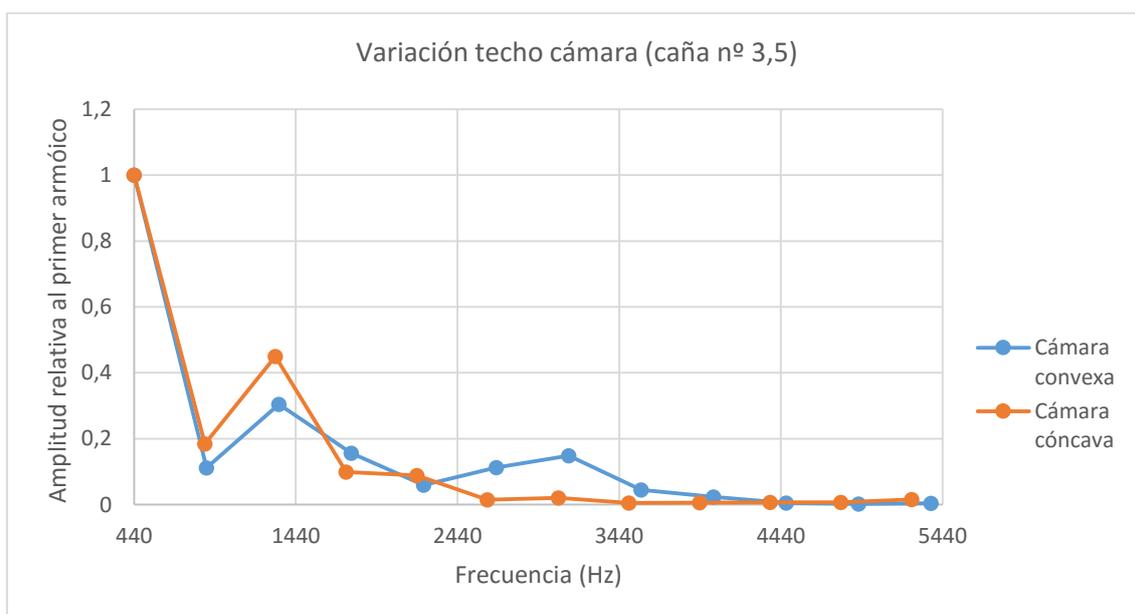
La afinación en ambas boquillas, si bien es muy diferente (la boquilla con cámara convexa tiene una afinación alta, mientras que la de cámara cóncava es baja, existiendo una diferencia de afinación notable), se encuentra dentro de los límites de afinación temperada, con lo que su afinación es centrada.

Finalmente, la amplitud es muy dispar (excepto en el quinto armónico). En los primeros armónicos la cámara cóncava tiene mayor amplitud, si bien a partir del cuarto armónico la de la cámara convexa es mayor, lo que le confiere su timbre brillante.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	Convexa	Cóncava	Convexa	Cóncava	Convexa	Cóncava		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0108	0,9975	CENTRADO	CENTRADO	0,0701	0,1841		
3	1,0140	0,9966	CENTRADO	CENTRADO	0,2282	0,4498		
4	1,0157	0,9962	CENTRADO	CENTRADO	0,2226	0,0992		
5	1,0168	0,9959	CENTRADO	CENTRADO	0,0923	0,0883		
6	1,0174	0,9958	CENTRADO	CENTRADO	0,2006	0,0149		
7	1,0179	0,9957	CENTRADO	CENTRADO	0,1940	0,0205		
8	1,0183	0,9955	CENTRADO	CENTRADO	0,0831	0,0046		
9	1,0186	0,9955	CENTRADO	CENTRADO	0,0731	0,0055		
10	1,0189	0,9954	CENTRADO	CENTRADO	0,0456	0,0072		
11	1,0190	0,9954	CENTRADO	CENTRADO	0,0155	0,0067		
12	1,0192	0,9954	CENTRADO	CENTRADO	0,0040	0,0153		

Tabla 20. Valores obtenidos en la variación del techo de la cámara y caña nº3

A continuación, se presentan los resultados para la caña del número 3.5.



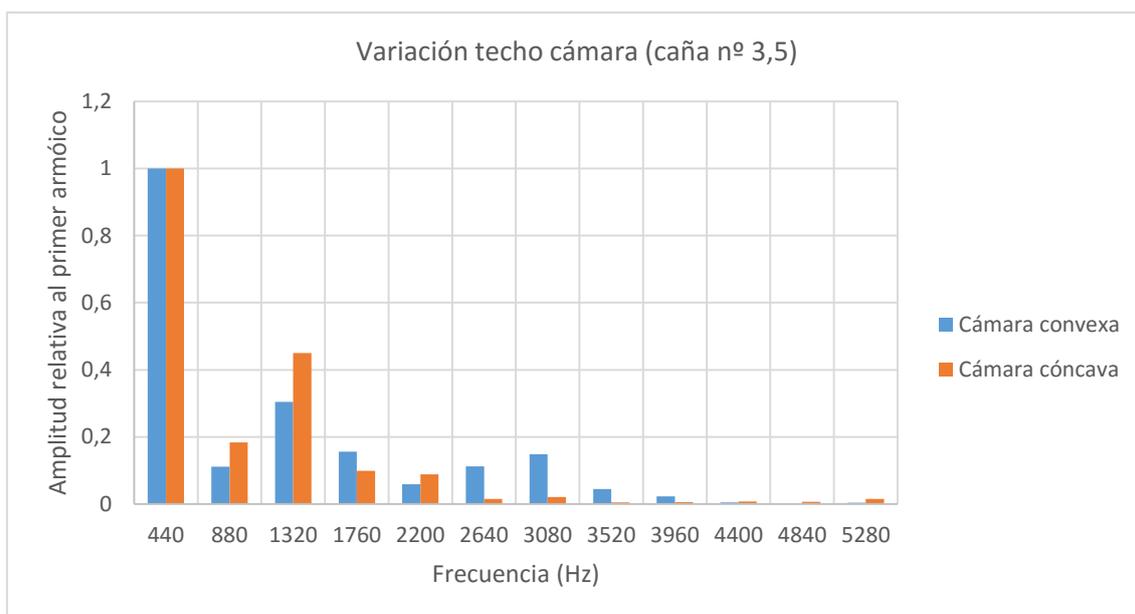


Gráfico 12. Análisis frecuencial con variación del techo de la cámara y caña nº3.5

Al igual que para la caña nº 3, la boquilla con cámara cóncava tiene un sonido más redondo debido a su mayor amplitud en el tercer armónico, y los pequeños picos en el cuarto y quinto armónicos, lo que refuerza la nota fundamental y da al sonido un timbre más redondo, respectivamente.

La boquilla con cámara convexa, a partir del cuarto armónico tiene amplitudes mayores que la anterior, lo que motiva un timbre más brillante. Sin embargo, al haber aumentado la dureza de la caña, si bien aumenta la potencia relativa de los armónicos responsables de redondear el sonido, también disminuye la amplitud de los armónicos superiores, lo que disminuye las diferencias con la cámara cóncava.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	Convexa	Cóncava	Convexa	Cóncava	Convexa	Cóncava		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0093	0,9969	CENTRADO	CENTRADO	0,1115	0,1841		
3	1,0123	0,9958	CENTRADO	CENTRADO	0,3044	0,4498		
4	1,0137	0,9954	CENTRADO	CENTRADO	0,1565	0,0992		
5	1,0147	0,9950	CENTRADO	CENTRADO	0,0591	0,0883		
6	1,0153	0,9948	CENTRADO	CENTRADO	0,1124	0,0149		
7	1,0157	0,9947	CENTRADO	CENTRADO	0,1487	0,0205		
8	1,0160	0,9945	CENTRADO	CENTRADO	0,0446	0,0046		
9	1,0163	0,9944	CENTRADO	CENTRADO	0,0231	0,0055		
10	1,0165	0,9942	CENTRADO	CENTRADO	0,0051	0,0072		
11	1,0166	0,9941	CENTRADO	CENTRADO	0,0023	0,0067		
12	1,0168	0,9941	CENTRADO	CENTRADO	0,0036	0,0153		

Tabla 21. Valores obtenidos en la variación del techo de la cámara y caña nº3.5

En definitiva, se puede concluir lo siguiente:

La boquilla con cámara cóncava produce un timbre redondo y con buena amplitud en los primeros armónicos. Sin embargo, en los armónicos superiores son de poca amplitud relativa. Estas características la hacen apropiada para estilo clásico. Además, para enriquecer el sonido (es decir, aumentar la cantidad de armónicos superiores), la caña más dura da mejor resultado.

La boquilla con cámara convexa produce un timbre brillante, lo que la hace idónea para estilos modernos como el jazz, rock, etc. Una caña de mayor dureza produce el apagado de los armónicos superiores, sin embargo el timbre sigue siendo muy brillante.



Figura 30. Boquillas B7 y B8

4.2.3.2. VARIACIÓN DE LA COLOCACIÓN DE LA GARGANTA

La diferencia presente en estas boquillas es la colocación, con respecto al centro, del taladro de la garganta.

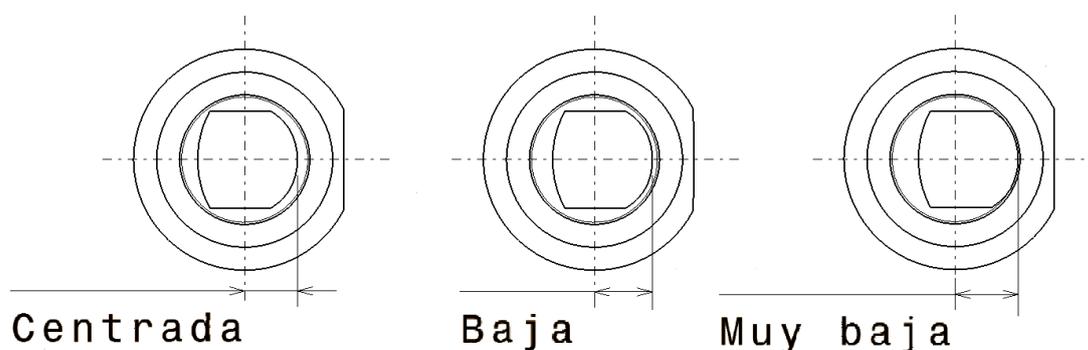


Figura 31. Esquema de la variación de la colocación de la garganta

La altura o colocación de la cámara es la distancia desde el eje del taladro de la boquilla a la base de la garganta, distinguiéndose así tres configuraciones distintas: centrada, que es la posición más habitual (y, en este caso, la que corresponde con la boquilla de referencia), y Baja y Muy baja, acercándose así a la tabla de la boquilla.

Debido a la modificación en la altura o colocación de la garganta, el ángulo de salida inferior o rampa se ve también afectado, siendo esto necesario para que se pueda mantener, lo más constante posible, el área de la abertura inferior en la boquilla.

Este tipo de variación no es habitual entre modelos de un mismo fabricante, ya que el taladro suele estar centrado. Sin embargo, está presente en ciertas boquillas, con lo que se ha considerado su estudio.

Los valores de altura de la garganta y sus correspondientes del ángulo de la rampa son los siguientes:

VARIACIÓN EN LA COLOCACIÓN DE LA GARGANTA [mm]			
	CENTRADA	BAJA	MUY BAJA
Distancia del centro del taladro a la base de la garganta	6,625	7,281	7,937
Ángulo de la rampa [°]	24	19	12

Tabla 22. Valores utilizados para la colocación de la garganta

Los resultados obtenidos son los siguientes, para las dos cañas objeto de estudio. La boquilla de referencia en este estudio es la de garganta centrada.

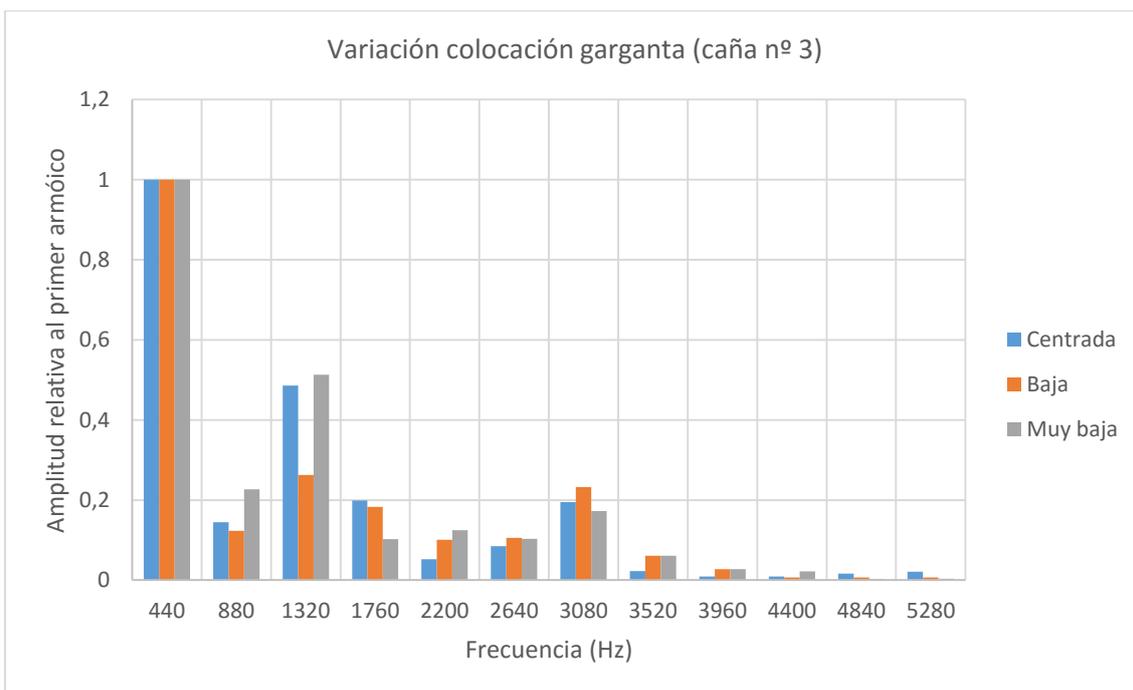
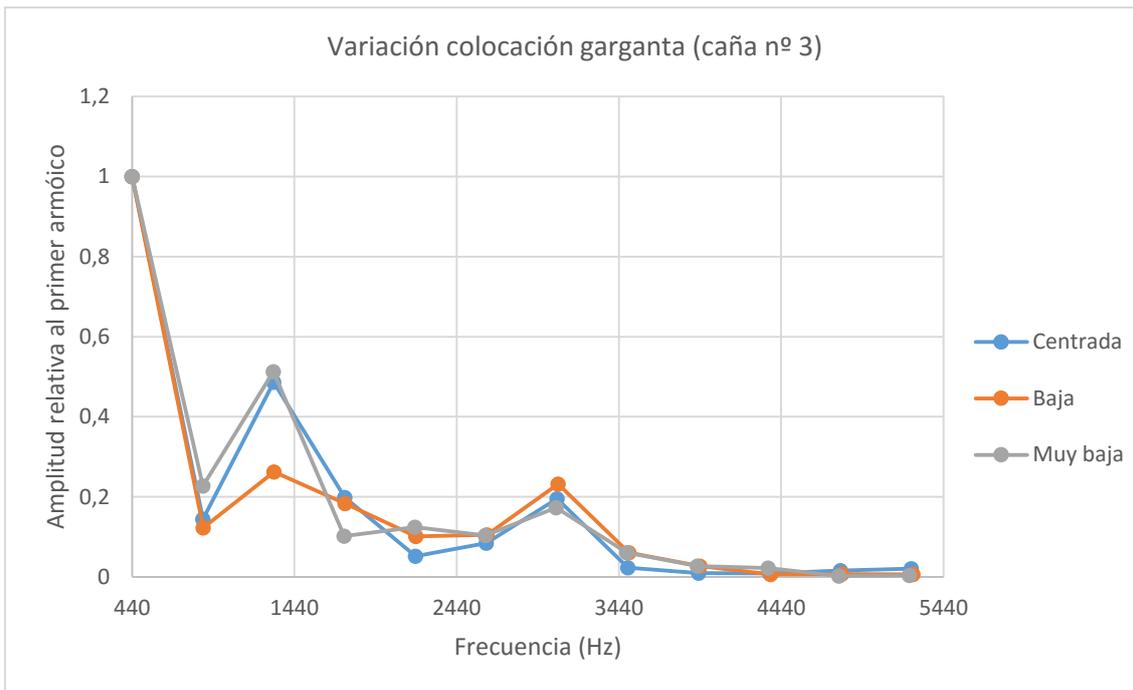


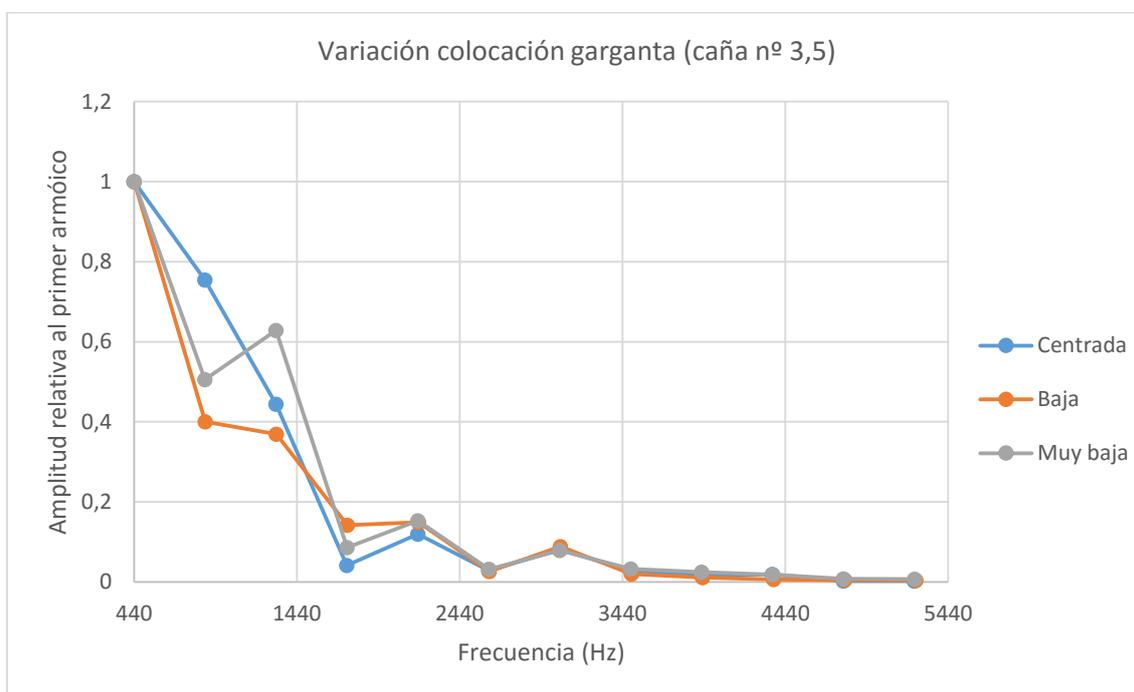
Gráfico 13. Análisis frecuencial con variación en la colocación de la garganta y caña nº3

La distribución de armónicos de las boquillas no presenta una relación concreta, ya que la boquilla Baja es la más apagada en los primeros armónicos, y además presenta un máximo en el séptimo armónico, lo que indica aspereza en el sonido.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Cent.	Baja	M. Baja	Baja	Med. Baja	Cent.	Baja	M. Baja	B	MB	B	MB
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9961	0,9971	0,9949	CENTRADO	CENTRADO	0,1448	0,1230	0,2271				
3	0,9949	0,9960	0,9932	CENTRADO	CENTRADO	0,4862	0,2628	0,5129				
4	0,9942	0,9955	0,9924	CENTRADO	CENTRADO	0,1987	0,1833	0,1022				
5	0,9938	0,9953	0,9919	CENTRADO	CENTRADO	0,0521	0,1011	0,1243				
6	0,9936	0,9951	0,9915	CENTRADO	CENTRADO	0,0845	0,1056	0,1034				
7	0,9933	0,9949	0,9913	CENTRADO	CENTRADO	0,1951	0,2319	0,1728				
8	0,9932	0,9948	0,9911	CENTRADO	CENTRADO	0,0229	0,0611	0,0606				
9	0,9931	0,9947	0,9910	CENTRADO	CENTRADO	0,0094	0,0276	0,0272				
10	0,9930	0,9947	0,9908	CENTRADO	CENTRADO	0,0087	0,0069	0,0222				
11	0,9930	0,9946	0,9908	CENTRADO	CENTRADO	0,0161	0,0070	0,0027				
12	0,9929	0,9946	0,9907	CENTRADO	CENTRADO	0,0209	0,0065	0,0037				

Tabla 23. Valores obtenidos en la variación de la colocación de la garganta y caña nº3

Todas las diferencias que se recogen en la tabla son relativas a la boquilla de referencia. Las diferencias en afinación son prácticamente inexistentes, siendo todos los formantes ligeramente desafinados hacia abajo, pero con una diferencia despreciable. En cuanto a la amplitud, las diferencias son notables en todos los formantes.



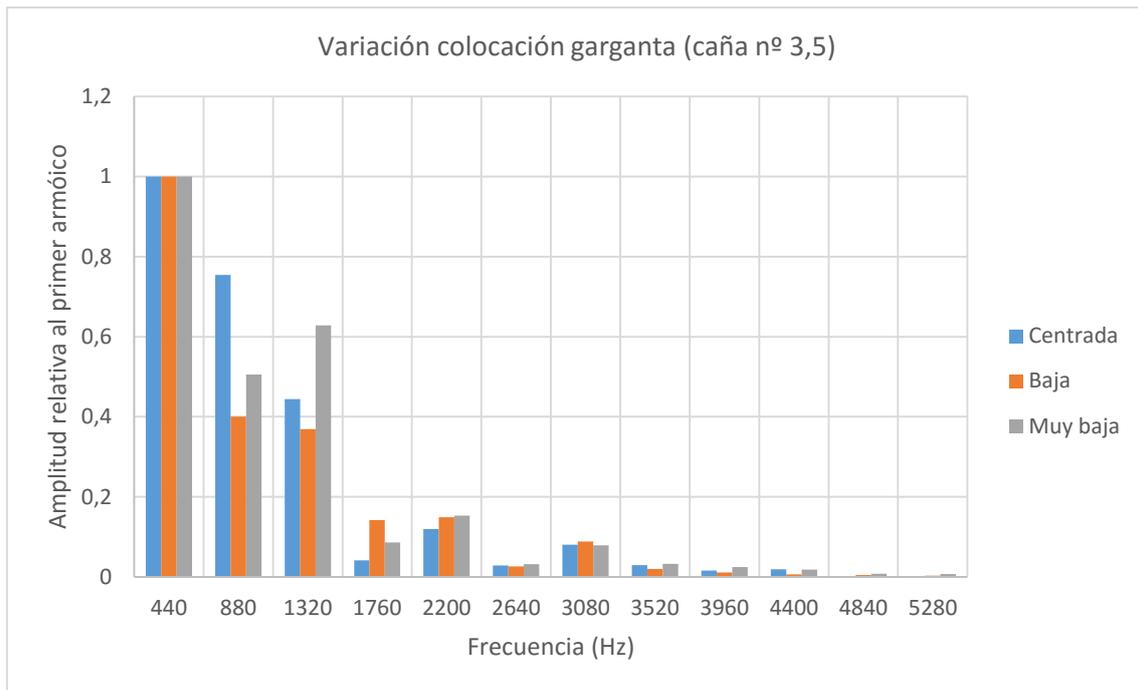


Gráfico 14. Análisis frecuencial con variación en la colocación de la garganta y caña nº3.5

Para la caña del nº 3.5, de nuevo se repiten los mismos resultados, si bien se acentúa mucho más el segundo armónico.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Cent.	Baja	M. Baja	Baja	Med. Baja	Cent.	Baja	M. Baja	B	MB	B	MB
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9969	0,9961	0,9953	CENTRADO	CENTRADO	0,7544	0,4003	0,5055				
3	0,9934	0,9947	0,9937	CENTRADO	CENTRADO	0,4443	0,3694	0,6285				
4	0,9927	0,9941	0,9929	CENTRADO	CENTRADO	0,0418	0,1421	0,0865				
5	0,9921	0,9937	0,9925	CENTRADO	CENTRADO	0,1200	0,1494	0,1531				
6	0,9918	0,9934	0,9922	CENTRADO	CENTRADO	0,0292	0,0265	0,0316				
7	0,9915	0,9932	0,9919	CENTRADO	CENTRADO	0,0805	0,0887	0,0792				
8	0,9914	0,9931	0,9918	CENTRADO	CENTRADO	0,0296	0,0200	0,0324				
9	0,9912	0,9930	0,9916	CENTRADO	CENTRADO	0,0158	0,0109	0,0249				
10	0,9911	0,9929	0,9916	CENTRADO	CENTRADO	0,0193	0,0066	0,0184				
11	0,9911	0,9929	0,9914	CENTRADO	CENTRADO	0,0024	0,0048	0,0080				
12	0,9910	0,9928	0,9914	CENTRADO	CENTRADO	0,0028	0,0037	0,0076				

Tabla 24. Valores obtenidos en la variación de la colocación de la garganta y caña nº3.5

Las diferencias de afinación son despreciables, si bien se ve que la boquilla de colocación Baja vuelve a ser la más afinada. Las diferencias de amplitud vuelven a ser muy distintas.

Así, se concluye lo siguiente:

La variación en la colocación de la garganta produce variaciones significativas, pero no de manera proporcional o directa, con lo que no es posible hacer un análisis concreto de las cualidades sonoras de cada una de ellas.

Además, la aparición de armónicos como el séptimo de manera notable, no se puede concretar un estilo musical apropiado para las boquillas, si bien, la boquilla de taladro centrado y, en consecuencia las otras dos, podrían ser adecuadas para el estilo clásico, debido a la presencia del segundo armónico, que refuerza la fundamental y, en especial, el tercer armónico, que redondea el sonido.



Figura 32. Boquillas B9, B10 y B11

4.2.3.3. VARIACIÓN DE LA ABERTURA

En este análisis se tendrá en cuenta la variación en la amplitud de la abertura.

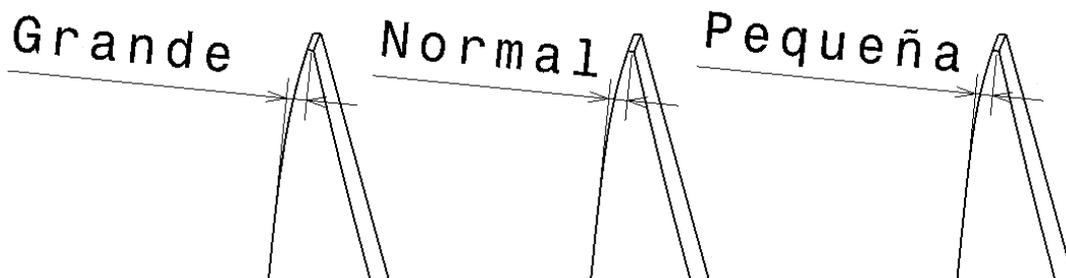


Figura 33. Esquema de la variación de la abertura

La abertura en punta es la distancia existente entre la punta de la boquilla y la tabla, tomada paralelamente a ésta última. Así, es la distancia libre entre la punta de la caña (cuando el montaje es completo) y la punta de la boquilla, y determina el área de admisión de aire.

Esta característica no modifica ninguna dimensión adicional de la boquilla (aparte de la colocación de la zona de los dientes, que se desplaza proporcionalmente a la variación de la boquilla y no influye en el sonido).

Los valores tenidos en cuenta para la abertura han sido grande (tomada como referencia), normal y pequeña, y son los siguientes:

VARIACIÓN DE LA ABERTURA [mm]		
GRANDE	NORMAL	PEQUEÑA
2,00	1,85	1,70

Tabla 25. Valores utilizados para la abertura

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las cañas de los números 3 y 3.5.

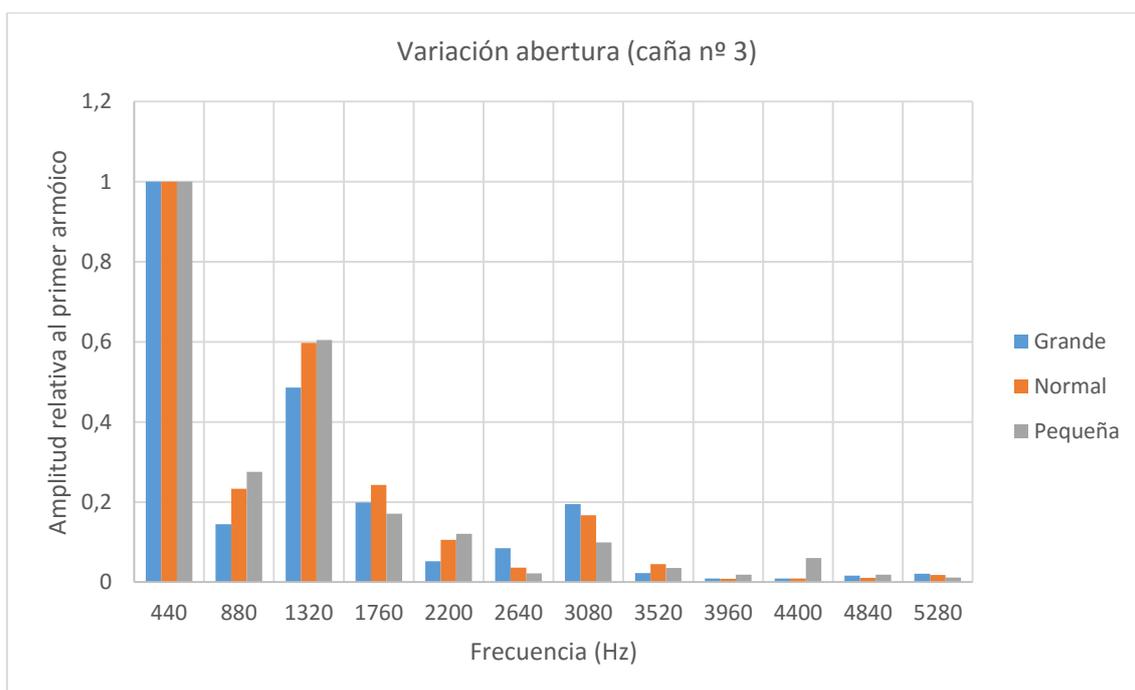
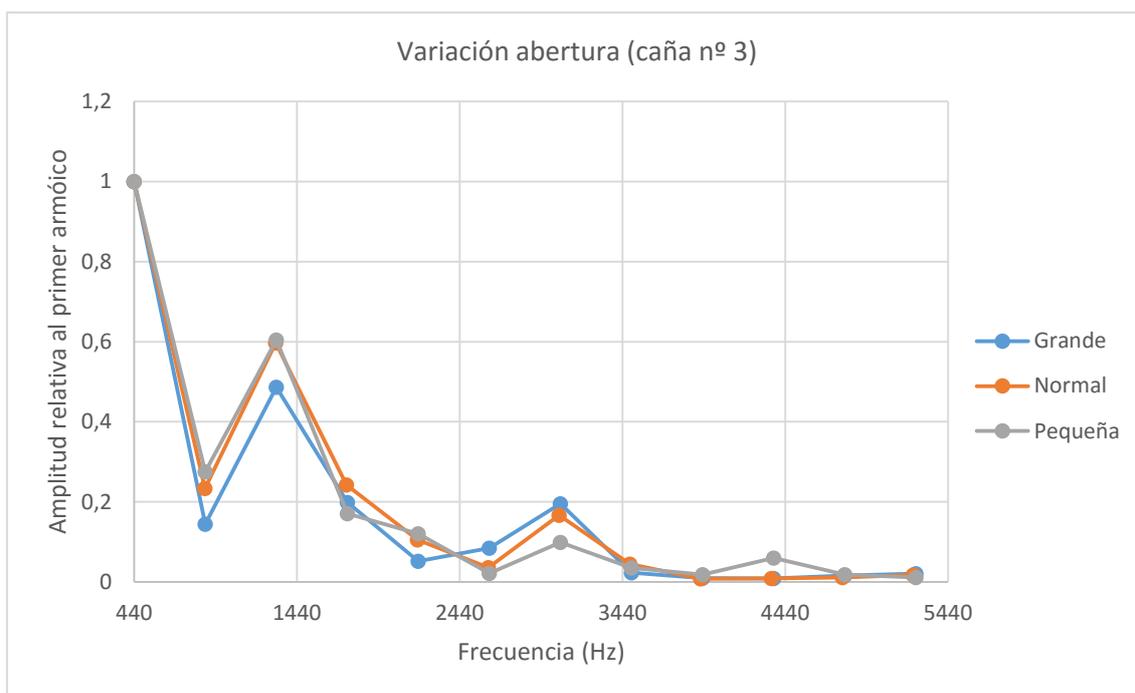


Gráfico 15. Análisis frecuencial con variación de la abertura y caña nº3

Para la caña del número 3 se puede observar claramente una similitud en la distribución de las amplitudes, si bien existen diferencias significativas de amplitud en todos los formantes. Destaca el pico en el tercer armónico, que proporciona un sonido redondeado, sin embargo, también destaca el séptimo armónico, que da al timbre un color áspero.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Grande	Normal	Pequeña	Normal	Pequeña	G	N	P	N	P	N	P
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9961	0,9945	0,9962	CENTRADO	CENTRADO	0,1448	0,2333	0,2756				
3	0,9949	0,9927	0,9949	CENTRADO	CENTRADO	0,4862	0,5974	0,6044				
4	0,9942	0,9918	0,9942	CENTRADO	CENTRADO	0,1987	0,2427	0,1707				
5	0,9938	0,9912	0,9938	CENTRADO	CENTRADO	0,0521	0,1054	0,1203				
6	0,9936	0,9909	0,9936	CENTRADO	CENTRADO	0,0845	0,0360	0,0218				
7	0,9933	0,9906	0,9934	CENTRADO	CENTRADO	0,1951	0,1667	0,0989				
8	0,9932	0,9904	0,9933	CENTRADO	CENTRADO	0,0229	0,0447	0,0352				
9	0,9931	0,9903	0,9932	CENTRADO	CENTRADO	0,0094	0,0079	0,0184				
10	0,9930	0,9902	0,9931	CENTRADO	CENTRADO	0,0087	0,0087	0,0602				
11	0,9930	0,9901	0,9930	CENTRADO	CENTRADO	0,0161	0,0110	0,0187				
12	0,9929	0,9900	0,9929	CENTRADO	CENTRADO	0,0209	0,0180	0,0115				

Tabla 26. Valores obtenidos en la variación de la abertura y caña nº3

La afinación en las boquillas es muy similar, ligeramente baja en todos los formantes, pero centrada con respecto a la afinación temperada. Como se ha dicho anteriormente, las amplitudes son muy diferentes. Además, en ciertos armónicos tienen una relación directa o inversamente proporcional a la variación en la abertura.

En la siguiente tabla se observan los valores de la amplitud relativa para los armónicos mencionados. El segundo armónico aporta refuerzo en la sensación de fundamental. Tercer y quinto armónico dan al timbre un color redondo. El séptimo armónico aporta aspereza debido a la disonancia.

	VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON LA ABERTURA (CAÑA Nº 3)		
	Grande	Normal	Pequeña
Segundo	0,144757662	0,233346383	0,275559928
Tercero	0,486173071	0,597379629	0,604413155
Quinto	0,052083713	0,10538272	0,120334328
Séptimo	0,195116407	0,166694386	0,098871849

Tabla 27. Variación de la amplitud de los armónicos con la abertura y caña nº3

A continuación se muestra de manera gráfica los valores obtenidos.

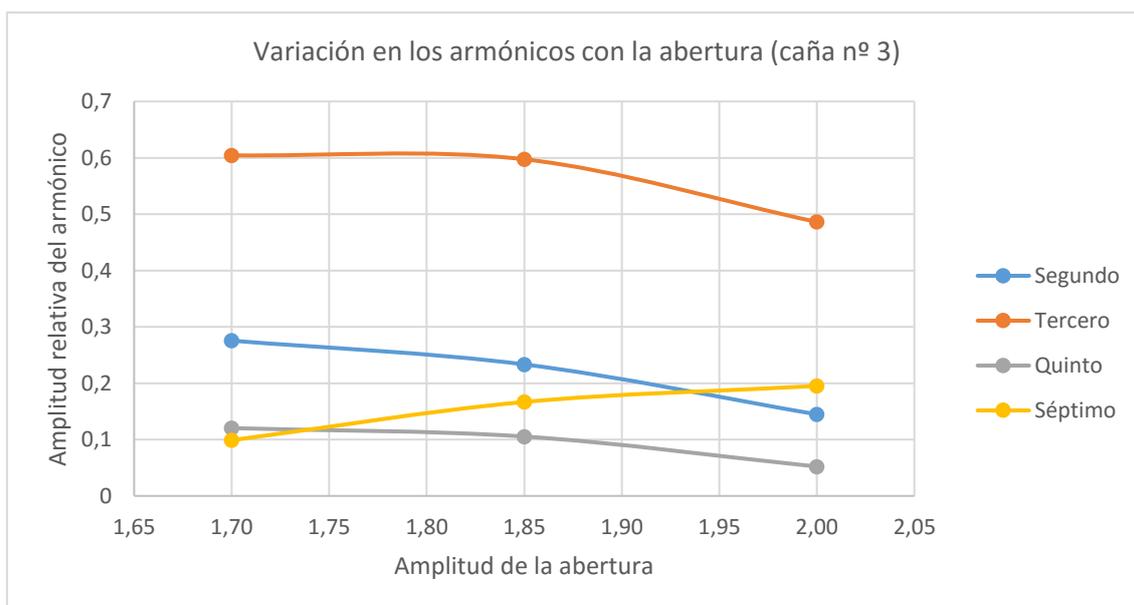


Gráfico 16. Variación de la amplitud de los armónicos con la abertura y caña nº3

Como se puede observar, el segundo, tercero y quinto armónicos decrecen con la abertura. Esto quiere decir que la sensación de fundamental y el color de timbre redondo se incrementan al ser la abertura más pequeña.

Esto explica el porqué de la elección de una boquilla de menor abertura cuando se quiere interpretar un sonido más clásico (a igualdad de dureza de caña, ya que una caña más dura redondea el sonido y aumenta la amplitud relativa del armónico que potencia la fundamental).

Además, la amplitud del séptimo armónico crece con la abertura, con lo que la aspereza del sonido aumenta igualmente.

Los resultados para la caña del nº 3.5 son los siguientes.

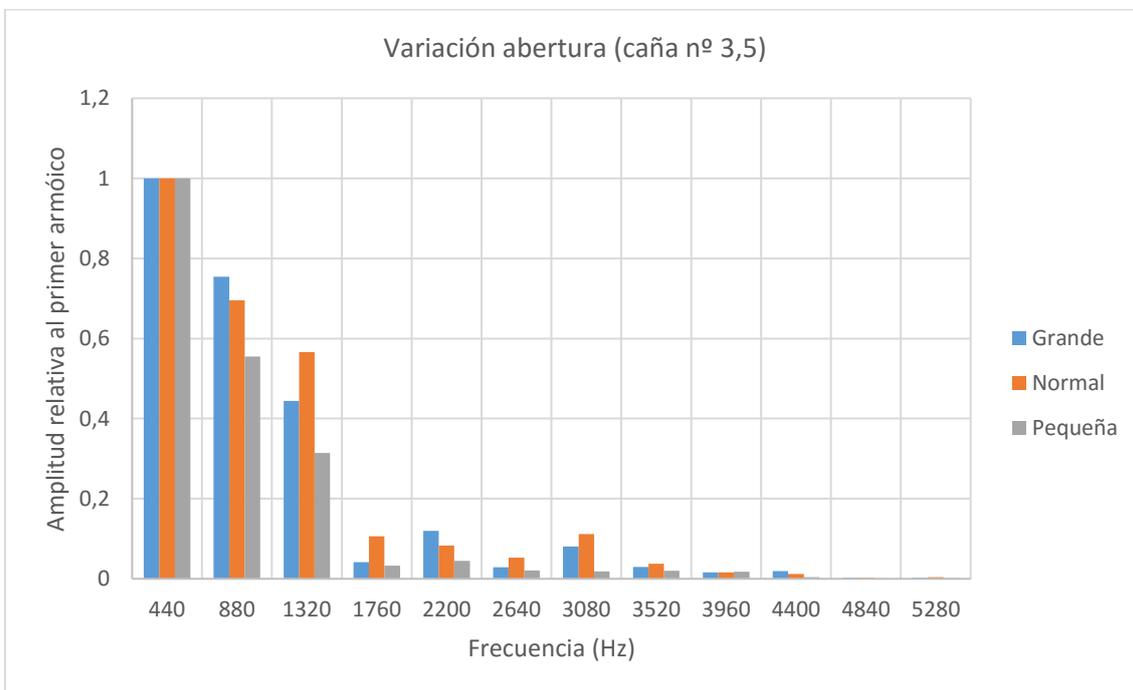
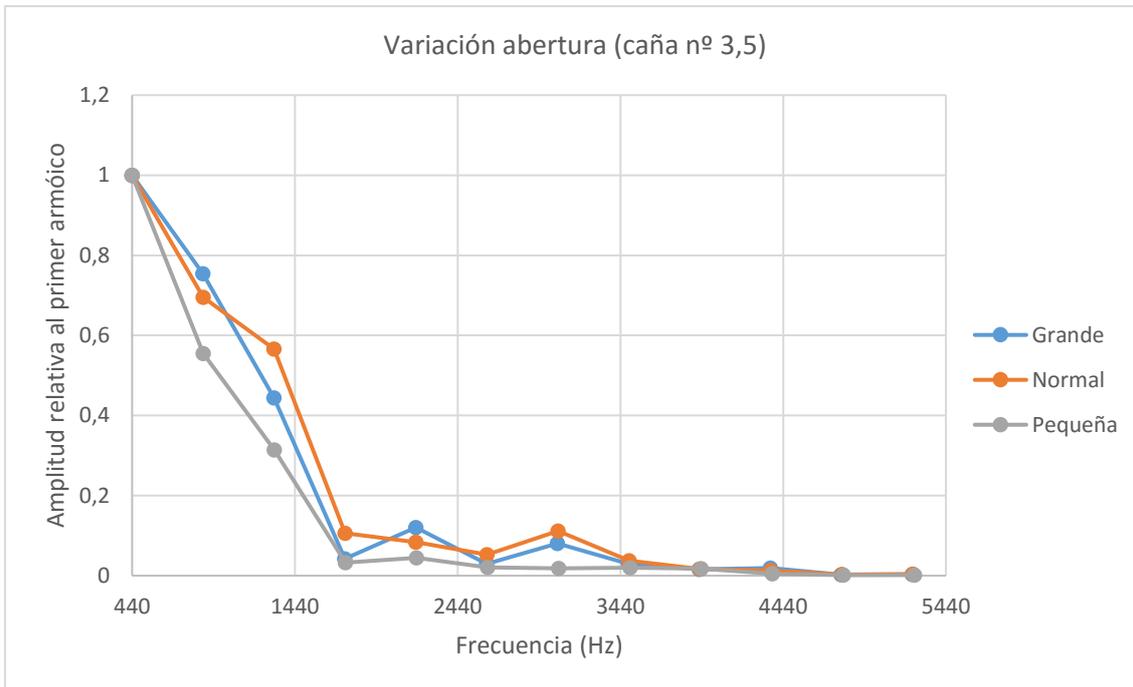


Gráfico 17. Análisis frecuencial con variación de la abertura y caña nº3.5

Al igual que para la caña anterior, los resultados son similares. Sin embargo, el segundo armónico crece considerablemente, hecho normal ya que con una caña más dura se potencia la sensación de fundamental.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Grande	Normal	Pequeña	Normal	Pequeña	G	N	P	N	P	N	P
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9969	0,9955	0,9966	CENTRADO	CENTRADO	0,7544	0,6952	0,5549				
3	0,9934	0,9941	0,9955	CENTRADO	CENTRADO	0,4443	0,5659	0,3141				
4	0,9927	0,9934	0,9949	CENTRADO	CENTRADO	0,0418	0,1060	0,0326				
5	0,9921	0,9930	0,9945	CENTRADO	CENTRADO	0,1200	0,0834	0,0449				
6	0,9918	0,9927	0,9943	CENTRADO	CENTRADO	0,0292	0,0527	0,0208				
7	0,9915	0,9925	0,9942	CENTRADO	CENTRADO	0,0805	0,1118	0,0184				
8	0,9914	0,9924	0,9940	CENTRADO	CENTRADO	0,0296	0,0373	0,0199				
9	0,9912	0,9922	0,9939	CENTRADO	CENTRADO	0,0158	0,0165	0,0173				
10	0,9911	0,9921	0,9939	CENTRADO	CENTRADO	0,0193	0,0124	0,0045				
11	0,9911	0,9921	0,9938	CENTRADO	CENTRADO	0,0024	0,0029	0,0013				
12	0,9910	0,9920	0,9937	CENTRADO	CENTRADO	0,0028	0,0039	0,0014				

Tabla 28. Valores obtenidos en la variación de la abertura y caña nº3.5

La afinación en las boquillas es muy similar, quedando baja en todos los formantes, pero centrada. Como se ha dicho anteriormente, las amplitudes son muy diferentes, observándose una relación directa o inversamente proporcional a la variación en la abertura.

	VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON LA ABERTURA (CAÑA Nº 3,5)		
	Grande	Normal	Pequeña
Segundo	0,754389486	0,695210144	0,554888245
Tercero	0,444333304	0,565901839	0,314126407
Quinto	0,120011331	0,083445844	0,044949785
Séptimo	0,080533918	0,111788866	0,018394012

Tabla 29. Variación de la amplitud de los armónicos con la abertura y caña nº3.5

Al contrario que para la caña del nº 3, los armónicos señalados anteriormente invierten su comportamiento para la caña de este estudio. Esto hace pensar en la existencia de un “punto de equilibrio” en el que se produzca este fenómeno.

A continuación se muestra de forma gráfica.

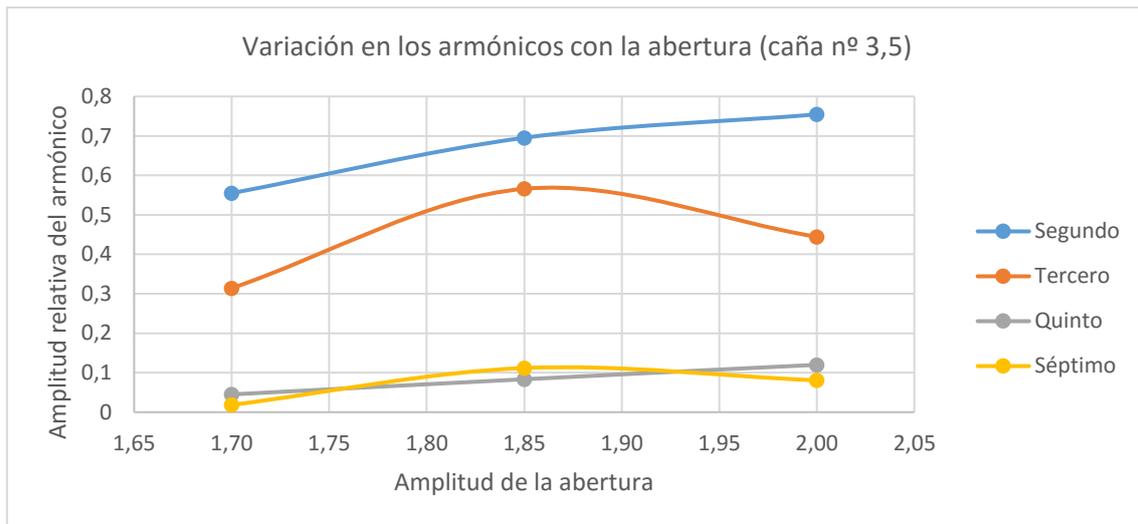


Gráfico 18. Variación de la amplitud de los armónicos con la abertura y caña nº3.5

En conclusión, se puede afirmar lo siguiente:

La variación en la amplitud de la abertura no modifica sustancialmente el sonido, ya que no varía los requisitos de sonido “clásico” de manera notable. Sin embargo, sí que se observan variaciones importantes en la “calidad” de dicho sonido.

Se ha observado una inversión en el comportamiento de los armónicos más señalados al cambiar de una caña a otra (aumentando su dureza). Este comportamiento podría significar la existencia de un “punto de equilibrio”.

La unión de estos dos comportamientos explica, en definitiva, por qué es difícil encontrar una unión caña – boquilla que satisfaga todos los requisitos que un intérprete requiere a su sonido, haciendo así de la amplitud de la abertura un factor fundamental (de hecho, es el único parámetro de la boquilla que proporcionan los fabricantes con la medida exacta) para la elección de la boquilla.



Figura 34. Boquillas B9, B12 y B13

4.2.3.4. VARIACIÓN DEL ANCHO DE LA GARGANTA

En este análisis caracterizará la boquilla por el ancho de la garganta.

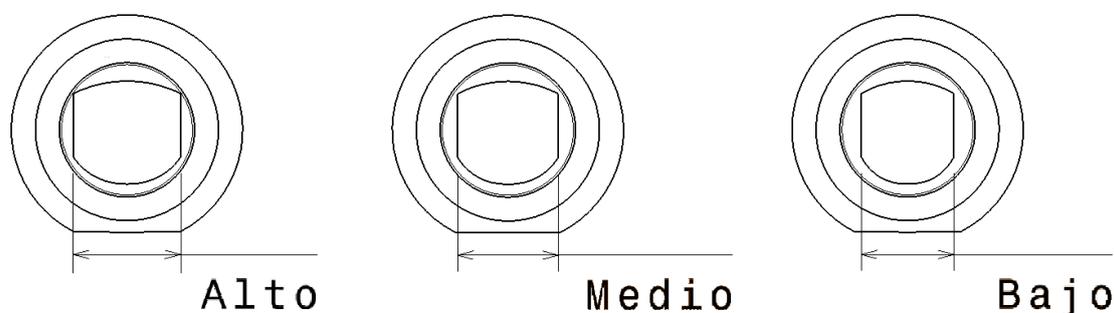


Figura 35. Esquema de la variación del ancho de la garganta

El ancho de la garganta indica la separación inicial entre las paredes de la cámara, distinguiéndose tres configuraciones: Alto, Medio (que se corresponde con la boquilla de referencia) y Bajo.

Debido a la modificación en la anchura de la garganta, el ángulo lateral de la cámara se ve también afectado, para poderse mantener los parámetros de anchura en punta, que son invariables.

Así, los valores de anchura de la garganta y sus correspondientes del ángulo lateral son los siguientes:

VARIACIÓN DEL ANCHO DE LA GARGANTA [mm]			
	ALTO	MEDIO	BAJO
Ancho de la garganta	13,00	12,20	11,20
Ángulo lateral cámara [°]	1,00	1,20	1,70

Tabla 30. Valores utilizados para el ancho de la garganta

A continuación se muestran los resultados obtenidos para ambos tipos de caña.

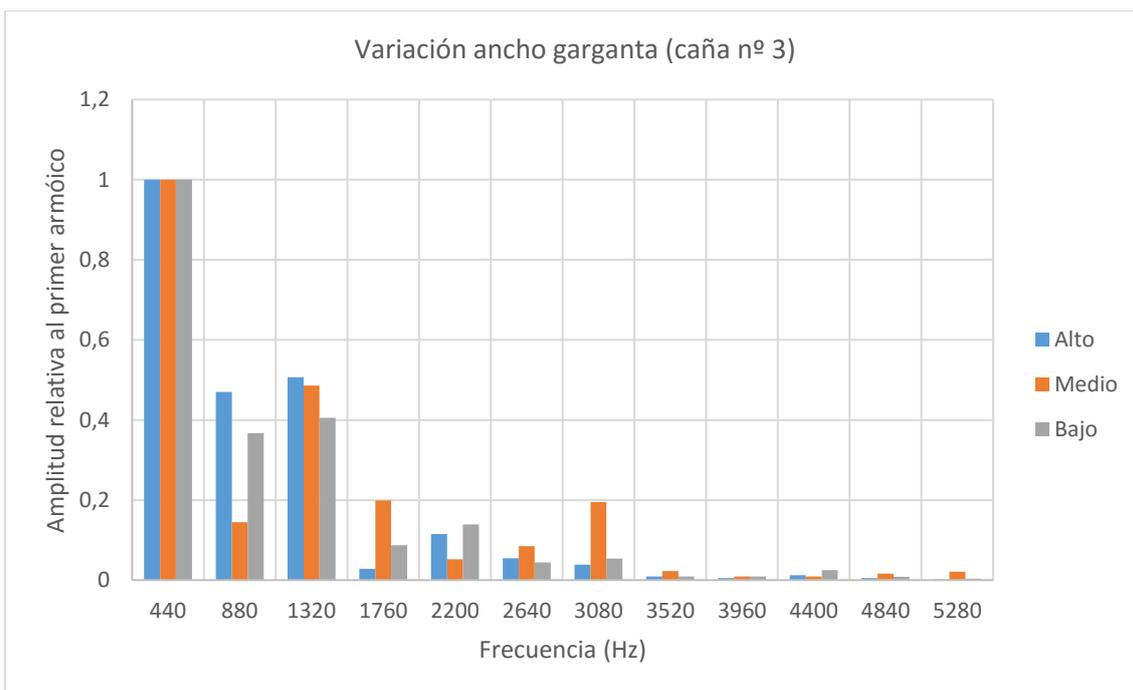
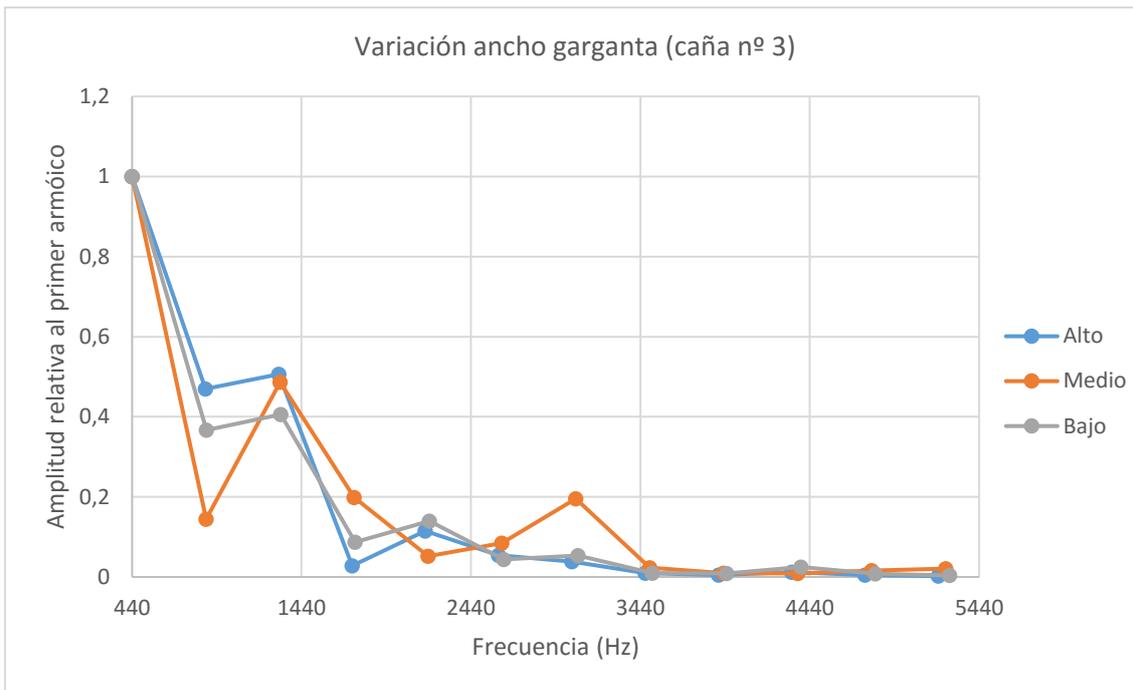


Gráfico 19. Análisis frecuencial con variación del ancho de la garganta y caña nº3

Como se observa en estas gráficas, los picos se encuentran en los armónicos segundo y tercero, fundamentalmente, haciendo esta boquilla adecuada para el clásico. Sin embargo, la boquilla de anchura media presenta un pico en el séptimo armónico, lo que la hace más áspera que las otras dos.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Alto	Medio	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Medio	Bajo	A	B	A	B
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9918	0,9961	0,9984	CENTRADO	CENTRADO	0,4700	0,1448	0,3669				
3	0,9891	0,9949	0,9979	CENTRADO	CENTRADO	0,5066	0,4862	0,4056				
4	0,9876	0,9942	0,9976	CENTRADO	CENTRADO	0,0280	0,1987	0,0868				
5	0,9869	0,9938	0,9975	CENTRADO	CENTRADO	0,1153	0,0521	0,1393				
6	0,9861	0,9936	0,9974	CENTRADO	CENTRADO	0,0546	0,0845	0,0444				
7	0,9857	0,9933	0,9973	CENTRADO	CENTRADO	0,0384	0,1951	0,0536				
8	0,9855	0,9932	0,9972	CENTRADO	CENTRADO	0,0093	0,0229	0,0094				
9	0,9852	0,9931	0,9972	CENTRADO	CENTRADO	0,0050	0,0094	0,0090				
10	0,9850	0,9930	0,9972	CENTRADO	CENTRADO	0,0124	0,0087	0,0251				
11	0,9848	0,9930	0,9971	CENTRADO	CENTRADO	0,0051	0,0161	0,0080				
12	0,9847	0,9929	0,9971	CENTRADO	CENTRADO	0,0021	0,0209	0,0038				

Tabla 31. Valores obtenidos en la variación del ancho de garganta y caña nº3

Los valores presentes en esta tabla (referidos a la boquilla de referencia en este estudio, es decir, la de anchura media), indican que no hay una gran diferencia de afinación entre ellas, siendo la afinación más centrada cuanto más estrecha es la garganta, como se puede observar en el siguiente gráfico.

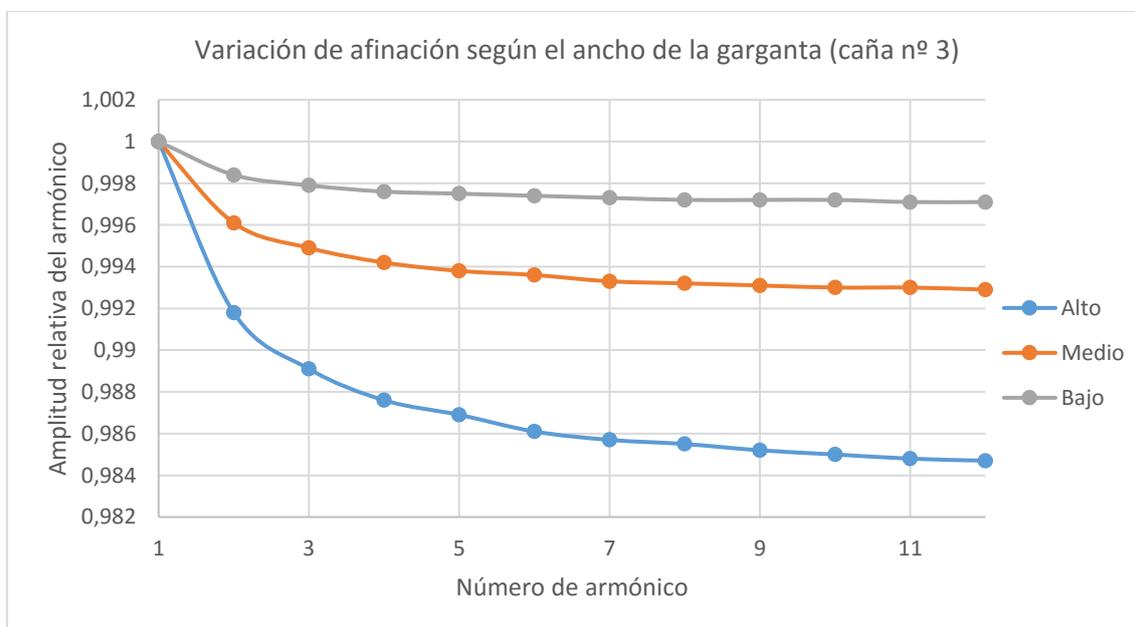


Gráfico 20. Variación de la afinación con el ancho de garganta y caña nº3

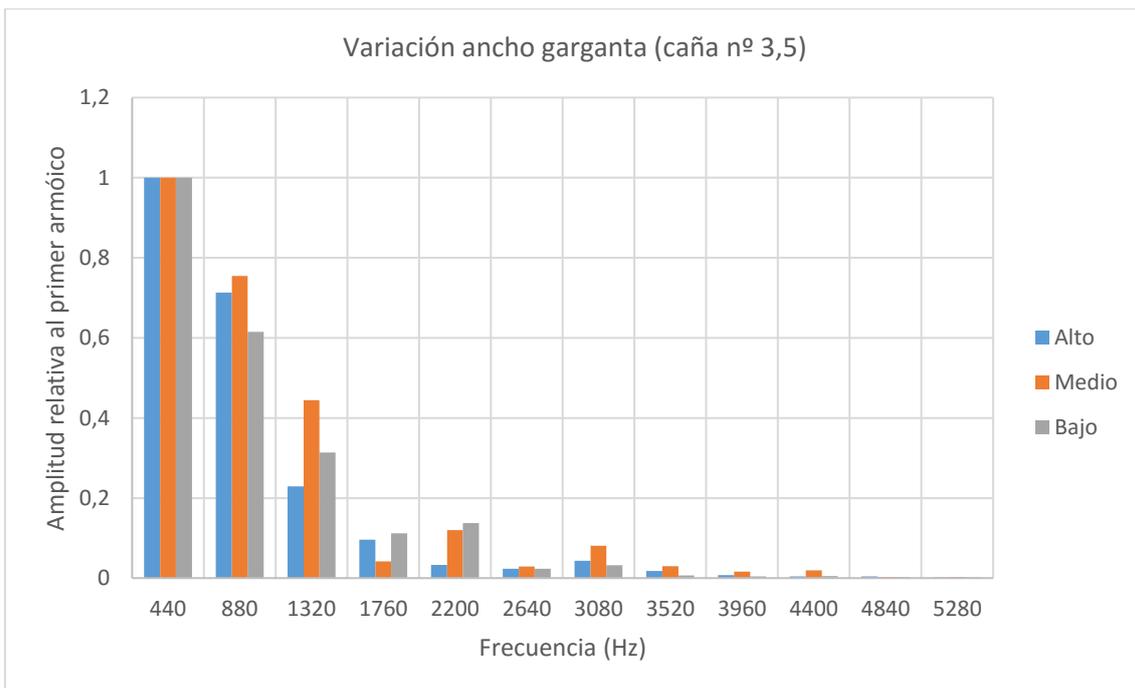
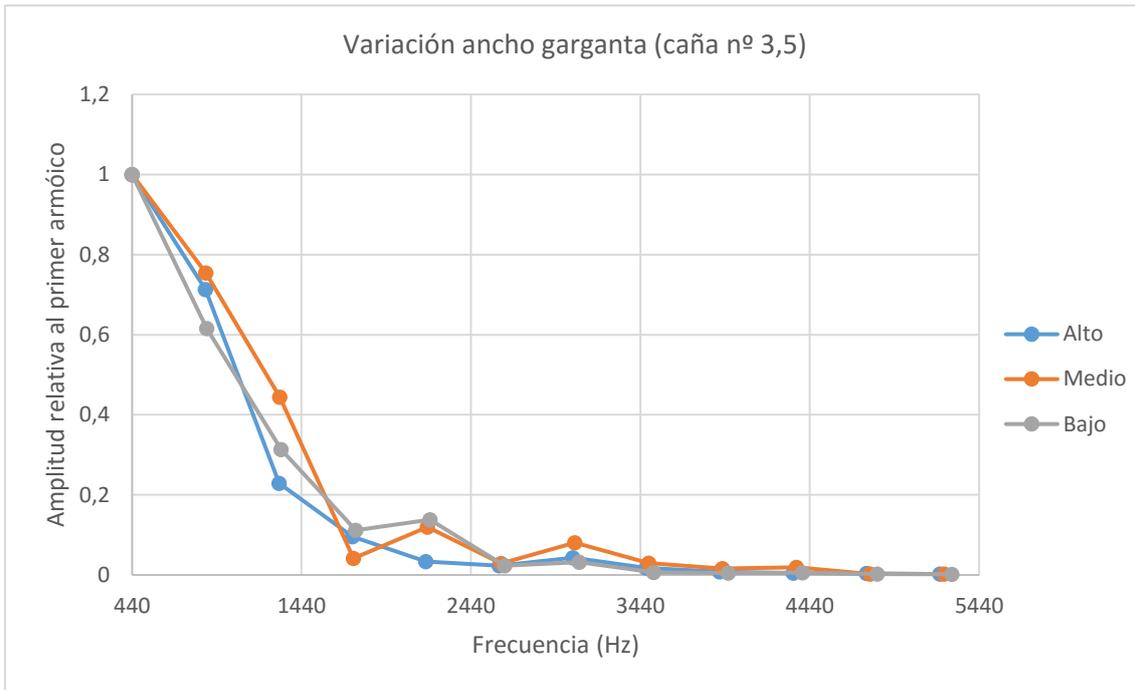


Gráfico 21. Análisis frecuencial con variación del ancho de la garganta y caña nº3.5

En este caso, la amplitud de los primeros armónicos es mayor, además de que las diferencias en el séptimo armónico se hacen menos notables, aunque igualmente considerables.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Alto	Medio	Bajo	Alto	Bajo	Alto	Medio	Bajo	A	B	A	B
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9928	0,9951	0,9998	CENTRADO	CENTRADO	0,7129	0,7544	0,6154				
3	0,9903	0,9934	0,9997	CENTRADO	CENTRADO	0,2290	0,4443	0,3134				
4	0,9890	0,9927	0,9998	CENTRADO	CENTRADO	0,0958	0,0418	0,1121				
5	0,9883	0,9921	0,9997	CENTRADO	CENTRADO	0,0332	0,1200	0,1378				
6	0,9878	0,9918	0,9997	CENTRADO	CENTRADO	0,0234	0,0292	0,0232				
7	0,9874	0,9915	0,9997	CENTRADO	CENTRADO	0,0434	0,0805	0,0321				
8	0,9872	0,9914	0,9997	CENTRADO	CENTRADO	0,0179	0,0296	0,0067				
9	0,9870	0,9912	0,9996	CENTRADO	CENTRADO	0,0078	0,0158	0,0046				
10	0,9868	0,9911	0,9997	CENTRADO	CENTRADO	0,0046	0,0193	0,0054				
11	0,9867	0,9911	0,9997	CENTRADO	CENTRADO	0,0040	0,0024	0,0026				
12	0,9866	0,9910	0,9997	CENTRADO	CENTRADO	0,0022	0,0028	0,0019				

Tabla 32. Valores obtenidos en la variación del ancho de garganta y caña nº3.5

En cuanto a la afinación, se produce el mismo fenómeno, acercándose a la afinación más centrada conforme se estrecha la garganta. Sin embargo, la afinación en la boquilla de ancho bajo se acerca mucho al ideal, apenas variando entre cada uno de sus formantes.

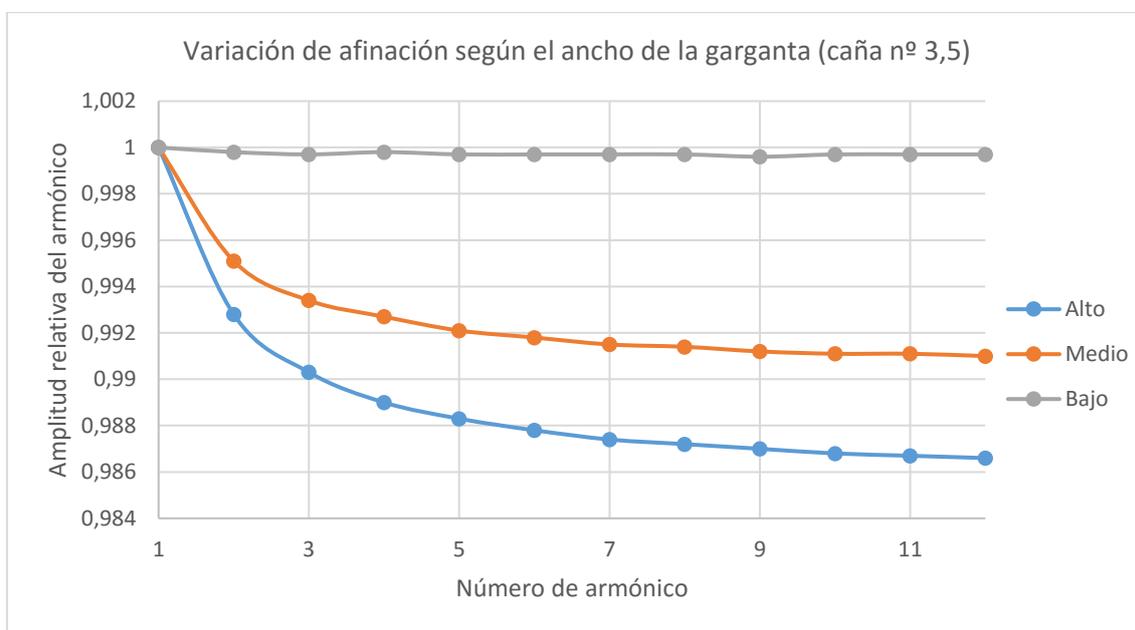


Gráfico 22. Variación de la afinación con el ancho de garganta y caña nº3.5

En conclusión, se determina lo siguiente:

La variación en la anchura de la garganta no presenta un comportamiento definido, con lo que no se puede decir que dicha variación produzca un sonido determinado. Esto es debido a que la variación del ancho modifica, además, el ángulo de las paredes laterales de la cámara, parámetro muy importante en la estructura interior de la boquilla, variando así sustancialmente el sonido.

Sin embargo, sí se ha observado un comportamiento determinado en cuanto a la distribución de la afinación, ya que al reducir la anchura, la afinación se acerca más al ideal. Esto explica por qué las boquillas consideradas “clásicas” tienen una garganta muy estrecha, mientras que las de “jazz” tienen un taladro más amplio, sacrificando afinación por potencia.



Figura 36. Boquillas B9, B14 y B15

4.2.3.5. VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE LA CÁMARA

Este análisis consiste en la variación de la longitud de la cámara.

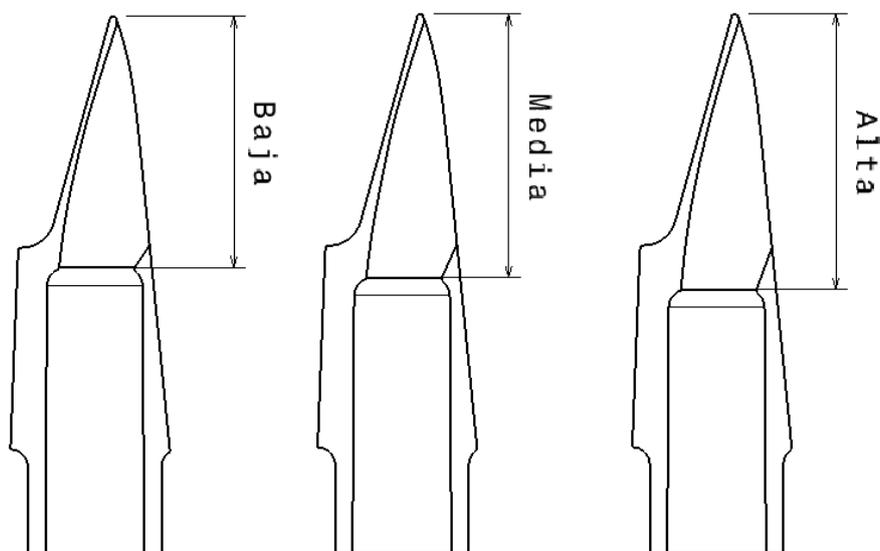


Figura 37. Esquema de la variación de la longitud de la cámara

La longitud de la cámara (además de la curvatura del techo) determina el volumen de aire que puede abarcar ésta.

Con la modificación de la longitud varía además el ángulo de la rampa, para que así el área de la abertura inferior en la boquilla sea lo más invariable posible.

Así, los valores de longitud de cámara y sus correspondientes del ángulo de la rampa son los siguientes:

VARIACIÓN DE LA LONGITUD DE LA CÁMARA [mm]			
	BAJA	MEDIA	ALTA
Longitud de la cámara	42,00	44,00	46,00
Ángulo de la rampa [°]	33	24	20

Tabla 33. Valores utilizados para la longitud de la cámara

Cabe reseñar que este factor a veces viene proporcionado por el fabricante, sin embargo nunca con el valor exacto (small, medium y large chamber suelen ser las denominaciones más comunes).

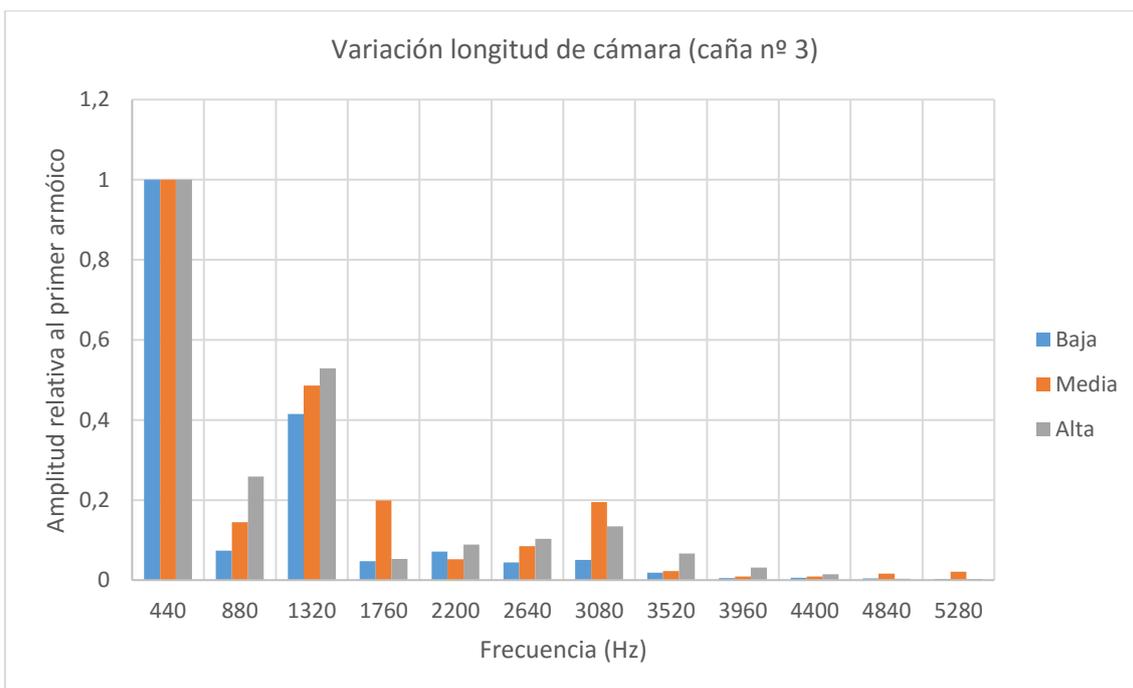
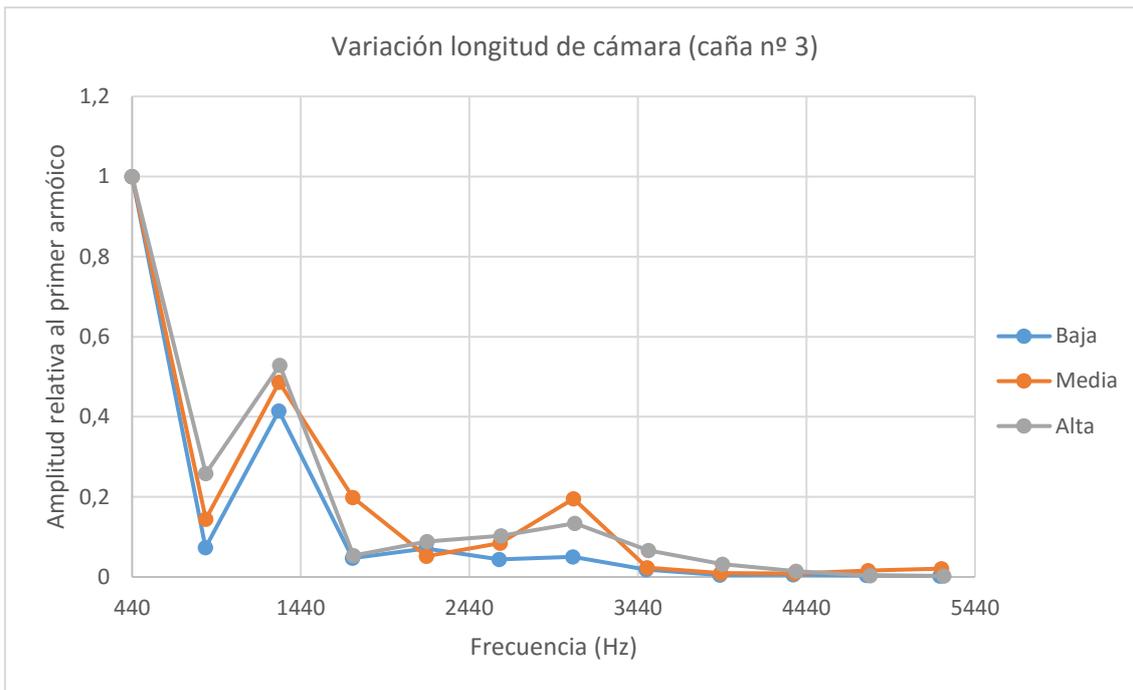


Gráfico 23. Análisis frecuencial con variación de la longitud de la cámara y caña nº3

Como se observa en las gráficas, la distribución en los armónicos viene siendo la habitual, resaltándose el pico del tercer armónico y el del séptimo armónico. Además, existe una relación creciente según el largo en dichos picos.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Baja	Media	Alta	Baja	Alta	Baja	Media	Alta	B	A	B	A
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9951	0,9961	0,9974	CENTRADO	CENTRADO	0,0733	0,1448	0,2584				
3	0,9934	0,9949	0,9966	CENTRADO	CENTRADO	0,4150	0,4862	0,5290				
4	0,9926	0,9942	0,9962	CENTRADO	CENTRADO	0,0472	0,1987	0,0533				
5	0,9921	0,9938	0,9959	CENTRADO	CENTRADO	0,0712	0,0521	0,0884				
6	0,9918	0,9936	0,9957	CENTRADO	CENTRADO	0,0443	0,0845	0,1029				
7	0,9919	0,9933	0,9956	CENTRADO	CENTRADO	0,0502	0,1951	0,1340				
8	0,9917	0,9932	0,9955	CENTRADO	CENTRADO	0,0188	0,0229	0,0666				
9	0,9915	0,9931	0,9954	CENTRADO	CENTRADO	0,0048	0,0094	0,0316				
10	0,9914	0,9930	0,9953	CENTRADO	CENTRADO	0,0059	0,0087	0,0143				
11	0,9912	0,9930	0,9953	CENTRADO	CENTRADO	0,0042	0,0161	0,0037				
12	0,9911	0,9929	0,9954	CENTRADO	CENTRADO	0,0027	0,0209	0,0023				

Tabla 34. Valores obtenidos en la variación de la longitud de la cámara y caña nº3

En los valores de la tabla (referidos a la boquilla de referencia, de longitud de cámara media), se puede ver cómo la afinación es muy similar entre las boquillas, y se acerca a la afinación temperada según aumenta la longitud. Además, las diferencias de amplitud son muy notables, no siguiéndose un comportamiento estricto. Sin embargo, en general la amplitud de los armónicos crece con la longitud de la cámara.

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON LA LONGITUD DE LA CÁMARA (CAÑA Nº 3)			
	Baja	Media	Alta
Segundo	0,073303774	0,144757662	0,258449768
Tercero	0,414974219	0,486173071	0,528982911
Séptimo	0,05024982	0,195116407	0,133956886

Tabla 35. Variación de la amplitud de los armónicos con la longitud de la cámara y caña nº3

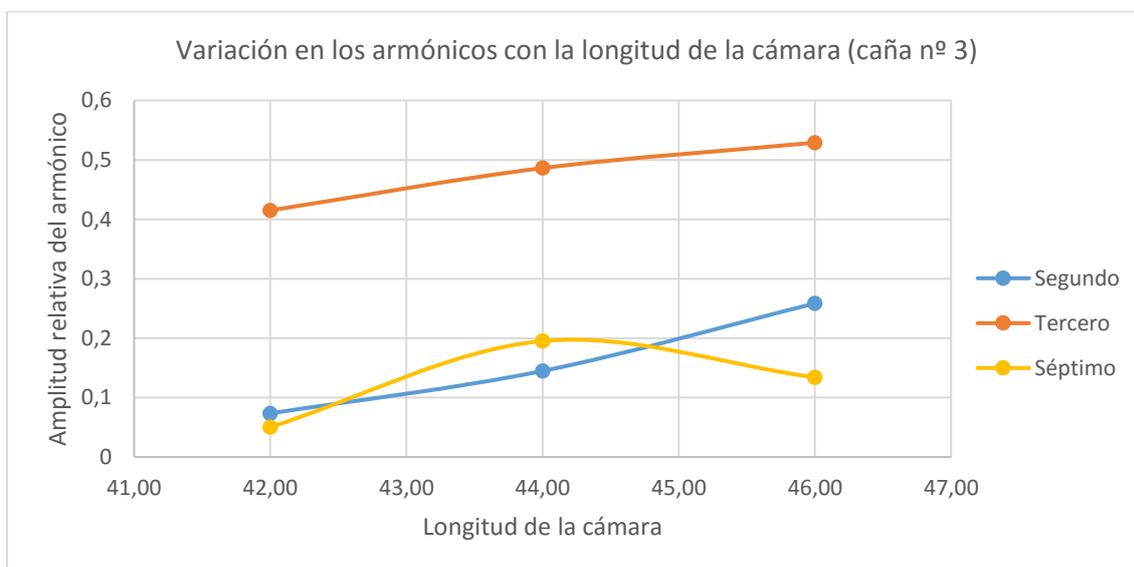


Gráfico 24. Variación de la amplitud de los armónicos con la longitud de la cámara y caña nº3

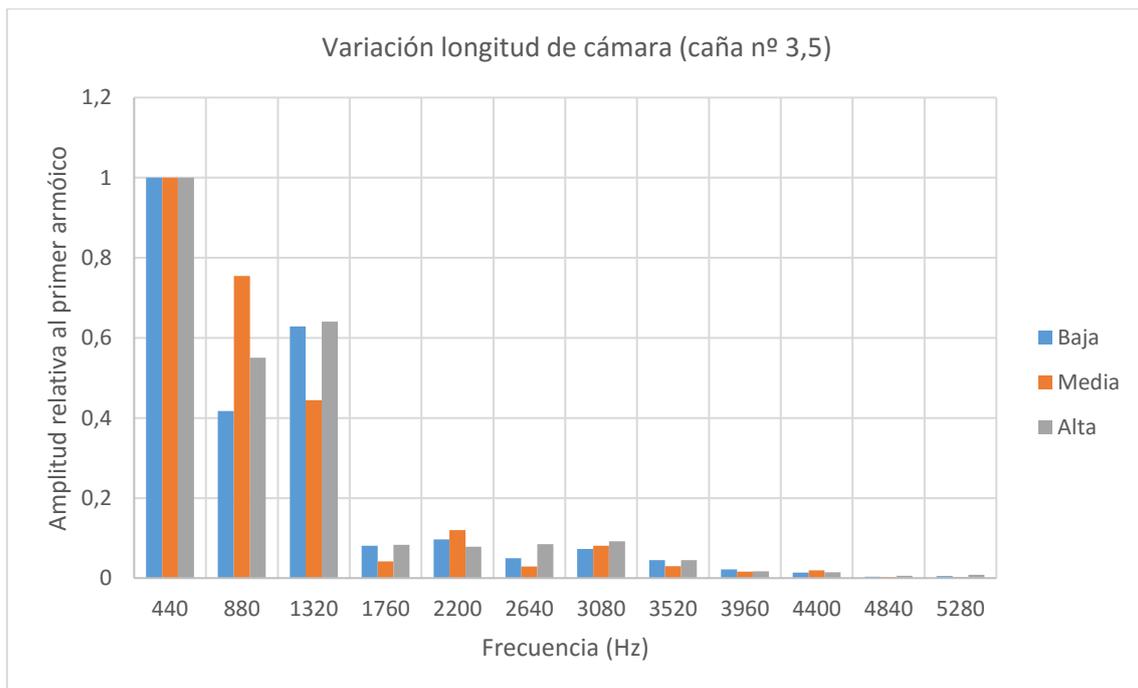
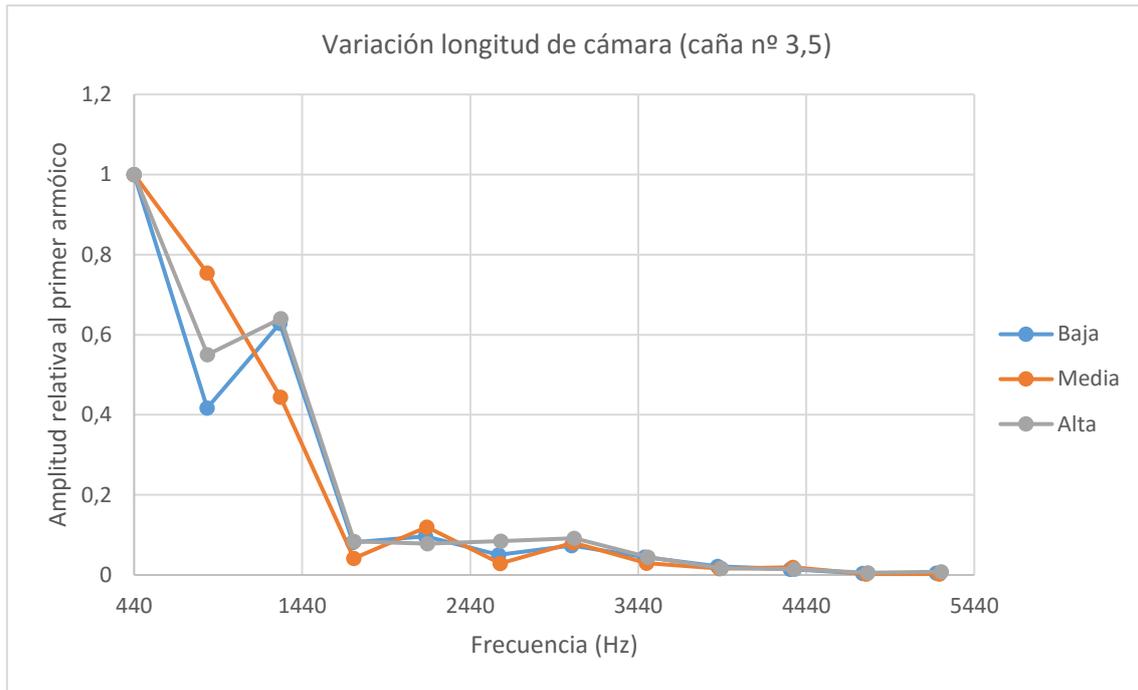


Gráfico 25. Análisis frecuencial con variación de la longitud de la cámara y caña nº3.5

Al aumentar la dureza de la caña, aumenta la potencia de los primeros armónicos, pero desaparece la relación de amplitud anterior. Esta nueva distribución aumenta la potencia de los armónicos segundo y tercero, con lo que se produce un timbre más potente y redondo, respectivamente.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Baja	Media	Alta	Baja	Alta	Baja	Media	Alta	B	A	B	A
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9930	0,9951	0,9962	CENTRADO	CENTRADO	0,4169	0,7544	0,5500				
3	0,9907	0,9934	0,9951	CENTRADO	CENTRADO	0,6282	0,4443	0,6403				
4	0,9896	0,9927	0,9944	CENTRADO	CENTRADO	0,0812	0,0418	0,0835				
5	0,9889	0,9921	0,9940	CENTRADO	CENTRADO	0,0968	0,1200	0,0784				
6	0,9884	0,9918	0,9938	CENTRADO	CENTRADO	0,0500	0,0292	0,0848				
7	0,9885	0,9915	0,9936	CENTRADO	CENTRADO	0,0732	0,0805	0,0921				
8	0,9882	0,9914	0,9934	CENTRADO	CENTRADO	0,0450	0,0296	0,0448				
9	0,9880	0,9912	0,9934	CENTRADO	CENTRADO	0,0218	0,0158	0,0168				
10	0,9878	0,9911	0,9933	CENTRADO	CENTRADO	0,0142	0,0193	0,0144				
11	0,9869	0,9911	0,9932	CENTRADO	CENTRADO	0,0037	0,0024	0,0057				
12	0,9876	0,9910	0,9932	CENTRADO	CENTRADO	0,0049	0,0028	0,0084				

Tabla 36. Valores obtenidos en la variación de la longitud de la cámara y caña nº3.5

En cuanto a la afinación, sigue siendo muy centrada y sin diferencias apreciables entre ellas, produciéndose el mismo efecto de acercarse a la afinación temperada según aumenta el largo de la cámara. Las diferencias de amplitud siguen siendo notables, excepto en el séptimo armónico, con lo que la aspereza que le confiere es más uniforme.

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON LA LONGITUD DE LA CÁMARA (CAÑA Nº 3,5)			
	Baja	Media	Alta
Segundo	0,416933245	0,754389486	0,550015044
Tercero	0,628208923	0,444333304	0,640309378
Séptimo	0,073170783	0,080533918	0,092110259

Tabla 37. Variación de la amplitud de los armónicos con la longitud de la cámara y caña nº3.5

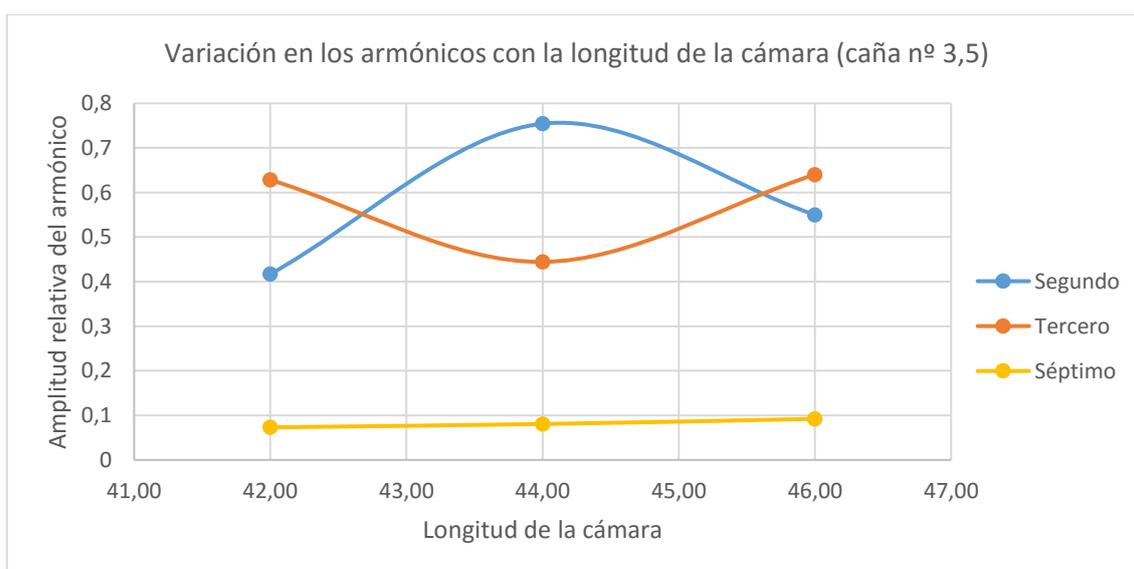


Gráfico 26. Variación de la amplitud de los armónicos con la longitud de la cámara y caña nº3.5

Para concluir, se afirma lo siguiente:

La variación en la longitud de la cámara no presenta un comportamiento definido, con lo que no se puede decir que dicha variación produzca un sonido determinado. Por el contrario, sí que aumenta la potencia en los armónicos segundo y tercero. Esto es debido a que el volumen de aire que admite es mayor cuanto más larga sea la cámara.

Sin embargo, este comportamiento se invierte al aumentar la dureza de la caña. Este fenómeno se debe a que, al aumentar dicha dureza se requiere de mayor energía para hacerla vibrar, con lo que el aire que penetra en la cámara lo hace con menor velocidad.

Por tanto, al igual que con otros parámetros, como la abertura, se puede decir que existe un punto de equilibrio en el conjunto caña – boquilla para poder extraer los valores requeridos en la interpretación.



Figura 38. Boquillas B9, B16 y B17

4.2.3.6. VARIACIÓN EN LA POSICIÓN DE LA TABLA

Esta comparación consiste en la variación de la posición de la tabla.

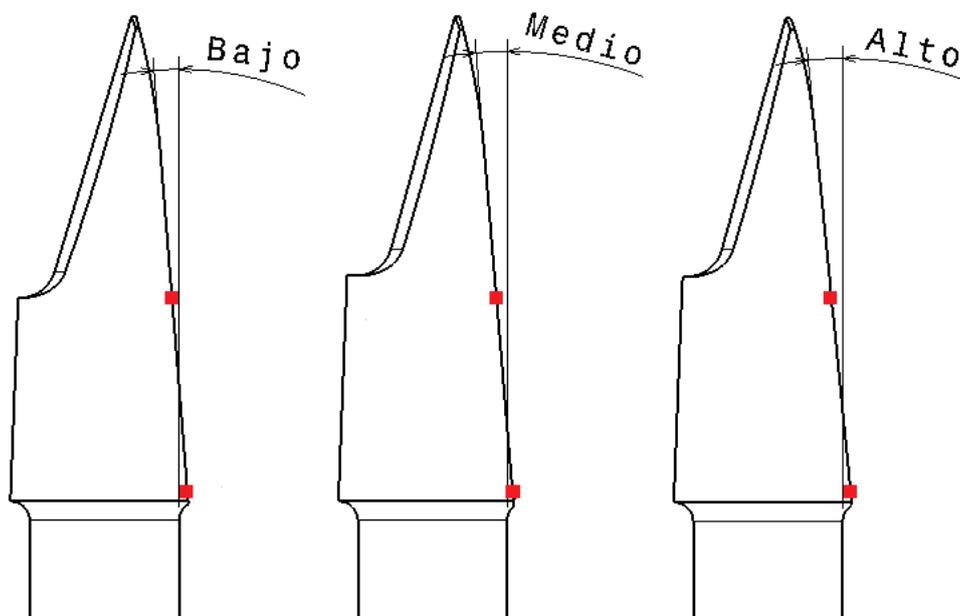


Figura 39. Esquema de la variación de la posición de la tabla

La magnitud que se va a variar en este caso es el ángulo de la tabla, determinado por la distancia de dos puntos (señalados en la imagen en rojo) con respecto al eje central, en vista lateral. Dicha modificación acarrea una variación en el ángulo lateral de la cámara para que se mantengan las dimensiones de la punta.

Los valores obtenidos son los siguientes, para las distintas modificaciones (siendo la característica Alto la correspondiente a la boquilla de referencia):

VARIACIÓN DE LA TABLA			
Ángulo de la tabla [°]	ALTO	MEDIO	BAJO
Distancia punto inicial [mm]	12,45	12	12,45
Distancia punto final [mm]	9,575	9,575	10,125
Distancia media tabla – eje	MEDIO	BAJO	ALTO
	11,01	10,79	11,29
Ángulo lateral cámara [°]	1,20	1,60	1,60

Tabla 38. Valores utilizados en la variación de la tabla

Los parámetros variables en este estudio son numerosos, con lo que se ha decidido tener en cuenta el ángulo de la tabla como variable de referencia principal. Sin embargo, se tendrá en cuenta también la distancia media al eje.

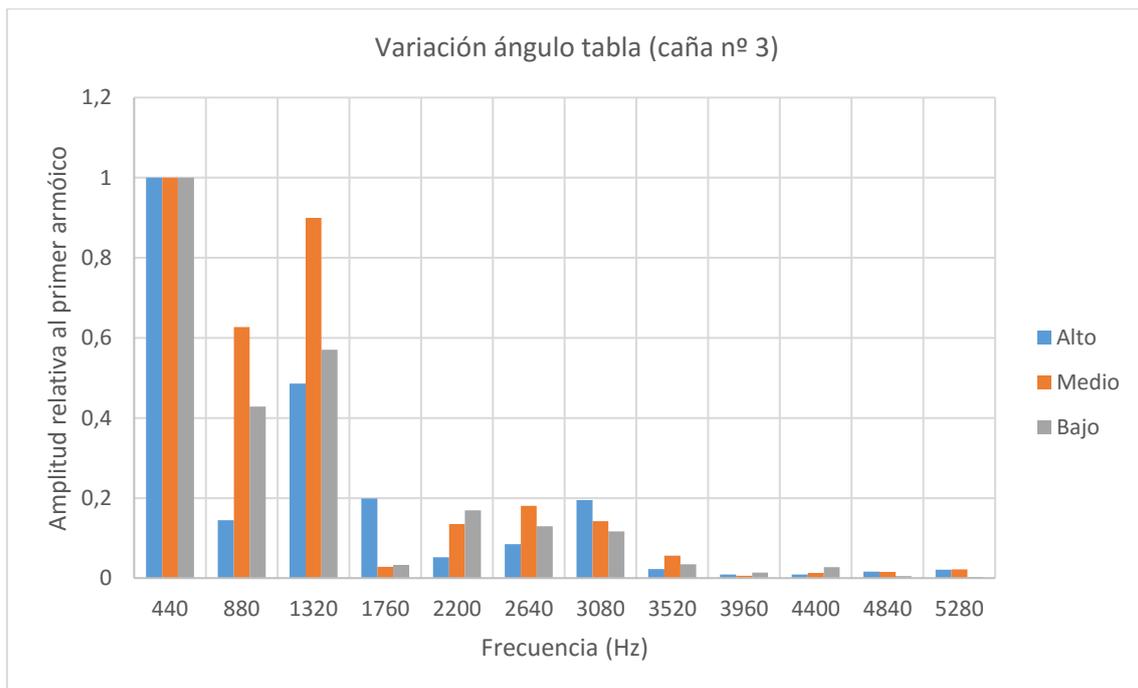
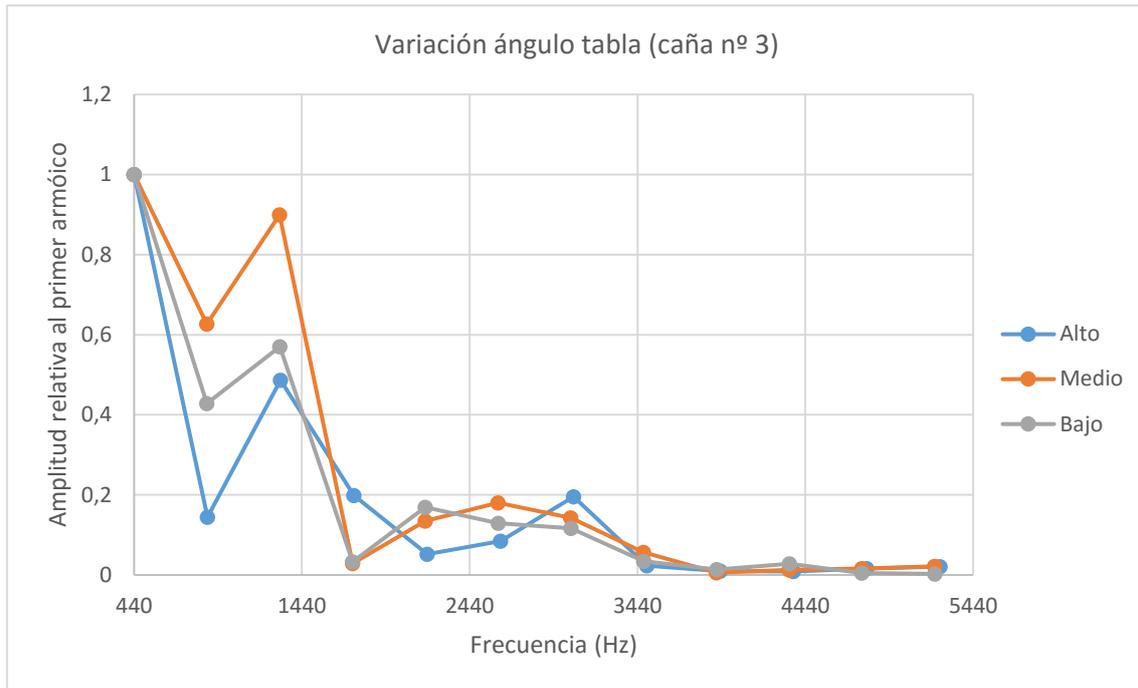


Gráfico 27. Análisis frecuencial con variación de la tabla y caña nº3

Como se puede ver, las configuraciones de ángulo medio y bajo aumentan la potencia en los primeros armónicos, reduciéndose en el séptimo. Sin embargo, no es una relación directa, con lo que se va a valorar dicha variación, además, en función de la distancia media de la tabla al eje.

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON EL ÁNGULO DE LA TABLA (CAÑA Nº 3)			
	Alto	Medio	Bajo
Segundo	0,14475766	0,62676512	0,42857268
Tercero	0,48617307	0,89932645	0,57006686
Quinto	0,05208371	0,13472469	0,1694692
Séptimo	0,19511641	0,14245961	0,11666233

Tabla 39. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del ángulo de la tabla y caña nº3

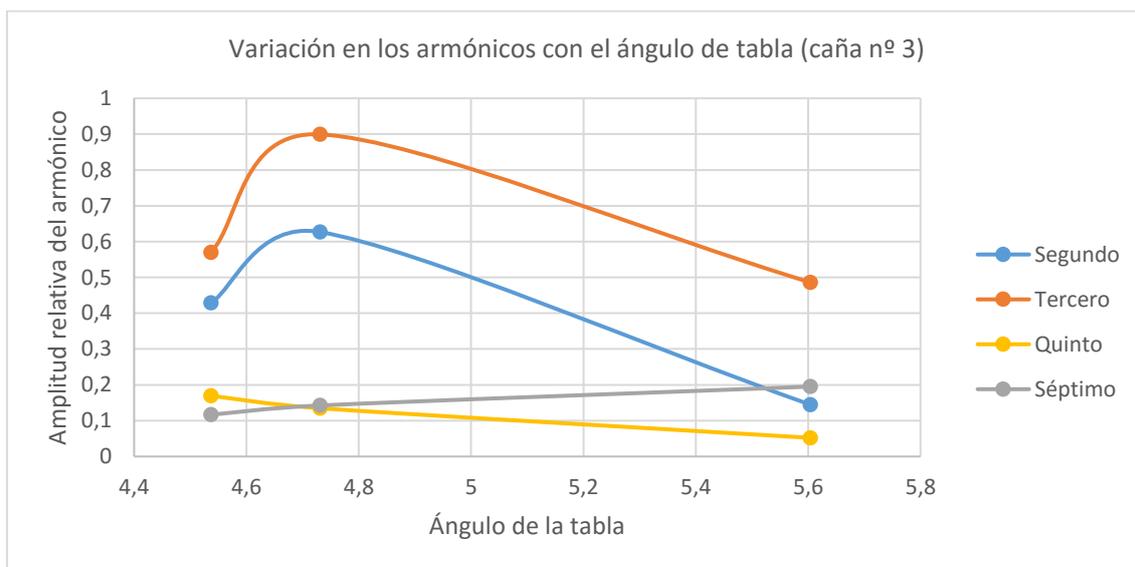


Gráfico 28. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del ángulo de la tabla y caña nº3

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON LA DISTANCIA EJE – TABLA (CAÑA Nº 3)			
	Alta	Media	Baja
Segundo	0,428572679	0,144757662	0,626765123
Tercero	0,570066863	0,486173071	0,899326451
Quinto	0,169469195	0,052083713	0,134724691
Séptimo	0,116662327	0,195116407	0,142459609

Tabla 40. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación de la distancia del eje a la tabla y caña nº3

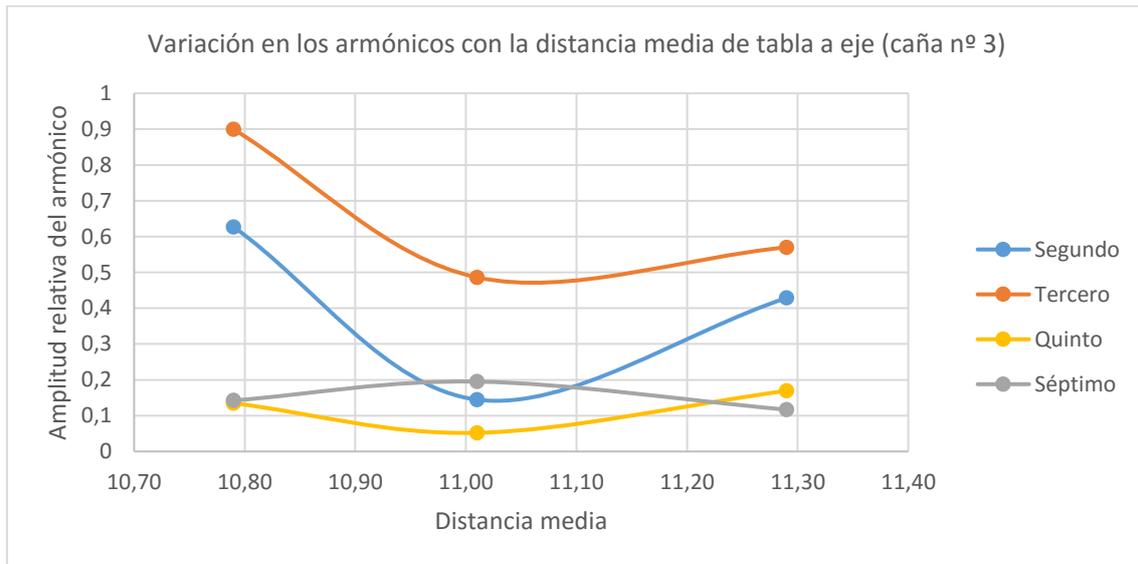


Gráfico 29. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación de la distancia del eje a la tabla y caña nº3

Las gráficas anteriores muestran la variación de amplitudes según el ángulo de la tabla y la distancia de ésta al eje. A pesar de no existir una relación constante, sí se observa que los armónicos segundo y tercero realizan la misma forma de variación, mientras que quinto y séptimo oponen sus movimientos.

Según el ángulo de tabla, se puede decir que si aumenta éste, el timbre se vuelve menos redondo (disminuye el quinto armónico) y más áspero (aumenta el séptimo).

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Alto	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo	M	B	M	B
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9961	0,9928	0,9932	CENTRADO	CENTRADO	0,1448	0,6268	0,4286				
3	0,9949	0,9905	0,9908	CENTRADO	CENTRADO	0,4862	0,8993	0,5701				
4	0,9942	0,9894	0,9898	CENTRADO	CENTRADO	0,1987	0,0285	0,0329				
5	0,9938	0,9886	0,9890	CENTRADO	CENTRADO	0,0521	0,1347	0,1695				
6	0,9936	0,9881	0,9885	CENTRADO	CENTRADO	0,0845	0,1801	0,1293				
7	0,9933	0,9878	0,9882	CENTRADO	CENTRADO	0,1951	0,1425	0,1167				
8	0,9932	0,9875	0,9879	CENTRADO	CENTRADO	0,0229	0,0565	0,0347				
9	0,9931	0,9873	0,9878	CENTRADO	CENTRADO	0,0094	0,0058	0,0138				
10	0,9930	0,9871	0,9876	CENTRADO	CENTRADO	0,0087	0,0129	0,0278				
11	0,9930	0,9871	0,9872	CENTRADO	CENTRADO	0,0161	0,0158	0,0051				
12	0,9929	0,9870	0,9871	CENTRADO	CENTRADO	0,0209	0,0220	0,0027				

Tabla 41. Valores obtenidos en la variación de la tabla y caña n°3

En cuanto a la afinación, no existen diferencias entre los distintos formantes, quedando ligeramente bajos todos ellos, pero centrados respecto al sistema temperado. En la amplitud sí existen diferencias importantes, no pudiendo distinguir un patrón entre ellas, como se ha dicho anteriormente.

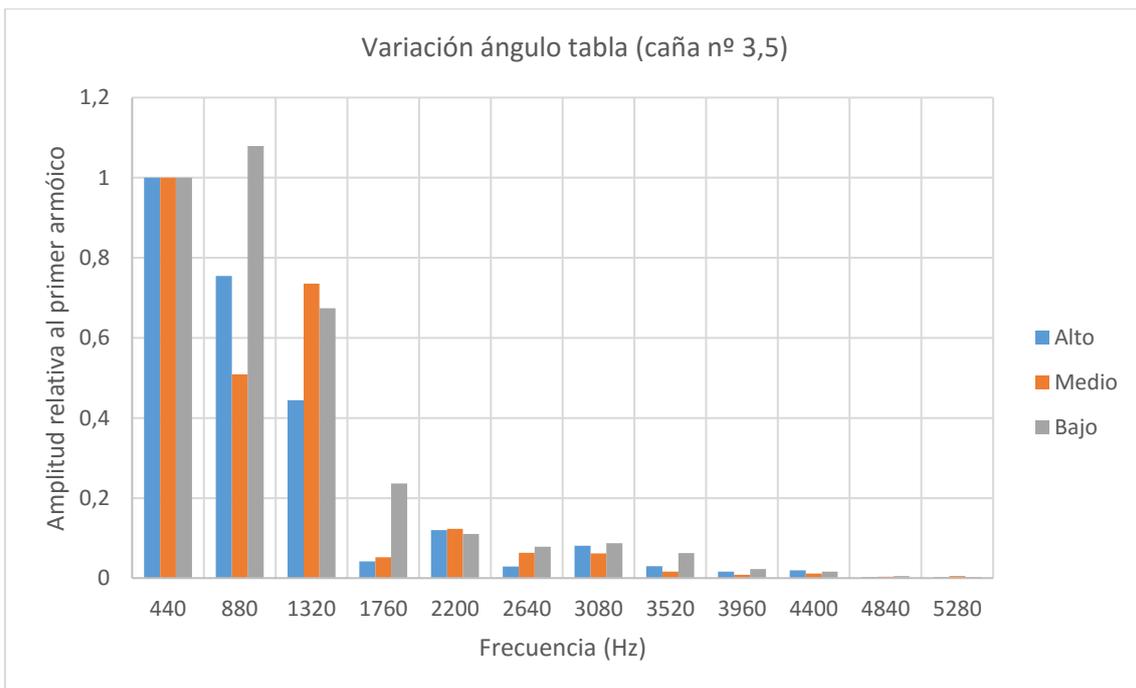
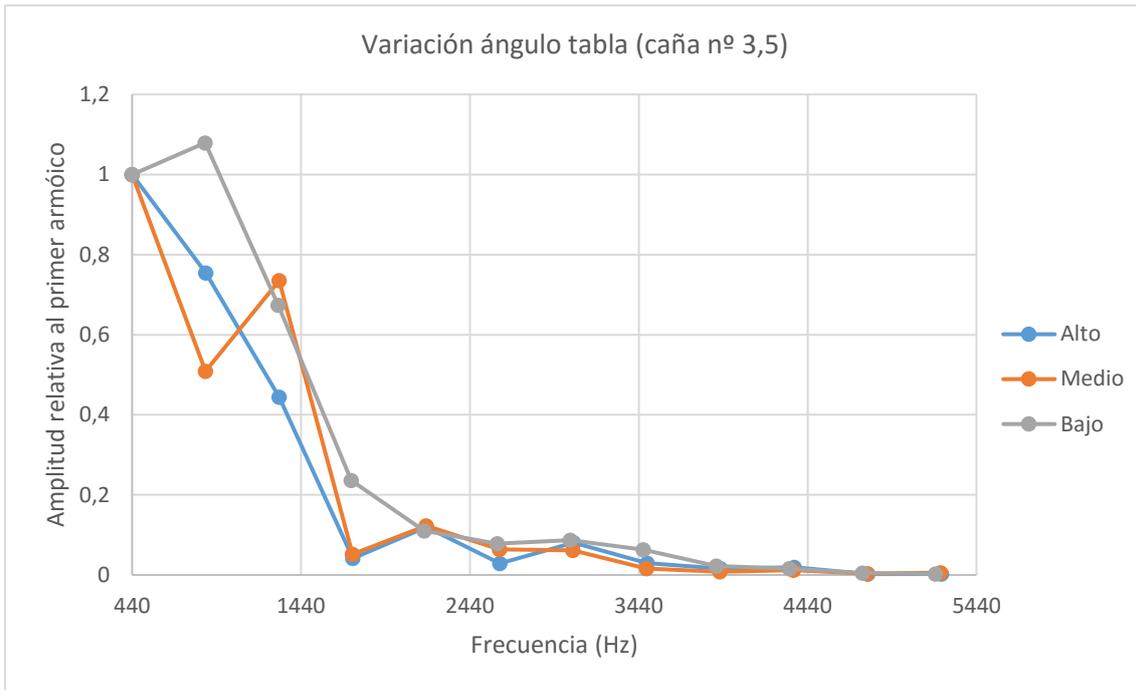


Gráfico 30. Análisis frecuencial con variación de la tabla y caña nº3.5

Como es habitual, el aumento de la dureza de la caña aumenta la potencia de los primeros armónicos (especialmente el segundo y el tercero), aportando sonoridad y color redondo al timbre, pero reduce la presencia de armónicos superiores, reduciendo así su color brillante.

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON EL ÁNGULO DE LA TABLA (CAÑA Nº 3,5)			
	Alto	Medio	Bajo
Segundo	0,75438949	0,50876229	1,07916767
Tercero	0,44433333	0,73518851	0,67364053
Quinto	0,12001133	0,1230697	0,11040229
Séptimo	0,08053392	0,06173297	0,08710209

Tabla 42. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del ángulo de la tabla y caña nº3.5

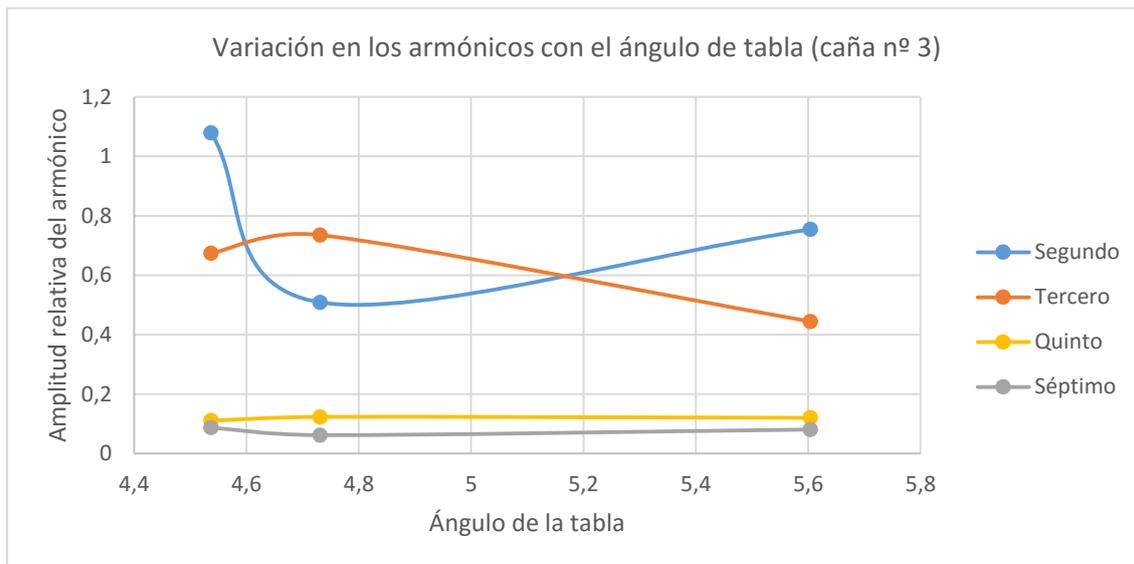


Gráfico 31. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del ángulo de la tabla y caña nº3.5

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON LA DISTANCIA EJE – TABLA (CAÑA Nº 3,5)			
	Alta	Media	Baja
Segundo	1,079167666	0,754389486	0,508762292
Tercero	0,67364053	0,444333304	0,735188514
Quinto	0,110402286	0,120011331	0,123069703
Séptimo	0,087102089	0,080533918	0,061732973

Tabla 43. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación de la distancia del eje a la tabla y caña nº3.5

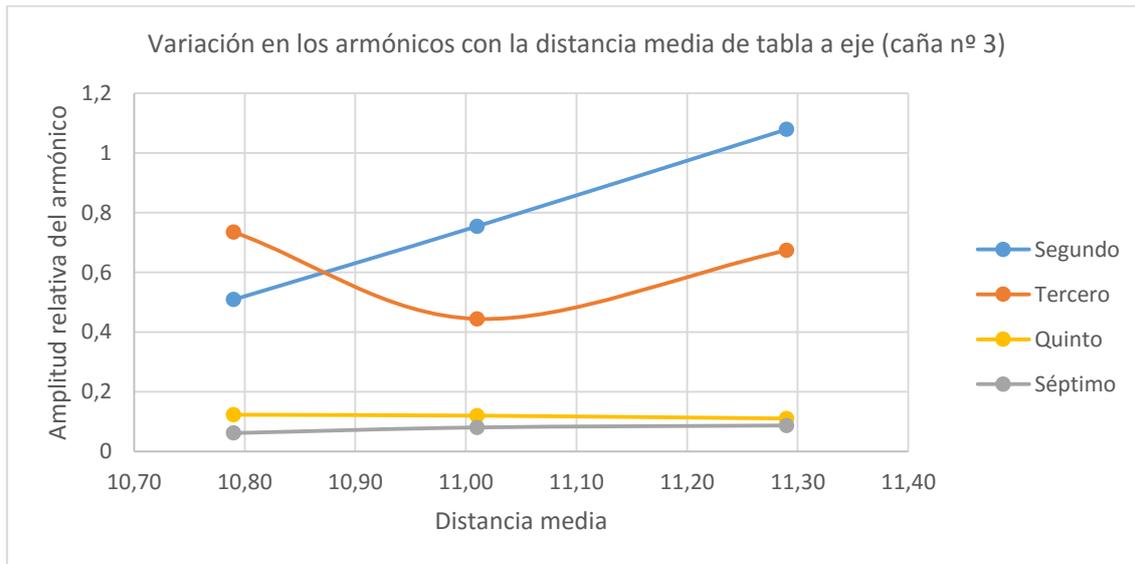


Gráfico 32. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación de la distancia del eje a la tabla y caña nº3.5

A pesar de no existir una relación constante en las gráficas anteriores, se observa que los armónicos segundo y tercero, así como quinto y séptimo, llevan movimientos opuestos.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Alto	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo	M	B	M	B
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9969	0,9945	0,9915	CENTRADO	CENTRADO	0,7544	0,5088	1,0792				
3	0,9934	0,9927	0,9886	CENTRADO	CENTRADO	0,4443	0,7352	0,6736				
4	0,9927	0,9918	0,9872	CENTRADO	CENTRADO	0,0418	0,0519	0,2360				
5	0,9921	0,9912	0,9864	CENTRADO	CENTRADO	0,1200	0,1231	0,1104				
6	0,9918	0,9908	0,9858	CENTRADO	CENTRADO	0,0292	0,0636	0,0786				
7	0,9915	0,9906	0,9854	CENTRADO	CENTRADO	0,0805	0,0617	0,0871				
8	0,9914	0,9904	0,9851	CENTRADO	CENTRADO	0,0296	0,0159	0,0628				
9	0,9912	0,9902	0,9849	CENTRADO	CENTRADO	0,0158	0,0081	0,0228				
10	0,9911	0,9901	0,9846	CENTRADO	CENTRADO	0,0193	0,0117	0,0161				
11	0,9911	0,9904	0,9843	CENTRADO	CENTRADO	0,0024	0,0033	0,0050				
12	0,9910	0,9902	0,9841	CENTRADO	CENTRADO	0,0028	0,0054	0,0028				

Tabla 44. Valores obtenidos en la variación de la tabla y caña nº3.5

En cuanto a la afinación, no existen diferencias significativas, quedando ligeramente bajos todos los formantes, pero centrados. En la amplitud sí que existen diferencias significativas, excepto en el quinto armónico, pero al ser éste un formante de poca amplitud no interfiere demasiado en el sonido.

En conclusión, se afirma lo siguiente:

Al igual que en otros estudios, no se puede decir que exista una relación concreta en la variación de la tabla, sino que parece existir un punto de equilibrio en el que las amplitudes de los armónicos analizados son máximas.



Figura 40. Boquillas B9, B18 y B19

4.2.3.7. VARIACIÓN EN EL TIPO DE LA GARGANTA

En este análisis se tendrá en cuenta la forma geométrica de la garganta.

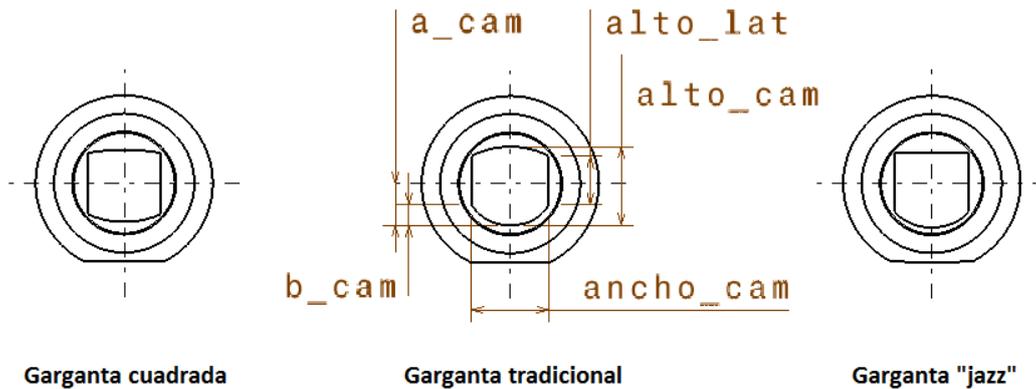


Figura 41. Esquema de la variación del tipo de garganta

Aunque no es una variación de un parámetro en concreto, es importante conocer el porqué de los distintos tipos de taladros en la garganta.

En las imágenes se ven los tres tipos fundamentales, aunque hay más (uno muy habitual es el redondo). En la tabla siguiente se recogen los valores de dichos parámetros, aclarando cada valor para relacionarlo con la imagen:

VARIACIÓN DE LA FORMA DE LA GARGANTA [mm]				
TIPO DE PARÁMETRO		Tradicional	Cuadrada	Jazz
Alto cámara	$alto_cam$	12,55	11,50	12,00
Alto lateral cámara	$alto_lat$	7,74	9,80	9,40
Ancho cámara	$ancho_cam$	6,10	5,70	5,90
Distancia base-centro	a_cam	6,62	6,20	7,00
Distancia inferior	b_cam	3,29	1,20	2,50

Tabla 45. Valores utilizados en los distintos tipos de garganta

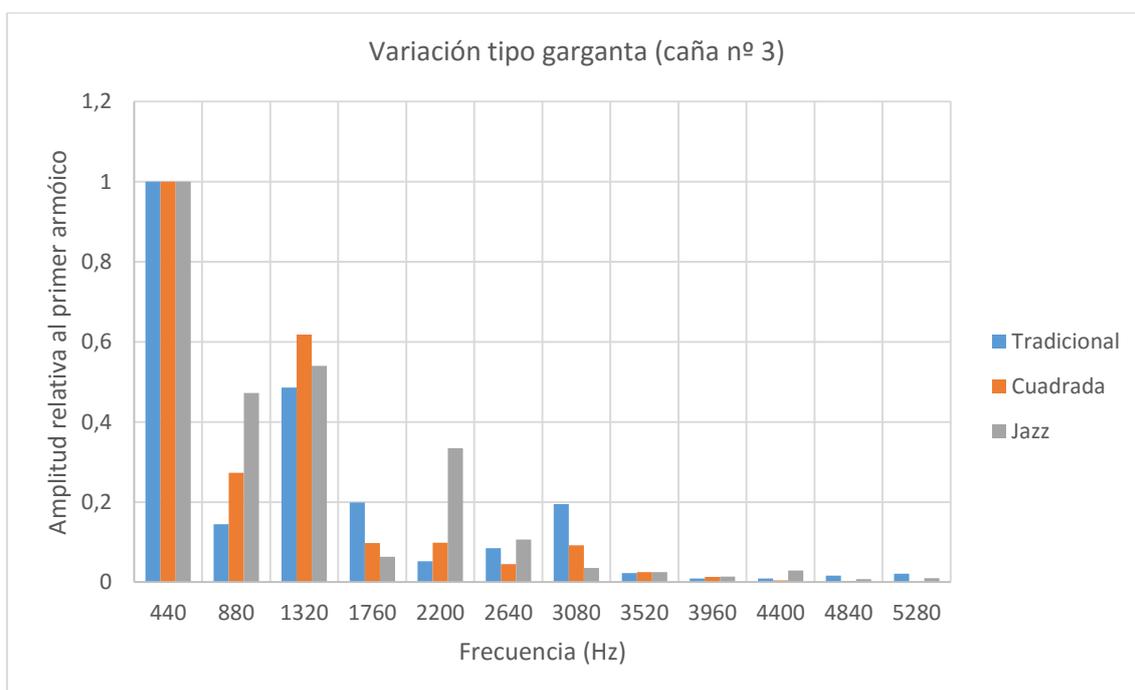
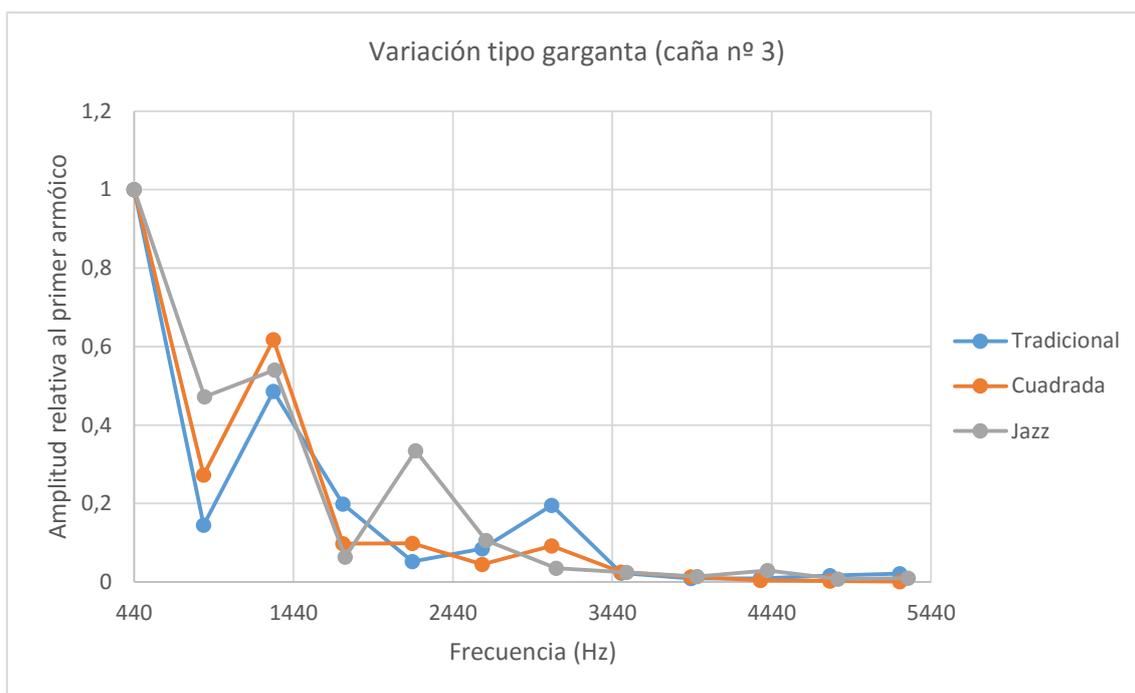


Gráfico 33. Análisis frecuencial con variación del tipo de garganta y caña nº3

Como se puede observar en las gráficas, la boquilla más potente corresponde a la garganta tipo “jazz”, siendo sus picos máximos en el segundo y quinto armónicos. El resto de formantes tienen una distribución similar, si bien el séptimo armónico es mayor en la garganta “tradicional”, con lo que su sonido será más áspero.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Trad.	Cuad.	Jazz	Cuadrada	Jazz	Trad.	Cuad.	Jazz	C	J	C	J
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9961	0,9962	1,0017	CENTRADO	CENTRADO	0,1448	0,2730	0,4719				
3	0,9949	0,9949	1,0023	CENTRADO	CENTRADO	0,4862	0,6179	0,5404				
4	0,9942	0,9942	1,0025	CENTRADO	CENTRADO	0,1987	0,0977	0,0635				
5	0,9938	0,9938	1,0027	CENTRADO	CENTRADO	0,0521	0,0985	0,3344				
6	0,9936	0,9936	1,0028	CENTRADO	CENTRADO	0,0845	0,0453	0,1061				
7	0,9933	0,9934	1,0029	CENTRADO	CENTRADO	0,1951	0,0922	0,0352				
8	0,9932	0,9932	1,0030	CENTRADO	CENTRADO	0,0229	0,0252	0,0246				
9	0,9931	0,9931	1,0030	CENTRADO	CENTRADO	0,0094	0,0132	0,0142				
10	0,9930	0,9932	1,0030	CENTRADO	CENTRADO	0,0087	0,0042	0,0291				
11	0,9930	0,9930	1,0031	CENTRADO	CENTRADO	0,0161	0,0029	0,0078				
12	0,9929	0,9929	1,0031	CENTRADO	CENTRADO	0,0209	0,0011	0,0096				

Tabla 46. Valores obtenidos en la variación del tipo de garganta y caña nº3

Los valores de afinación son centrados, sin existir diferencias notables entre ellos, siendo la boquilla tipo “jazz” la que tiene un valor superior a la afinación temperada. Esto se ha visto anteriormente, y es debido a la forma del techo de su cámara, ligeramente convexa. Los valores de amplitud son muy similares, y se recogen en las siguientes tablas y gráficas, para los armónicos segundo, tercero, quinto y séptimo.

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON EL TIPO DE GARGANTA (CAÑA Nº 3)			
	Tradicional	Cuadrada	Jazz
Segundo	0,144757662	0,273031902	0,471886945
Tercero	0,486173071	0,617899596	0,54039469
Quinto	0,052083713	0,098543798	0,334444765
Séptimo	0,195116407	0,092220466	0,035169591

Tabla 47. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del tipo de garganta y caña nº3

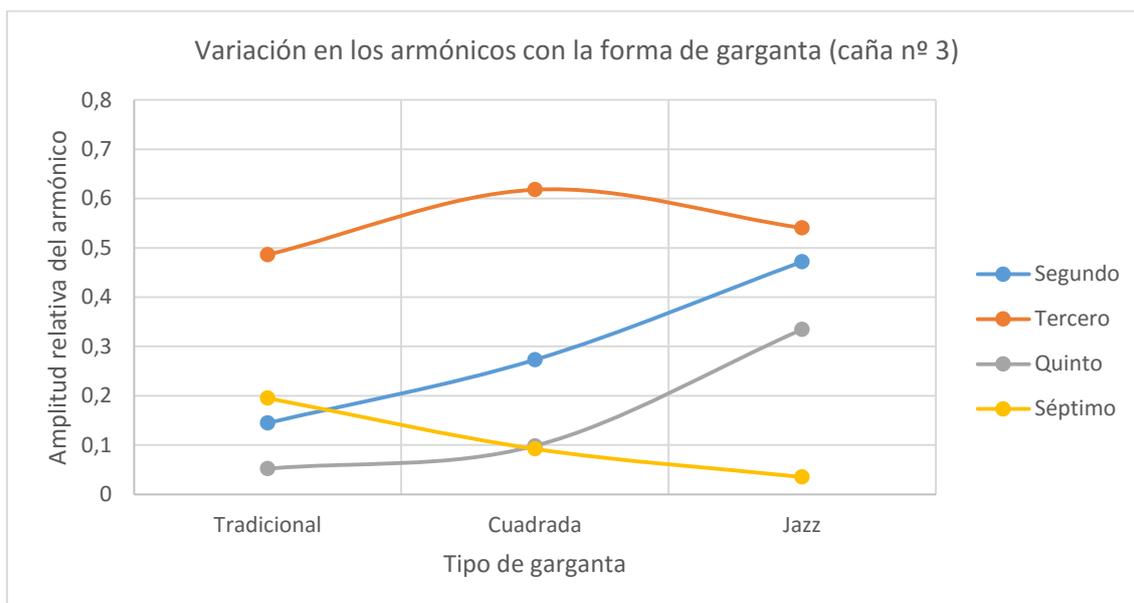


Gráfico 34. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del tipo de garganta y caña nº3

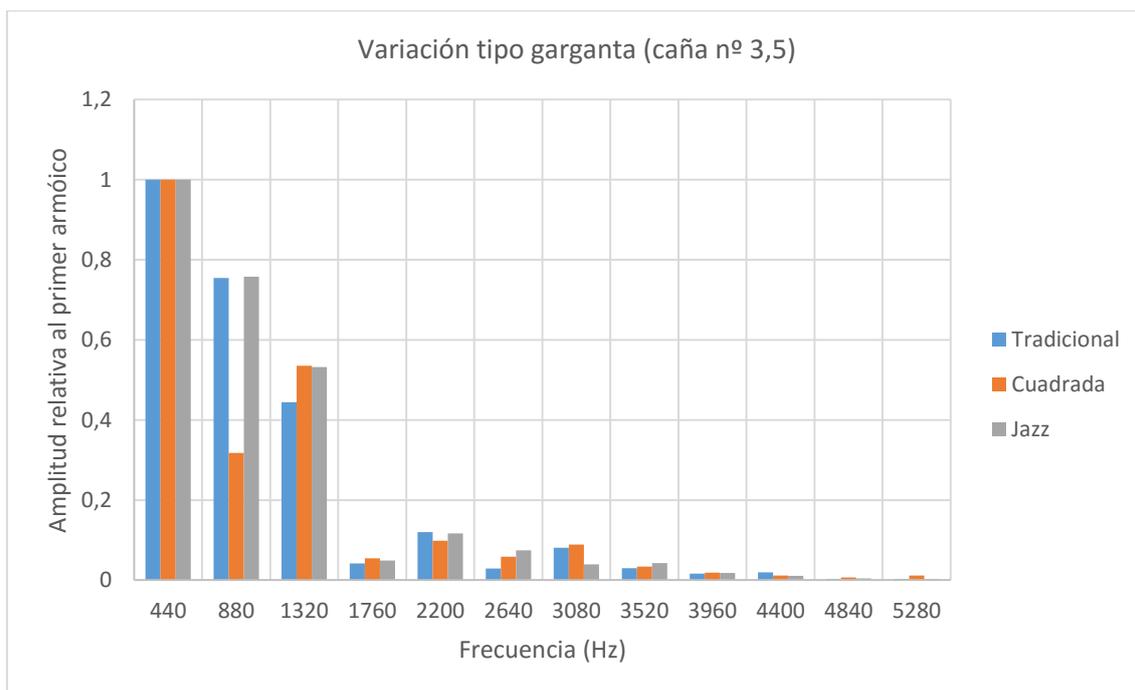
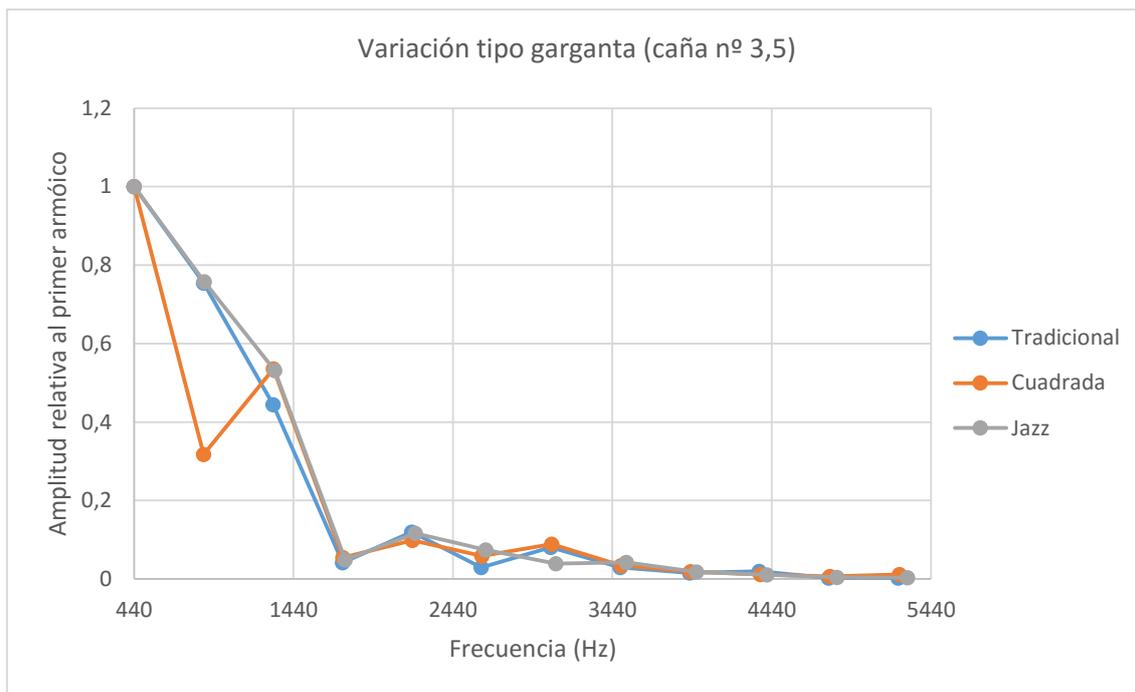


Gráfico 35. Análisis frecuencial con variación del tipo de garganta y caña nº3.5

Para la caña de dureza mayor, como es habitual, los formantes son más apagados, debido a la forma general de la boquilla, siendo de amplitud mayor los armónicos segundo y tercero.

	Frecuencia			Afinación general		Amplitud			DAF		DAM	
	Trad.	Cuad.	Jazz	Cuadrada	Jazz	Trad.	Cuad.	Jazz	C	J	C	J
1	1,0000	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000	1,0000				
2	0,9951	0,9961	1,0012	CENTRADO	CENTRADO	0,7544	0,3174	0,7577				
3	0,9934	0,9948	1,0015	CENTRADO	CENTRADO	0,4443	0,5355	0,5317				
4	0,9927	0,9941	1,0017	CENTRADO	CENTRADO	0,0418	0,0543	0,0493				
5	0,9921	0,9937	1,0019	CENTRADO	CENTRADO	0,1200	0,0986	0,1166				
6	0,9918	0,9935	1,0021	CENTRADO	CENTRADO	0,0292	0,0585	0,0744				
7	0,9915	0,9933	1,0021	CENTRADO	CENTRADO	0,0805	0,0888	0,0393				
8	0,9914	0,9931	1,0021	CENTRADO	CENTRADO	0,0296	0,0340	0,0428				
9	0,9912	0,9930	1,0022	CENTRADO	CENTRADO	0,0158	0,0189	0,0182				
10	0,9911	0,9929	1,0022	CENTRADO	CENTRADO	0,0193	0,0116	0,0106				
11	0,9911	0,9928	1,0022	CENTRADO	CENTRADO	0,0024	0,0063	0,0040				
12	0,9910	0,9928	1,0022	CENTRADO	CENTRADO	0,0028	0,0117	0,0031				

Tabla 48. Valores obtenidos en la variación del tipo de garganta y caña nº3.5

Las diferencias de afinación vuelven a ser despreciables, siendo la de garganta “jazz” de frecuencia mayor a la temperada, y los otros dos tipos de frecuencia menor. Las diferencias de amplitud son desiguales, y se muestran a continuación.

VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON EL TIPO DE GARGANTA (CAÑA Nº 3,5)			
	Tradicional	Cuadrada	Jazz
Segundo	0,754389486	0,317431157	0,757654581
Tercero	0,444333304	0,535529462	0,531715781
Quinto	0,120011331	0,098583128	0,116599705
Séptimo	0,080533918	0,088758349	0,039335533

Tabla 49. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del tipo de garganta y caña nº3.5

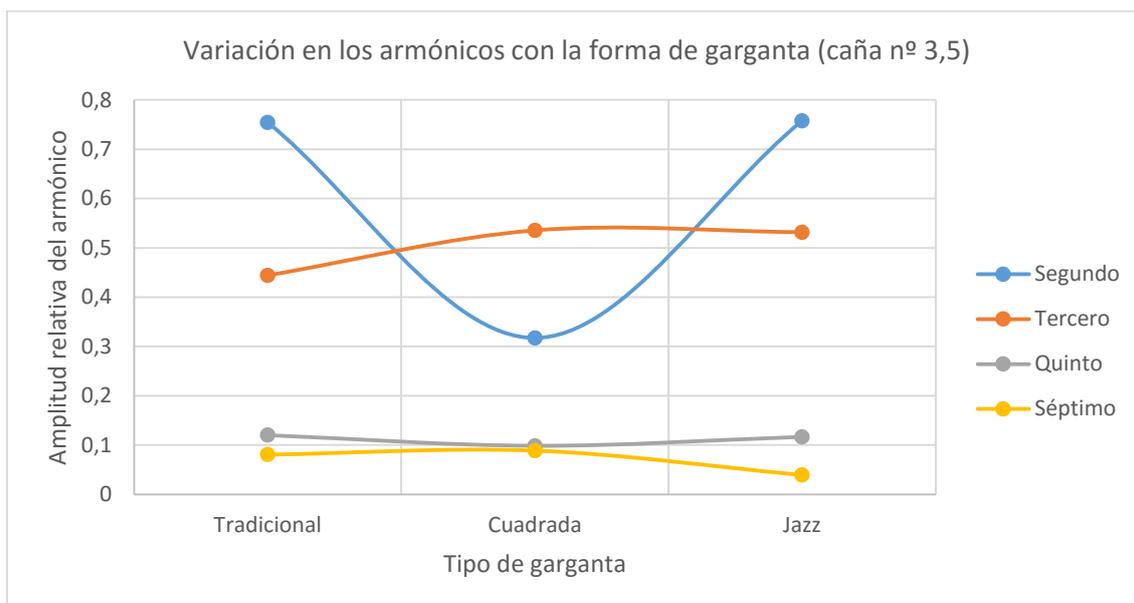


Gráfico 36. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del tipo de garganta y caña nº3.5

Por tanto, se puede concluir que:

La garganta de tipo “jazz” es la que proporciona una mayor potencia, seguida de la cuadrada y la tradicional, atendiendo solamente a la caña blanda, pues la dura apaga bastante el sonido.

Además, el sonido más redondo lo poseen las boquillas de cámara “jazz” y cuadrada, ya que su tercer y quinto armónicos son los más potentes. En adición, la garganta tradicional tiene el séptimo armónico más potente, realizando así un timbre más áspero que las otras dos.



Figura 42. Boquillas B9, B20 y B21

4.2.3.8. VARIACIÓN EN LA COLOCACIÓN DE LA GARGANTA (CÁMARA CONVEXA)

Este análisis se centrará en la colocación de la garganta en boquillas con cámara convexa.

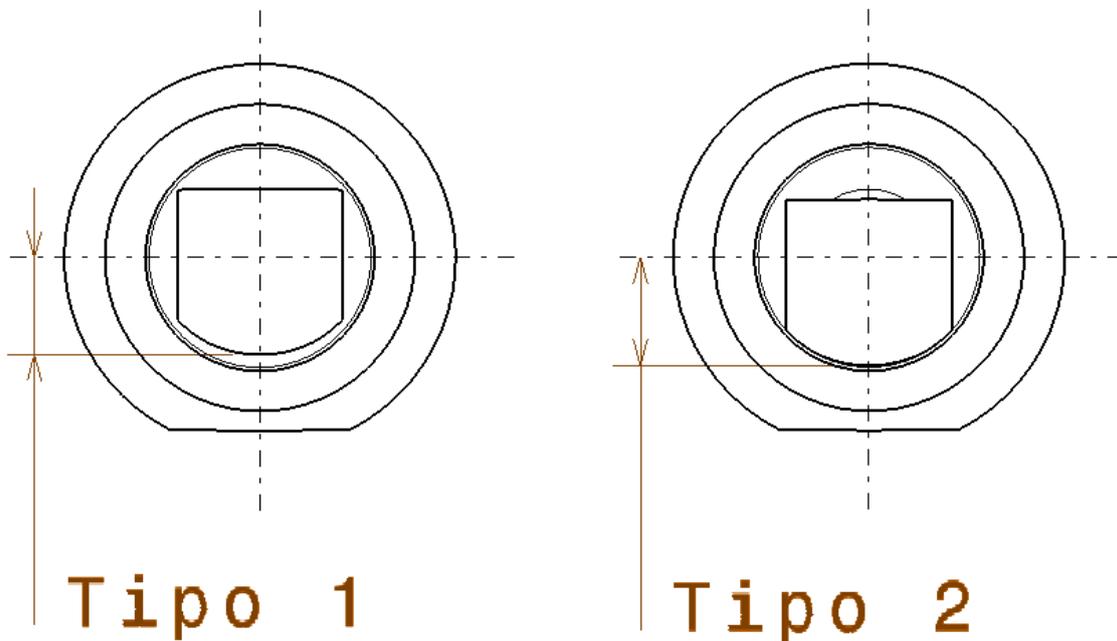


Figura 43. Esquema de la variación en la colocación de la garganta (cámara convexa)

Esta variación, con la garganta del tipo “jazz”, y el techo de la cámara con forma convexa, consiste en la modificación de la distancia del centro del taladro a la base de la garganta.

Se ha considerado relevante pues varias boquillas de fabricante, con este tipo de garganta, y la cámara con techo convexo, varían en la colocación del taladro, siendo una cualidad presente el volumen permitido o, viéndolo de otra manera, la capacidad de admisión de aire de cada una.

En la tabla siguiente se recogen los parámetros que se han variado, con su respectivo valor:

VARIACIÓN DE LA COLOCACIÓN DE LA GARGANTA [mm]		
Magnitud a considerar	Tipo 1	Tipo 2
Distancia base-centro	7,00	7,80
Ángulo de la rampa [°]	22	16
Ángulo de entrada [°]	5	5
Ángulo de salida [°]	10	10

Tabla 50. Valores utilizados en la colocación de la garganta

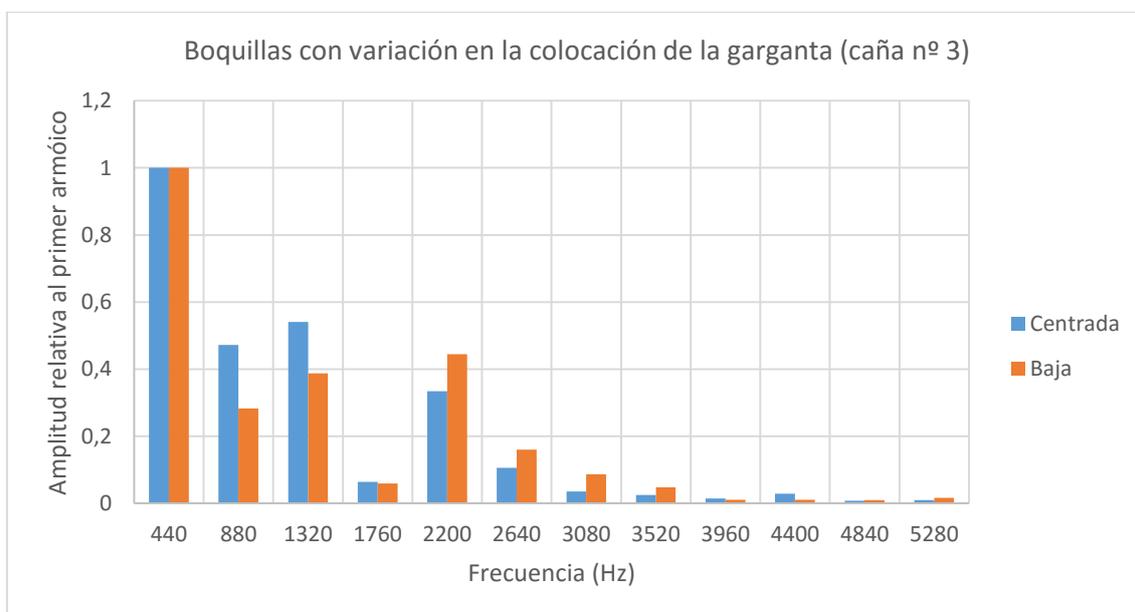
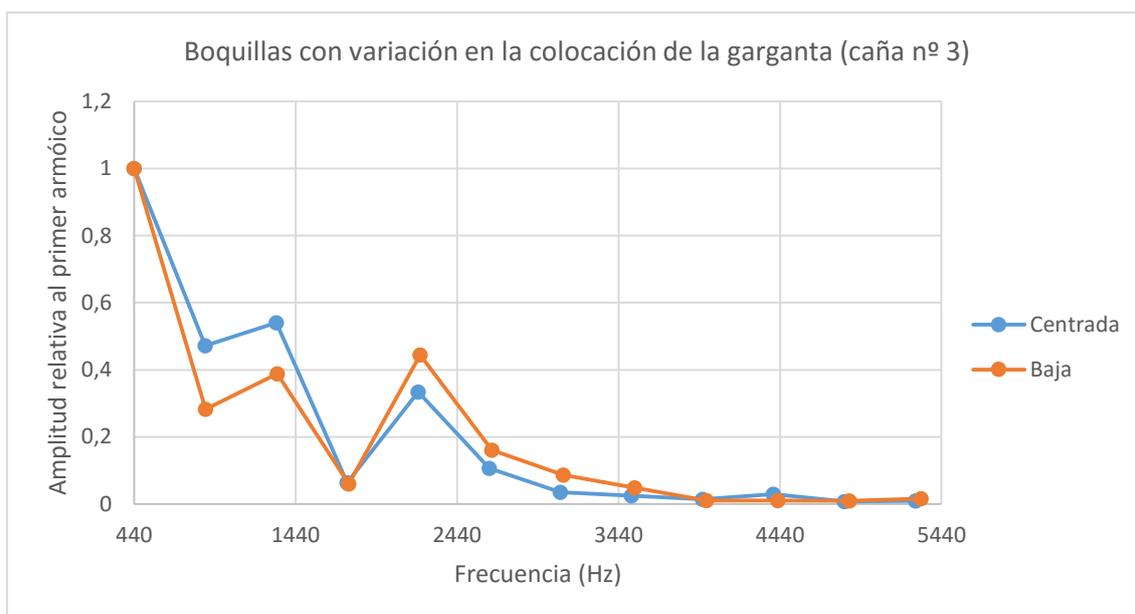


Gráfico 37. Análisis frecuencial con variación en la colocación de la garganta y caña nº3

Las gráficas muestran que la cámara centrada tiene un sonido más potente, debido a su segundo armónico mayor, mientras que la diferencia en los armónicos tercero y quinto son contrarias, por lo que el sonido redondo es prácticamente igual en ambas, si bien, es un timbre más brillante y nasal en la baja pues tiene mayores armónicos superiores.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	Centrada	Baja	Centrada	Baja	Centrada	Baja		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0017	1,0035	CENTRADO	CENTRADO	0,4719	0,2827		
3	1,0023	1,0046	CENTRADO	CENTRADO	0,5404	0,3879		
4	1,0025	1,0052	CENTRADO	CENTRADO	0,0635	0,0595		
5	1,0027	1,0056	CENTRADO	CENTRADO	0,3344	0,4442		
6	1,0028	1,0058	CENTRADO	CENTRADO	0,1061	0,1604		
7	1,0029	1,0060	CENTRADO	CENTRADO	0,0352	0,0870		
8	1,0030	1,0061	CENTRADO	CENTRADO	0,0246	0,0482		
9	1,0030	1,0061	CENTRADO	CENTRADO	0,0142	0,0109		
10	1,0030	1,0062	CENTRADO	CENTRADO	0,0291	0,0103		
11	1,0031	1,0063	CENTRADO	CENTRADO	0,0078	0,0098		
12	1,0031	1,0063	CENTRADO	CENTRADO	0,0096	0,0166		

Tabla 51. Valores obtenidos en la variación de la colocación de la garganta y caña nº3

La afinación es similar en ambas boquillas, ligeramente alta, mientras que la diferencia de amplitud es notable en varios armónicos, especialmente, como se ha dicho anteriormente, en el segundo formante.

A continuación se muestra una gráfica que recoge los armónicos segundo, tercero, quinto y séptimo.

	VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON LA COLOCACIÓN DE LA GARGANTA (CAÑA Nº 3)	
	Centrada	Baja
Segundo	0,471886945	0,282701798
Tercero	0,54039469	0,387856519
Quinto	0,334444765	0,44423933
Séptimo	0,035169591	0,087006128

Tabla 52. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación en la colocación de la garganta y caña nº3

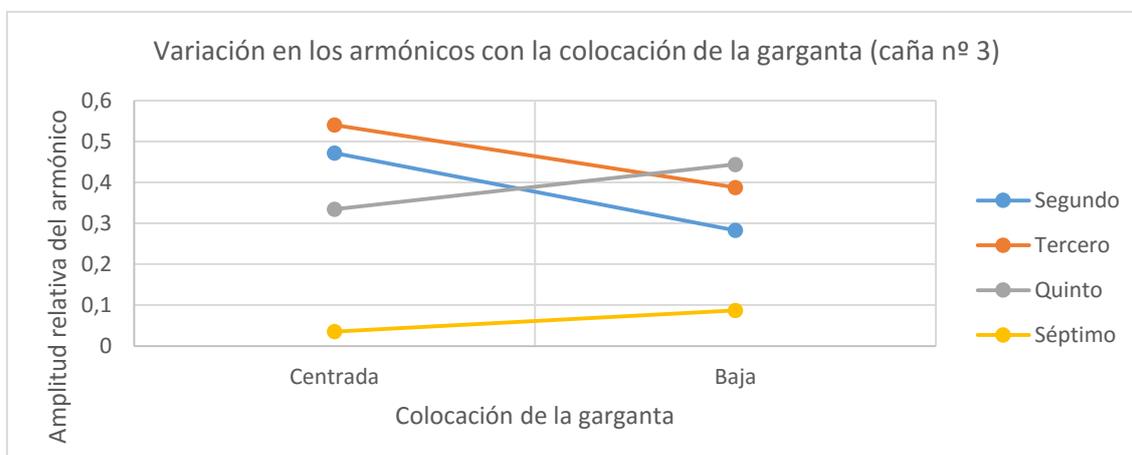


Gráfico 38. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación en la colocación de la garganta y caña nº3

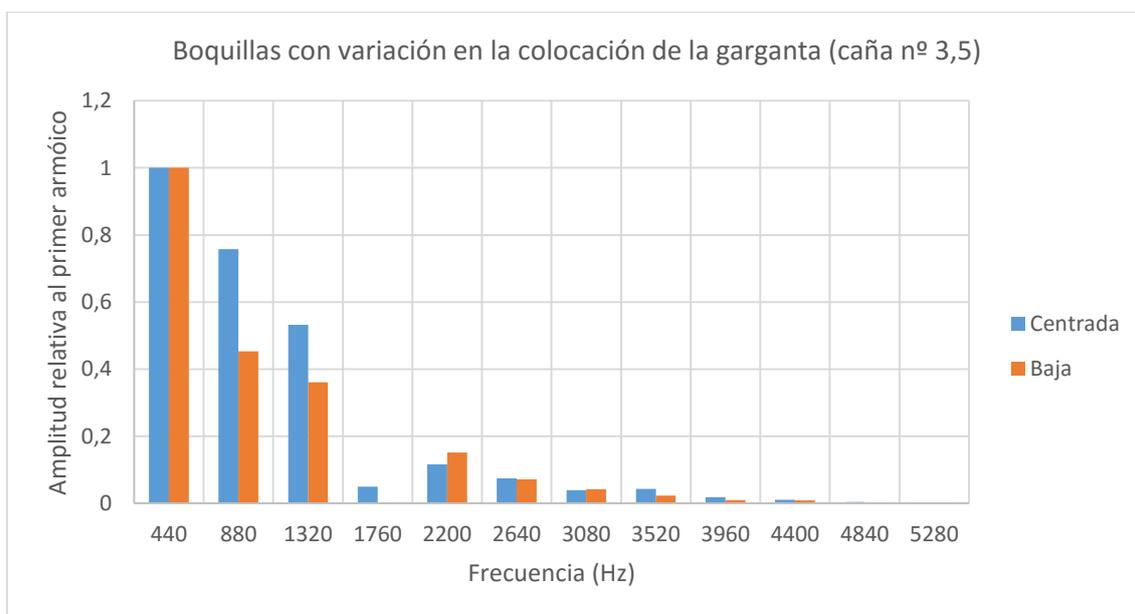
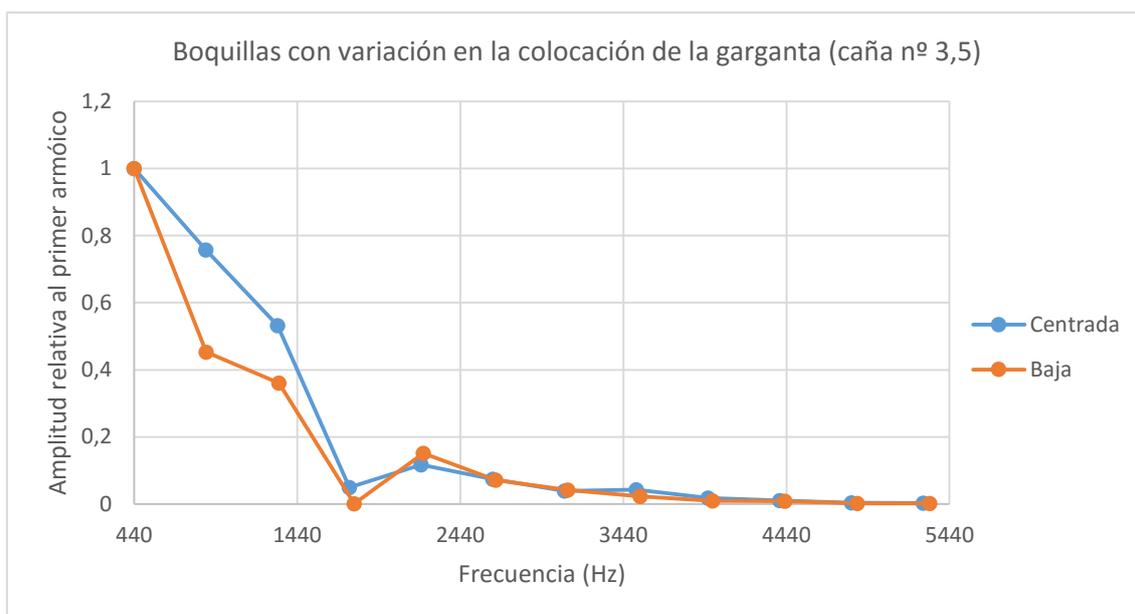


Gráfico 39. Análisis frecuencial con variación en la colocación de la garganta y caña nº3.5

En el caso de la caña dura, crecen los primeros armónicos, con lo que crece su potencia relativa, sin embargo se apagan el resto de armónicos, resaltándose ligeramente el quinto. Esto da un sonido redondo muy poco brillante, como es habitual al realizarse el análisis para la caña dura.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	Centrada	Baja	Centrada	Baja	Centrada	Baja		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0012	1,0038	CENTRADO	CENTRADO	0,7577	0,4531		
3	1,0015	1,0052	CENTRADO	CENTRADO	0,5317	0,3611		
4	1,0017	1,0164	CENTRADO	CENTRADO	0,0493	0,0008		
5	1,0019	1,0061	CENTRADO	CENTRADO	0,1166	0,1518		
6	1,0021	1,0064	CENTRADO	CENTRADO	0,0744	0,0715		
7	1,0021	1,0066	CENTRADO	CENTRADO	0,0393	0,0420		
8	1,0021	1,0068	CENTRADO	CENTRADO	0,0428	0,0228		
9	1,0022	1,0070	CENTRADO	CENTRADO	0,0182	0,0095		
10	1,0022	1,0070	CENTRADO	CENTRADO	0,0106	0,0090		
11	1,0022	1,0071	CENTRADO	CENTRADO	0,0040	0,0018		
12	1,0022	1,0072	CENTRADO	CENTRADO	0,0031	0,0022		

Tabla 53. Valores obtenidos en la variación de la colocación de la garganta y caña nº3.5

Las diferencias de afinación presentan una variación importante en el cuarto armónico, siendo la afinación centrada pero elevada en la boquilla con la garganta baja. Esto no se puede explicar con exactitud. Las diferencias en amplitud, son importantes en los primeros armónicos. La distribución de amplitudes en los formantes más importantes es la siguiente.

	VARIACIÓN DE LA AMPLITUD RELATIVA DE LOS ARMÓNICOS CON LA COLOCACIÓN DE LA GARGANTA (CAÑA Nº 3,5)	
	Centrada	Baja
Segundo	0,757654581	0,453134415
Tercero	0,531715781	0,361103144
Quinto	0,116599705	0,151750105
Séptimo	0,039335533	0,042010614

Tabla 54. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación en la colocación de la garganta y caña nº3.5

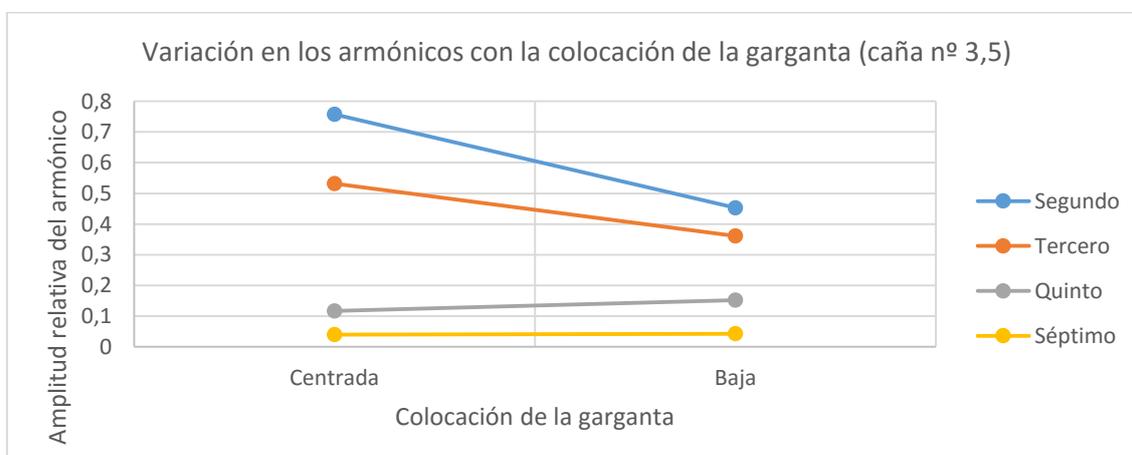


Gráfico 40. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación en la colocación de la garganta y caña nº3.5

Finalmente, se puede afirmar que:

Al acercar la garganta a la tabla, se reduce la amplitud relativa de los armónicos segundo y tercero, con lo que el timbre es menos potente y menos redondo.

En el quinto armónico la diferencia no es notable, si bien el séptimo armónico aumenta al bajar la garganta, siendo así el timbre más áspero.

Otra característica de estas boquillas, debido a su cámara convexa, es que las frecuencias de afinación en los formantes son ligeramente altas, haciendo así el timbre más brillante.



Figura 44. Boquillas B21 y B22

4.2.3.9. VARIACIÓN DEL MATERIAL

Esta variación pretende demostrar la no influencia del material en las cualidades sonoras de cada boquilla del saxofón, ya que viene siendo defendido desde siempre por todos los intérpretes del instrumento.

Para ello, se han seleccionado 3 boquillas diferentes y se han fabricado, además de mediante la impresión 3D, con la técnica de la estereolitografía.

A continuación se presentan las cualidades de ambos materiales utilizados:

- En la impresión 3D, se utiliza el ácido poliláctico o PLA, un polímero biodegradable derivado del ácido láctico, obtenido a partir de recursos totalmente renovables. Sintetizado por primera vez en 1932, es un polímero resistente a humedad y grasa, con un módulo de elasticidad similar al polietileno, aunque menos denso. Sus aplicaciones, especialmente en medicina, debido a su compatibilidad biológica, son cada vez más numerosas.
- En la estereolitografía, se utilizan resinas líquidas, que al recibir el haz láser ultravioleta, se fotopolimerizan, solidificándose así capa a capa la pieza. La resina utilizada es de tipo traslúcido, con mayor resistencia a la tracción y menor densidad que el PLA. Sin embargo, este material presenta el inconveniente de no ser biocompatible, con lo que no se conocen los efectos que podría tener sobre el organismo.



Figura 45. Máquina de SLA del Laboratorio de Desarrollo de Producto de la ETSI Industriales

Para la fabricación en estereolitografía se hubo de recortar la boquilla debido a que la máquina no disponía de suficiente resina como para alcanzar la altura de 90 mm de las boquillas. Por tanto, se recortó la base una distancia de 13 mm, lo que no influye en el timbre del sonido (ya que no se produce variación en esa zona, ya que es donde está introducido el tudel). Sin embargo, sí que se produce variación en la afinación, ya que al ser el tubo de menor longitud, aumenta la frecuencia de la nota base, y con ello de sus armónicos.

En la imagen se puede ver la modificación realizada.

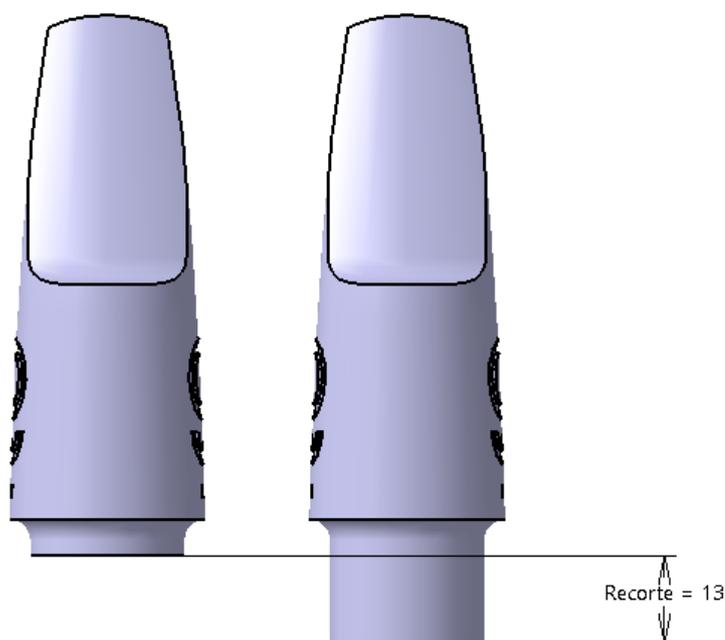


Figura 46. Recorte realizado al diseño por falta de resina en la máquina

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las 3 bocinas, de modo que son comparadas cada una de ellas fabricadas en ambos materiales.

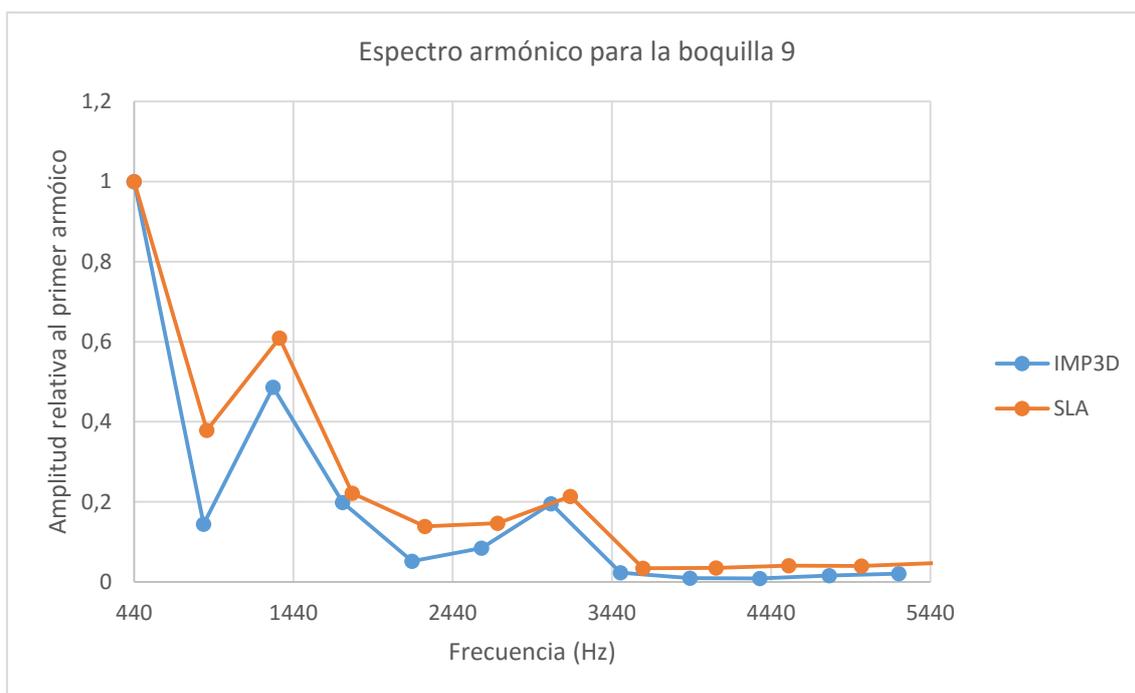


Gráfico 41. Análisis frecuencial con variación del material

Como se observa en la gráfica, la forma que sigue la distribución de armónicos es prácticamente la misma. Sin embargo, sí se puede ver que la boquilla fabricada por estereolitografía es ligeramente más potente, además de estar mucho menos centrada en la afinación. La afinación desplazada hacia arriba es debido a que se hubo de recortar la base de la boquilla debido a que no se disponía de suficiente resina para la fabricación.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	IMP3D	SLA	IMP3D	SLA	IMP3D	SLA		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	0,9961	1,0190	CENTRADO	CENTRADO	0,1448	0,3785		
3	0,9949	1,0255	CENTRADO	DESAFINADO	0,4862	0,6091		
4	0,9942	1,0286	CENTRADO	DESAFINADO	0,1987	0,2219		
5	0,9938	1,0305	CENTRADO	DESAFINADO	0,0521	0,1390		
6	0,9936	1,0318	CENTRADO	DESAFINADO	0,0845	0,1469		
7	0,9933	1,0327	CENTRADO	DESAFINADO	0,1951	0,2135		
8	0,9932	1,0334	CENTRADO	DESAFINADO	0,0229	0,0341		
9	0,9931	1,0340	CENTRADO	DESAFINADO	0,0094	0,0350		
10	0,9930	1,0344	CENTRADO	DESAFINADO	0,0087	0,0409		
11	0,9930	1,0347	CENTRADO	DESAFINADO	0,0161	0,0399		
12	0,9929	1,0350	CENTRADO	DESAFINADO	0,0209	0,0472		

Tabla 55. Valores obtenidos con la variación del material

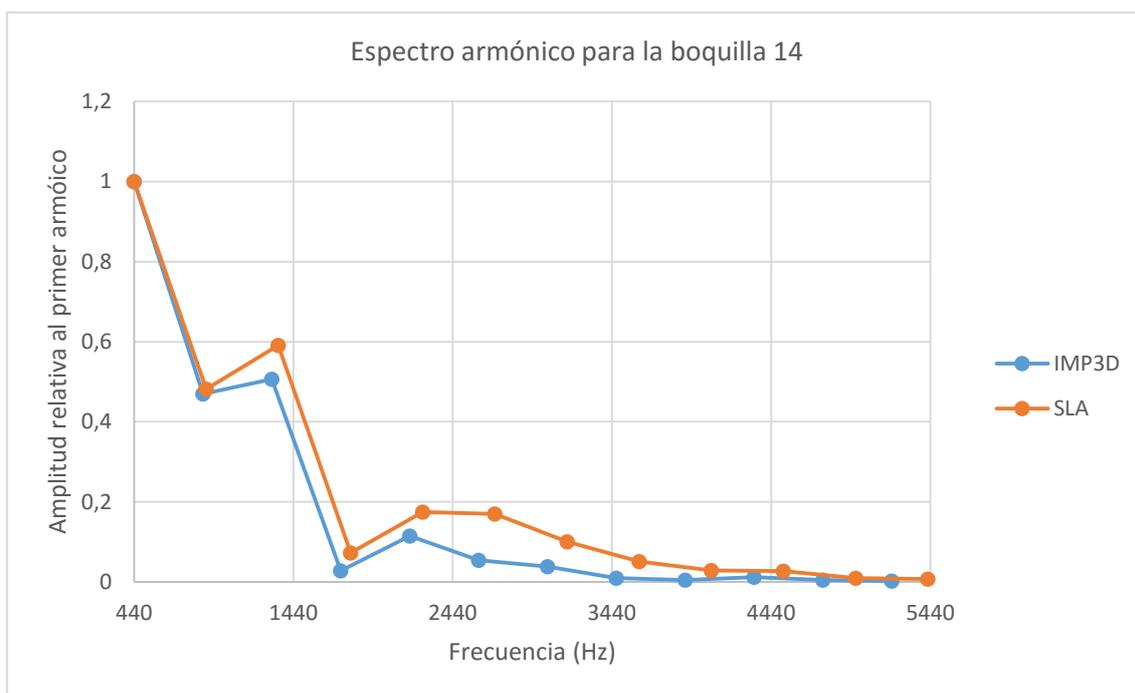


Gráfico 42. Análisis frecuencial con variación del material

Al igual que en el caso anterior, la forma de la distribución de armónicos es prácticamente la misma, con diferencias no apreciables de amplitud, aunque sí en la afinación, que vuelve a ser demasiado elevada a partir del cuarto armónico.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	IMP3D	SLA	IMP3D	SLA	IMP3D	SLA		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	0,9918	1,0149	CENTRADO	CENTRADO	0,4700	0,4819		
3	0,9891	1,0199	CENTRADO	CENTRADO	0,5066	0,5912		
4	0,9876	1,0224	CENTRADO	DESAFINADO	0,0280	0,0727		
5	0,9869	1,0239	CENTRADO	DESAFINADO	0,1153	0,1747		
6	0,9861	1,0249	CENTRADO	DESAFINADO	0,0546	0,1698		
7	0,9857	1,0256	CENTRADO	DESAFINADO	0,0384	0,1006		
8	0,9855	1,0261	CENTRADO	DESAFINADO	0,0093	0,0511		
9	0,9852	1,0266	CENTRADO	DESAFINADO	0,0050	0,0291		
10	0,9850	1,0269	CENTRADO	DESAFINADO	0,0124	0,0271		
11	0,9848	1,0271	CENTRADO	DESAFINADO	0,0051	0,0097		
12	0,9847	1,0274	CENTRADO	DESAFINADO	0,0021	0,0070		

Tabla 56. Valores obtenidos con la variación del material

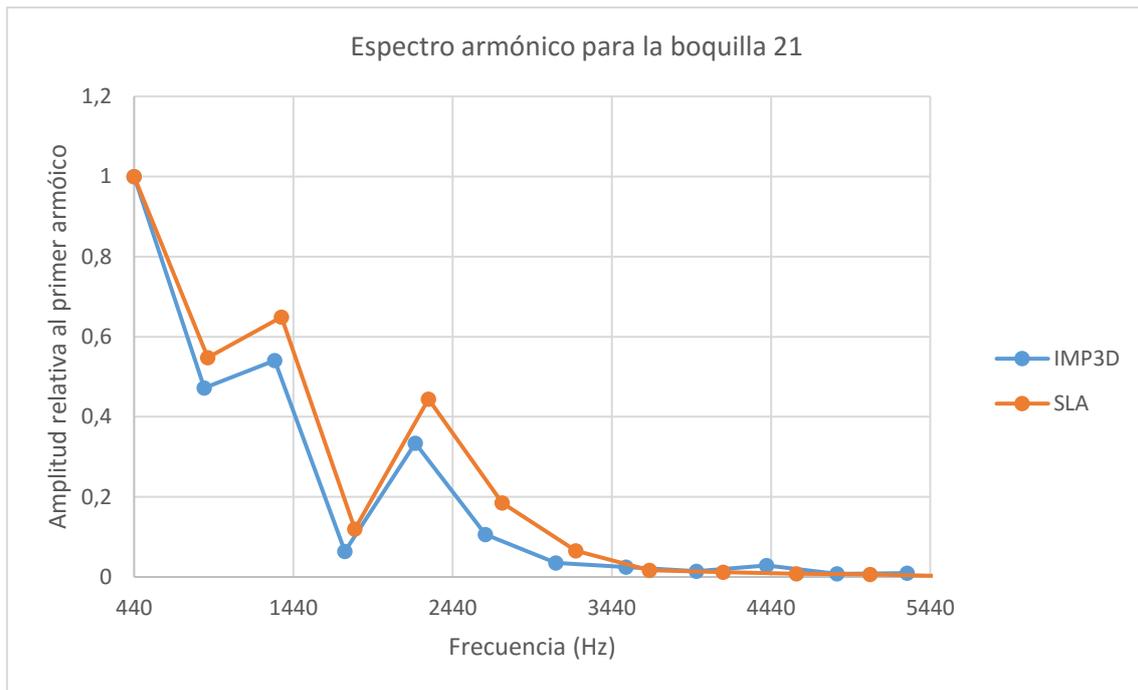


Gráfico 43. Análisis frecuencial con variación del material

En esta boquilla se sigue la tónica de los experimentos anteriores, con la única diferencia de que los armónicos superiores son de menor amplitud en la boquilla fabricada mediante estereolitografía.

	Frecuencia		Afinación general		Amplitud		DAF	DAM
	IMP3D	SLA	IMP3D	SLA	IMP3D	SLA		
1	1,0000	1,0000	CENTRADO	CENTRADO	1,0000	1,0000		
2	1,0017	1,0255	CENTRADO	DESAFINADO	0,4719	0,5477		
3	1,0023	1,0339	CENTRADO	DESAFINADO	0,5404	0,6492		
4	1,0025	1,0381	CENTRADO	DESAFINADO	0,0635	0,1201		
5	1,0027	1,0406	CENTRADO	DESAFINADO	0,3344	0,4440		
6	1,0028	1,0423	CENTRADO	DESAFINADO	0,1061	0,1849		
7	1,0029	1,0435	CENTRADO	DESAFINADO	0,0352	0,0656		
8	1,0030	1,0445	CENTRADO	DESAFINADO	0,0246	0,0172		
9	1,0030	1,0451	CENTRADO	DESAFINADO	0,0142	0,0122		
10	1,0030	1,0457	CENTRADO	DESAFINADO	0,0291	0,0082		
11	1,0031	1,0462	CENTRADO	DESAFINADO	0,0078	0,0068		
12	1,0031	1,0464	CENTRADO	DESAFINADO	0,0096	0,0024		

Tabla 57. Valores obtenidos con la variación del material

En conclusión, se puede afirmar que:

Como se viene afirmando desde siempre, el material de la boquilla no influye en el tipo de sonido, es decir, en la distribución de los armónicos (al menos de manera notable).

Sin embargo, el material sí influye en la potencia del sonido. La potencia del sonido viene determinada por la cantidad de aire que se emite, y, al ser la resina de la estereolitografía menos resistente a la viscosidad del aire, se acentúa el sonido.

La afinación viene determinada por la longitud del tubo, por lo que en este estudio no se puede extraer una conclusión concreta de ella.

Además, otra de las razones de las pequeñas diferencias existentes puede ser el mejor acabado de la estereolitografía frente a la impresión 3D, ya que esta última presenta una discontinuidad entre capas mayor que la anterior, con lo que puede causar diferencias en el timbre.



Figura 47. Boquillas B9, B14 y B21 fabricadas en ambos materiales

4.2.4. CONTRASTE DE RESULTADOS

En este apartado, se realiza el contraste de mediciones entre el micrófono utilizado en todo el estudio anterior, y un micrófono aportado por el Laboratorio de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada, además de la herramienta PULSE.

De la misma manera que anteriormente, se realiza la grabación, y el propio programa PULSE extrae los valores necesarios para la FFT. Sin embargo, una vez extraídos estos, se pudo comprobar que eran proporcionales a los que se extraían de MATLAB si se le introducía el archivo de audio, con lo que la opción final fue grabar audios y procesarlos por MATLAB como se había hecho anteriormente.

Por tanto, la diferencia existente radica en la calidad del audio generado, que viene dado tanto por el micrófono como por las condiciones del recinto. En las grabaciones iniciales, se realizó el experimento en una habitación insonorizada y vacía, típica de los ensayos musicales. La grabación para el contraste se realizó al aire libre, en condiciones de campo libre.

Para este experimento no se realizaron grabaciones de todas las boquillas fabricadas, sino que se escogieron 10 distintas, con las cuales el objetivo es comparar si la grabación con la que se ha hecho el estudio, y la grabación realizada con el equipo profesional, dan resultados similares.

En la siguiente tabla se muestran los resultados para cada armónico, ya corregidos a su altura relativa respecto al primer armónico, para cada una de las boquillas.

B7		B8		B9		B10		B12	
Orig.	Acust.								
0,0548	0,0550	0,0669	0,0688	0,0307	0,0316	0,0323	0,0337	0,0387	0,0403
0,0038	0,0040	0,0123	0,0119	0,0044	0,0046	0,0040	0,0040	0,0090	0,0087
0,0125	0,0126	0,0301	0,0298	0,0149	0,0143	0,0085	0,0082	0,0231	0,0238
0,0122	0,0125	0,0066	0,0070	0,0061	0,0059	0,0059	0,0057	0,0094	0,0093
0,0051	0,0052	0,0059	0,0061	0,0016	0,0016	0,0033	0,0031	0,0041	0,0041
0,0110	0,0107	0,0010	0,0010	0,0026	0,0027	0,0034	0,0033	0,0014	0,0013
0,0106	0,0103	0,0014	0,0013	0,0060	0,0058	0,0075	0,0076	0,0065	0,0061
0,0046	0,0045	0,0003	0,0003	0,0007	0,0007	0,0020	0,0019	0,0017	0,0018
0,0040	0,0041	0,0004	0,0004	0,0003	0,0003	0,0009	0,0009	0,0003	0,0003
0,0025	0,0024	0,0005	0,0005	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003
0,0009	0,0009	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0002	0,0002	0,0004	0,0004
0,0002	0,0002	0,0010	0,0011	0,0006	0,0006	0,0002	0,0002	0,0007	0,0007

B14		B16		B18		B20		B21	
Orig.	Acust.								
0,0423	0,0433	0,0492	0,0484	0,0325	0,0313	0,0482	0,0500	0,0536	0,0543
0,0199	0,0200	0,0036	0,0035	0,0139	0,0144	0,0132	0,0130	0,0253	0,0246
0,0214	0,0218	0,0204	0,0205	0,0185	0,0186	0,0298	0,0293	0,0290	0,0301
0,0012	0,0012	0,0023	0,0023	0,0011	0,0011	0,0047	0,0049	0,0034	0,0035
0,0049	0,0050	0,0035	0,0035	0,0055	0,0055	0,0048	0,0047	0,0179	0,0181
0,0023	0,0022	0,0022	0,0021	0,0042	0,0043	0,0022	0,0023	0,0057	0,0060
0,0016	0,0017	0,0025	0,0024	0,0038	0,0038	0,0044	0,0044	0,0019	0,0018
0,0004	0,0004	0,0009	0,0009	0,0011	0,0011	0,0012	0,0013	0,0013	0,0013
0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0004	0,0004	0,0006	0,0006	0,0008	0,0008
0,0005	0,0005	0,0003	0,0003	0,0009	0,0009	0,0002	0,0002	0,0016	0,0016
0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0004	0,0004
0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0005	0,0005

Tabla 58. Comparación de valores en ambos métodos de grabación

Como se puede observar, las diferencias en los resultados en los armónicos no son excesivamente grandes. En la siguiente tabla se muestran las diferencias porcentuales para cada una de las boquillas, en cada uno de sus armónicos, con respecto a los armónicos medidos en el experimento original.

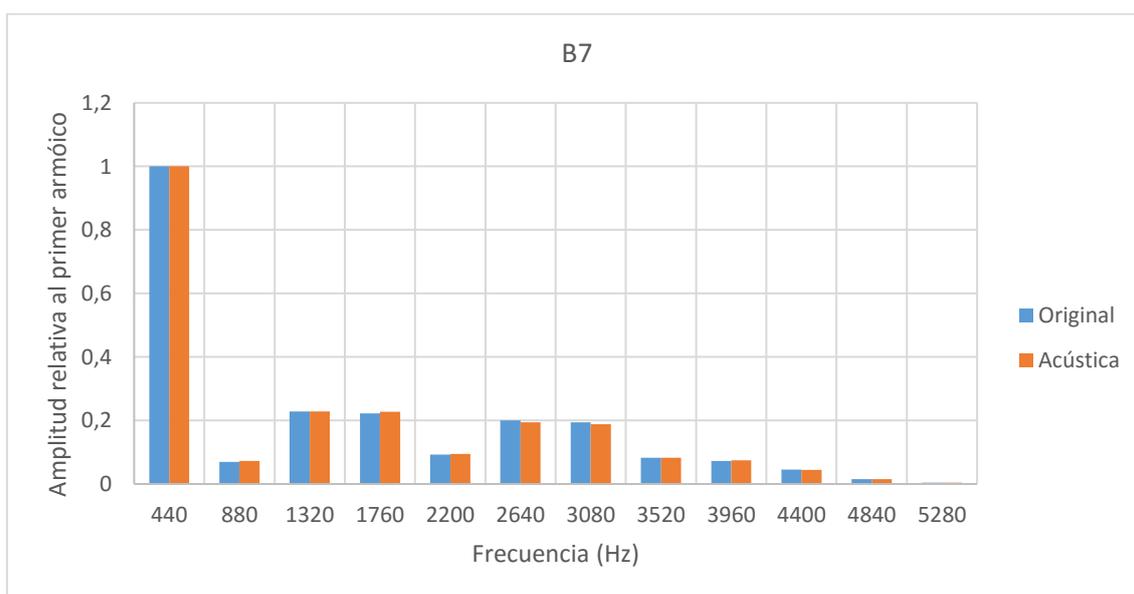
	B7	B8	B9	B10	B12	B14	B16	B18	B20	B21	MAYOR	MENOR
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-3,79	6,13	-0,39	4,21	7,58	1,47	0,41	-7,39	4,44	3,85	7,58	-7,39
3	-0,30	3,60	7,00	7,94	1,25	0,49	-2,13	-4,47	5,21	-2,67	7,94	-4,47
4	-1,99	-2,14	6,23	8,13	5,37	-1,96	-1,12	-4,16	-0,58	-1,97	8,13	-4,16
5	-2,69	-0,58	0,58	8,04	2,59	-1,08	-0,41	-3,43	5,40	0,39	8,04	-3,43
6	3,19	-0,58	-0,78	7,85	7,39	6,06	1,42	-6,14	0,00	-3,55	7,85	-6,14
7	2,99	6,42	6,61	3,25	8,64	-1,86	-0,10	-4,99	5,59	6,12	8,64	-4,99
8	0,50	1,85	-1,95	8,80	2,30	-2,44	1,32	-4,79	-0,77	4,54	8,80	-4,79
9	-1,99	-1,26	0,10	4,98	6,81	1,56	-1,42	0,00	4,82	-1,18	6,81	-1,42
10	3,19	0,10	5,74	6,41	2,88	1,56	-2,54	-7,08	6,85	-2,76	6,85	-7,08
11	-0,60	1,17	-0,78	8,13	1,44	7,14	2,84	-3,54	4,63	-2,27	8,13	-3,54
12	-1,79	-1,07	4,09	-0,48	7,01	-0,39	-0,71	-8,53	4,63	2,67	7,01	-8,53

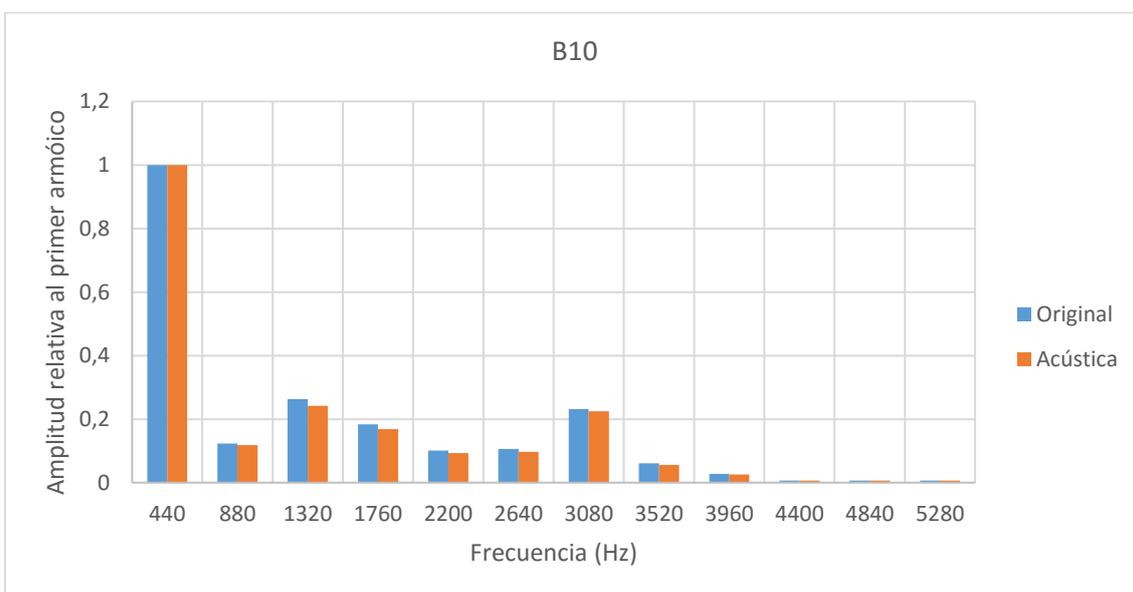
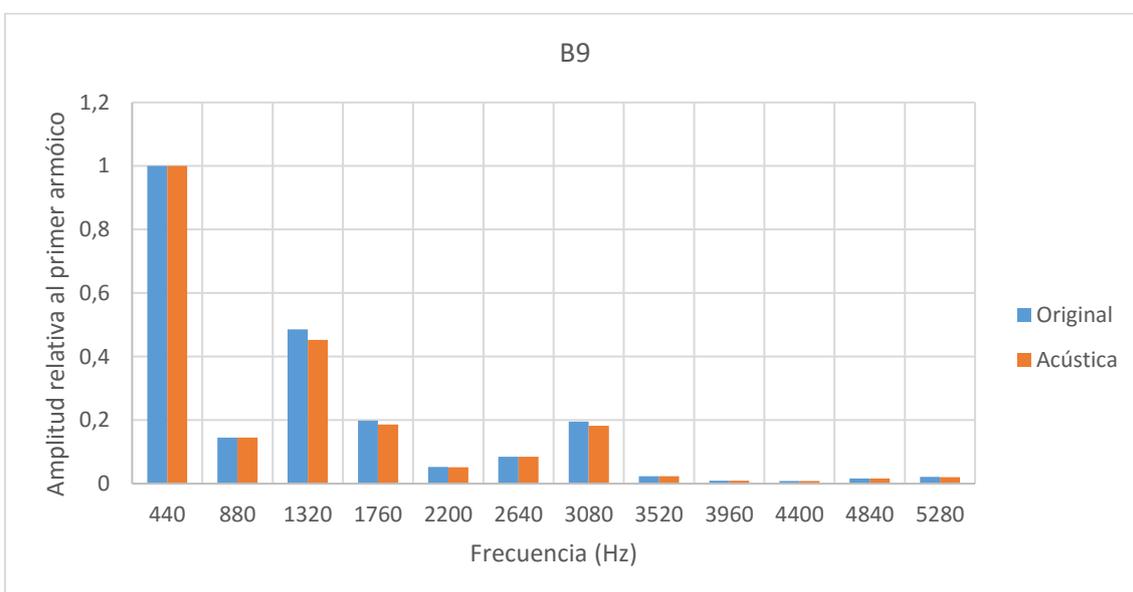
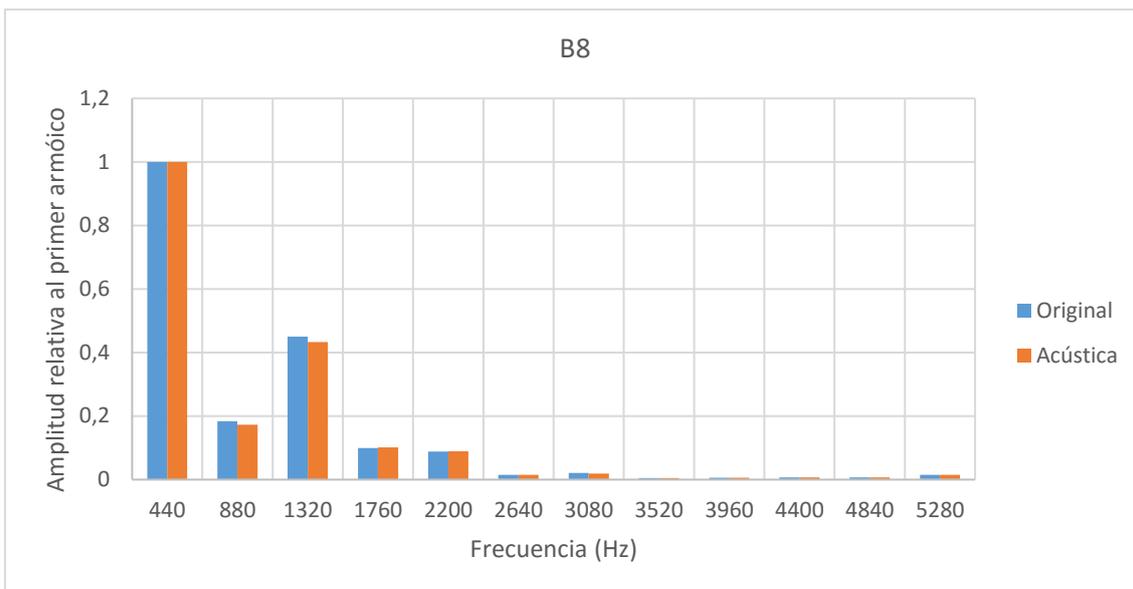
Tabla 59. Diferencias porcentuales entre los valores grabados por ambos métodos

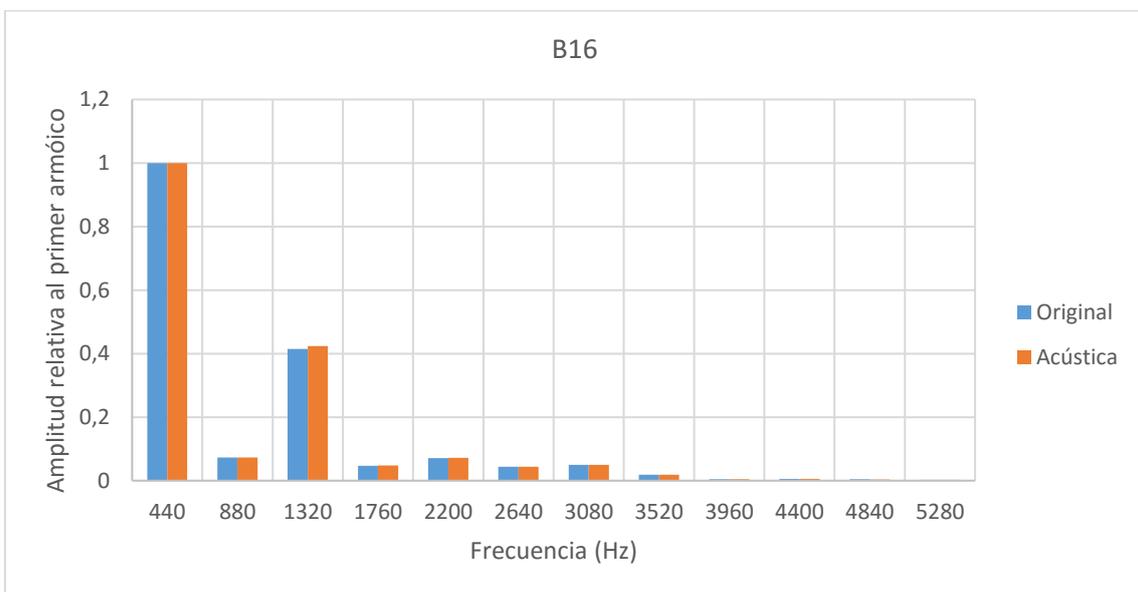
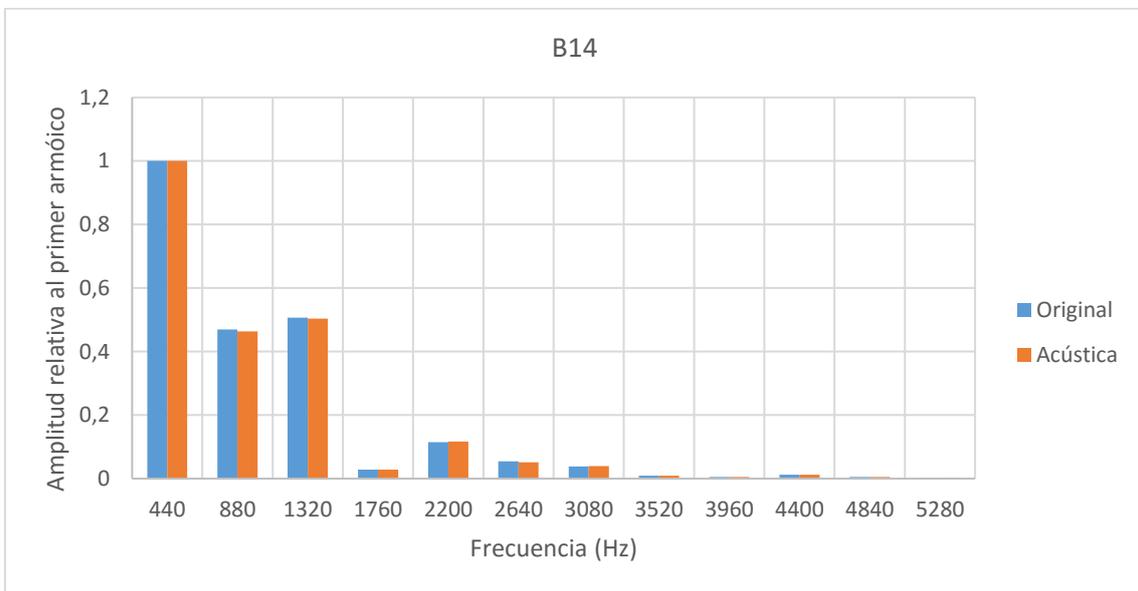
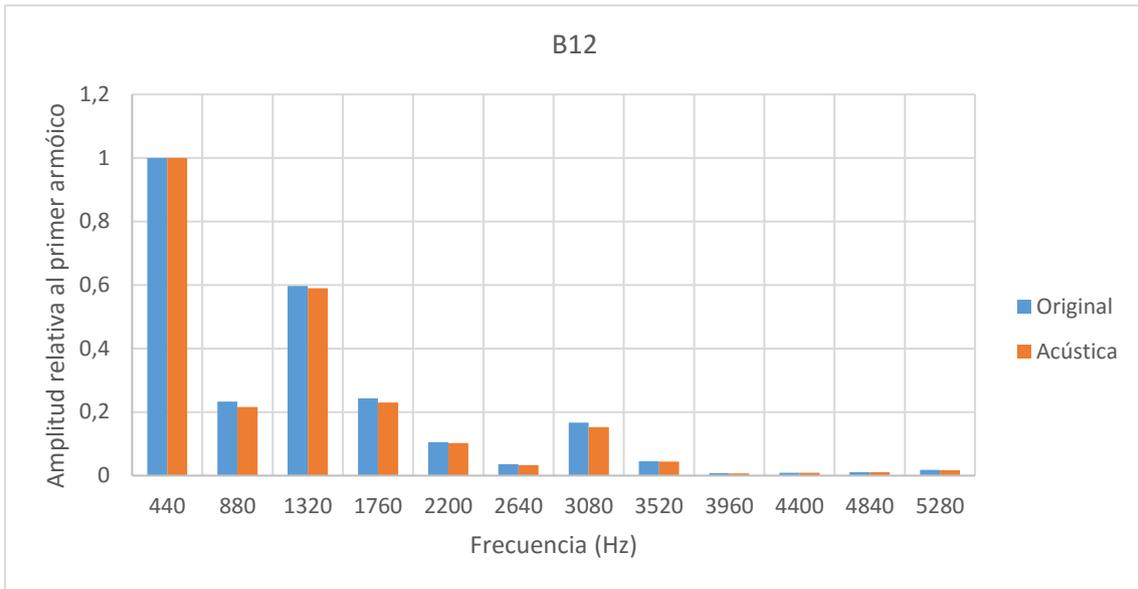
Como se puede observar en la tabla, los valores que aporta el nuevo análisis no son muy diferentes de los iniciales, pues en ningún caso se supera el 10% del valor original. Además, la distribución es relativamente constante en todos ellos, lo que es consecuencia de la mayor sensibilidad del micrófono, si bien la distribución es muy similar a la original.

Por ello, se da como bueno el estudio inicial, demostrando así que no es necesario un micrófono de gran calidad para este tipo de estudios.

A continuación, se presentan las gráficas con los valores de los armónicos para cada una de las boquillas y las dos situaciones de grabación. Como se observa, las diferencias entre un método y otro de grabación son inapreciables.







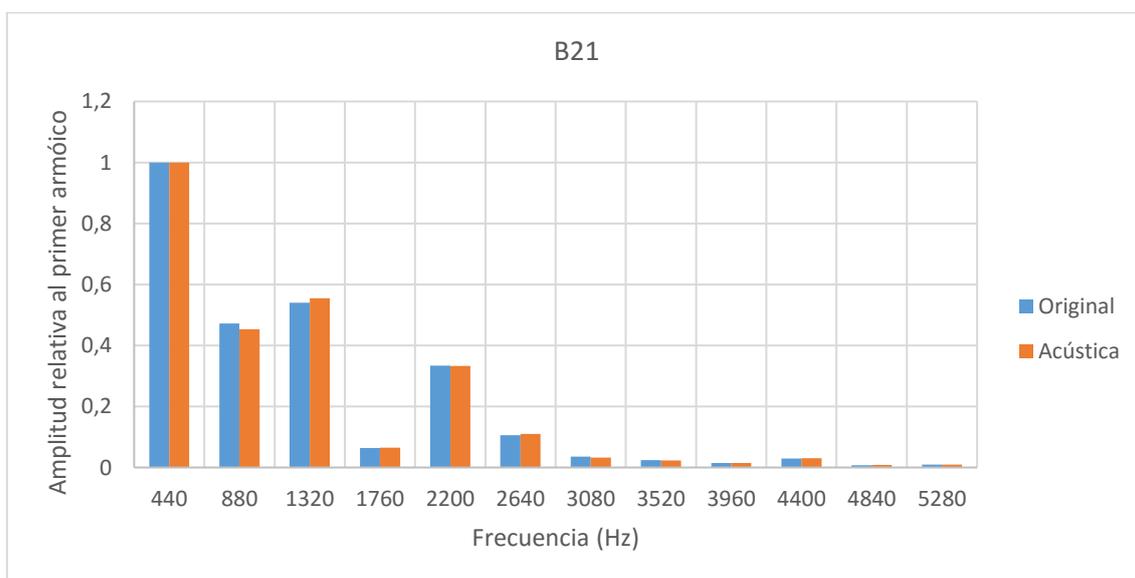
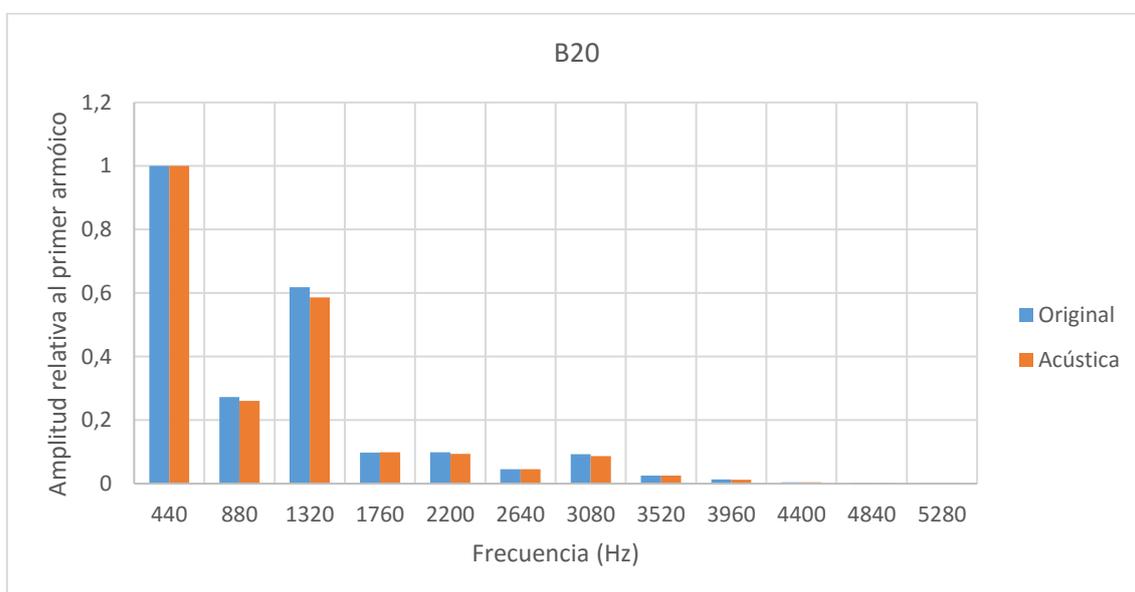
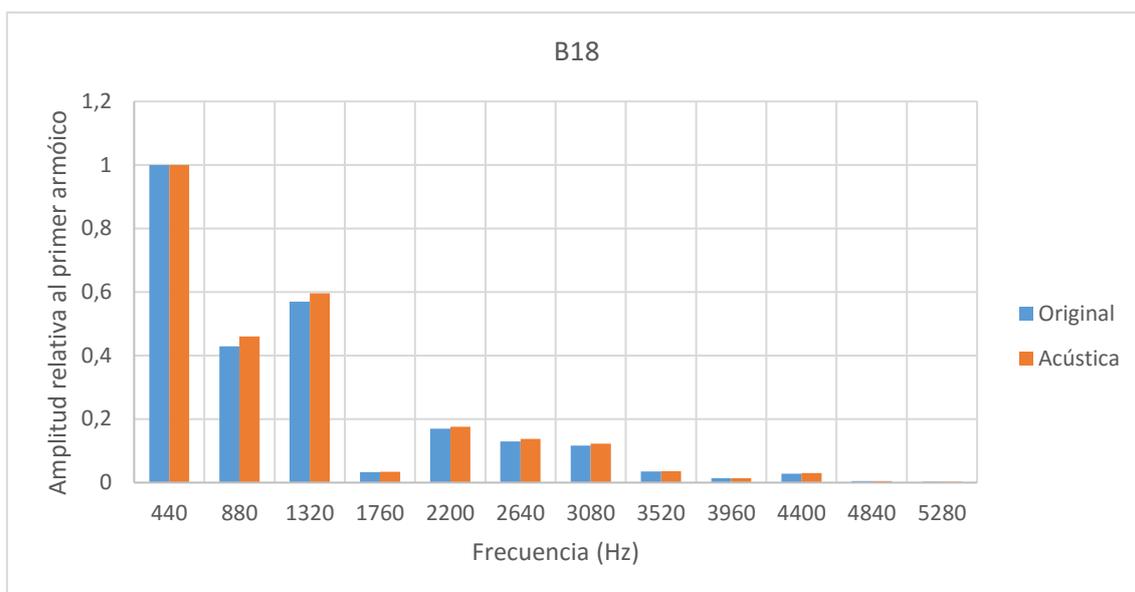


Gráfico 44. Distribución de armónicos para ambos métodos de grabación

5. CONCLUSIONES

Tras la realización de todas las variaciones y sus experimentos correspondientes, así como su posterior análisis y valoración de los resultados, se extraen las siguientes conclusiones:

- En referencia al análisis modal de la caña, se ha podido comprobar cómo, al aumentar la dureza de ésta, aumenta su frecuencia fundamental, mientras que al aumentar la longitud de abertura, disminuye la frecuencia, siguiendo así un comportamiento similar a la de una viga empotrada. Esto explica por qué cañas de mayor dureza funcionan mejor con notas más agudas, mientras que boquillas con mayor longitud de abertura tienen mayor facilidad de emisión con notas graves.
- El análisis frecuencial a boquillas comerciales permite reconocer cuales son los parámetros geométricos que más van a influir en el timbre. Así, se agruparon de modo que el “dibujo” que realiza la distribución de armónicos fuera similar. De este modo, se pudo comprobar que el factor más importante para definir el tipo de timbre o su “dibujo armónico” es la forma de la cámara o, más concretamente, de su techo. Así, una cámara cóncava proporciona un timbre más apropiado para el clásico, con armónicos que refuerzan la redondez del sonido, mientras que una cámara convexa es más apropiada para música moderna, siendo sus armónicos predominantes los que aportan brillantez.
- Gracias a la parte central del proyecto, la variación de magnitudes individualmente, se ha conseguido valorar los factores más determinantes:
 - Se ha podido comprobar como la influencia del techo de la cámara es crucial en el sonido, variando desde un timbre “oscuro” (cámara cóncava) a un timbre “brillante” (cámara convexa).
 - Una magnitud muy importante, y quizás la única que ha permitido realizar un análisis de proporcionalidad en su distribución de armónicos, es la abertura. Esto hace pensar que debido a ello, es la magnitud que siempre proporcionan los fabricantes.
 - Otra magnitud que ha sido muy significativa es la anchura de la garganta, aunque en este caso debido a la afinación, explicando así la relación entre volumen (mayor anchura, mayor área de garganta) y afinación, siguiendo una correspondencia inversamente proporcional.

- Además, la utilización de nuevas tecnologías de fabricación por adición, han permitido la fabricación de numerosas boquillas, en varios materiales. Esto ha permitido que el análisis frecuencial con variación del material, haya podido demostrar que el material utilizado no influye en la distribución de armónicos.
- En definitiva, el estudio ha permitido afirmar que hay varias magnitudes que presentan una relación proporcional entre su variación y la de los armónicos, mientras que otras dimensiones geométricas que su variación no sigue una relación en la distribución de armónicos.
- Por ello, se puede afirmar que conseguir un sonido concreto mediante una geometría determinada es prácticamente imposible, si bien se puede aproximar mucho mediante la utilización de las magnitudes que se han señalado como fundamentales anteriormente: forma del techo de la cámara, abertura y anchura de la garganta, que definen tipo de timbre, amplitud relativa de los armónicos fundamentales y relación afinación – volumen, respectivamente.
- Finalmente, se pudo comprobar que la simulación mediante elementos finitos del flujo del aire en el interior de la boquilla no arrojaba resultados relacionables con la variación en la distribución de los armónicos del sonido. Por tanto, este objetivo, planteado como principal en el inicio del estudio, se hubo de descartar, pues no se logró un resultado concreto. Las simulaciones realizadas se encuentran resumidas en el apartado *ANEXOS*.

6. LÍNEAS FUTURAS

Este proyecto sólo alcanza una pequeña parte del estudio acústico de los instrumentos musicales. Gracias a los medios actuales, se podría avanzar en los siguientes aspectos:

- Debido a la enorme cantidad de instrumentos musicales distintos, se podría realizar el mismo estudio en otros útiles musicales, tales como boquillas de viento metal, cuerdas de instrumentos de cuerda, parches de instrumentos de percusión, etc.
- La experiencia adquirida en nuevas técnicas de fabricación ha permitido ver que son viables en el ámbito musical considerado, pudiéndose así centrar un estudio en su utilización con el fin de reducir costes y mejorar tiempo, haciendo así más accesible este tipo de material al músico.
- Dentro de las oportunidades que ofrecen las tecnologías de fabricación por adición, la posibilidad de ofrecer productos que, mediante las técnicas tradicionales, suponen al músico un coste mucho mayor, permitiría abrir una línea de negocio relacionada con la oferta de productos musicales “low cost”, de una calidad similar y a un precio mucho menor.

7. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

7.1. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

La planificación temporal del proyecto se recoge en el diagrama de Gantt, y está asociada a su correspondiente EDP (estructura de descomposición del proyecto). Así, dicha planificación la vamos a dividir en las siguientes etapas fundamentales:

- Búsqueda de información necesaria para el proyecto. Puesto que es un tema innovador y con apenas antecedentes, esta etapa se desarrolló en menos tiempo del esperado.
- Diseño gráfico por ordenador de las boquillas. Esta fase tomó mucho tiempo, pues también incluye la fabricación y corrección de fallos en dichas boquillas.
- Grabación de resultados. Incluye todo el proceso de grabación del audio de todas las boquillas.
- Análisis por ordenador de los resultados obtenidos. Así, se obtiene la representación en el dominio de la frecuencia mediante la Transformada Discreta de Fourier, a través de MATLAB, y se realiza el análisis armónico.
- Redacción del proyecto.

La planificación, realizada esquemáticamente con Microsoft Project, queda como se ve a continuación:

	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
	Búsqueda de información	21 días	mié 14/10/15	vie 20/11/15	
	Introducción a la acústica	7 días	mié 14/10/15	mar 27/10/15	
	Análisis de frecuencia	7 días	mar 27/10/15	lun 09/11/15	2
	Estudios previos en el saxofón	7 días	lun 09/11/15	vie 20/11/15	3
	Diseño gráfico de las boquillas	83 días	mié 14/10/15	mié 16/03/16	
	Estimación de parámetros necesarios	2 días	mié 14/10/15	vie 16/10/15	
	Diseño de boquillas de fabricante	45 días	vie 16/10/15	vie 08/01/16	6
	Fabricación en impresora 3D FAB	3 días	vie 08/01/16	jue 14/01/16	7
	Búsqueda de errores	2 días	jue 14/01/16	mar 19/01/16	8
	Rediseño de boquillas de fabricante	2 días	mar 19/01/16	jue 21/01/16	9
	Diseño de boquillas con variaciones	10 días	vie 22/01/16	mié 10/02/16	10
	Fabricación en impresora 3D VAR prototipo	3 días	mié 10/02/16	mar 16/02/16	11
	Búsqueda de errores	1 día	mar 16/02/16	mié 17/02/16	12
	Fabricación final en impresora 3D VAR	15 días	mié 17/02/16	mié 16/03/16	13
	Grabación de resultados	4 días	mié 16/03/16	mié 23/03/16	
	Grabación con caña blanda	4 días	mié 16/03/16	mié 23/03/16	14
	Grabación con caña dura	4 días	mié 16/03/16	mié 23/03/16	14
	Análisis por ordenador	40 días	jue 24/03/16	mar 07/06/16	
	Diseño de los documentos EXCEL para el análisis	15 días	jue 24/03/16	mié 20/04/16	17
	Diseño del código de MATLAB para el procesado de datos	15 días	jue 21/04/16	mié 18/05/16	19
	Análisis de los audios obtenidos	5 días	jue 19/05/16	vie 27/05/16	20
	Introducción de los datos obtenidos en EXCEL	5 días	vie 27/05/16	mar 07/06/16	21
	Redacción del proyecto	45 días	mar 07/06/16	mar 30/08/16	
	Redacción del proyecto	45 días	mar 07/06/16	mar 30/08/16	22

Tabla 60. Distribución de acciones en la planificación

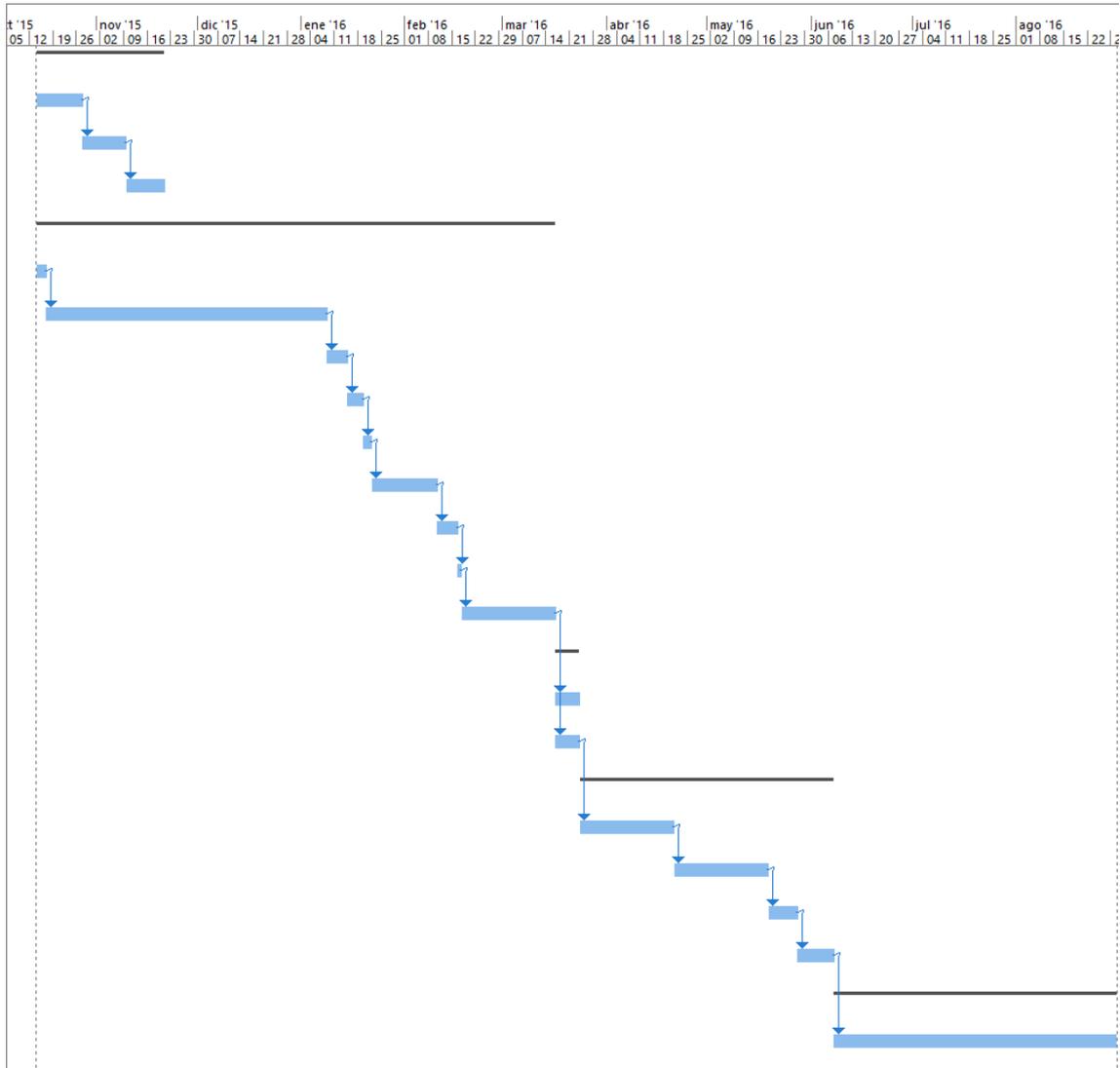


Figura 48. Diagrama de Gantt de la planificación

Como se puede observar en la representación gráfica del diagrama de Gantt, el proyecto está compuesto por multitud de pequeñas tareas, muy excluyentes todas ellas, ya que no es posible en su gran mayoría poder empezar la siguiente tarea sin haber finalizado las anteriores.

7.2. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Para la estimación del presupuesto se ha tenido en cuenta los siguientes conceptos:

- Coste total del alumno, estimado como un ingeniero industrial junior, cuyo coste horario es 15 €/h.
- Coste total del director del proyecto, siendo su coste horario de 40 €/h.
- Costes en la fabricación de las boquillas, cuyo coste horario se detallará en adelante.
- Costes varios que incluyen reprografía, transporte, etc.

7.2.1. COSTES DE FABRICACIÓN DE LAS BOQUILLAS

Para calcular el coste horario de la fabricación de cada boquilla, se van a tener en cuenta los siguientes parámetros fundamentales:

- Amortización de la máquina de fabricación. Se tiene en cuenta el precio de la máquina, y una estimación de horas útiles de fabricación, obteniendo así la amortización horaria.
- Tiempo de fabricación de la boquilla. Al ser todas las boquillas del mismo tamaño y prácticamente de las mismas dimensiones, el tiempo de fabricación es muy similar, con lo que se ha tomado un tiempo estándar en función de la máquina.
- Coste del material utilizado.
- Coste de la energía utilizada.

Tomando en cuenta los valores anteriores, la fórmula del coste (C) queda:

$$C = m_p \cdot p_m \cdot K + \frac{p_{maq}}{t_{amort}} \cdot t_f + P \cdot p_e \cdot t_f$$

Siendo cada uno de los valores lo siguiente:

- m_p : masa de la pieza.
- p_m : precio del material.
- K : coeficiente de seguridad por pérdidas de material (rebabas, soportes, etc).
- $\frac{p_{maq}}{t_{amort}}$: amortización de la máquina (cociente precio y horas útiles).
- P : potencia de la máquina.
- p_e : precio de la electricidad.
- t_f : tiempo total de fabricación.

No se ha tenido en cuenta el coste del operario ya que al ser una producción tan automatizada, se incurriría en un coste despreciable.

Así, los costes de fabricación finales, según las técnicas de fabricación utilizadas, son los siguientes.

Máquina utilizada		Impresora 3D	Estereolitografía
Precio impresora	€ *	1073,553719	45454,54545
Precio material	€/kg *	14,00826446	164,4628099
Tiempo fabricación	horas	8,65	1,9
Volumen pieza	m ³	0,000019707	0,0000161300
Densidad material	kg/m ³	1260	1200
Masa pieza	kg	0,02483082	0,019356
Coste material	€	0,347836693	3,183342149
Sobrecoste coef. Seg.	€	0,417404032	3,820010579
Tiempo amortización	horas	8000	10000
Amortización	€/h	0,134194215	4,545454545
Gasto en amortizar	€	1,160779959	8,636363636
Potencia	kW	0,348	3,6
Energía gastada	kWh	3,0102	6,84
Precio kWh	€/kWh*	0,13	0,13
Gasto en luz	€	0,391326	0,8892
Coste de fabricación	€	1,969509991	13,34557421

Tabla 61. Coste de fabricación de las boquillas

7.2.2. PRESUPUESTO FINAL DEL PROYECTO

PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO					
Nº	Concepto	Ud.	Coste	Tiempo	Total
1	Ingeniero Junior	1	15 €/h	1158 h	17.370 €
2	Ingeniero Senior	1	40 €/h	100 h	4.000 €
3	Informática, transporte, reprografía	1	700 €	-	700 €
4	Boquillas fabricadas por Imp3D (pruebas)*	9	1,97 €/ud	-	17,73 €
5	Boquillas fabricadas por Imp3D (definitivas)*	16	1,97 €/ud	-	31,52 €
6	Boquillas fabricadas por Estereolitografía*	3	13,35 €/ud	-	40,05 €
TOTAL					22.159,29 €

Tabla 62. Presupuesto total

* Los precios señalados no incluyen el I.V.A.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cyril M. Harris y Allan G. Piersol. *Shock and Vibration Handbook*. Quinta edición. Año 2002. McGraw – Hill.
- [2] William F. Smith y Javad Hashemi. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Cuarta edición. Año 2006. McGraw – Hill.
- [3] Manuel Recuero López. *Ingeniería acústica*. Primera edición. Año 1999. Paraninfo.
- [4] Jesús Mariano Merino de la Fuente. *Las vibraciones de la música*. Primera edición. Año 2006. Editorial Club Universitario.
- [5] Jean-Pierre Dalmont, Joël Gilbert, Sébastien Ollivier. *Nonlinear characteristics of single-reed instruments: Quasistatic volume flow and reed opening measurements*. Año 2003. Journal of the Acoustical Society of America, Acoustical Society of America.
- [6] Andrey Ricardo da Silva. *Numerical Studies of Aeroacoustic Aspects of Wind Instruments*. Año 2008. McGill University. Montreal, Quebec, Canadá.
- [7] Jesús Alonso Moral. *Apuntes de Acústica de la Música*. Escuela de Luthería del Conservatorio de Bilbao “Juan Crisóstomo de Arriaga”.
- [8] Wikipedia [Internet]. 2016. *Sonido*. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Sonido>
- [9] Wikipedia [Internet]. 2016. *Envolvente acústico*. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Envolvente_acústico

- [10] Wikipedia [Internet]. 2016. *Transformada de Fourier*. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_de_Fourier
- [11] Wikipedia [Internet]. 2016. *Timbre*. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Timbre_\(acústica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Timbre_(acústica))
- [12] Wikipedia [Internet]. 2016. *Serie armónica*. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Serie_armónica_\(música\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Serie_armónica_(música))
- [13] María Quintanilla [Internet]. 2016. *Acústica Musical*. Disponible en: <http://cpms-acusticamusical.blogspot.com.es/>

9. ANEXOS

9.1. ESTUDIO CON CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo como así disminuye también el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala.

El método consiste en discretizar una región del espacio creando lo que se conoce por una malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño.

En este análisis, el volumen de control mencionado anteriormente es el interior de la boquilla (en verde en la imagen), cerrado por una supuesta caña, lo que crea un área de admisión de aire (inlet) y un área de expulsión (outlet).

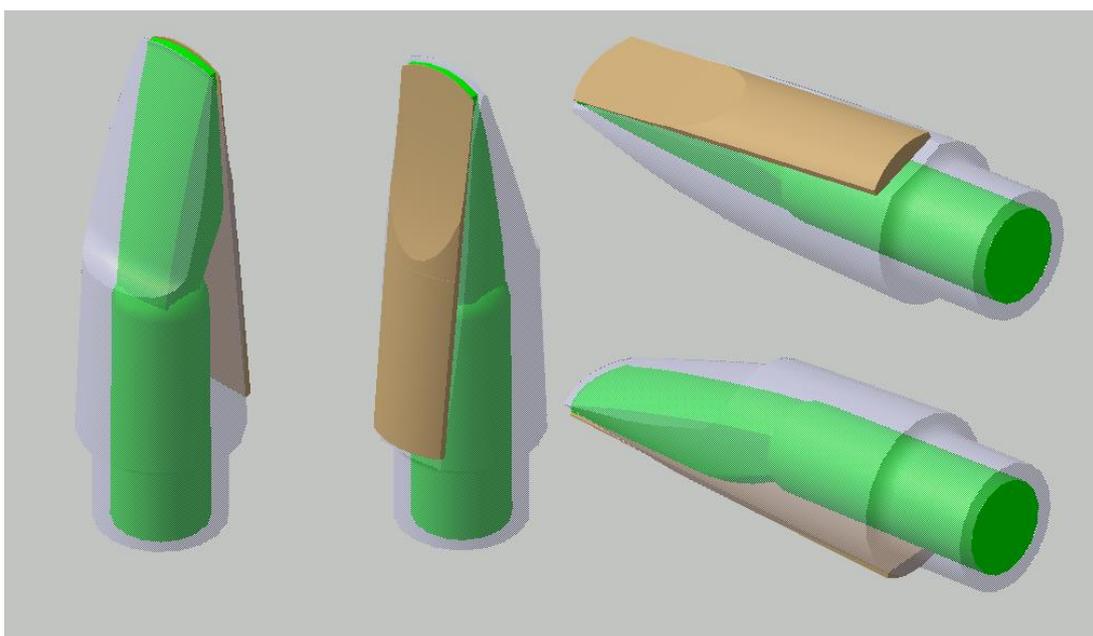


Figura 49. Conjunto boquilla caña. En verde, volumen interior a analizar

Para el análisis CFD se utiliza el programa ANSYS Fluent, al que previamente se le introduce la modelización discreta por elementos finitos, y las condiciones de contorno siguientes, así como propiedades del fluido y de la pared:

Inlet	Velocidad	10,55	m/s
	Presión	0	Pa
	Temperatura	300	K
Outlet	Presión	0	Pa
	Temperatura	300	K
Aire	Densidad	1,225	kg/m ³
	Calor específico	1006,43	J/kg·K
	Conductividad térmica	0,0242	W/m·K
	Viscosidad	1,79E-05	kg/m·s
Ebonita	Densidad	1090	kg/m ³
	Calor específico	2090	J/kg·K
	Conductividad térmica	0,29	W/m·K

Tabla 63. Variables de simulación

En los sucesivos análisis realizados, la única variable que varía es la velocidad, pues la presión y temperatura a lo largo del volumen de control no se modifican.

Este análisis fue concebido, en principio, como parte fundamental del proyecto pero, debido a que los datos obtenidos son poco concluyentes a la hora de relacionarlos con la producción de armónicos, se decidió dejar como análisis secundario. Sólo se va a presentar la velocidad media en cada una de las posiciones.

Los planos de análisis se observan en la siguiente imagen:

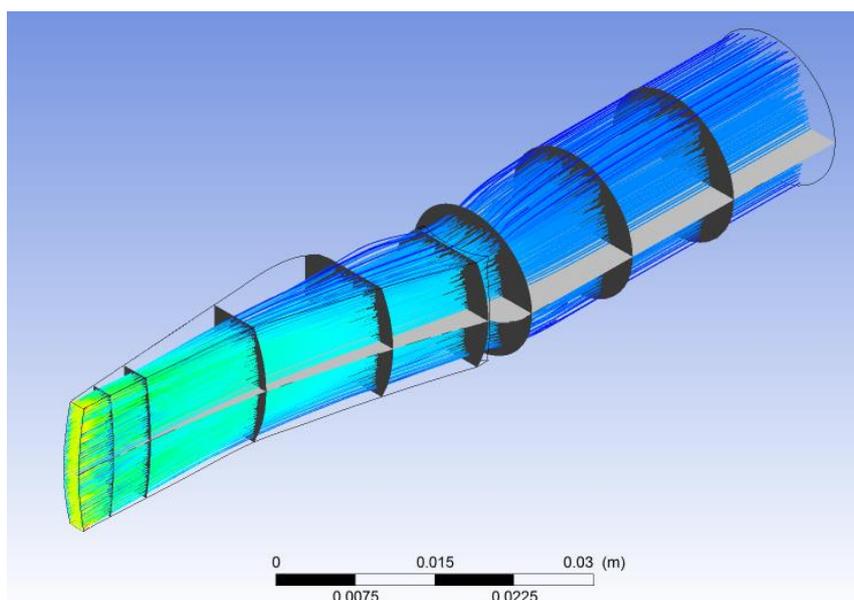


Figura 50. Flujo interno y planos de análisis

9.1.1. TIPO DE TECHO EN LA CÁMARA.

Sit	Cámara convexa		Cámara cóncava	
	Z	Vmed	Z	Vmed
Inlet	0,0000000	10,5500000000	0,0000000	10,5500000000
Plane 7	0,0050546	7,9897100000	0,0050546	6,4406100000
Plane 6	0,0095254	4,9224700000	0,0095254	3,4800500000
Plane 5	0,0229379	3,3623000000	0,0229379	2,1900700000
Plane 4	0,0364000	2,0099100000	0,0364000	1,6763700000
Planocam	0,0460000	1,2884300000	0,0460000	1,4720700000
Plane 3	0,0498000	1,4790800000	0,0498000	1,5092700000
Plane 2	0,0631751	1,3679800000	0,0631751	1,3570800000
Plane 1	0,0766000	1,3432000000	0,0766000	1,3007800000
Outlet	0,0900000	1,4163400000	0,0900000	1,3953800000

Tabla 64. Valores de velocidad en función de la posición

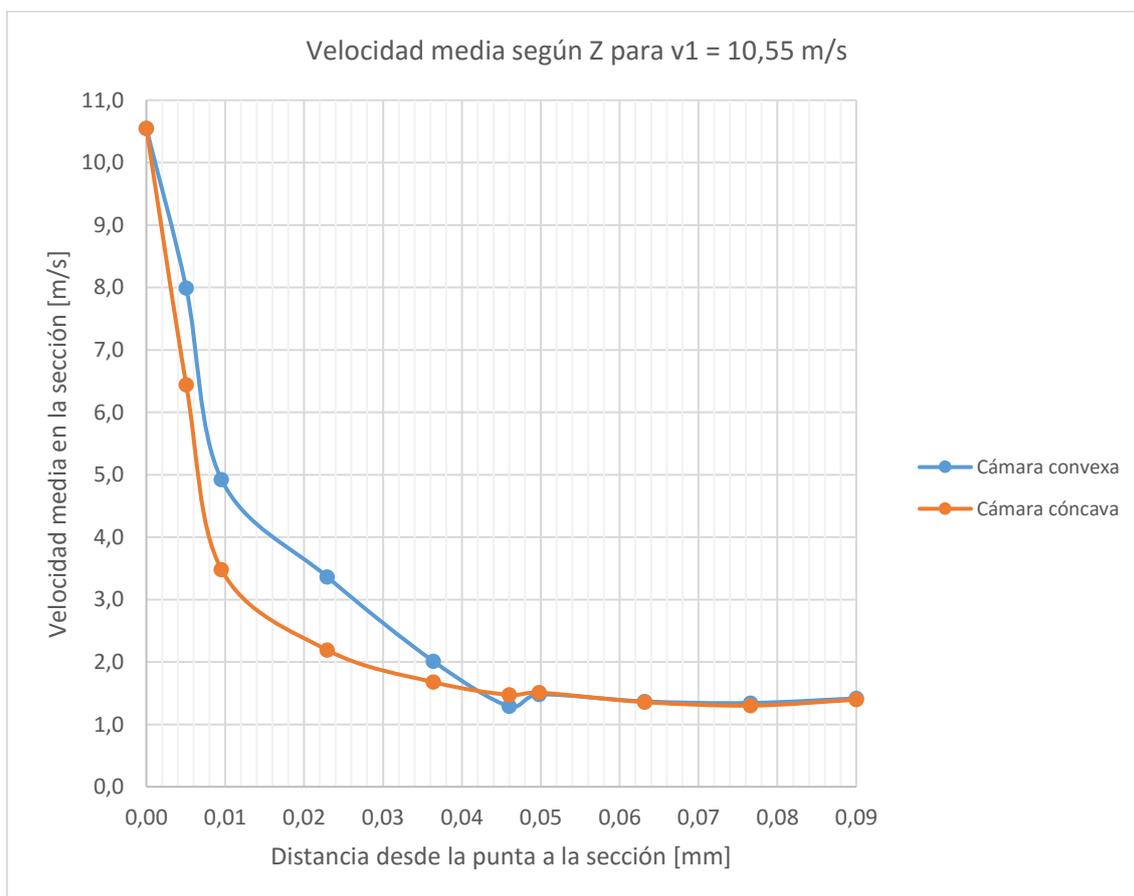


Gráfico 45. Velocidad en función de la posición

La velocidad para la cámara convexa es mayor en el primer tramo, pero en cuanto el flujo atraviesa la garganta, se igualan las velocidades, reduciéndose la velocidad en la cámara convexa, debido a una gran turbulencia.

9.1.2. COLOCACIÓN DE LA GARGANTA

Sit	Centrada		Baja		Muy baja	
	Z	Vmed	Z	Vmed	Z	Vmed
Inlet	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000
Plane 7	0,0050546	6,1360400	0,0050546	6,1045900	0,0050546	6,2846100
Plane 6	0,0095254	3,0670300	0,0095254	2,9649400	0,0095254	3,9598100
Plane 5	0,0229379	2,0327000	0,0229379	2,1815600	0,0229379	2,1366000
Plane 4	0,0364000	1,5008100	0,0364000	0,9720470	0,0364000	1,4736400
Planocam	0,0440000	1,3501800	0,0440000	1,1303300	0,0440000	1,2984100
Plane 3	0,0498000	1,2482300	0,0498000	1,2226800	0,0498000	1,2908600
Plane 2	0,0631751	1,2124600	0,0631751	1,1913300	0,0631751	1,2059600
Plane 1	0,0766000	1,1604900	0,0766000	1,1564900	0,0766000	1,1326800
Outlet	0,0900000	1,2519700	0,0900000	1,2399300	0,0900000	1,2378300

Tabla 65. Valores de velocidad en función de la posición

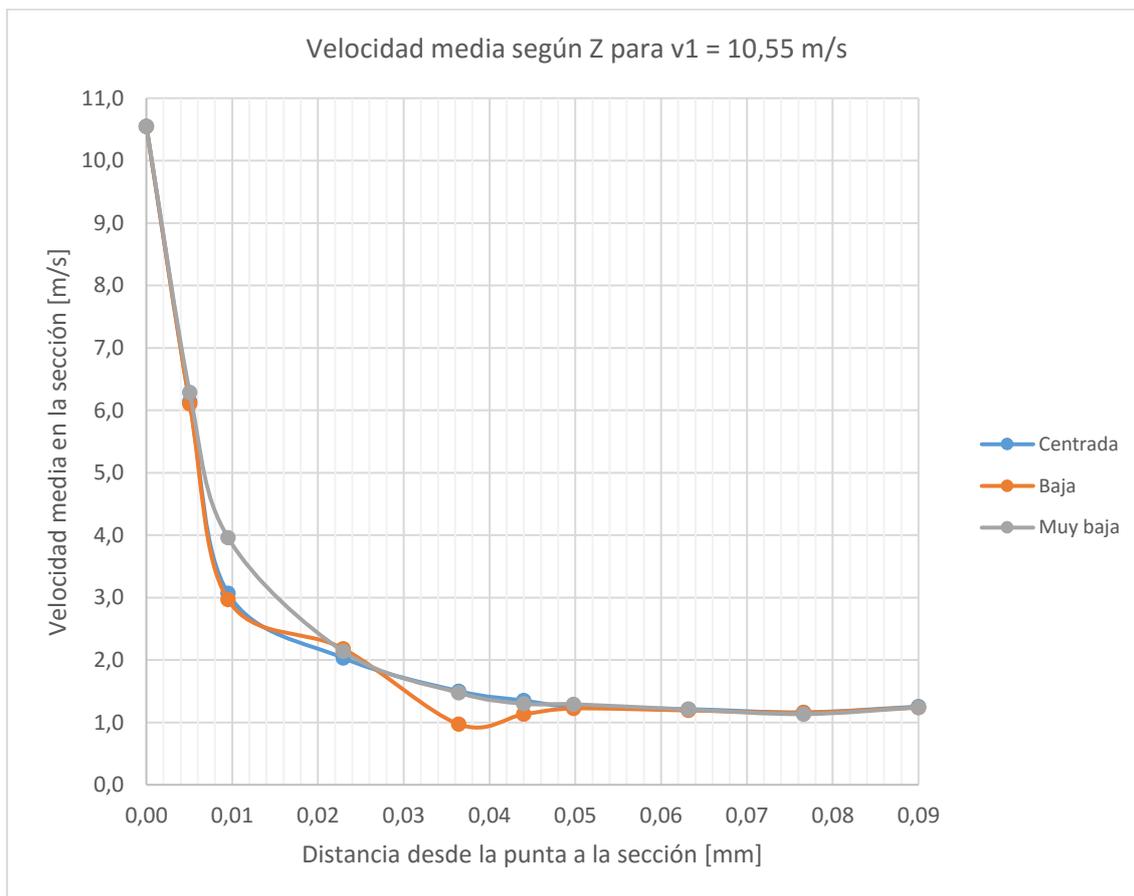


Gráfico 46. Velocidad en función de la posición

Si bien no se observa una clara diferencia, la evolución de la velocidad con la garganta muy baja implica cambios menos bruscos, ya que sigue la línea del flujo.

9.1.3. ABERTURA

Sit	Grande		Normal		Pequeña	
	Z	Vmed	Z	Vmed	Z	Vmed
Inlet	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000
Plane 7	0,0050546	6,1360400	0,0050546	5,7108600	0,0050546	5,6709700
Plane 6	0,0095254	3,0670300	0,0095254	2,7590700	0,0095254	3,3211300
Plane 5	0,0229379	2,0327000	0,0229379	1,9130600	0,0229379	1,7649200
Plane 4	0,0364000	1,5008100	0,0364000	1,3784200	0,0364000	1,2486400
Planocam	0,0440000	1,3501800	0,0440000	1,2582800	0,0440000	1,6169600
Plane 3	0,0498000	1,2482300	0,0498000	1,1366400	0,0498000	0,9819980
Plane 2	0,0631751	1,2124600	0,0631751	1,1040800	0,0631751	0,9633140
Plane 1	0,0766000	1,1604900	0,0766000	1,0618200	0,0766000	0,9186080
Outlet	0,0900000	1,2519700	0,0900000	1,1224900	0,0900000	0,9864740

Tabla 66. Valores de velocidad en función de la posición

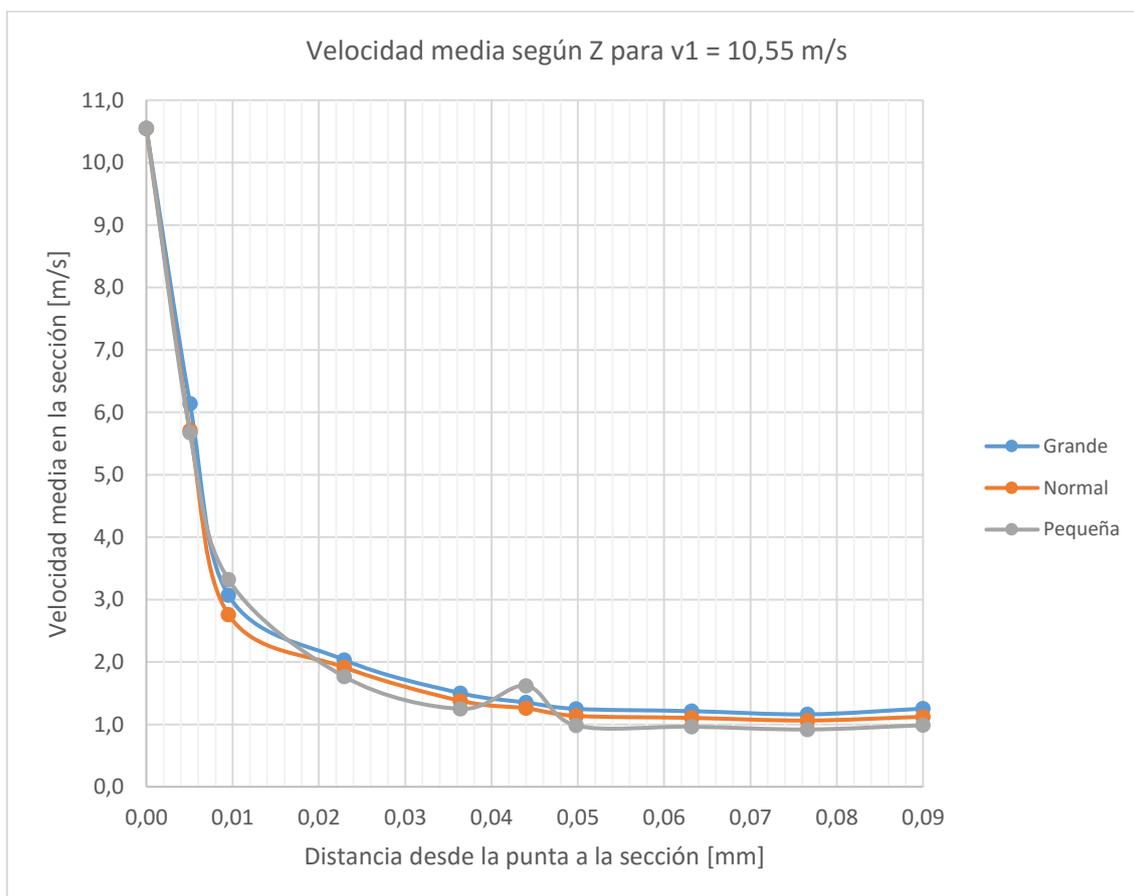


Gráfico 47. Velocidad en función de la posición

Como es de esperar, la velocidad es mayor a mayor abertura (ya que también será mayor el caudal). Sin embargo, las diferencias no son muy notables.

9.1.4. ANCHURA DE LA CÁMARA

Sit	Grande		Normal		Pequeña	
	Z	Vmed	Z	Vmed	Z	Vmed
Inlet	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000
Plane 7	0,0050546	6,1360400	0,0050546	6,1252000	0,0050546	6,0759000
Plane 6	0,0095254	3,0670300	0,0095254	3,0560800	0,0095254	3,0695100
Plane 5	0,0229379	2,0327000	0,0229379	2,0353800	0,0229379	2,0613100
Plane 4	0,0364000	1,5008100	0,0364000	1,4901600	0,0364000	1,3396500
Planocam	0,0440000	1,3501800	0,0440000	1,2682400	0,0440000	1,4607400
Plane 3	0,0498000	1,2482300	0,0498000	1,2669800	0,0498000	1,2597900
Plane 2	0,0631751	1,2124600	0,0631751	1,2527300	0,0631751	1,1942300
Plane 1	0,0766000	1,1604900	0,0766000	1,2123800	0,0766000	1,1591600
Outlet	0,0900000	1,2519700	0,0900000	1,2930100	0,0900000	1,2373800

Tabla 67. Valores de velocidad en función de la posición

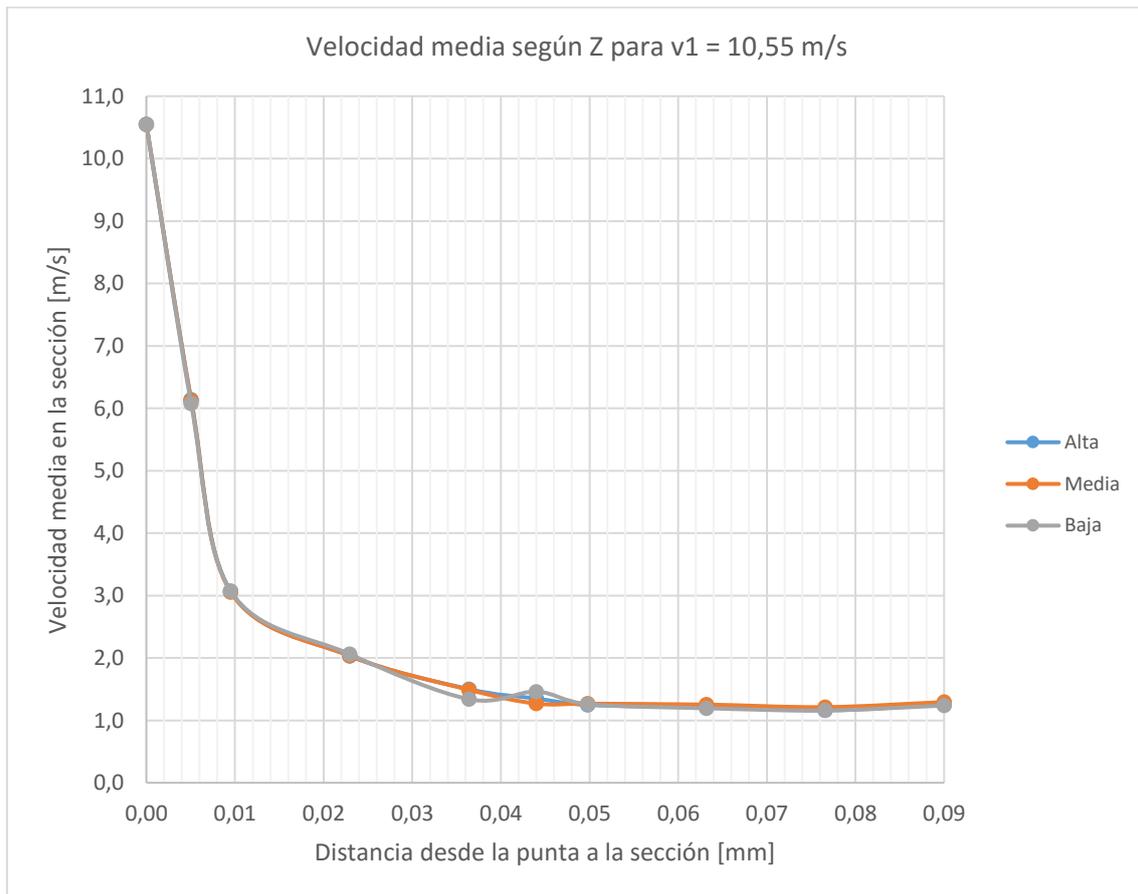


Gráfico 48. Velocidad en función de la posición

No existen diferencias notables, si bien la velocidad crece con la anchura según se acerca a la garganta.

9.1.5. LONGITUD DE LA CÁMARA

Sit	Baja		Media		Alta	
	Z	Vmed	Z	Vmed	Z	Vmed
Inlet	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000
Plane 7	0,0050546	6,5273000	0,0050546	6,1360400	0,0050546	6,1551500
Plane 6	0,0095254	4,3629600	0,0095254	3,0670300	0,0095254	3,1020900
Plane 5	0,0229379	2,3727800	0,0229379	2,0327000	0,0229379	1,8675700
Plane 4	0,0364000	1,7335000	0,0364000	1,5008100	0,0364000	1,2314800
Planocam	0,0420000	1,6128500	0,0440000	1,3501800	0,0460000	1,4719300
Plane 3	0,0498000	1,1417100	0,0498000	1,2482300	0,0498000	0,9160530
Plane 2	0,0631751	1,1567700	0,0631751	1,2124600	0,0631751	1,2020900
Plane 1	0,0766000	1,0914100	0,0766000	1,1604900	0,0766000	1,1543200
Outlet	0,0900000	1,1733600	0,0900000	1,2519700	0,0900000	1,1970200

Tabla 68. Valores de velocidad en función de la posición

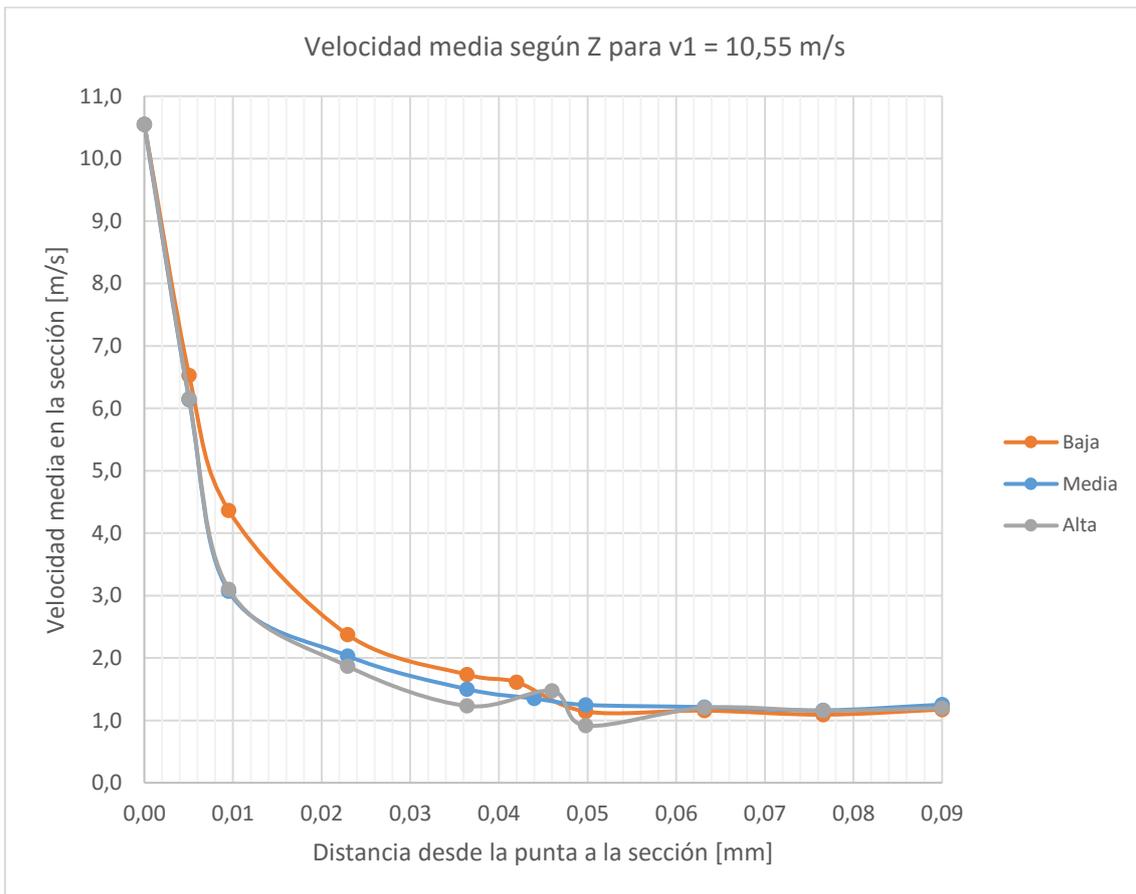


Gráfico 49. Velocidad en función de la posición

En este caso se observan diferencias de velocidad antes de la garganta, estabilizándose posteriormente.

9.1.6. POSICIÓN DE LA TABLA

Sit	Ángulo alto		Ángulo medio		Ángulo bajo	
	Z	Vmed	Z	Vmed	Z	Vmed
Inlet	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000
Plane 7	0,0050546	6,1360400	0,0050546	6,5411600	0,0050546	6,4980600
Plane 6	0,0095254	3,0670300	0,0095254	3,8361900	0,0095254	3,6293500
Plane 5	0,0229379	2,0327000	0,0229379	2,1107600	0,0229379	2,1034900
Plane 4	0,0364000	1,5008100	0,0364000	1,6093000	0,0364000	1,5676900
Planocam	0,0440000	1,3501800	0,0440000	1,5524200	0,0440000	1,4995600
Plane 3	0,0498000	1,2482300	0,0498000	1,3092900	0,0498000	1,3170000
Plane 2	0,0631751	1,2124600	0,0631751	1,2526700	0,0631751	1,2682100
Plane 1	0,0766000	1,1604900	0,0766000	1,2201800	0,0766000	1,2271000
Outlet	0,0900000	1,2519700	0,0900000	1,3061700	0,0900000	1,3085200

Tabla 69. Valores de velocidad en función de la posición

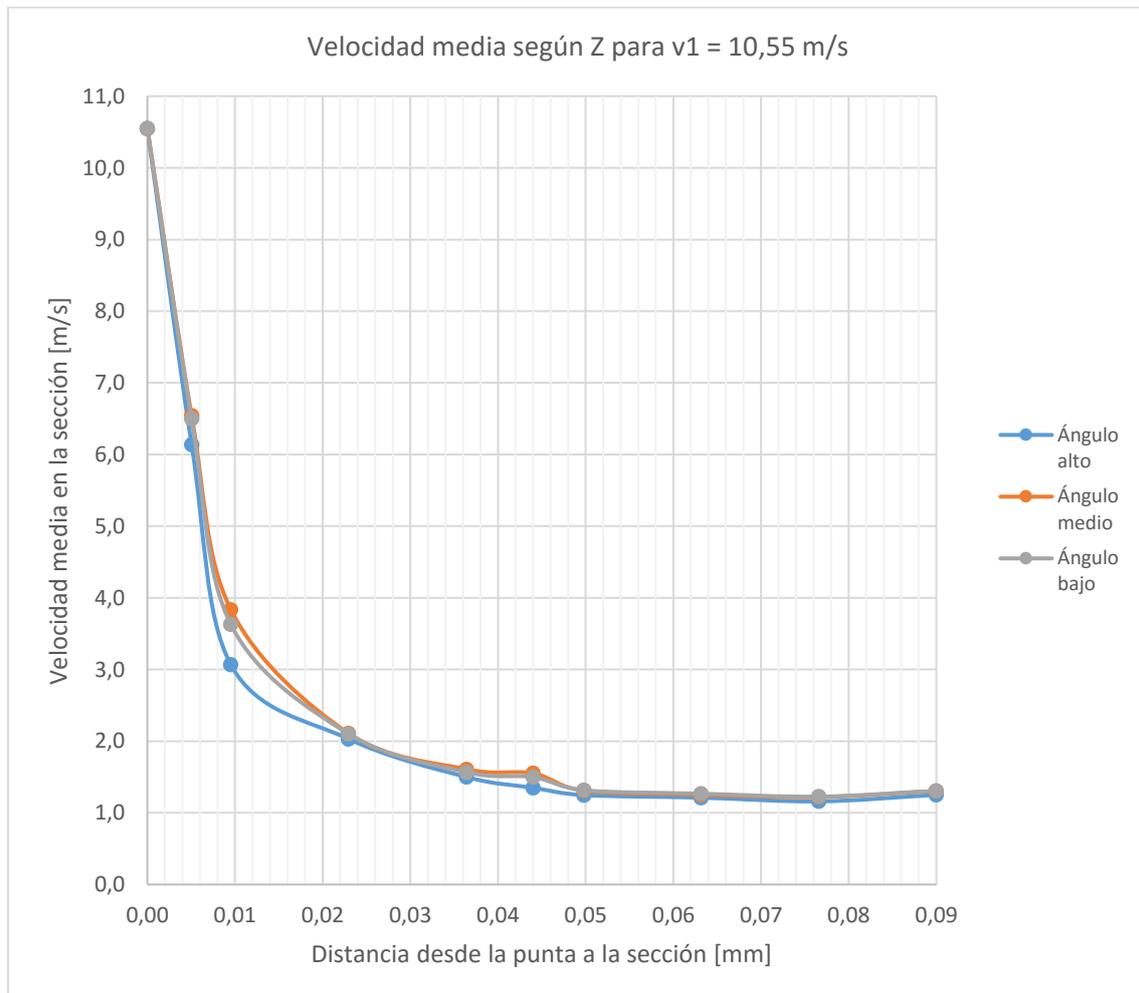


Gráfico 50. Velocidad en función de la posición

En este caso no hay una relación concreta entre las variables.

9.1.7. TIPO DE GARGANTA

Sit	Cámara tradicional		Cámara cuadrada	
	Z	Vmed	Z	Vmed
Inlet	0,0000000	10,5500000	0,0000000	10,5500000
Plane 7	0,0050546	6,1360400	0,0050546	6,1485600
Plane 6	0,0095254	3,0670300	0,0095254	3,1108000
Plane 5	0,0229379	2,0327000	0,0229379	2,1608900
Plane 4	0,0364000	1,5008100	0,0364000	1,5235700
Planocam	0,0440000	1,3501800	0,0440000	1,3539300
Plane 3	0,0498000	1,2482300	0,0498000	1,2712800
Plane 2	0,0631751	1,2124600	0,0631751	1,2121500
Plane 1	0,0766000	1,1604900	0,0766000	1,1822400
Outlet	0,0900000	1,2519700	0,0900000	1,2576000

Tabla 70. Valores de velocidad en función de la posición

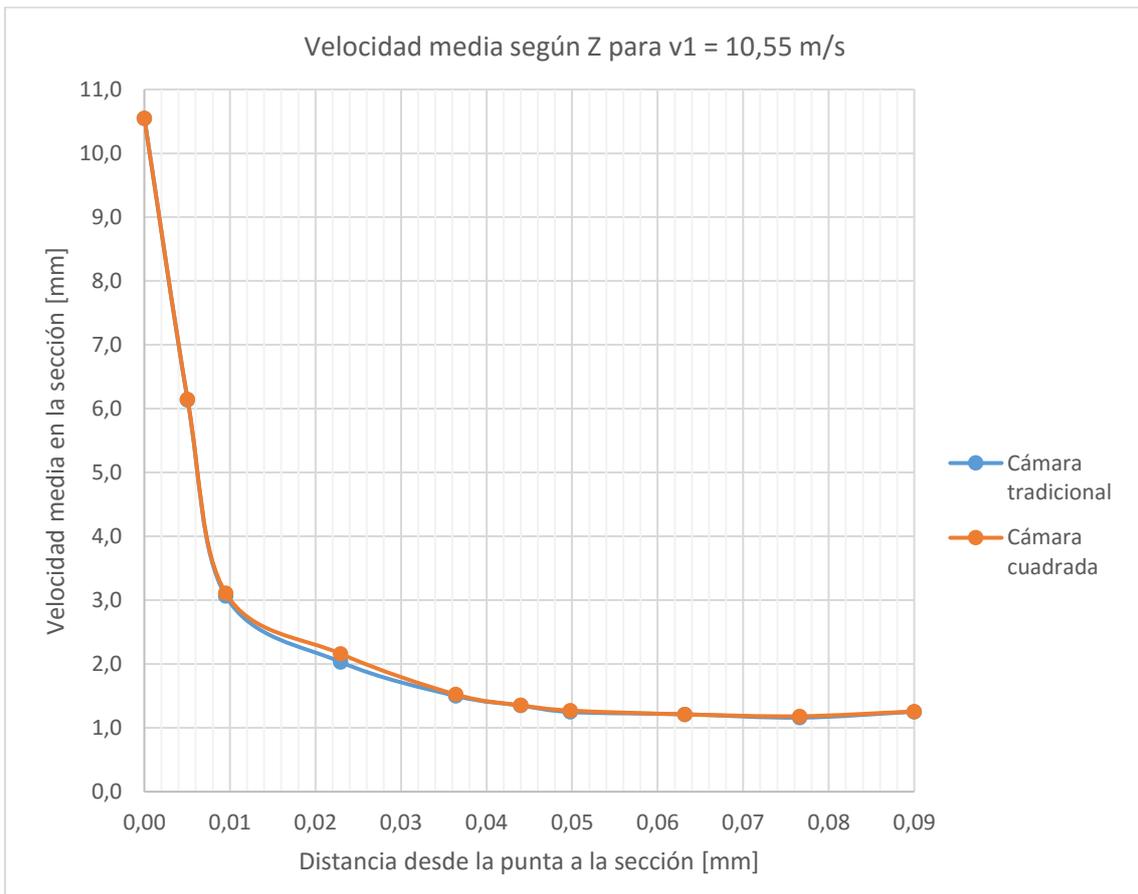


Gráfico 51. Velocidad en función de la posición

No hay apenas diferencias, con lo que el tipo de garganta no influye en las velocidades del flujo.

9.1.8. IMÁGENES DEL ESTUDIO CFD

A modo de documentar el estudio en CFD mediante ANSYS, se incorporan varias imágenes correspondientes a las simulaciones realizadas.

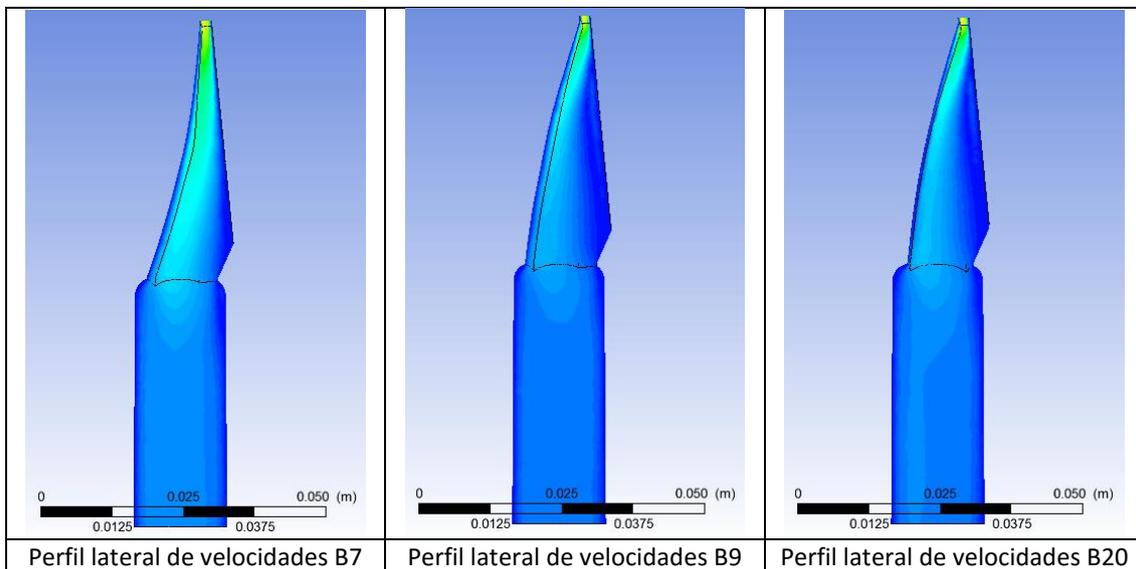


Figura 51. Perfiles de velocidades para varias boquillas

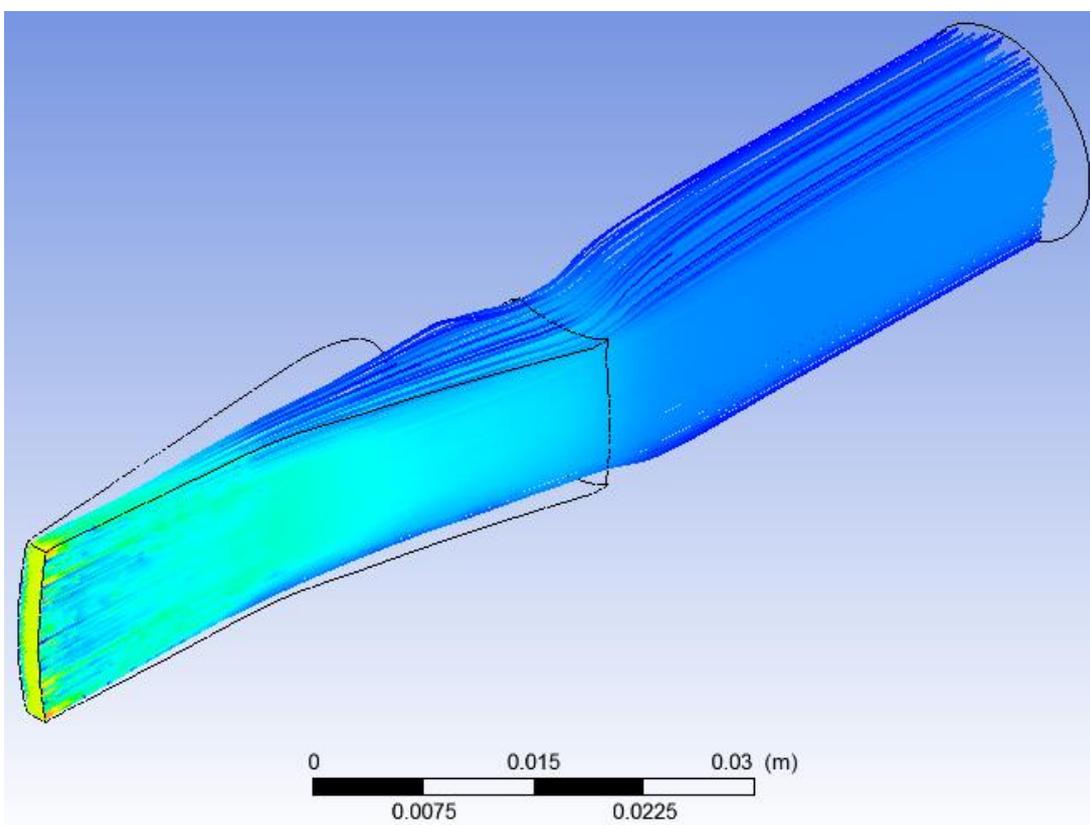


Figura 52. Flujo interno para B7

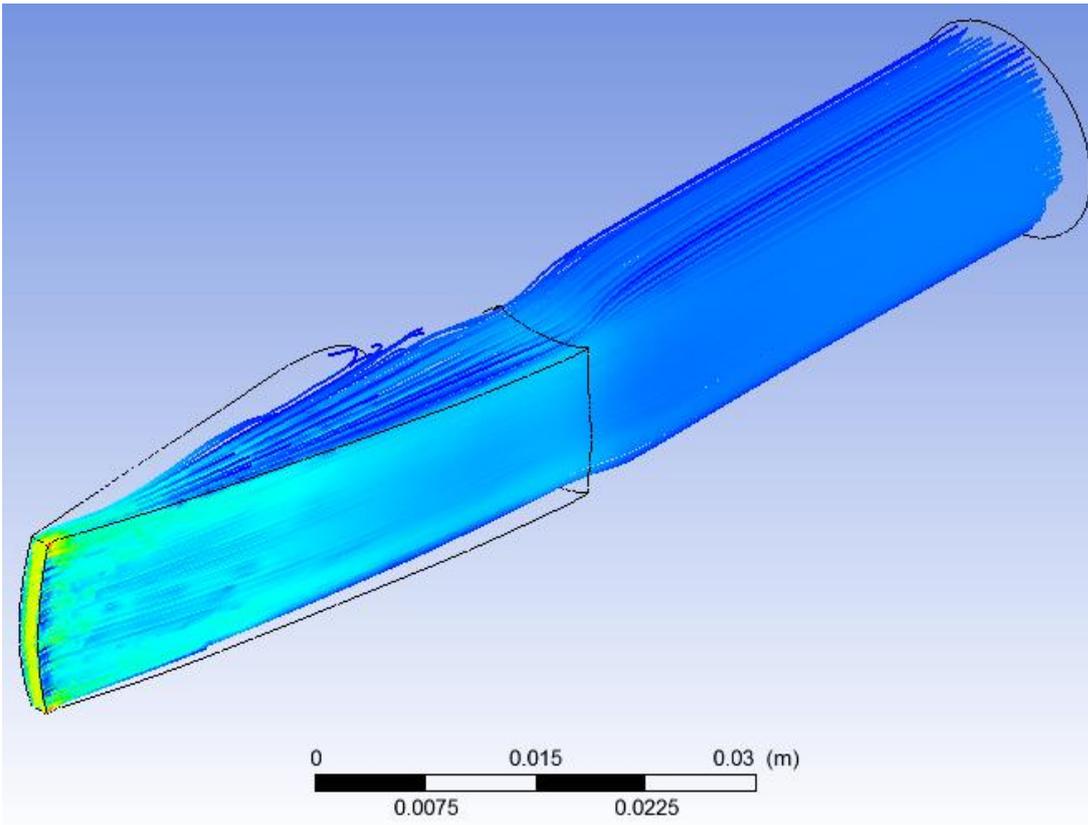


Figura 53. Flujo interno para B9

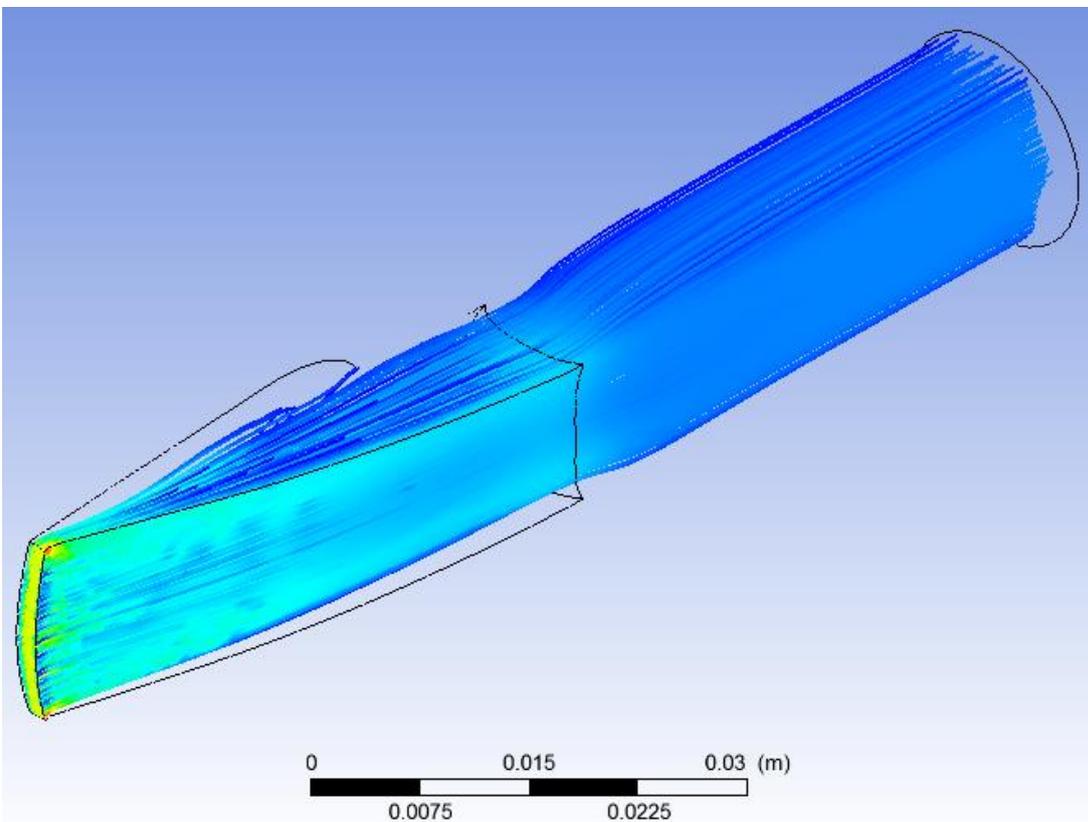


Figura 54. Flujo interno para B20

9.2. CÓDIGO DE MATLAB

```
[x fs1 N1 opts1]=wavread('archivo_de_audio.wav');

L1=length(x); % Tiempo de la señal
t1=L1/fs1; % Vector tiempo
T1=[0:2*t1/L1:t1]'; % Vector tiempo

nfft1=L1; % Número de puntos de la FFT
X=fft(x,nfft1)/L1; % FFT
f1=fs1/2*linspace(0,1,nfft1/2+1); % Vector frecuencia
M1=abs(X(1:nfft1/2+1)); % Parte absoluta de la FFT
F1=f1.'; % Transpuesto de frecuencias

% Representación gráfica

figure
plot(f1,M1,'linewidth',1.1);
grid on;
xlim([0 6000]);
title('Espectro armónico de la nota');
xlabel('Frecuencia en Hz');
ylabel('y(f)');

% Búsqueda de picos en las amplitudes (cada 1000 valores)

[pks1,locs1]=findpeaks(M1,'MinPeakDistance',1000);

% Distribución de los picos en vectores

picos1=[F1(locs1),pks1];
[a aa]=size(picos1);
vectorindices=[a];
mindim=min(vectorindices);
picos11=[picos1(1:mindim,1) picos1(1:mindim,2)];
picostot=[picos11];
[h hh]=size(M1);
vectorindicesm=[h];
mindimm=min(vectorindicesm);
mmm1=[F1(1:mindimm,1) M1(1:mindimm,1)];

% Grabado de los picos en vector

mmmtot=[mmm1];

% Grabado de datos en archivo excel

xlswrite('armonicos.xls', mmm1,1);
xlswrite('armonicos.xls', picostot,2);

display('fin')
```

9.3. RELACIÓN DE LAS BOQUILLAS UTILIZADAS EN CADA ESTUDIO SEGÚN SU DENOMINACIÓN.

BOQUILLAS UTILIZADAS EN CADA ESTUDIO SEGÚN SU NUMERACIÓN			
Estudio realizado	Boquillas utilizadas		
Tipo de cámara	Convexa	Cóncava	
	B7	B8	
Colocación de garganta	Centrada	Baja	Muy baja
	B9	B10	B11
Abertura	Grande	Normal	Pequeña
	B9	B12	B13
Ancho de garganta	Alto	Medio	Bajo
	B14	B9	B15
Longitud de la cámara	Baja	Media	Alta
	B16	B9	B17
Posición de la tabla	Alto	Medio	Bajo
	B9	B19	B18
Tipo de garganta	Tradicional	Cuadrada	Jazz
	B9	B20	B21
Colocación de garganta (convexa)	Tipo 1	Tipo 2	
	B21	B22	

Tabla 71. Boquillas numeradas utilizadas en cada experimento

9.4. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS BOQUILLAS FABRICADAS

TIPO	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19	B20	B21	B22
rad_tud (mm)	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200	8,200
rad_ext_tud (mm)	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090	11,090
cir2_con (mm)	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875	12,875
cir1_con (mm)	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000
long_cono (mm)	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300	29,300
prof_tal_tud (mm)	44,000	44,000	46,000	46,000	46,000	46,000	46,000	46,000	46,000	48,000	44,000	46,000	46,000	46,000	46,000	46,000
lar_tot (mm)	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000	90,000
mitad_ancho_punta (mm)	8,800	8,800	8,800	8,800	8,800	8,800	8,800	8,800	8,800	8,800	8,800	9,200	9,200	8,800	8,800	8,800
largo_antes (mm)	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700
ini_curva_bonito (mm)	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400	10,400
P1tabla (mm)	26,450	26,450	26,450	26,450	26,450	26,450	26,450	26,450	26,450	26,450	26,450	26,450	26,000	26,450	26,450	26,450
P2tabla (mm)	22,450	22,450	22,450	22,450	22,450	22,450	22,450	22,450	22,450	22,450	22,450	23,000	22,450	22,450	22,450	22,450
alto_cam_tot (mm)	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	12,552	11,500	12,000	12,000
alto_cam_lat (mm)	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	7,745	9,800	9,400	9,400
ancho_cam (mm)	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100	6,100	6,500	5,600	6,100	6,100	6,100	6,100	5,700	5,900	5,900
a_cam (mm)	6,625	6,625	6,625	7,281	7,937	6,625	6,625	6,625	6,625	6,625	6,625	6,625	6,625	6,200	7,000	7,800
b_cam (mm)	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	3,288	1,200	2,500	2,500
grosor_punta (mm)	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700
ang_apoyo (deg)	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750	24,750
ini_perf_dient (mm)	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000	52,000
ang_salida_inf (deg)	24,000	24,000	24,000	19,000	12,000	24,000	24,000	24,000	24,000	33,000	20,000	24,000	24,000	24,000	22,000	16,000
abertura (mm)	2,200	2,200	2,000	2,000	2,000	1,850	1,700	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
long_aber (mm)	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
ang_correc_lat (deg)	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,200	1,000	1,700	1,200	1,200	1,600	1,600	1,800	1,400	1,400
angulo_taladro (deg)	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350
angulo_baffle (deg)	5,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	18,000	5,000	5,000
angulo_entrada_cam (deg)	110,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	95,000	100,000	100,000

Tabla 72. Características de cada boquilla

9.5. VARIACIÓN EN LA ESTRUCTURA ARMÓNICA CON EL REGISTRO DEL INSTRUMENTO

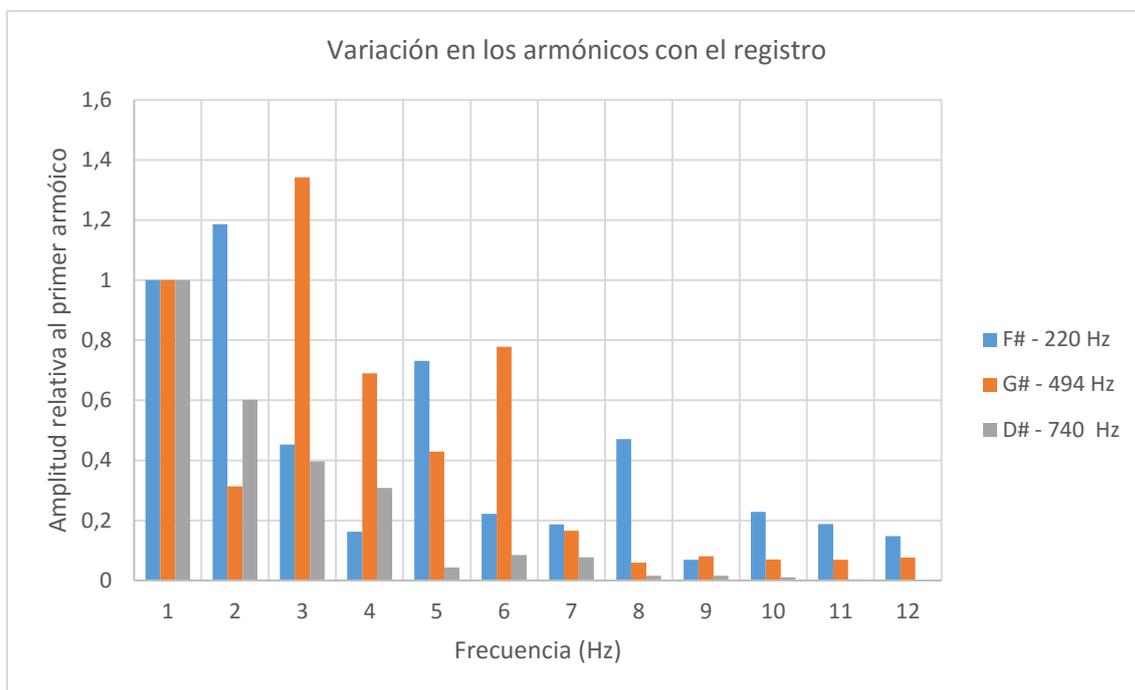


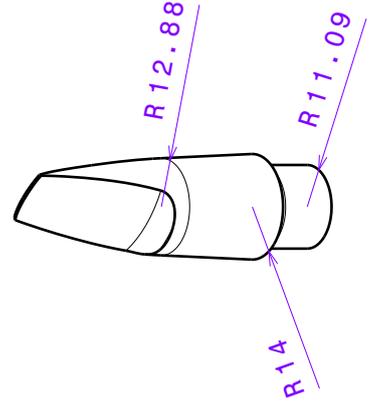
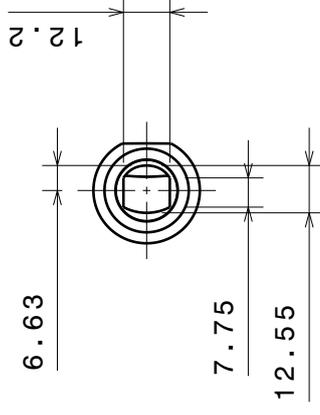
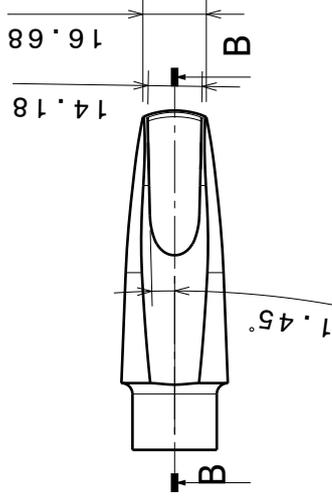
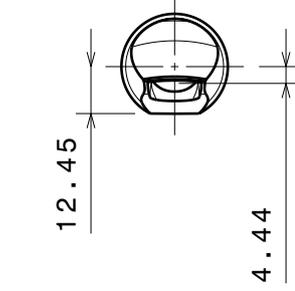
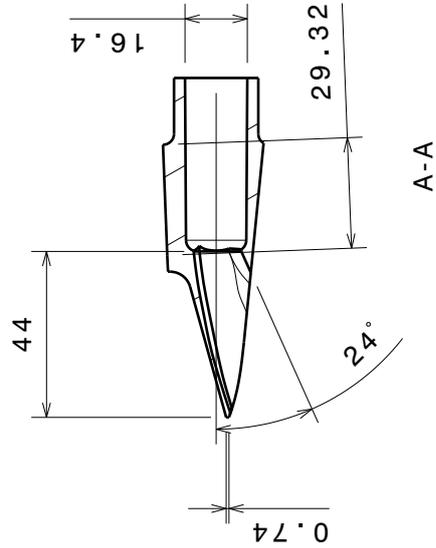
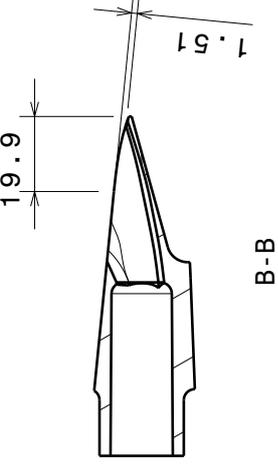
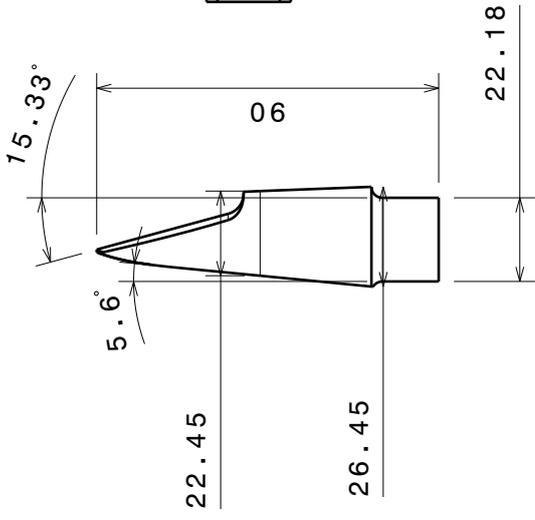
Gráfico 52. Distribución de armónicos para varias notas de distintos registros

En la gráfica se observa que la distribución armónica en las notas del saxofón no es regular a lo largo de todo el registro. Así, en el registro más grave (menor frecuencia), hay una mayor cantidad de armónicos superiores, con lo que la nota es más brillante, reduciéndose la presencia de éstos conforme aumenta la frecuencia.

En el registro medio, los primeros armónicos son más notables que en el resto de registros, con lo que su sonido es más redondo.

Esta cualidad es la que se ha elegido para proponer la nota de estudio en esta zona del registro.

9.6. PLANOS



DESIGNED BY: Guillermo Azuara		I	
DATE: 28/06/2016		H	
CHECKED BY: Guillermo Azuara		G	
DATE: 05/09/2016		F	
SIZE A4		E	
SCALE 1:2		D	
WEIGHT (kg) 0,02		C	
Comments Boquilla de referencia		B	
Dassault Systèmes		A	
SHEET 1/1			

Boquilla B9

Boquilla de referencia

Dassault Systèmes

1/1

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

10. ÍNDICE DE ELEMENTOS

10.1. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Frecuencias de las notas centrales del piano	8
Tabla 2. Transposición de notas en los saxofones	15
Tabla 3: Frecuencias para los saxofones afinados en Sib	17
Tabla 4: Frecuencias para los saxofones afinados en Mib	18
Tabla 5. Tipos de cañas y grosor correspondiente	34
Tabla 6. Magnitudes utilizadas en el análisis modal	38
Tabla 7. Resultados numéricos para las tres longitudes de abertura	41
Tabla 8. Características de las boquillas comerciales.....	48
Tabla 9. Características del timbre en función de la predominancia de los distintos armónicos	49
Tabla 10. Valores límite para el análisis	50
Tabla 11. Valores obtenidos en boquillas de clásico con caña nº3.....	51
Tabla 12. Valores obtenidos en boquillas de clásico con caña nº3.5.....	52
Tabla 13. Valores obtenidos en boquillas de clásico con caña nº3.....	54
Tabla 14. Valores obtenidos en boquillas de clásico con caña nº3.5.....	55
Tabla 15. Valores obtenidos en boquillas de jazz con caña nº3.....	57
Tabla 16. Valores obtenidos en boquillas de jazz con caña nº3.5	58
Tabla 17. Valores de las magnitudes utilizadas en la boquilla de referencia B9	60
Tabla 18. Valores obtenidos en la boquilla de referencia.....	63
Tabla 19. Valores de los ángulos utilizados	64
Tabla 20. Valores obtenidos en la variación del techo de la cámara y caña nº3	66
Tabla 21. Valores obtenidos en la variación del techo de la cámara y caña nº3.5.....	67
Tabla 22. Valores utilizados para la colocación de la garganta.....	69
Tabla 23. Valores obtenidos en la variación de la colocación de la garganta y caña nº3	71
Tabla 24. Valores obtenidos en la variación de la colocación de la garganta y caña nº3.5	72
Tabla 25. Valores utilizados para la abertura	74
Tabla 26. Valores obtenidos en la variación de la abertura y caña nº3.....	76
Tabla 27. Variación de la amplitud de los armónicos con la abertura y caña nº3	76
Tabla 28. Valores obtenidos en la variación de la abertura y caña nº3.5.....	79
Tabla 29. Variación de la amplitud de los armónicos con la abertura y caña nº3.5	79
Tabla 30. Valores utilizados para el ancho de la garganta	81
Tabla 31. Valores obtenidos en la variación del ancho de garganta y caña nº3.....	83
Tabla 32. Valores obtenidos en la variación del ancho de garganta y caña nº3.5.....	85
Tabla 33. Valores utilizados para la longitud de la cámara	87
Tabla 34. Valores obtenidos en la variación de la longitud de la cámara y caña nº3	89

Tabla 35. Variación de la amplitud de los armónicos con la longitud de la cámara y caña nº3	89
Tabla 36. Valores obtenidos en la variación de la longitud de la cámara y caña nº3.5 .	91
Tabla 37. Variación de la amplitud de los armónicos con la longitud de la cámara y caña nº3.5	91
Tabla 38. Valores utilizados en la variación de la tabla.....	93
Tabla 39. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del ángulo de la tabla y caña nº3	95
Tabla 40. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación de la distancia del eje a la tabla y caña nº3.....	96
Tabla 41. Valores obtenidos en la variación de la tabla y caña nº3	97
Tabla 42. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del ángulo de la tabla y caña nº3.5	99
Tabla 43. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación de la distancia del eje a la tabla y caña nº3.5.....	100
Tabla 44. Valores obtenidos en la variación de la tabla y caña nº3.5.....	101
Tabla 45. Valores utilizados en los distintos tipos de garganta	102
Tabla 46. Valores obtenidos en la variación del tipo de garganta y caña nº3	104
Tabla 47. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del tipo de garganta y caña nº3	105
Tabla 48. Valores obtenidos en la variación del tipo de garganta y caña nº3.5	107
Tabla 49. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del tipo de garganta y caña nº3.5	108
Tabla 50. Valores utilizados en la colocación de la garganta	110
Tabla 51. Valores obtenidos en la variación de la colocación de la garganta y caña nº3	112
Tabla 52. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación en la colocación de la garganta y caña nº3	112
Tabla 53. Valores obtenidos en la variación de la colocación de la garganta y caña nº3.5	114
Tabla 54. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación en la colocación de la garganta y caña nº3.5	114
Tabla 55. Valores obtenidos con la variación del material	118
Tabla 56. Valores obtenidos con la variación del material	119
Tabla 57. Valores obtenidos con la variación del material	120
Tabla 58. Comparación de valores en ambos métodos de grabación	123
Tabla 59. Diferencias porcentuales entre los valores grabados por ambos métodos .	124
Tabla 60. Distribución de acciones en la planificación	132
Tabla 61. Coste de fabricación de las boquillas.....	136
Tabla 62. Presupuesto total.....	136
Tabla 63. Variables de simulación	140
Tabla 64. Valores de velocidad en función de la posición.....	141
Tabla 65. Valores de velocidad en función de la posición.....	142
Tabla 66. Valores de velocidad en función de la posición.....	143

Tabla 67. Valores de velocidad en función de la posición.....	144
Tabla 68. Valores de velocidad en función de la posición.....	145
Tabla 69. Valores de velocidad en función de la posición.....	146
Tabla 70. Valores de velocidad en función de la posición.....	147
Tabla 71. Boquillas numeradas utilizadas en cada experimento	151
Tabla 72. Características de cada boquilla	152

10.2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Violín Stradivarius	4
Figura 2. Onda sinusoidal general	7
Figura 3. Notas musicales asignadas a un teclado	8
Figura 4. Evolución temporal de la amplitud del sonido.....	10
Figura 5. Creación de ondas armónicas en un tubo	11
Figura 6. Representación de la transformada de Fourier	11
Figura 7. Familia de saxofones. De izquierda a derecha: sopranino, soprano, alto, tenor, barítono y bajo	13
Figura 8. Nomenclatura de las llaves en el saxofón	16
Figura 9. Ondas estacionarias en un tubo cónico.....	19
Figura 10. Partes del saxofón	21
Figura 11. Partes de la caña del saxofón	23
Figura 12. Diferentes cortes de la madera de la caña.....	23
Figura 13. Partes fundamentales de la boquilla del saxofón	26
Figura 14. Tipos de baffle	26
Figura 15. Fabricación de pieza mediante impresión 3D	28
Figura 16. Partes de la máquina de estereolitografía	31
Figura 17. Piezas fabricadas mediante estereolitografía, con sus correspondientes soportes.....	31
Figura 18. Conjunto boquilla - caña - abrazadera, para la boquilla Selmer Super Session D.....	33
Figura 19. Esquema de una caña.....	34
Figura 20. Producción del sonido	35
Figura 21. Modos de vibración de una viga empotrada.....	35
Figura 22. Esquema en 3D de la caña.....	39
Figura 23. Tres primeros modos de vibración de la caña.....	40
Figura 24. Espectrograma para la boquilla B7.....	45
Figura 25. Espectrograma para la boquilla B13.....	46
Figura 26. Esquema de colocación del micrófono.....	47
Figura 27. Boquilla de referencia B9 fabricada mediante impresión 3D	60
Figura 28. Plano de la boquilla de referencia con las magnitudes fundamentales	61
Figura 29. Esquema de la variación del techo de la cámara	64
Figura 30. Boquillas B7 y B8.....	68
Figura 31. Esquema de la variación de la colocación de la garganta	69
Figura 32. Boquillas B9, B10 y B11	73
Figura 33. Esquema de la variación de la abertura	74
Figura 34. Boquillas B9, B12 y B13	80
Figura 35. Esquema de la variación del ancho de la garganta	81
Figura 36. Boquillas B9, B14 y B15	86
Figura 37. Esquema de la variación de la longitud de la cámara	87
Figura 38. Boquillas B9, B16 y B17	92

Figura 39. Esquema de la variación de la posición de la tabla	93
Figura 40. Boquillas B9, B18 y B19	101
Figura 41. Esquema de la variación del tipo de garganta	102
Figura 42. Boquillas B9, B20 y B21	109
Figura 43. Esquema de la variación en la colocación de la garganta (cámara convexa)	110
Figura 44. Boquillas B21 y B22.....	115
Figura 45. Máquina de SLA del Laboratorio de Desarrollo de Producto de la ETSI Industriales	116
Figura 46. Recorte realizado al diseño por falta de resina en la máquina	117
Figura 47. Boquillas B9, B14 y B21 fabricadas en ambos materiales	121
Figura 48. Diagrama de Gantt de la planificación	133
Figura 49. Conjunto boquilla caña. En verde, volumen interior a analizar	139
Figura 50. Flujo interno y planos de análisis	140
Figura 51. Perfiles de velocidades para varias boquillas	148
Figura 52. Flujo interno para B7	148
Figura 53. Flujo interno para B9	149
Figura 54. Flujo interno para B20	149

10.3. ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Relaciones grosor - frecuencia - armónico	43
Gráfico 2. Variación de la frecuencia en función del grosor y de la longitud de abertura para el primer armónico.....	43
Gráfico 3. Espectros armónicos para una nota de 440 Hz emitida por un saxofón (arriba) y una nota de 880 Hz emitida por una flauta (abajo).....	44
Gráfico 4. Análisis frecuencial a boquillas de clásico con caña nº3	50
Gráfico 5. Análisis frecuencial a boquillas de clásico con caña nº3.5	52
Gráfico 6. Análisis frecuencial a boquillas de clásico con caña nº3	53
Gráfico 7. Análisis frecuencial a boquillas de clásico con caña nº3.5	54
Gráfico 8. Análisis frecuencial a boquillas de jazz con caña nº3	56
Gráfico 9. Análisis frecuencial a boquillas de jazz con caña nº3.5	57
Gráfico 10. Análisis frecuencial a la boquilla de referencia	62
Gráfico 11. Análisis frecuencial con variación del techo de la cámara y caña nº3	65
Gráfico 12. Análisis frecuencial con variación del techo de la cámara y caña nº3.5	67
Gráfico 13. Análisis frecuencial con variación en la colocación de la garganta y caña nº3	70
Gráfico 14. Análisis frecuencial con variación en la colocación de la garganta y caña nº3.5	72
Gráfico 15. Análisis frecuencial con variación de la abertura y caña nº3	75
Gráfico 16. Variación de la amplitud de los armónicos con la abertura y caña nº3	77
Gráfico 17. Análisis frecuencial con variación de la abertura y caña nº3.5	78
Gráfico 18. Variación de la amplitud de los armónicos con la abertura y caña nº3.5 ...	80
Gráfico 19. Análisis frecuencial con variación del ancho de la garganta y caña nº3	82
Gráfico 20. Variación de la afinación con el ancho de garganta y caña nº3	83
Gráfico 21. Análisis frecuencial con variación del ancho de la garganta y caña nº3.5 ..	84
Gráfico 22. Variación de la afinación con el ancho de garganta y caña nº3.5	85
Gráfico 23. Análisis frecuencial con variación de la longitud de la cámara y caña nº3 ..	88
Gráfico 24. Variación de la amplitud de los armónicos con la longitud de la cámara y caña nº3	89
Gráfico 25. Análisis frecuencial con variación de la longitud de la cámara y caña nº3.5	90
Gráfico 26. Variación de la amplitud de los armónicos con la longitud de la cámara y caña nº3.5	91
Gráfico 27. Análisis frecuencial con variación de la tabla y caña nº3	94
Gráfico 28. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del ángulo de la tabla y caña nº3	95
Gráfico 29. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación de la distancia del eje a la tabla y caña nº3.....	96
Gráfico 30. Análisis frecuencial con variación de la tabla y caña nº3.5	98
Gráfico 31. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del ángulo de la tabla y caña nº3.5	99

Gráfico 32. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación de la distancia del eje a la tabla y caña nº3.5.....	100
Gráfico 33. Análisis frecuencial con variación del tipo de garganta y caña nº3	103
Gráfico 34. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del tipo de garganta y caña nº3.....	105
Gráfico 35. Análisis frecuencial con variación del tipo de garganta y caña nº3.5	106
Gráfico 36. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación del tipo de garganta y caña nº3.5.....	108
Gráfico 37. Análisis frecuencial con variación en la colocación de la garganta y caña nº3	111
Gráfico 38. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación en la colocación de la garganta y caña nº3	112
Gráfico 39. Análisis frecuencial con variación en la colocación de la garganta y caña nº3.5	113
Gráfico 40. Variación de la amplitud de los armónicos con la variación en la colocación de la garganta y caña nº3.5	114
Gráfico 41. Análisis frecuencial con variación del material.....	118
Gráfico 42. Análisis frecuencial con variación del material.....	119
Gráfico 43. Análisis frecuencial con variación del material.....	120
Gráfico 44. Distribución de armónicos para ambos métodos de grabación.....	127
Gráfico 45. Velocidad en función de la posición	141
Gráfico 46. Velocidad en función de la posición	142
Gráfico 47. Velocidad en función de la posición	143
Gráfico 48. Velocidad en función de la posición	144
Gráfico 49. Velocidad en función de la posición	145
Gráfico 50. Velocidad en función de la posición	146
Gráfico 51. Velocidad en función de la posición	147
Gráfico 52. Distribución de armónicos para varias notas de distintos registros	153