

MEJORA DE LOS SISTEMAS DE AFINACIÓN EN EL OBOE A TRAVÉS DEL ESTUDIO DE LOS ESPECTROS ARMÓNICOS DE LOS ACORDES DE 4º Y 5º JUSTA EN LA PRIMERA Y SEGUNDA OCTAVA.



Alumna: **Begoña Puchol-Quixal Alamar**

Director: **Ximo Cerdà Boluda** | Codirector: **Germán Ramos Peinado**

Valencia, julio 2016 | Máster en Música



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DCADHA
DPTO. DE COMUNICACIÓN AUDIOVISUAL
DOCUMENTACIÓN E HISTORIA DEL ARTE

RESUMEN:

Esta investigación tiene la finalidad de estudiar el contenido físico-armónico del sonido producido por el oboe en los acordes de cuarta y quinta justa en la primera y segunda octava para elaborar un posterior método de estudio que ayude a mejorar la afinación en los oboístas. Para ello se estudia de manera separada el contenido armónico de unas notas determinadas de manera aislada con un único oboísta, así como el contenido armónico de los acordes de cuarta y quinta justa con dos oboístas profesionales. Se realizarán mediciones exhaustivas para su posterior procesado con el fin de obtener un patrón fidedigno y aplicable a distintas situaciones de contexto.

Las mediciones acústicas muestran las frecuencias de los sonidos en hercios, así como el rango de intensidad sonora (dBs) de cada armónico, tanto de las notas sueltas como de los acordes. En el caso de los acordes, se muestran los sonidos generados por las notas que componen dichos acordes y sus diferentes intensidades.

El conocimiento obtenido a través de este análisis, es lo que servirá para el desarrollo del sistema de mejora de afinación en los oboístas, con la opción de extenderlo con una investigación paralela a cualquier otro instrumento. Ya que este proyecto no sólo pretende alcanzar unos resultados significativos, sino establecer un experimento referencia para posteriores estudios.

RESUM:

Esta investigació té la finalitat d'estudiar el contingut físic-harmònic del so produït per l'oboé en els acords de quarta i quinta justa en la primera i segona octava per a elaborar un posterior mètode d'estudi que ajude a millorar l'afinació en els oboïstes. Per a això s'estudia de manera separada el contingut harmònic d'unes notes de manera aïllada amb un únic oboïsta, així com el contingut harmònic dels acords de quarta i quinta justa amb dos oboïstes professionals. Es realitzaran mesuraments exhaustius sobre el seu posterior processat per a obtenir un patró fidel i aplicable a distintes situacions de context.

Els mesuraments acústics mostren les freqüències dels sons en hertzs, a més del rang d'intensitat sonora (dBs) de cada harmònic, tant de les notes soltes com dels acords. En el cas dels acords, es mostren els sons generats per les notes que componen els dits acords i les seues diferents intensitats.

El coneixement obtingut a través d'este anàlisi, és el que servirà per al desenrotllament del sistema de millora d'afinació en els oboïstes, amb l'opció d'entendre-ho amb una investigació paral·lela a qualsevol altre instrument. Ja que este projecte no sols pretén aconseguir uns resultats significatius, sinó establir un experiment referència per a posteriors estudis.

ABSTRACT:

The purpose of this research is to study the physical and harmonic content of the sound produced by the oboe in the chords of the fourth and fifth joust, in the first and second octave, in order to develop a method to improve the tuning of the oboe. This work is composed of two distinct parts: the study of the harmonic content of isolated notes, played by a single oboist; and the harmonic content of the chords of the fourth and fifth joust, played by two professional oboists. Exhaustive measurements have been processed in order to obtain a pattern which is applicable in different contexts.

Acoustic measurements show the frequencies of sound (in hertz), in addition to the sonorous intensity (loudness). In the case of chords, these measurements correspond to the sound generated by their component notes and their relative intensities.

This project has established experimental indexes beyond just collecting significant results for this study. For this reason, the knowledge obtained across these analyses will serve to develop a system to improve the tuning of oboes, which is readily extendible to any other instrument.

ÍNDICE

| | |
|-----------------------------|---------|
| 1. INTRODUCCIÓN | Pág. 7 |
| 2. LA FÍSICA DEL OBOE | Pág. 8 |
| 3. ANTECEDENTES | Pág. 11 |
| 4. OBJETIVOS | Pág. 17 |
| 5. MÉTODO | Pág. 19 |
| 6. EXPERIMENTO | Pág. 22 |
| 7. RESULTADOS | Pág. 23 |
| 8. CONCLUSIONES | Pág. 53 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | Pág. 61 |
| 10. ANEXO I | Pág. 67 |
| 11. ANEXO II | Pág. 68 |

1. Introducción

Este trabajo pretende analizar el comportamiento acústico de los acordes de 4ª y 5ª justa en la primera y segunda octava del oboe, con el fin de mejorar el sistema de afinación de los instrumentistas en dichos acordes.

Debido a las características físicas de los instrumentos musicales (Almeida, 2003 et 2002), cada instrumento genera unos armónicos determinados (Agulló, 1990) que definen el timbre de dicho instrumento (Eronen, 2001. Benade, 1968. Eronen, 2001). Es por ello que en este trabajo se analizan las propiedades acústicas del oboe, a través del espectro armónico de unas notas determinadas con un oboe profesional. Mediante este procedimiento, se obtiene un análisis espectral de cada nota, donde se muestra qué armónicos se producen en cada nota y qué amplitud de onda tienen.

Sobreponiendo los análisis de dos frecuencias simultáneas, se observa que notas resultantes aparecen a través del choque de armónicos. Con ello, se pretende que el instrumentista reconozca auditivamente dichas notas resultantes a la hora de afinar junto con uno o más oboístas los acordes nombrados anteriormente.

Anteriormente se ha analizado el sonido del oboe para observar qué es lo que caracteriza el timbre: si bien lo caracteriza la persona que lo toca (persona o boquilla improvisada con un flujo de aire continuo) (Benade, 1974. Backus, 1985), el instrumento con que se toca (material y forma) (Backus, 1974. Fletcher, 1999. Haines, 1979. Keefe, 1982. Wegst, 2006), o la caña con la que se toca (material, forma, dureza) (Blasco, 2012. Artley, 1968. Romero et al. 2006),

La innovación de este trabajo es que no se hace referencia al timbre del oboe (Shimizu et al. 1989), sino al análisis de un comportamiento acústico del instrumento (Fletcher et al. 1998. Miyara, 2003. Nederveen, 1998. Prasad et al. 1975. Prezelj et al. 2013).

2. La física del oboe

El oboe (del francés *hautbois*, “madera alta”) es un instrumento de la familia de viento madera, formado por tres cuerpos: cuerpo superior, cuerpo inferior y campana; al que se añade un cuerpo externo llamado caña, formado por una pala doble de caña de bambú y por un tudel compuesto de corcho en el exterior y de latón o alpaca en la parte interior, unidos mediante hilo de nailon. Esta pieza se inserta en la parte superior del instrumento y permite la entrada de aire a través de una pequeña abertura.

El tubo sonoro consta de un sistema excitador que abastece de energía a la columna de aire: la lengüeta; y de un sistema resonador: el tubo del instrumento, fabricado de madera de granadilla, ébano o de plástico.



Imagen 1: partes del oboe.

Los cuerpos superior e inferior tienen seis agujeros cada uno para formar la escala básica, que se extiende desde la nota re 4 a la nota do 5. Debido a unos agujeros y llaves adicionales en las diferentes piezas que lo componen, se puede llegar a tocar hasta la nota si b 3 por debajo y do 6 por arriba, para abarcar toda la escala cromática. Los sonidos del si b 3 hasta el do # 5 son fundamentales, mientras que el resto son armónicos de orden superior, obtenidos mediante la octavación de las posiciones normales del primer registro. Además, el oboe moderno permite generar ocho notas más, denominadas “armónicos artificiales”,

producidos mediante distintas digitaciones. Por tanto, tiene un rango de casi tres octavas completas.

Se ha establecido previamente que las vibraciones de las cañas del oboe son complejas y que involucran las leyes de Bernoulli¹ (André Almeida et al., 2007) que se enumeran a continuación:

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

El sonido es una onda longitudinal, lo que significa que las moléculas del medio oscilan en la dirección de propagación. Cuando se sopla a través de la caña, la columna de aire excita las dos palas produciendo el sonido, y se transmite la vibración de las partículas de aire a lo largo del tubo, produciéndose a continuación la reflexión del sonido, que vuelve hacia la boquilla. Tanto el espectro como las frecuencias están controladas por la columna de aire, por medio de un mecanismo de retroalimentación (no lineal).

Al tocar una nota, la frecuencia resultante de la onda de sonido no sólo contiene la frecuencia de la nota original, sino que contiene también los armónicos de dicha frecuencia, es decir, un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. La amplitud de los armónicos determinan la calidad del sonido y

¹ Johann Bernoulli: fue un matemático, médico y filólogo suizo, que vivió entre los siglos XVII y XVIII, y que enunció una serie de leyes aplicables tanto a tubos abiertos, como a tubos cerrados.

hace posible la distinción de un instrumento a otro, aun cuando tengan igual altura e intensidad.

Al ser un tubo abierto, la frecuencia fundamental es $V/2L$, siendo L la longitud del tubo y V la velocidad del sonido². Así mismo, el tubo abierto puede emitir la serie completa de todos sus armónicos, que tendrán la frecuencia:

$$n = nv/2L \text{ (con } n = 2, 3, 4, \text{ etc.)}$$

Debido a que es un tubo cónico, la propagación de las ondas dentro del tubo se comportan de la siguiente manera:

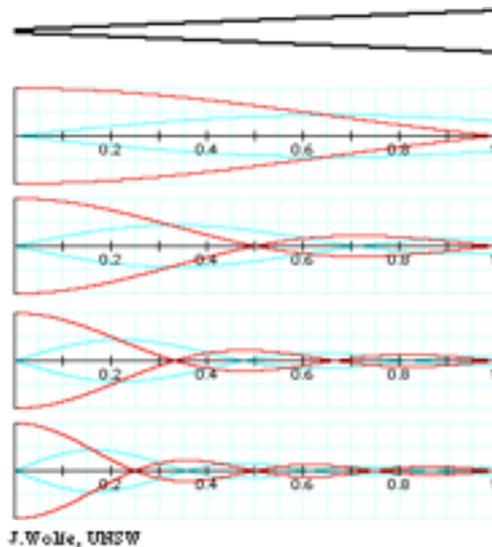


Imagen 2: Comportamiento de las ondas en un tubo cónico.

Las columnas vibrantes de aire poseen nodos donde la vibración es nula y vientres donde la vibración alcanza su máxima amplitud. La imagen 2 muestra los diferentes patrones de vibración, correspondiendo el primero de ellos a la nota fundamental, el segundo al segundo armónico y así sucesivamente. Las líneas rojas representan la presión del sonido y las azules el comportamiento del aire.

² Velocidad del sonido = 340 m/s, a una temperatura de 20°.

3. Antecedentes

Por regla general, hay una carencia de un método específico de aprendizaje para la correcta afinación del oboe, en cuanto a acordes conjuntos se refiere (Gilbert, 1991. Prodan, 1977). Cuando tocan conjuntamente dos o más oboes, se producen una serie de sonidos “extraños” (Beuchamp, 1999), que no se sabe bien el origen de su procedencia. Cuando se toca una nota aislada, el afinador hace referencia a qué nota se está tocando. Sin embargo, no hay ningún dispositivo electrónico que indique que un acorde está afinado correctamente, y por tanto depende de la correcta audición e interpretación del instrumentista.

En los siguientes textos se ha encontrado información muy relevante referente al comportamiento del timbre de los instrumentos de viento (Benade, 1990), así como de su comportamiento acústico. Véase Keefe (1982), Ando y Yamaguchi (1993), Almeida et al. (2002), Nederveen (1998), Shimizu et al. (1989) y Barjau (1989).

Tiene una especial importancia la psicoacústica, debido a que muchas veces el propio músico percibe sonidos o timbres que acústicamente no se están produciendo, y que el público no llega a percibir (Blasco, 2012). Hay que tener en cuenta que el oído humano percibe desde los 20 Hz hasta los 20 KHz, y que dependiendo del rango auditivo de cada persona, ésta percibirá unos tonos u otros, así como los diferentes armónicos que cada nota pueda generar. Según J. Roederer: “la existencia de un límite finito para la discriminación de tonos es un indicio de que la región activada sobre la membrana basilar por un tono simple tiene una extensión espacial finita”. En un experimento con dos notas de frecuencias cercanas, la percepción de cada nota y del batido que genera la proximidad de las frecuencias varía dependiendo del medio en el que se escuche. Si se escucha de manera dicótica la sensación primaria de batido se pierde y ambos tonos pueden ser discriminados. Esto sucede porque sólo hay una región

activada en la membrana basilar, sin posibilidad de superposición de señales en la cóclea. En el momento que se vuelve a escuchar monoaural, los batidos vuelven.

Los efectos resultantes de nuestras sensaciones cuando la frecuencia de un tono va más allá de la banda crítica, mientras otra frecuencia se mantiene constante, pueden ser clasificados en dos categorías dependiendo de si su origen está en el oído o en el sistema nervioso. Aparecen unas frecuencias que no están presente en el estímulo sonoro original y aparecen como resultado de la distorsión no lineal de la señal acústica en el oído (Roederer, 1997). En un experimento basado en lo anterior, donde se superponen dos notas a distancia de una octava, manteniendo fija una de ella (f_1) y variando la otra frecuencia (f_2), se distingue claramente la presencia de uno o más tonos de alturas más bajas que varían dependiendo de cómo se modifique la segunda frecuencia. Estos estímulos denominados sonidos resultantes no existen en el estímulo sonoro original. El sonido resultante, más fácil de identificar a niveles elevados de intensidad, aparece como resultado de la diferencia de las frecuencias componentes del acorde, es decir:

$$R = f_1 - f_2$$

Cuando f_2 esté a diferencia de una octava ocurre que:

$$R = 2f_1 - f_1 = f_1$$

Así mismo, cuando esté a distancia de un intervalo de quinta, ocurrirá lo siguiente:

$$R = 3/2 f_1 - f_1 = 1/2 f_1$$

Lo que significa que la nota resultante sonará una octava por debajo de f_1 .

Los diversos experimentos realizados en animales han revelado que las frecuencias de los sonidos resultantes no están presentes en la entrada de la

cóclea. Por otra parte mediciones directas de los impulsos neuronales (Goldstein, 1970) revelan que hay regiones activadas sobre la membrana basilar en las posiciones correspondientes a las frecuencias de los sonidos resultantes. Por último, añade que lo ideal para realizar estos experimentos sería contar con generadores electrónicos para aumentar la intensidad de los sonidos, y que no se deben confundir con sonidos resultantes falsos, generados por órganos electrónicos, amplificadores o parlantes de baja calidad, debido a que no se generará la sensación en el oído, sino en el parlante.

En el libro de la flautista alemana D. Geller (2004), se propone un método de enseñanza donde además de aplicar los métodos tradicionales de percepción de los sonidos se añade un método por el cual se explican los fenómenos físicos y matemáticos, de manera que sean comprensibles. Además, explica qué ocurre cuando suena un acorde de dos notas en dos flautas a una distancia de 4ª y 5ª justa y las notas resultantes que surgen de cada acorde, siendo éstas la frecuencia resultante a la resta de ambas frecuencias del acorde. Es decir:

Frecuencia 1 - Frecuencia 2 = nota resultante.

El libro anteriormente nombrado es el antecedente principal de mi tesina, debido a la importancia de analizar el fenómeno físico-armónico que ocurre cuando dos oboes producen dos sonidos simultáneamente. Dado que el comportamiento físico del oboe difiere del de la flauta, es necesario realizar un análisis espectral del oboe. La flauta es un tubo abierto, en el que se produce una onda estacionaria en el interior del tubo. En el oboe, el comportamiento de la onda sufre alguna modificación debido a la forma cónica del tubo. Véase la imagen 2 (página 6) y la imagen 3 (página 10).

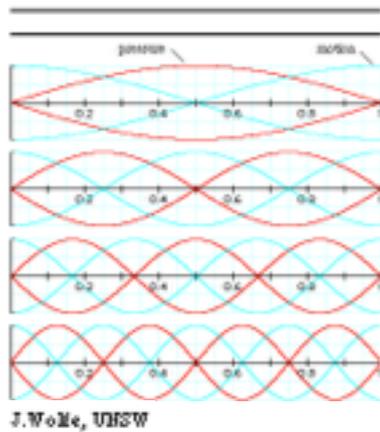


Imagen 3: Comportamiento de las ondas en una flauta.

Como se muestra a continuación en la imagen 4, al producir un tono no puro³ se generan las siguientes distribuciones espaciales de la presión sonora (Dalmont, 2003. Gokhshtein, 1979), en un tubo abierto para diez soluciones estacionarias:

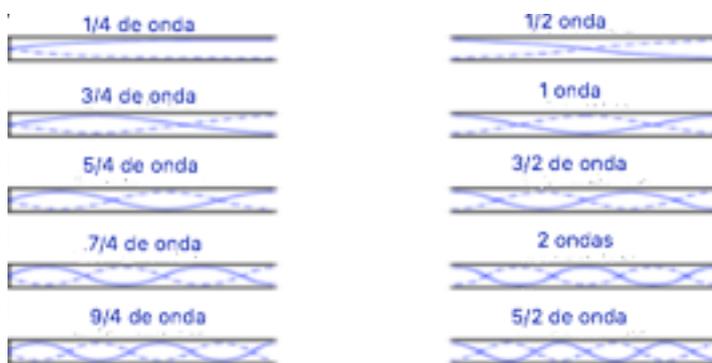


Imagen 4: Propagación de ondas de sonido en tubos de tipo abierto.

En la tesis realizada por K. Milar (2008) se analiza el comportamiento físico del oboe cuando es tocado por diferentes músicos (profesionales o no profesionales), con distintos instrumentos (de plástico y de madera) y distintas

³ Tono puro: sonido que carece de armónicos.

cañas (manufacturadas, de plástico, o hechas por el propio oboísta) sobre la nota A4 (440 Hz aproximadamente), para ver cómo influyen los diferentes parámetros en el sonido del oboe. Primero se analiza la propagación de las ondas a través del oboe, posteriormente, se utiliza el análisis de Fourier para expresar la forma de onda con unas frecuencias determinadas: 220 Hz, 1100 Hz, y 1540 Hz. Con el fin de aislar la influencia del instrumentista en el experimento se utiliza un tubo de aire continuo, con el objetivo de controlar el flujo del aire tanto en la caña y en el oboe, y se graba con un micrófono tanto con el oboe de plástico, como con el de madera. Todas las gráficas muestran que, con la caña más ligera, el oboe de plástico tiene una amplitud de onda más elevada en los armónicos agudos, en comparación con el oboe de madera. Además, la frecuencia fundamental no es la frecuencia con una amplitud de onda más elevada. El tercer armónico posee la mayor amplitud a cualquier frecuencia, con una amplitud de -15 dB en el oboe de madera y -11 dB en el de plástico. Los resultados con la caña media son muy parecidos a los anteriormente nombrados. Dependiendo del tipo de oboe, se enfatizan unos armónicos u otros.

En un estudio realizado por N. Pfiester (2008) en el departamento de física de la Universidad de Purdue se estudian las propiedades acústicas del oboe, con el fin de entender cómo produce un sonido único a través de un transductor piezo eléctrico a través de un sistema de adquisición de datos de gestión. Se realizan unos tests con dos oboes diferentes en cuanto a marca y material (oboe 1: Lorée AK Standard, de madera; oboe 2: Foz Renard Model 330 Artist, de plástico), para ver qué hace único a cada modelo, y para observar la influencia del material en el que han sido contruidos. Los resultados muestran dos resultados distintos de armónicos cuyas características principales son similares, así como múltiples tendencias para ambos oboes en las medidas de impedancia.

En un estudio sobre las propiedades físicas de la doble lengüeta (Almeida et al., 2003) se introducen unos métodos experimentales para intentar de verificar la hipótesis teórica sobre el flujo de aire de dentro de la caña. Se colocan unos

labios artificiales para obtener un mayor control sobre algunos parámetros individuales. El primer ejemplo de boca artificial fue usado por Backus (1961) en su concepción de su primer modelo de clarinete y fue adaptado y perfeccionado para el estudio de otros instrumentos de lengüeta (Gilbert, 1991), así como para instrumentos de metal (Vergez, 2000).

4. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es realizar un análisis físico-armónico exhaustivo de los acordes de 4ª y 5ª justa en la primera y segunda octava del oboe, para observar el comportamiento de las ondas sonoras generadas en dichos acordes y poder ser utilizado como parte de un posterior método de estudio de afinación en la elaboración de acordes con dos oboes.

Con este estudio se pretende que el oboísta entienda y vea gráficamente lo que está sucediendo acústicamente en un acorde determinado, para poder conseguir la correcta afinación del mismo.

Se observarán y analizarán los siguientes parámetros:

- Análisis espectral para obtener las frecuencias generadas en cada nota de manera individual interpretadas por un oboísta profesional: fa 4, si 4, do 5, fa 5, si 5 y do 6.
- Análisis de la intensidad sonora (dB) de cada frecuencia generada.
- Análisis espectral para obtener las frecuencias generadas en los acordes de 4ª y 5ª justa en ambas octavas, interpretadas por dos oboístas profesionales.
- Análisis espectral de cada frecuencia con su correspondiente intensidad sonora (dB).
- Análisis de la aparición o no aparición de notas extrañas (no esperadas en los acordes a nivel teórico) realizados por los dos oboístas profesionales.

El segundo objetivo de este trabajo es ser el comienzo de una posterior Tesis Doctoral basada en los siguientes parámetros:

- Elaboración de un sistema que genere un flujo de aire continuo con una presión determinada, para eliminar la influencia del oboísta en el experimento y ver qué armónicos aparecen en los distintos acordes, sin depender del factor humano.

- Análisis espectral de frecuencias e intensidad sonora de los acordes: 2ª, 3ª, 6ª y 7ª mayor y menor, y 4ª, 5ª y 8ª justa en la primera y segunda octava del oboe.
- Análisis de los parámetros anteriores con cuatro modelos de oboe profesionales (Marigaux 901, Buffet modelo Orfeo, Rigoutat modelo J, y Ludwig Frank) para observar su comportamiento armónico dependiendo de las dimensiones y del material de cada instrumento. Se realizará el mismo experimento con cada uno de los cuatro modelos de oboe para no influir en los resultados.
- Análisis de las frecuencias obtenidas a partir de un acorde, para observar la aparición o no aparición de notas extrañas a dicho acorde, dependiendo de los siguientes matices dinámicos: *fortissimo*, *mezzo forte* y *piano* y posterior investigación para obtener un patrón o justificación de dichas notas.
- En el caso de la aparición de notas resultantes: elaboración de un método de afinación basado en la percepción de notas resultantes en cada acorde, como resultado del comportamiento físico-armónico del oboe.
- Elaboración de un test psicoacústico, con músicos profesionales y no profesionales, de los cuales algunos tengan oído absoluto, para evaluar las respuestas de cada individuo a través de una escala de Likert del 1 al 5, sobre la percepción de notas en unos acordes determinados. La escala se valorará de la siguiente manera: 1 = totalmente en desacuerdo; y 5 = totalmente de acuerdo. Se entregará una encuesta al principio del experimento y se contestará entre las diferentes audiciones. Cada sujeto dispondrá de un ordenador con cascos, y distintas pistas de audio que podrá repetir de manera ilimitada hasta completar la encuesta.

Este test evaluará la influencia en la percepción auditiva de determinados acordes del oboe, como por ejemplo, evaluar qué nota se percibe con más intensidad, o si se escucha alguna nota de frecuencia más grave que la fundamental del acorde.

5. Método

Debido a la necesidad de pistas de audio digitales en este experimento para su posterior edición y transformación, se han realizado distintas grabaciones con uno y dos oboístas profesionales (cada oboísta interpreta con su propio instrumento y cañas) en una cámara anecoica para evitar reflexiones del sonido, así como para evitar posibles ruidos externos. Todas las grabaciones han sido realizadas en un matiz dinámico *mezzo forte*.

Se han grabado las notas fa 4, si b 4 y do 5 afinadas a 442 Hz, con una duración entre cuatro y ocho segundos y medio para su posterior edición.

Por otra parte, se ha grabado en la misma sala y con las mismas condiciones ambientales, a dos oboístas profesionales realizando los acordes de 4ª y 5ª justa en la primera octava, tomando como nota fundamental de cada acorde la nota fa 4.

Posteriormente se han seleccionado fragmentos de las diferentes pistas de audio y mediante el teorema de Fourier⁴ se han analizado las distintas frecuencias e intensidades de cada nota del acorde, así como de sus correspondientes armónicos.

Finalmente, se han analizado los resultados en aras de comprobar la aparición de notas extrañas a determinados acorde, así como su correspondiente análisis espectral de frecuencias (hercios) e intensidades (dB) y la comparación de las frecuencias obtenidas de manera individual en cada nota y obtenidas mediante un acorde, para elaborar las conclusiones del experimento.

⁴ Teorema de Fourier: cualquier vibración periódica, por complicada que sea, puede ser representada como una superposición de vibraciones armónicas puras.

5.1. Materiales

Para que este experimento sea posible, se han utilizado los siguientes materiales:

- Dos oboes marca Marigaux, modelo 901, de madera de granadina.
- Caña de oboísta 1:
 - Elaboración propia.
 - Pala marca Neruranter.
 - Grosor: 57 - 58 mm.
 - Forma de la pala: Rieger nº 2.
 - Tudel: Glotin 45mm.
- Caña de oboísta 2:
 - Elaboración propia.
 - Pala marca Neuranter.
 - Grosor: 57 - 58 mm.
 - Forma de la pala: Rieger nº2.
 - Tudel: Glotin 46 mm.
- Micrófonos: Earthworks M 30.
- Tarjeta de sonido: Presonus Audiobox 44.
- Programa informático Audacity.
- Programa informático Sonic Visualiser.
- Programa informático MuseScore 2.

5.2. Tareas

El experimento consta de dos tareas:

5.2.1. La primera tarea consiste en grabar con audio, en una cámara anecoica, a un oboísta profesional (sujeto número uno), las notas fa 4 (350,82 Hz), si b 4 (468,28 Hz), do 5 (525,63 Hz), fa 5 (701,63 Hz), si b 5 (936,57 Hz) y do 6 (1051,26 Hz) con una duración de cuatro segundos cada una. Posteriormente, se realizará un análisis espectral de dichas notas (Smith, 2011) y se guardará en pistas de audio independientes, para poder analizar los acordes de 4ª y 5ª justa, con la información individual de cada nota del acorde. Se observará el comportamiento de los distintos armónicos en cada acorde, así como su intensidad, y se realizará el estudio de todas las frecuencias obtenidas de las notas reales y de sus armónicos.

5.2.2. La segunda tarea consiste en grabar simultáneamente a dos oboístas profesionales (sujeto número uno y sujeto número dos) los acordes nombrados anteriormente en las mismas condiciones de sala, tocando siempre el sujeto número uno la nota fundamental del acorde (en este caso, fa 4 y fa 5). Se analizarán los resultados y se compararán con los resultados de la primera tarea para observar si hubiera una posible modificación en las frecuencias y en las intensidades de las notas fundamentales y de los armónicos en cada acorde.

5.3. Sujetos

Se tomarán como sujetos del experimento dos oboístas profesionales.

5.4. Condiciones experimentales

Las grabaciones se realizan en una cámara anecoica, con dos micrófonos unidireccionales enfocados por encima y por debajo de la campana de los instrumentos. Se escuchan los resultados de manera individual, con auriculares. La edición de audio se realiza con el programa Audacity y los espectrogramas con el programa Sonic Visualiser.

6. Experimento

- Se graba al sujeto uno para realizar el análisis espectral de las notas fa 4, si b 4, do 5, fa 5, si b 5 y do 6.
- Se graban a los sujetos uno y dos, realizando conjuntamente los acordes de 4ª y 5ª justa.
- Una vez grabadas las distintas pistas de audio, se seleccionan fragmentos de pocos segundos, para realizar un análisis espectral.
- Se elabora una tabla con cada nota, donde se muestra la frecuencia en hercios de la nota fundamental y de los primeros dieciséis armónicos de manera teórica.
- Mediante el análisis de Fourier se descomponen los sonidos grabados por un solo oboísta, en una nota fundamental con sus correspondientes armónicos (ver Anexo I).
- Mediante el análisis de Fourier se descomponen los sonidos grabados por dos oboístas profesionales, para observar el comportamiento físico-acústico de cada nota del acorde y la unión de sus correspondientes armónicos.

7. Resultados

Mediante el análisis de Fourier se han descompuesto los sonidos fa 4 y 5, si b 4 y 5, y do 5 y 6 (grabados por un solo oboísta) en una nota fundamental con sus correspondientes armónicos (ver Anexo I); así como los acordes de cuarta y quinta justa realizados sobre dichas notas y grabados por dos oboístas profesionales. Como resultado, se han obtenido los siguientes datos:

7.1. Frecuencias de Fa 4

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| NOTA | FRECUENCIA (Hz) |
|--------|-----------------|
| FA 4 | 350,82 |
| FA 5 | 701,63 |
| DO 6 | 1051,26 |
| FA 6 | 1403,26 |
| LA 6 | 1768 |
| DO 7 | 2102,52 |
| MI b 7 | 2500,33 |
| FA 7 | 2806,52 |
| SOL 7 | 3150,22 |
| LA 7 | 3536 |
| SI 7 | 3969,03 |
| DO 8 | 4205,03 |
| RE b 8 | 4455,08 |
| MI b 8 | 5000,66 |
| MI 8 | 5298,01 |
| FA 8 | 5613,05 |

Tabla 1.

- Espectrogramas:

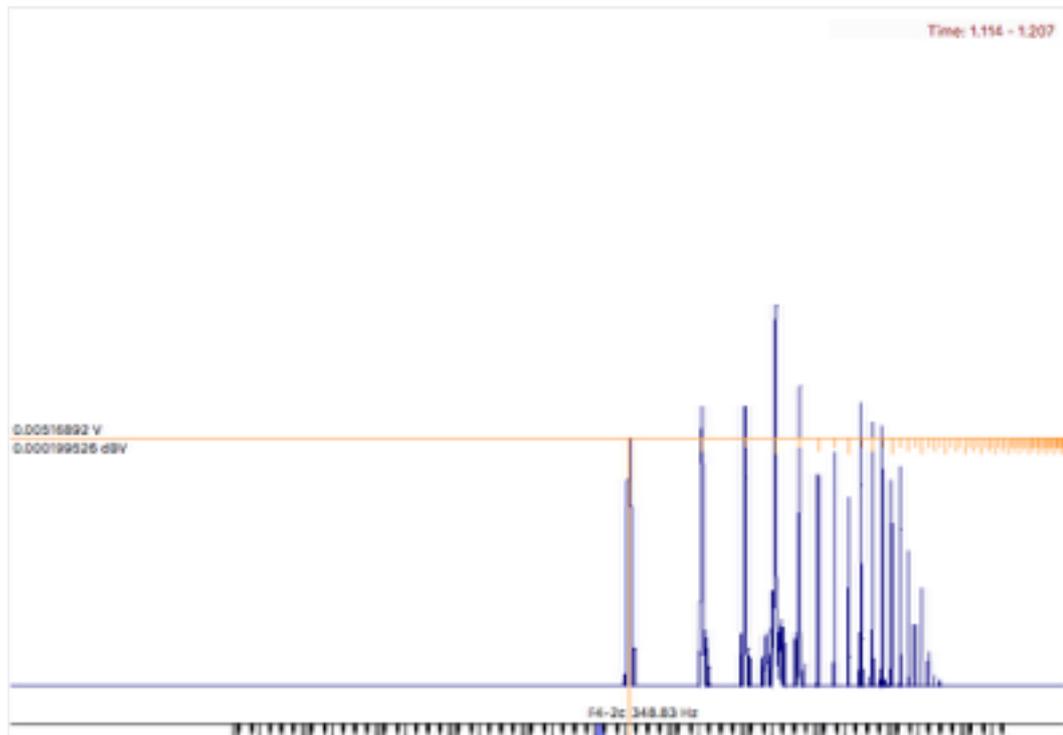


Imagen 5: Espectrograma de fa 4.

La imagen 5 muestra el espectrograma de la nota fa 4. El eje horizontal (X) muestra, una vez seleccionado un punto en la gráfica, las frecuencias obtenidas en hercios; el eje vertical (Y) muestra la intensidad de cada frecuencia en voltios una vez seleccionado un punto en la gráfica. En la parte inferior del eje horizontal aparece un teclado de piano que ayuda a identificar las nota de una manera sencilla, donde las notas en gris oscuro muestran, a modo de referencia, la nota do para marcar el comienzo de cada octava en el piano. Para obtener una información más exacta de cada armónico es necesario colocar el puntero en cada uno de los picos de los valores de la gráfica.

La línea vertical amarilla de la imagen 5 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la nota fa (F4) y la frecuencia exacta de dicha nota ($F4 = 348,83 \text{ Hz}$), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota fa 4 ($0,00516892 \text{ V}$). De este mismo

modo se obtienen los valores de los siguientes diez armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 2.

En la imagen 5, correspondiente a la nota fa 4, se observa que el tercer armónico, que corresponde con la nota fa 6 (dos octavas por encima de la original), sobresale por encima del resto en cuanto a intensidad (-31,24 dB).

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos fa 4 - segundo 1,114 - 1,207

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| FA 4 | -2 | 348,83 | 0,0051689 | -45,7320 |
| FA 5 | -2 | 697,66 | 0,0074178 | -42,5945 |
| DO 6 | +5 | 1049,63 | 0,0088675 | -41,0440 |
| FA 6 | -2 | 1395,31 | 0,0273905 | -31,2480 |
| LA 6 | -16 | 1743,53 | 0,0108293 | -39,3080 |
| DO 7 | +5 | 2099,24 | 0,0032629 | -49,7280 |
| MI b 7 | -16 | 2465,72 | 0,0042855 | -47,3600 |
| FA 7 | -2 | 2790,61 | 0,0027114 | -51,3360 |
| SOL 7 | +12 | 3158,31 | 0,0081395 | -41,7880 |
| LA 7 | -16 | 3487,05 | 0,0065705 | -43,6480 |
| SI 7 | -45 | 3850,01 | 0,0057783 | -44,7640 |

Tabla 2.

La tabla 2 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) de la nota fundamental fa 4 y de sus diez primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 5) de la nota fa 4, correspondiente a la primera octava del oboe.

7.2. Frecuencias de Si b 4

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| NOTA | FRECUENCIA (Hz) |
|---------|-----------------|
| SI b 4 | 468,28 |
| SI b 5 | 936,57 |
| FA 6 | 1403,26 |
| SI b 6 | 1873,13 |
| RE 7 | 2360 |
| FA 7 | 2806,52 |
| LA b 7 | 3337,54 |
| SI b 7 | 3746,26 |
| DO 8 | 4205,03 |
| RE 8 | 4719,99 |
| MI 8 | 5298,01 |
| FA 8 | 5613,05 |
| SOL b 8 | 5946,82 |
| LA b 8 | 6675,08 |
| LA 8 | 7072 |
| SI b 8 | 7938,05 |

Tabla 3.

- Espectrograma:

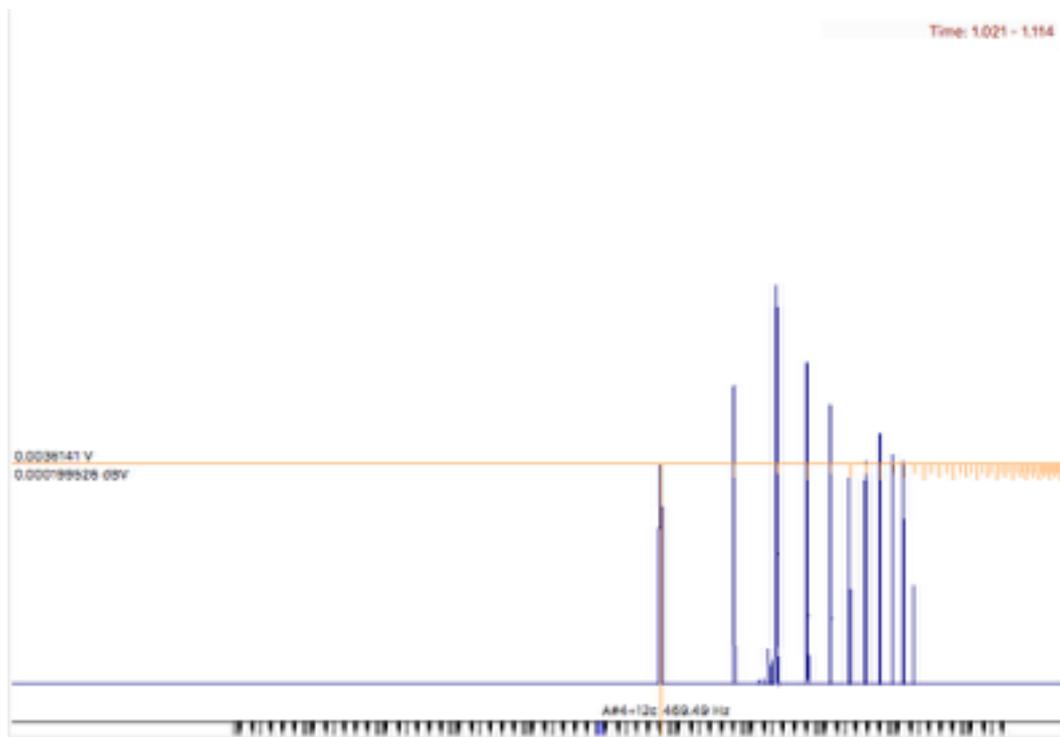


Imagen 6: Espectrograma de si b 4.

La imagen 6 muestra el espectrograma de la nota si b 4. El procedimiento de obtención de datos es el mismo que el de la imagen 5 anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 6 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la nota si b 4 ⁵ y la frecuencia exacta de dicha nota (A#4 = 469,49 Hz), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota si b 4 (0,0036141 V). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes diez armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 4.

En la imagen 6, correspondiente a la nota si b 4, se observa que el tercer armónico, que corresponde con la nota fa 6 (a distancia de quinta justa ascendente

⁵ Las notas la sostenido (A #) y si b (B b) son equivalentes.

respecto al segundo armónico) , sobresale por encima del resto en cuanto a intensidad (-28,22 dB).

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos si b 4 - segundo 1,021 - 1,114

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD D (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| SI b 4 | +12 | 469,49 | 0,0036141 | -48,8400 |
| SI b 5 | +12 | 938,98 | 0,0099632 | -40,0320 |
| FA 6 | +19 | 1412,69 | 0,0387972 | -28,2240 |
| SI b 6 | +12 | 1877,95 | 0,0138803 | -37,1520 |
| RE 7 | -2 | 2346,62 | 0,0080316 | -41,9040 |
| FA 7 | +19 | 2825,37 | 0,0030200 | -50,4000 |
| LA b 7 | -23 | 3277,79 | 0,0037463 | -48,5280 |
| SI b 7 | +12 | 3755,88 | 0,0054853 | -45,2160 |
| DO 8 | +5 | 4198,47 | 0,0040701 | -47,8080 |
| RE 8 | -2 | 4693,21 | 0,0037463 | -48,5280 |
| MI 8 | -31 | 5181,73 | 0,0082680 | -41,6520 |

Tabla 4.

La tabla 4 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) de la nota fundamental si b 4 y de sus diez primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 6) de la nota si b 5, correspondiente a la primera octava del oboe.

7.3 Frecuencias de Do 5

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| NOTA | FRECUENCIA (Hz) |
|--------|-----------------|
| DO 5 | 525,63 |
| DO 6 | 1051,26 |
| SOL 6 | 1575,11 |
| DO 7 | 2102,52 |
| MI 7 | 2649,01 |
| SOL 7 | 3150,22 |
| SI b 7 | 3746,26 |
| DO 8 | 4205,03 |
| RE 8 | 4719,99 |
| MI 8 | 5298,01 |
| FA # 8 | 5946,82 |
| SOL 8 | 6300,44 |
| LA b 8 | 6675,08 |
| SI b 8 | 7942,52 |
| SI 8 | 7938,05 |
| DO 9 | 8410,06 |

Tabla 5.

- Espectrograma:

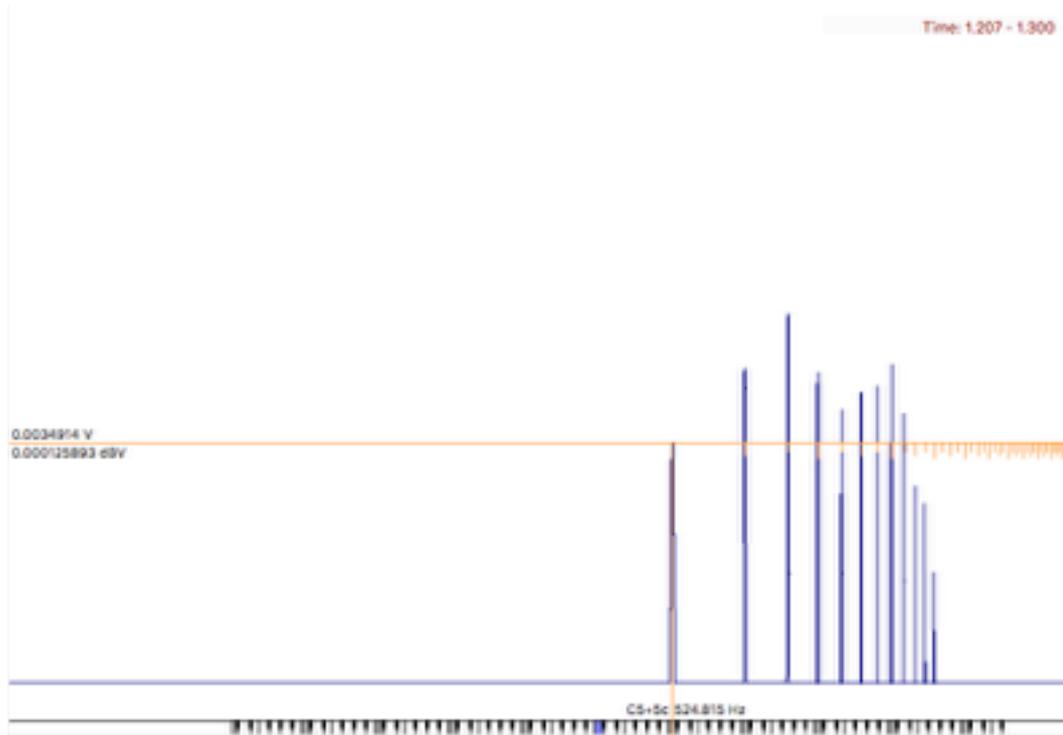


Imagen 7: Espectrograma de do 5.

La imagen 7 muestra el espectrograma de la nota do 5. El procedimiento de obtención de datos es el mismo que el de la imagen 5 anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 7 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la nota do 5 y la frecuencia exacta de dicha nota ($C5 = 524,815$), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota do 5 (0,0034914 V). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes diez armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 6.

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos do 5 - segundo segundo 1,207 - 1,3

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| DO 5 | +5 | 524,82 | 0,0034914 | -49,1400 |
| DO 6 | +5 | 1049,63 | 0,0098946 | -40,0920 |
| SOL 6 | +12 | 1579,16 | 0,0202955 | -33,8520 |
| DO 7 | +5 | 2099,24 | 0,0092087 | -40,7160 |
| MI 7 | -9 | 2623,14 | 0,0056702 | -44,9280 |
| SOL 7 | +12 | 3158,31 | 0,0069088 | -43,2120 |
| SI b 7 | -31 | 3664,04 | 0,0075579 | -42,4320 |
| DO 8 | +5 | 4198,47 | 0,0104424 | -39,6240 |
| RE 8 | -2 | 4693,21 | 0,0052772 | -45,5520 |
| MI 8 | -9 | 5246,26 | 0,0018958 | -54,4440 |
| FA # 8 | -38 | 5792,34 | 0,0015283 | -56,3160 |

Tabla 6.

La tabla 6 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) de la nota fundamental do 5 y de sus diez primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 7) de la nota do 5.

7.4. Frecuencias del intervalo 4ª justa

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| ARMÓNICOS DE FA | ARMÓNICOS DE SI b | FRECUENCIAS (Hz) |
|-----------------|-------------------|------------------|
| FA 4 | | 350,82 |
| | SI B 4 | 468,28 |
| FA 5 | | 701,63 |
| | SI b 5 | 936,57 |
| DO 6 | | 1051,26 |
| FA 6 | FA 6 | 1403,26 |
| LA 6 | | 1768 |
| | SI b 6 | 1873,13 |
| DO 7 | | 2102,52 |
| | RE 7 | 2360 |
| MI b 7 | | 2649,01 |
| FA 7 | FA 7 | 2806,52 |
| SOL 7 | | 3150,22 |
| | LA b 7 | 3337,54 |
| LA 7 | | 3536 |
| | SI B 7 | 3746,26 |
| SI 7 | | 3969,03 |
| DO 8 | DO 8 | 4205,03 |
| RE b 8 | | 4455,08 |
| | RE 8 | 4719,99 |
| MI b 8 | | 5000,66 |
| MI 8 | MI 8 | 5298,01 |
| FA 8 | FA 8 | 5613,05 |
| SOL b 8 | SOL b 8 | 5946,82 |
| SOL 8 | | 6300,44 |
| LA b 8 | LA B 8 | 6675,08 |
| LA 8 | LA 8 | 7072 |
| | SI b 8 | 7938,05 |

Tabla 7.

- Espectrograma:

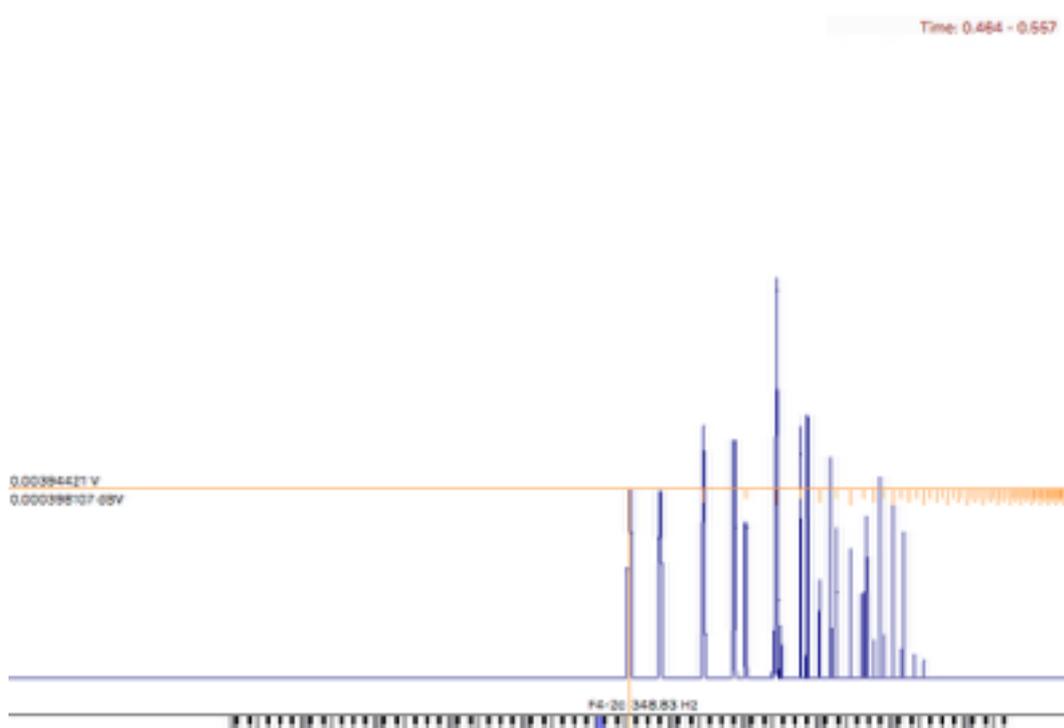


Imagen 8: Espectrograma del intervalo de 4ª justa.

La imagen 8 muestra el espectrograma del acorde de cuarta justa, formado por las notas fa 4 y si b 4. El procedimiento de obtención de datos es el mismo que el de la imagen 5 anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 8 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la primera nota del acorde, siendo en este caso la nota fa 4 y la frecuencia exacta de dicha nota ($F4 = 348,83 \text{ Hz}$), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota fa 4 (0,00394421). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes once armónicos del acorde, cuyos datos aparecen en la tabla 8 .

En la imagen 8, correspondiente al intervalo de 4ª justa, destaca la nota fa 6 (dos octavas por encima de la nota fundamental del acorde) con una intensidad de -25,68 dB.

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos 4ª justa - segundo 0,464 - 0,557

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| FA 4 | -2 | 348,83 | 0,0039442 | -48,0808 |
| SI b 4 | +12 | 469,49 | 0,0038214 | -48,3556 |
| FA 5 | -2 | 697,66 | 0,0085610 | -41,3495 |
| SI b 5 | +12 | 938,98 | 0,0070811 | -42,9980 |
| DO 6 | +5 | 1049,63 | 0,0026144 | -51,6525 |
| FA 6 | -2 | 1395,31 | 0,0519464 | -25,6889 |
| LA 6 | -16 | 1743,53 | 0,0085610 | -41,3495 |
| SI b 6 | +12 | 1877,95 | 0,0097157 | -40,2505 |
| DO 7 | +5 | 2099,24 | 0,0013036 | -57,6970 |
| RE 7 | -2 | 2346,62 | 0,0058570 | -44,6465 |
| MI b 7 | -16 | 2465,72 | 0,0024541 | -52,2020 |
| FA 7 | -2 | 2790,61 | 0,0019055 | -54,4000 |

Tabla 8.

La tabla 8 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) del acorde de cuarta justa formado por las notas fa 4 y si b 4, y de sus once primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 8) de dicho acorde.

7.5. Frecuencias del intervalo 5ª justa

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| ARMÓNICOS DE FA | ARMÓNICOS DE DO | FRECUENCIAS (Hz) |
|-----------------|-----------------|------------------|
| FA 4 | | 350,82 |
| | DO 5 | 525,63 |
| FA 5 | | 701,63 |
| DO 6 | DO 6 | 1051,26 |
| FA 6 | | 1403,26 |
| | SOL 6 | 1575,11 |
| LA 6 | | 1768 |
| DO 7 | DO 7 | 2102,52 |
| MI b 7 | | 2649,01 |
| | MI 7 | 2649,01 |
| FA 7 | | 2806,52 |
| SOL 7 | SOL 7 | 3150,22 |
| LA 7 | | 3536 |
| | SI b 7 | 3746,26 |
| SI 7 | | 3969,03 |
| DO 8 | DO 8 | 4205,03 |
| RE b 8 | | 4455,08 |
| | RE 8 | 4719,99 |
| MI b 8 | | 5000,66 |
| MI 8 | MI 8 | 5298,01 |
| FA 8 | | 5613,05 |
| SOL b 8 | FA # 8 | 5946,82 |
| SOL 8 | SOL 8 | 6300,44 |
| LA b 8 | LA b 8 | 6675,08 |
| LA 8 | | 7072 |
| | SI b 8 | 7492,52 |
| SI 8 | SI 8 | 7938,05 |
| DO 9 | DO 9 | 8410,06 |

Tabla 9.

- Espectrograma:

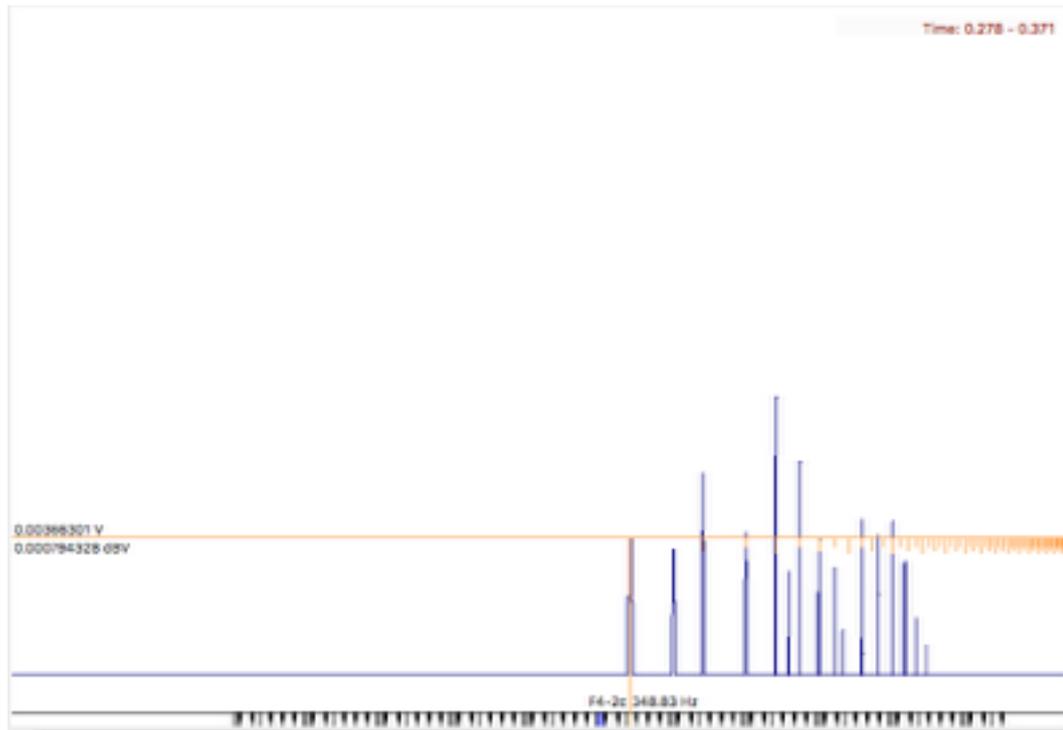


Imagen 9: Espectrograma del intervalo de 5ª justa.

La imagen 9 muestra el espectrograma del acorde de quinta justa, formado por las notas fa 4 y do 5. El procedimiento de obtención de datos es el mismo que el de la imagen 5 anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 9 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la primera nota del acorde, siendo en este caso la nota fa 4 y la frecuencia exacta de dicha nota ($F4 = 348,83 \text{ Hz}$), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota fa 4 (0,00366301). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes doce armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 10 .

En la imagen 9, correspondiente al espectrograma del intervalo de 5ª justa, destaca la nota fa 6 (dos octavas por encima de la nota fundamental del acorde) con una intensidad de -24,94 dB.

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos 5ª justa - segundo 0,278 - 0,371

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| FA 4 | -2 | 348,83 | 0,0036630 | -48,7232 |
| DO 5 | +5 | 524,82 | 0,0032172 | -49,8505 |
| FA 5 | -2 | 697,66 | 0,0076425 | -42,3353 |
| DO 6 | +5 | 1049,63 | 0,0038805 | -48,2222 |
| FA 6 | -2 | 1395,31 | 0,0178948 | -34,9455 |
| SOL 6 | +12 | 1579,16 | 0,0025543 | -51,8546 |
| LA 6 | -16 | 1743,53 | 0,0085770 | -41,3333 |
| DO 7 | +5 | 2099,24 | 0,0036106 | -48,8485 |
| MI b 7 | -38 | 2435,39 | 0,0026672 | -51,4788 |
| MI 7 | -9 | 2623,14 | 0,0012970 | -57,7414 |
| SOL 7 | +12 | 3158,31 | 0,0045476 | -46,8445 |
| SI b 7 | -9 | 3709,67 | 0,0038250 | -48,3475 |
| DO 8 | +5 | 4198,47 | 0,0043550 | -47,2202 |

Tabla 10.

La tabla 10 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) del acorde de quinta justa formado por las notas fa 4 y do 5, y de sus doce primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 9) de dicho acorde.

Resaltar de la tabla 10 que el mi b 7 está 213,62 Hz (-38 c) por debajo de la frecuencia real de dicha nota.

7.6. Frecuencias de Fa 5

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| NOTA | FRECUENCIA (Hz) |
|--------|-----------------|
| FA 5 | 701,63 |
| FA 6 | 1403,26 |
| DO 7 | 2102,52 |
| FA 7 | 2806,52 |
| LA 7 | 3536 |
| DO 8 | 4205,03 |
| MI b 8 | 5000,66 |
| FA 8 | 5613,05 |
| SOL 8 | 6300,44 |
| LA 8 | 7072 |
| SI 8 | 7938,05 |
| DO 9 | 8410,06 |
| RE b 9 | 8910,16 |
| MI b 9 | 10001,32 |
| MI 9 | 10596,02 |
| FA 9 | 11226,1 |

Tabla 11.

- Espectrograma:

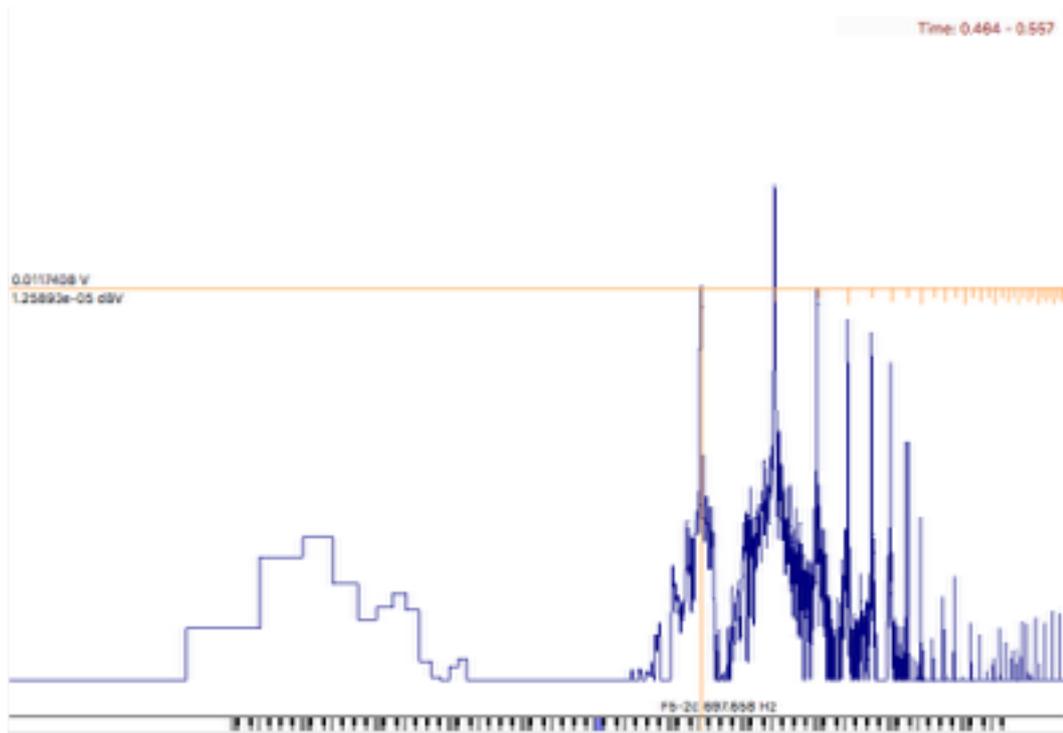


Imagen 10: Espectrograma de fa 5.

La imagen 10 muestra el espectrograma de la nota fa 5. El procedimiento de obtención de datos es el mismo que el de la imagen 5 anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 10 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la nota fa 5 (F5) y la frecuencia exacta de dicha nota ($F5 = 697,658$), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota fa 5 ($0,0117408$ V). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes diez armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 11.

En la imagen 10 destaca la intensidad del segundo armónico, correspondiente a la nota fa 6 (una octava ascendente de la nota fundamental) con una intensidad de $-23,1636$ dB.

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos fa 5 - segundo 0,464 - 0,557

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| FA 5 | -2 | 697,66 | 0,0117408 | -38,6060 |
| FA 6 | -2 | 1395,31 | 0,0694733 | -23,1636 |
| DO 7 | +5 | 2099,24 | 0,0109648 | -39,2000 |
| FA 7 | -2 | 2790,61 | 0,0067939 | -43,3576 |
| LA 7 | -16 | 3487,05 | 0,0056615 | -44,9414 |
| DO 8 | +5 | 4198,47 | 0,0032761 | -49,6929 |
| MI b 8 | -38 | 4870,76 | 0,0008157 | -61,7697 |
| FA 8 | -2 | 5581,20 | 0,0002225 | -73,0545 |
| SOL 8 | -9 | 6238,89 | 0,0000255 | -91,8626 |
| LA 8 | -16 | 6974,07 | 0,0000529 | -85,5273 |
| SI 8 | -45 | 7700,00 | 0,0000780 | -82,1616 |

Tabla 12.

La tabla 12 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) de la nota fa 5, y de sus diez primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 10) de dicha nota.

7.7. Frecuencias de si b 5

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| NOTA | FRECUENCIA (Hz) |
|---------|-----------------|
| SI b 5 | 936,57 |
| SI b 6 | 1873,13 |
| FA 7 | 2806,52 |
| SI b 7 | 3746,26 |
| RE 8 | 4719,99 |
| FA 8 | 5613,05 |
| LA b 8 | 6675,08 |
| SI b 8 | 7492,52 |
| DO 9 | 8410,06 |
| RE 9 | 9439,98 |
| MI 9 | 10596,02 |
| FA 9 | 11226,1 |
| SOL b 9 | 11893,64 |
| LA b 9 | 13350,16 |
| LA 9 | 14144 |
| SI b 9 | 14985,04 |

Tabla 13.

- Espectrograma:

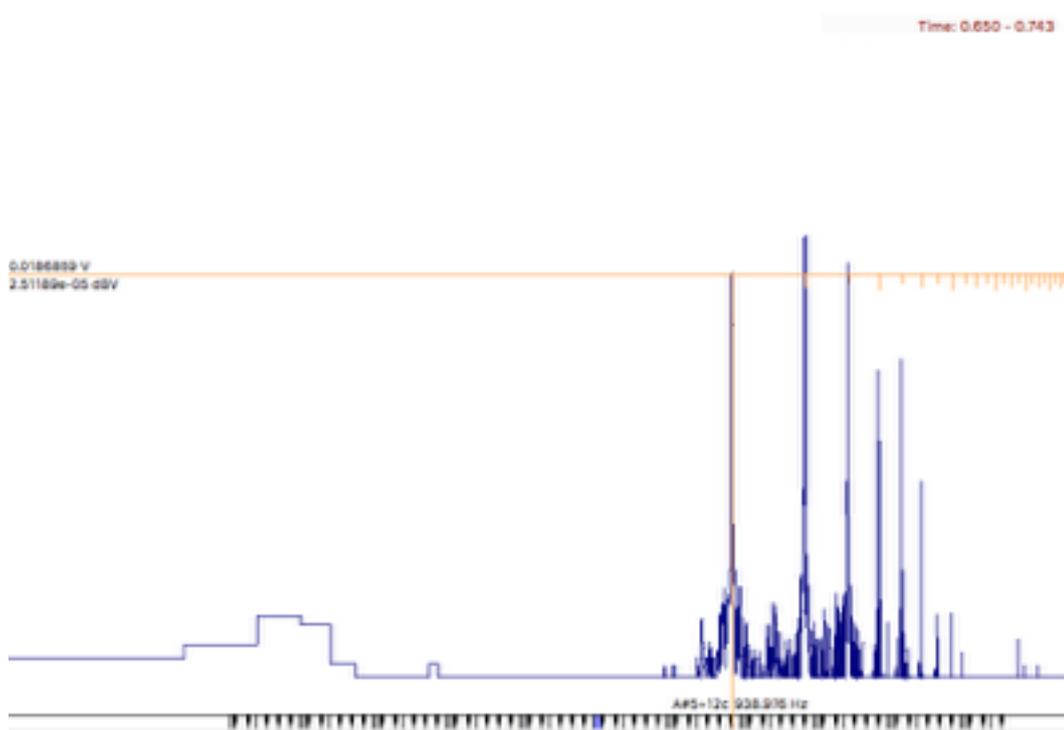


Imagen 11: Espectrograma de si b 5.

La imagen 11 muestra el espectrograma de la nota si b 5. El procedimiento de obtención de datos es el mismo que el de la imagen 5 anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 11 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la nota si b 5⁶ y la frecuencia exacta de dicha nota (A#5 = 938,976 Hz), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota si b 5 (0,0186859 V). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes ocho armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 14.

En la imagen 11, correspondiente a la nota si b 5, destacan la nota fundamental y sus dos primeros armónicos en cuanto a intensidad se refiere. A diferencia con el análisis de la misma nota, pero una octava más baja (si b 4) se

⁶ Las notas la sostenido (A #) y si b (B b) son equivalentes.

observa que en el caso de la segunda octava no destaca una nota sola, en cuanto a intensidad se refiere.

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos si b 5 - segundo 0,65 - 0,743

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|---------------|-----------------|----------------|-----------------|
| SI b 5 | +12 | 938,98 | 0,0186859 | -34,5697 |
| SI b 6 | +12 | 1877,95 | 0,0332985 | -29,5515 |
| FA 7 | +19 | 2825,37 | 0,0231443 | -32,7111 |
| SI b 7 | +12 | 3755,88 | 0,0038356 | -48,3232 |
| RE 8 | -2 | 4693,21 | 0,0046502 | -46,6505 |
| FA 8 | +19 | 5650,71 | 0,0006222 | -64,1212 |
| LA b 8 | -23 | 6555,55 | 0,0000702 | -83,0788 |
| SI b 8 | +12 | 7511,72 | 0,0000732 | -82,7071 |
| DO 9 | -16 | 8293,61 | 0,0000385 | -88,2828 |

Tabla 14.

La tabla 14 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) de la nota si b 5, y de sus ocho primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 11) de dicha nota.

7.8. Frecuencias de do 6

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| NOTA | FRECUENCIA (Hz) |
|--------|-----------------|
| DO 6 | 1051,26 |
| DO 7 | 2102,52 |
| SOL 7 | 3150,22 |
| DO 8 | 4205,03 |
| MI 8 | 5298,01 |
| SOL 8 | 6300,44 |
| SI b 8 | 7492,52 |
| DO 9 | 8410,06 |
| RE 9 | 9439,98 |
| MI 9 | 10596,02 |
| FA # 9 | 11893,64 |
| SOL 9 | 12600,88 |
| LA b 9 | 13350,16 |
| SI b 9 | 14985,04 |
| SI 9 | 15876,1 |
| DO 10 | 16820,12 |

Tabla 15.

- Espectrograma:

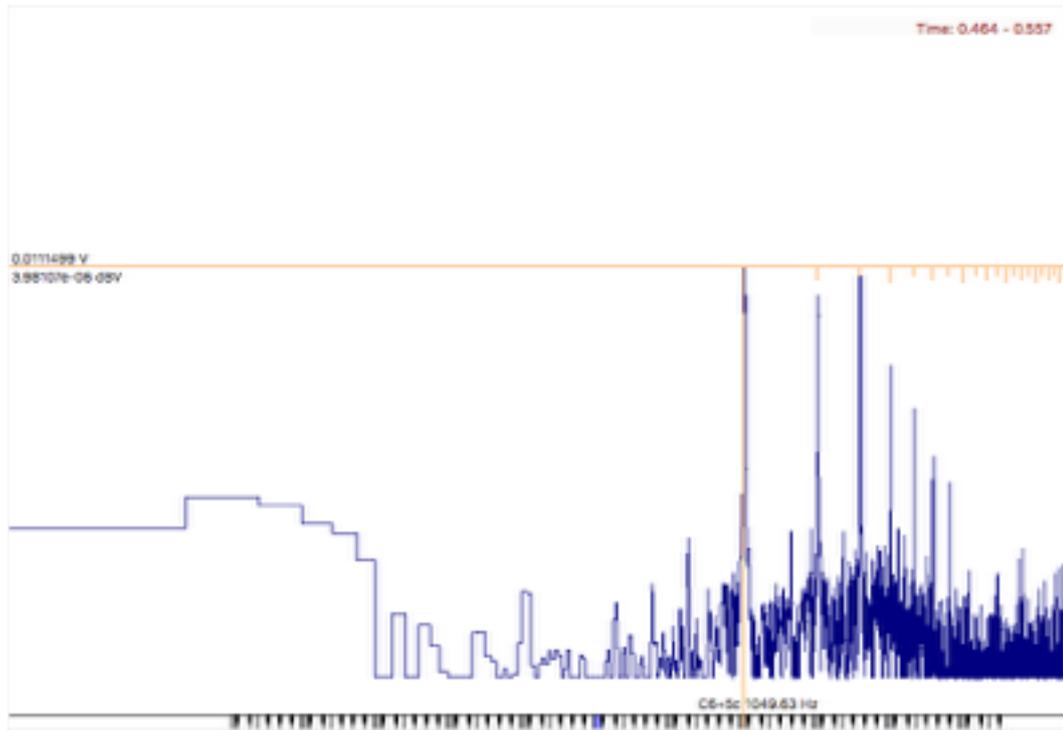


Imagen 12: Espectrograma de do 6.

La imagen 12 muestra el espectrograma de la nota do 6. El procedimiento de obtención de datos es el mismo que el de la imagen 5 anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 7 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la nota do 6 y la frecuencia exacta de dicha nota ($C6 = 1049,63 \text{ Hz}$), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota do 6 ($0,0111499 \text{ V}$). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes seis armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 16.

En la imagen 12, correspondiente a la nota do 6, destacan la nota fundamental y sus dos primeros armónicos, en cuanto a intensidad se refiere, correspondientes a las notas do 6, do 7 y sol 7. .

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos do 6 - segundo 0,464 - 0,557

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| DO 6 | +5 | 1049,63 | 0,0111499 | -39,0546 |
| DO 7 | +5 | 2099,24 | 0,0065793 | -43,6364 |
| SOL 7 | +12 | 3158,31 | 0,0093521 | -40,5818 |
| DO 8 | +5 | 4198,47 | 0,0016947 | -55,4182 |
| MI 8 | -9 | 5246,26 | 0,0007398 | -62,6182 |
| SOL 8 | +12 | 6316,59 | 0,0002920 | -70,6909 |
| SI b 8 | -9 | 7419,32 | 0,0001767 | -75,0545 |

Tabla 16.

La tabla 16 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) de la nota fundamental do 6 y de sus seis primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 12) de la nota do 6.

No es posible mostrar más armónicos de la nota do 6 debido a que tienen muy poca intensidad y a que no aparecen correctamente reflejadas las frecuencias en el espectrograma.

7.9. Frecuencias del intervalo 4ª justa. 2ª Octava.

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| ARMÓNICOS DE FA | ARMÓNICOS DE SI b | FRECUENCIAS (Hz) |
|-----------------|-------------------|------------------|
| FA 5 | | 701,63 |
| | SI B 5 | 936,57 |
| FA 6 | | 1403,26 |
| | SI b 6 | 1873,13 |
| DO 7 | | 2102,52 |
| FA 7 | FA 7 | 2806,52 |
| LA 7 | | 3536 |
| | SI b 7 | 3746,26 |
| DO 8 | | 4205,03 |
| | RE 8 | 4719,99 |
| MI b 8 | | 5000,66 |
| FA 8 | FA 8 | 5613,05 |
| SOL 8 | | 6300,44 |
| | LA b 8 | 6675,08 |
| LA 8 | | 7072 |
| | SI B 8 | 7492,52 |
| SI 8 | | 7938,05 |
| DO 9 | DO 9 | 8410,06 |
| RE b 9 | | 8910,16 |
| | RE 9 | 9439,98 |
| MI b 9 | | 10001,32 |
| MI 9 | MI 9 | 10596,02 |
| FA 9 | FA 9 | 11226,1 |
| SOL b 9 | SOL b 9 | 11893,64 |
| SOL 9 | | 12600,88 |
| LA b 9 | LA B 9 | 13350,16 |
| LA 9 | LA 9 | 14144 |
| | SI b 9 | 14985,04 |

Tabla 17.

- Espectrograma:

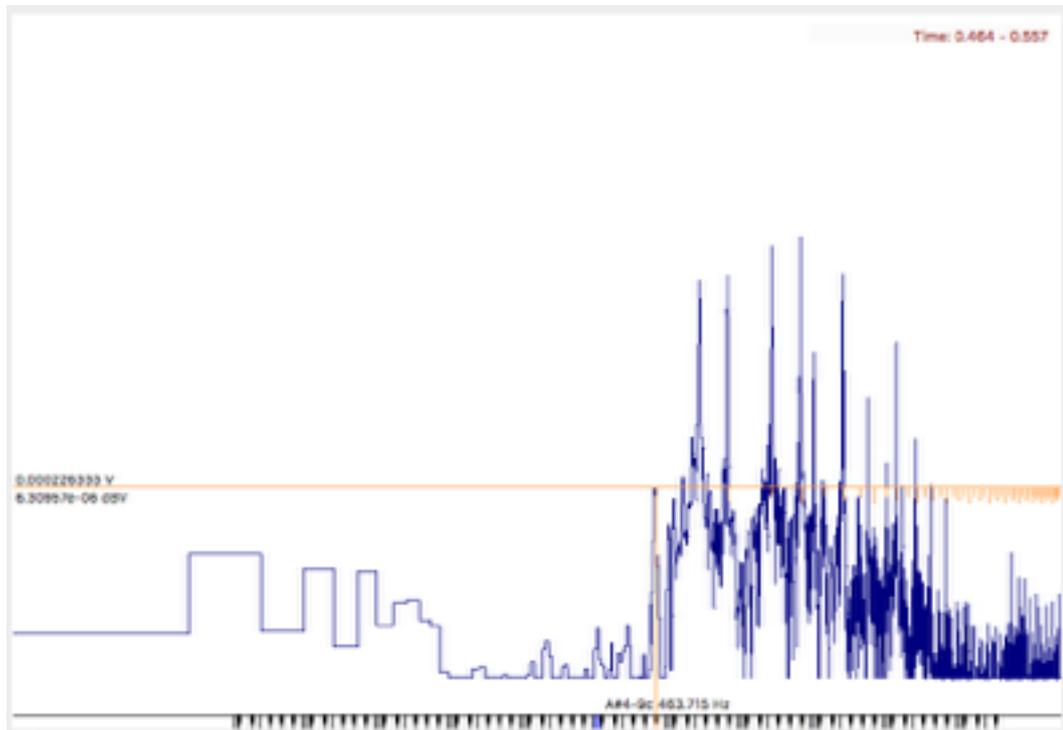


Imagen 13: Espectrograma del intervalo de 4ª justa en la segunda octava.

La imagen 13 muestra el espectrograma del intervalo de cuarta justa en la segunda octava del oboe, siendo la nota fundamental del acorde la nota fa 5. El procedimiento de obtención de datos de cada armónico es el mismo que el de la imagen 5, anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 13 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la nota si b 4 y la frecuencia exacta de dicha nota ($B\flat 4 = 463,715$), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia correspondientes a la nota si b 4 (0,000226333 V). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes once armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 18.

En la imagen 13, correspondiente al intervalo de cuarta justa en la segunda octava del oboe, destacan en cuanto a intensidad el segundo y tercer armónico de la nota fundamental del acorde (fa 6 y si b 6).

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos 4ª justa - segundo 0,464 - 0,557

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| SI b 4 | -9 | 463,72 | 0,0002263 | -72,9050 |
| FA 5 | -2 | 697,66 | 0,0097928 | -40,1818 |
| SI b 5 | -9 | 927,43 | 0,0125483 | -38,0283 |
| FA 6 | -2 | 1395,31 | 0,0218878 | -33,1960 |
| SI b 6 | -9 | 1854,84 | 0,0259261 | -31,7253 |
| DO 7 | +5 | 2099,24 | 0,0023645 | -52,5253 |
| FA 7 | -2 | 2790,61 | 0,0128556 | -37,8182 |
| LA 7 | -16 | 3487,05 | 0,0012607 | -57,9879 |
| SI b 7 | -9 | 3709,67 | 0,0002747 | -71,2243 |
| DO 8 | +5 | 4198,47 | 0,0003584 | -68,9131 |
| RE 8 | -23 | 4635,48 | 0,0034819 | -49,1636 |
| MI b 8 | -16 | 4931,42 | 0,0002376 | -72,4849 |
| FA 8 | -2 | 5581,20 | 0,0005814 | -64,7111 |
| | | | | |
| RE 7 | -2 | 2346,62 | 0,000672163 | -63,450,508 |

Tabla 18.

La tabla 18 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) del acorde de cuarta justa en la segunda octava del oboe, así como la información de sus once primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 13) del acorde de cuarta justa.

En la tabla 18 aparecen dos notas ajenas al acorde de cuarta justa, respecto a los armónicos esperados de la tabla 17. La nota si b 4 es una nota ajena al acorde y posee una frecuencia inferior a la nota fundamental del acorde. El armónico de re 7 no pertenece al acorde de cuarta justa en esa octava. Véase que sí que aparece en la tabla 17 como RE 8.

7.10. Frecuencias del intervalo 5ª justa. 2ª Octava.

- Tabla de frecuencias esperadas para una afinación de 442 Hz:

| ARMÓNICOS DE FA | ARMÓNICOS DE DO | FRECUENCIAS (Hz) |
|-----------------|-----------------|------------------|
| FA 5 | | 701,63 |
| | DO 6 | 1051,26 |
| FA 6 | | 1403,26 |
| DO 7 | DO 7 | 2102,52 |
| FA 7 | | 2806,52 |
| | SOL 7 | 3150,22 |
| LA 7 | | 3536 |
| DO 8 | DO 8 | 4205,03 |
| MI b 8 | | 5000,66 |
| | MI 8 | 5298,01 |
| FA 8 | | 5613,05 |
| SOL 8 | SOL 8 | 6300,44 |
| LA 8 | | 7072 |
| | SI b 8 | 7492,52 |
| SI 8 | | 7938,05 |
| DO 9 | DO 9 | 8410,06 |
| RE b 9 | | 8910,16 |
| | RE 9 | 9439,98 |
| MI b 9 | | 10001,32 |
| MI 9 | MI 9 | 10596,02 |
| FA 9 | | 11226,1 |
| SOL b 9 | FA # 9 | 11893,64 |
| SOL 9 | SOL 9 | 12600,88 |
| LA b 9 | LA b 9 | 13350,16 |
| LA 9 | | 14144 |
| | SI b 9 | 14985,04 |
| SI 9 | SI 9 | 15876,1 |
| DO 10 | DO 10 | 16820,12 |

Tabla 19.

- Espectrograma:

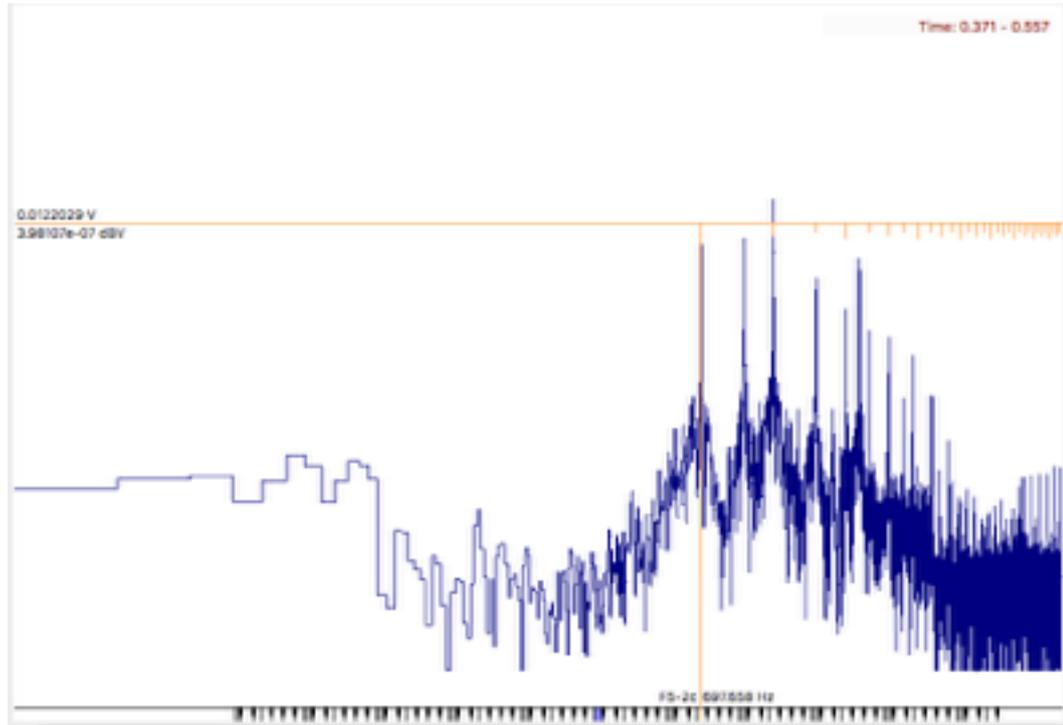


Imagen 14: Espectrograma del intervalo de 5ª justa en la segunda octava.

La imagen 14 muestra el espectrograma del intervalo de quinta justa en la segunda octava del oboe, siendo la nota fundamental del acorde la nota fa 5. El procedimiento de obtención de datos de cada armónico es el mismo que el de la imagen 5, anteriormente explicado.

La línea vertical amarilla de la imagen 14 muestra, a modo de ejemplo, el nombre de la nota fa 5 y la frecuencia exacta de dicha nota ($F5 = 697,658 \text{ Hz}$), mientras que la línea horizontal amarilla muestra el voltaje de la frecuencia fundamental (f_0) correspondientes a la nota fa 5 ($0,0122029 \text{ V}$). De este mismo modo se obtienen los valores de los siguientes doce armónicos, cuyos datos aparecen en la tabla 20.

- Datos obtenidos después de analizar la muestra de audio:

Armónicos 5ª justa - segundo 0,371 - 0,557

| NOTA | AFINACIÓN (c) | FRECUENCIA (Hz) | INTENSIDAD (V) | INTENSIDAD (dB) |
|--------|------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| FA 5 | -2 | 697,66 | 0,0122029 | -38,2707 |
| DO 6 | +5 | 1049,63 | 0,0087951 | -41,1152 |
| FA 6 | -2 | 1395,31 | 0,0208541 | -33,6162 |
| DO 7 | +5 | 2099,24 | 0,0034949 | -49,1313 |
| FA 7 | -2 | 2790,61 | 0,0016604 | -55,5960 |
| SOL 7 | +12 | 3158,31 | 0,0056273 | -44,9939 |
| LA 7 | -16 | 3487,05 | 0,0010312 | -59,7333 |
| DO 8 | +5 | 1498,47 | 0,0008625 | -61,2848 |
| MI b 8 | -38 | 4870,76 | 0,0002193 | -73,1798 |
| MI 8 | -9 | 5246,26 | 0,0006034 | -64,3879 |
| SOL 8 | +12 | 6316,59 | 0,0002193 | -73,1798 |
| SI b 8 | -9 | 7419,32 | 0,0000821 | -81,7131 |
| DO 9 | +5 | 8396,90 | 0,0000197 | -94,1252 |

Tabla 20.

La tabla 20 muestra la información obtenida de frecuencia (hercios) e intensidad (vatios y dB) del acorde de quinta justa en la segunda octava del oboe, así como la información de sus doce primeros armónicos después de realizar el espectrograma (imagen 14) del acorde de quinta justa.

Resaltar de la tabla 20 que el mi b 8 está 130, 06 Hz (-38 c) por debajo de la frecuencia real de dicha nota. La intensidad del último armónico de la tabla 20, do 9, es casi inexistente con respecto a los demás armónicos.

8. Conclusiones

- Las tablas con los armónicos teóricos esperados tienen dieciséis valores. Previo al estudio no se conocía si el experimento mostraría este número de armónicos al procesar los sonidos registrados con el programa informático.

Gracias a los medios de grabación y al equipo informático se han podido obtener, mediante el tratamiento de estas grabaciones, once armónicos en la mayoría de los casos.

Además, tal y como era de esperar, todos los armónicos analizados de estas grabaciones corresponden rigurosamente con las notas esperadas.

Los armónicos correspondientes a la nota DO 6 han creado dificultades para la comparación con las notas esperadas. La ausencia de algunos datos es debido a que no se han conseguido registrar las altas frecuencias de armónicos con la suficiente intensidad como para que el programa informático destaque los valores correspondientes a estos armónicos. Para intentar evitar estos problemas surgidos en el registro de los armónicos más agudos, puesto que también ocurre con la nota SI b 5, sería conveniente la emisión de estas notas con una mayor intensidad de sonido. Por todo esto, sólo se han podido obtener seis armónicos en el caso de DO 6 y nueve armónicos en el caso de SI b 5. Sin embargo, estas limitaciones no hacen que estos armónicos obtenidos de la nota DO 6 no se ajusten totalmente a los patrones obtenidos, y explicados detalladamente en el tercer punto de estas conclusiones.

- Después de observar el comportamiento armónico de todas las notas y acordes, se puede establecer un patrón claro en la afinación de los diferentes armónicos que dichos sonidos generan. Tal y como se observa en las tablas expuestas a continuación (tablas 21-30), las diferencias de afinación entre la nota teórica esperada y la obtenida del experimento son constantes, independientemente de la nota o notas emitidas que se analizan. Por ejemplo, el cuarto armónico de la nota FA 4, que es LA 6, está a 14 centésimas de semitono por debajo de la afinación teórica para la nota LA 6. Lo mismo que ocurre con el cuarto

armónico de SI b 4 que es la nota RE 7, que está también a 14 centésimas de semitono por debajo de la afinación teórica para la nota RE 7.

Esto mismo se cumple para otras octavas, o incluso para acordes (esta conclusión se obtiene del estudio de los acordes objeto del experimento de cuarta y quinta justa); donde a pesar de sonar dos sonidos simultáneamente, se identifican los armónicos de una y otra nota manteniendo la diferencia de afinación, respecto de la teórica esperada, que tenían sus notas fundamentales emitidas individualmente.

- Todas las diferencias de afinación entre la nota teórica esperada y la nota obtenida del experimento, que se han comentado en el párrafo anterior, aparecen expuestas en las siguientes tablas. Se observa el riguroso patrón de diferencias de afinación, independientemente de las notas, para todo el espectro con la excepción de los armónicos a distancia de un tono ascendente o descendente de la nota fundamental, donde debido a la cercanía y disonancia entre el sonido fundamental y este armónico situado a distancia de tono, la afinación de este armónico difiere al cambiar de nota o de escala. Por tanto, son estos armónicos las únicas excepciones al patrón obtenido que evidencia la constante afinación de los diferentes armónicos para todos los sonidos.

En las siguientes tablas se muestran los patrones de las diferencias en centésimas de semitono de una nota, respecto a la afinación de la nota fundamental. Las notas que tienen la misma afinación en centésimas que la nota fundamental tienen una diferencia (c) con valor cero. Las demás diferencias (c) son el resultado de la suma o resta de centésimas de semitono de los armónicos producidos por una nota, respecto al valor de las centésimas de la nota fundamental. Todas las notas contienen los mismos valores de diferencia de centésimas, a excepción de las notas a distancia de tono ascendente y descendente, respecto a la nota que genera los armónicos correspondientes al sexto y al octavo armónico. Por ejemplo, en la nota FA varían las notas MI b y SOL.

FA 4

| NOTA | DIFERENCIA (c) |
|--------|----------------|
| FA 5 | 0 |
| DO 6 | +7 |
| FA 6 | 0 |
| LA 6 | -14 |
| DO 7 | +7 |
| MI b 7 | -14 |
| FA 7 | 0 |
| SOL 7 | +14 |
| LA 7 | -14 |
| SI 7 | -43 |

Tabla 21.

FA 5

| NOTA | DIFERENCIA (c) |
|--------|----------------|
| FA 6 | 0 |
| DO 7 | +7 |
| FA 7 | 0 |
| LA 7 | -14 |
| DO 8 | +7 |
| MI b 8 | -36 |
| FA 8 | 0 |
| SOL 8 | -7 |
| LA 8 | -14 |
| SI 8 | -43 |

Tabla 22.

SI b 4

| NOTA | DIFERENCIA (c) |
|--------|----------------|
| SI b 5 | 0 |
| FA 6 | +7 |
| SI b 6 | 0 |
| RE 7 | -14 |
| FA 7 | +7 |
| LA b 7 | -35 |
| SI b 7 | 0 |
| DO 8 | +7 |
| RE 8 | -14 |
| MI 8 | -43 |

Tabla 23.

SI b 5

| NOTA | DIFERENCIA (c) |
|--------|----------------|
| SI b 6 | 0 |
| FA 7 | +7 |
| SI b 7 | 0 |
| RE 8 | -14 |
| FA 8 | +7 |
| LA b 8 | -35 |
| SI b 8 | 0 |
| DO 9 | -28 |
| RE 9 | -14 |
| MI 9 | -43 |

Tabla 24.

DO 5

| NOTA | DIFERENCIA (c) |
|--------|----------------|
| DO 6 | 0 |
| SOL 6 | +7 |
| DO 7 | 0 |
| MI 7 | -14 |
| SOL 7 | +7 |
| SI b 7 | -36 |
| DO 8 | 0 |
| RE 8 | -7 |
| MI 8 | -14 |
| FA # 8 | -43 |

Tabla 25.

DO 6

| NOTA | DIFERENCIA (c) |
|--------|----------------|
| DO 7 | 0 |
| SOL 7 | +7 |
| DO 8 | 0 |
| MI 8 | -14 |
| SOL 8 | +7 |
| SI b 8 | -9 |

Tabla 26.

4ª JUSTA - 1ª OCTAVA

| NOTA | DIFERENCIA RESPECTO A | DIFERENCIA RESPECTO A |
|--------|--------------------------|--------------------------|
| | FA (c) | SI b (c) |
| FA 5 | 0 | |
| SI b 5 | | 0 |
| DO 6 | +7 | |
| FA 6 | 0 | |
| LA 6 | -14 | |
| SI b 6 | | 0 |
| DO 7 | +7 | |
| RE 7 | -14 | |
| MI b 7 | -14 | |
| FA 7 | 0 | |

Tabla 27.

4ª JUSTA - 2ª OCTAVA

| NOTA | DIFERENCIA | DIFERENCIA |
|--------|----------------------|------------------------|
| | RESPECTO A FA (c) | RESPECTO A SI b (c) |
| FA 6 | 0 | |
| SI b 6 | | 0 |
| DO 7 | +7 | |
| FA 7 | 0 | |
| LA 7 | -14 | |
| SI b 7 | | 0 |
| DO 8 | +7 | |
| RE 8 | -14 | |
| MI b 8 | -14 | |
| FA 8 | 0 | |

Tabla 28.

5ª JUSTA - 1ª OCTAVA

| NOTA | DIFERENCIA | DIFERENCIA |
|--------|----------------------|----------------------|
| | RESPECTO A FA (c) | RESPECTO A DO (c) |
| FA 5 | 0 | |
| DO 6 | | 0 |
| FA 6 | 0 | |
| SOL 6 | | +7 |
| LA 6 | -14 | |
| DO 7 | | 0 |
| MI b 7 | -36 | |
| MI 7 | | -14 |
| SOL 7 | +14 | |
| SI b 7 | | -14 |
| DO 8 | +7 | |

Tabla 29.

5^a JUSTA - 2^a OCTAVA

| NOTA | DIFERENCIA RESPECTO A FA (c) | DIFERENCIA RESPECTO A DO (c) |
|--------|------------------------------------|------------------------------------|
| FA 6 | 0 | |
| DO 7 | | 0 |
| FA 7 | 0 | |
| SOL 7 | | +7 |
| LA 7 | -14 | |
| DO 8 | | 0 |
| MI b 8 | -36 | |
| MI 8 | | -14 |
| SOL 8 | +14 | |
| SI b 8 | | -14 |
| DO 9 | +7 | |

Tabla 30.

- En la mayoría de los casos, tanto en notas aisladas como en acordes, ocurre que la nota que teóricamente se debe percibir con más intensidad no corresponde a la nota fundamental que se está tocando, o a una de las notas fundamentales de un acorde. La nota que más intensidad tiene suele ser un armónico de la nota fundamental, aunque el oído humano perciba la nota real.

Este fenómeno ocurre también con el fenómeno de la fundamental perdida. Es decir, que generando los armónicos de una nota y omitiendo la nota fundamental, el oído humano percibe la nota fundamental aun sin estar físicamente presente debido a la disposición de los armónicos. Esto se debe a que, aunque cada nota o acorde genere una serie de armónicos como se ha observado en este estudio, el oído humano no percibe toda la serie armónica con sus diferentes intensidades y frecuencias de cada armónico, sino que percibe el conjunto de los mismos agrupado en una nota o un acorde. Por tanto, aunque en

la mayoría de casos se potencia la nota FA 6, el oído humano percibe la nota fundamental con más intensidad, aunque acústicamente no sea así.

- En el intervalo de 4ª justa, en la segunda octava, aparece una nota extraña al acorde, SI b 4, cuya frecuencia corresponde a una octava inferior de la nota fundamental del acorde de 4ª justa SI b 5. Se considera que es una nota resultante de las notas FA 5 y SI b 5, es decir, una nota ajena al acorde que aparece al restar las dos frecuencias de las notas del acorde de cuarta justa (frecuencia 1 - frecuencia 2 = nota resultante) (Geller, 2004).

Teóricamente debería salir la nota SI b 3 como resultado de la resta de frecuencias, pero debido a su baja intensidad y a la posible limitación del programa utilizado, se obtiene como resultado el primer armónico de dicha nota, SI b 3, correspondiente a la nota SI b 4 con una intensidad de -72,9 dB.

- En la tabla 18, correspondiente al acorde de cuarta justa en la primera octava del oboe aparece una nota extraña al acorde, re 7, que no aparece en la tabla 17 de frecuencias esperadas. Es necesario analizar todos los acordes de cuarta justa, para poder llegar a una conclusión fidedigna del origen de esta nota extraña, para ver si aparece de manera casual en este acorde debido posiblemente al choque de los armónicos de fa 5 y si b 5.

Esta nota no aparece en el acorde de cuarta justa en la primera octava del oboe, debido a que contienen unas frecuencias de más baja intensidad.

- Después de observar todas las frecuencias esperadas y los datos obtenidos del estudio, se concluye que hay una anulación de tres sonidos en los intervalos de quinta justa tanto en la primera como en la segunda octava. No aparecen los armónicos FA 7 y 8, LA 7 y 8, y SI 7 y 8, correspondientes a la nota fundamental del acorde: FA. Esto es debido a que hay ocasiones en las que las ondas sufren interferencias destructivas cuando dos frentes de onda tienen fase opuesta y los picos de uno se restan con los valles del otro y viceversa, si tienen la misma amplitud de onda, y la onda desaparece.

En base a estos resultados obtenidos con el experimento, se podría aprovechar esta línea de investigación como base a futuros experimentos del comportamiento acústico del oboe en los diferentes intervalos, incluso establecer un experimento paralelo para diferentes instrumentos donde se aprovecharía la metodología y otros muchos aspectos de este estudio.

Sería interesante establecer experimentos paralelos como por ejemplo el estudio de todos los intervalos en las diferentes octavas del oboe, así como el estudio del comportamiento acústico en los multifónicos del oboe (obtención de varios sonidos simultáneos, por medio de digitaciones especiales en un instrumento monofónico). También sería interesante la comparativa entre el comportamiento armónico del oboe con los instrumentos de la misma familia (viento madera), o con instrumentos que funcionen juntos a la hora de realizar acordes orquestalmente, o en música de cámara.

Dada la importancia de estos fenómenos acústicos en la percepción auditiva, sería conveniente desarrollar un estudio paralelo psicoacústico, para conseguir unos resultados globales, además de la realización de un estudio sobre el efecto de la fundamental perdida, explicada anteriormente, para observar qué percibe el oído humano realmente. También sería conveniente realizar un estudio paralelo sobre la percepción de notas resultantes de un acorde, a diferencia de dos octavas de diferencia del acorde real, para elaborar un método de estudio de afinación basado en la escucha de notas ajenas al acorde.

Lo más destacable del estudio es la utilidad para el músico de la demostración acústica de este experimento, para que el músico comprenda todo lo que está sucediendo cuando ejecuta cada acorde. Este entendimiento de los fenómenos acústicos del instrumento, serán la base para la educación y mejora de la afinación tanto en el estudio de manera individual, como en conjunto instrumental.

9. Bibliografía

Acústica Musical: Instrumentos de viento. Principios de funcionamiento. Proyecto para la asignatura : Ingeniería de las Ondas I. ETS. Ing. de Telecomunicaciones. Valladolid, 2005-2006. [En línea]. Recuperado de: <https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io2/public_html/viento/principios_viento.html>. [Fecha de consulta: 20 julio de 2016].

ALMEIDA, André, Christophe VERGEZ, René CAUSSÉ, y Xavier RODET. (2002, diciembre). *Physical study of double-reed instruments for application to sound-synthesis*. International Symposium on Musical Acoustics. México. [En línea]. Recuperado de: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01161426/document>>. [Fecha de consulta: 22 de marzo de 2016].

ALMEIDA, André, Christophe VERGEZ, René CAUSSÉ, y Xavier RODET. (2003, agosto 6-9). *Experimental research on double reed physical properties*. Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference. Estocolmo, Suecia. [En línea]. Recuperado de: <<http://articles.ircam.fr/textes/Almeida03a/index.pdf>>. [Fecha de consulta: 22 de marzo de 2016].

ALMEIDA, André, Christophe VERGEZ, René CAUSSÉ, y Xavier RODET. (2007). *Experimental Investigation of Reed Instrument Function Through Image Analysis of Reed Opening*. Acta Acustica United with Acustica 89, pp. 645 - 658.

ANDO, S., & YAMAGUCHI, K. (1993). *Statistical study of spectral parameters in musical instrument tones*. The Journal of the Acoustical Society of America, 94(1), 37–45. [En línea]. Recuperado de: <<http://scitation.aip.org/docserver/fulltext/asa/journal/jasa/94/1/1.407048.pdf?expires=1458065370&id=id&acname=2115567&checksum=3062FBD2BA5A6FD14C648872AB8218E7>>. [Fecha de consulta: 15 de marzo de 2016].

AGULLÓ, J. y Barjau, A. (1990). On the excitation mechanism in reed wind instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* 87 (S1), S137.

ALMEIDA, A, Vergez, C.y Caussé, R. (2007). Quasistatic nonlinear characteristics of double-reed instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* 121 (1), pp. 536-546.

ARTLEY, J. (1968). *How to Make Double Reeds*. Old Greenwich: Jack Spratt.

BACKUS, John. (1961). Vibrations of the reed and the air column in the clarinet. *Journal of the Acoustical Society of America*.

BACKUS, John. (1947). Input Impedance Curves for Reed Instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* 55 (2), pp. 457.

BACKUS, John. (1985). The effect of the player's vocal tract on woodwind instrument tone. *J. Acoust. Soc. Am.* 78 (1), pp. 17-20.

BARJAU, A., y J. Agulló. (1989). *Calculation of the starting transients of a double-reed conical woodwind*. *Acustica*.

BENADE, A. H. (1990). *Fundamentals of Musical Acoustics*. Second edition. Nueva York: Dover publications.

BENADE, A. H. y J. M. (1974). Gebler. Reed Cavity and Neck Proportions in Conical Woodwinds. *J. Acoust. Soc. Am.*, 55 (2), pp. 458.

BEUCHAMP, J. W. (1999). A comparison of wind instrument time-variant spectra. *J. Acoust. Soc. Am.* 105 (2), pp. 938.

BLASCO, Carolina. Estudio acústico del rebajado de las lengüetas del oboe. *Revista de Acústica*. Vol. 42. Nos 3 y 4. [En línea]. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/45609/acusticarevista_VOL42-34_04.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

BLASCO, Carolina. (2012). *Influencias en la percepción sonora y en la interpretación del rebajado de la lengüeta del oboe*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Pp: 12-16, 42-47, 74-21, 111.

DALMONT, J. P., J. Gilbert y S. Ollivier. (2003). Nonlinear characteristics of single-reed instruments: Quasistatic volume flow and reed opening measurements. *J. Acoust. Soc. Am.*, 114 (4), pp. 2253-2262.

ERONEN, Antti. (2001, octubre 21-24). *Comparison of features for musical instrument recognition*. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics Signal Processing Laboratory. New Paltz, Nueva York.

FARNER, S., Ch. Vergez, J. Kergomard y A. Lizée. (2005). Contribution to harmonic balance calculations of self-sustained periodic oscillations with focus on single-reed instruments. *J. Acoust. Soc. Am.* 119 (3), pp. 1794-1804.

FLETCHER, Neville. (1999). Materials for musical instruments. *Acoustics Australia*. 6-vol. 27, nº1, pp. 2-3. [En línea]. Recuperado de: <<https://newt.phys.unsw.edu.au/music/people/publications/Fletcher1999.pdf>>.

FLETCHER, N. y Rossind, T. D. (1998). *The Physics of Musical Instruments*. Nueva York: Springer-Verlag.

GELLER, Doris. (2004). *Tratado práctico de entonación para instrumentistas y cantantes*. Barcelona: Idea Books, S.A.

GILBERT, J. (1991). *Etude des Instruments de Musique à Anche Simple: Extension de la Méthode d'Equilibrage, Harmonique, Rôle de l'Inharmonicité des Résonances, Mesure des grandeurs d'Enrée*. PhD thesis, Univ. du Maine.

GOKHSHEIN, A. Ya.(1979). *Self-vibration of finite amplitude in a tube with a reed*. Sovietic Physics Doklady, Vol. 24, pp. 739.

GOLDSTEIN, J.L. (1970). Aural combination tones. *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing*. R. Plomp y G.F. Smoorenburg, eds. A. W. Suithoff, Leiden. 230.

HAINES, D. (1979). On musical instrument wood. *Catgut Acoustical Society Newsletter*. Nº 1, pp. 23–32.

KEEFE, Douglas H. (1982). *Acoustic streaming, dimensional analysis of nonlinearities and tone hole mutual interactions in woodwinds*. Department of Physics, Case Western Reserve University. Cleveland. [En línea]. Recuperado de: <<http://scitation.aip.org/docserver/fulltext/asa/journal/jasa/73/5/1.389404.pdf?expires=1459206112&id=id&acname=2115567&checksum=AA08905A7EA3FA2C5FCED91FD3E46E93>>. [Fecha de consulta: 20 de marzo de 2016].

KEEFE, Douglas H. (1981). *Woodwind Tone Hole Acoustics and the Spectrum Transformation Function*. PhD. Dissertation. Case Western Reserve University.

LUCE, D. A. (1963). *Physical Correlates of Non-percussive Musical Instrument Tones*. PhD thesis. [En línea]. Recuperado de: <http://iie.fing.edu.uy/~elopez/biblio/bibliografia/libros/audio/audio_processing_techniques/beauchamp-Analysis_Synthesis_and_Perception_of_Musical_Sounds.pdf>. [Fecha de consulta: 13 de febrero de 2016].

MILAR, Kendall. *FAST FOURIER TRANSFORM ANALYSIS OF OBOES, OBOE REEDS AND OBOISTS: WHAT MATTERS MOST TO TIMBRE?* Tesis. [En línea]. Recuperado de: <<https://ida.mtholyoke.edu/xmlui/bitstream/handle/10166/715/257.pdf?sequence=1>>.

MIYARA, Federico. (2003). *Introducción a la acústica*. Publicación interna de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, U. N. R. Rosario (Arg.). Pp. 1-10. [En línea]. Recuperado de: < <http://sistemamid.com/>

panel/uploads/biblioteca/2014-06-28_11-21-58106009.pdf>. [Consultado en: 28 de marzo de 2016].

NEDERVEEN, C. J. (1998). *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*. Revised edition. Northern Illinois University Press. DeKalb. [En línea]. Recuperado de: <<http://www.csounds.com/jmc/Articles/Woodwinds/Csound%20Woodwinds.htm>>.

PFIESTER, Nicole. (2008). *Sound Production Analysis of the Oboe*. [En línea] Tesis. Indiana: Purdue University. [En línea]. Recuperado de: <https://courses.physics.illinois.edu/phys193/NSF_REU_Reports/2008_reu/Nicole_Pfiester_Oboe_Analysis/Sound_Production_Analysis_of_a_Double_Reed_Instrument.pdf>. Fecha de consulta: 30 de noviembre de 2015].

PRASAD, M. G., Pattabiraman, J. y Rao, B. V. A. (1975). On acoustic near field measurements. *Journal of Sound and Vibration*. 40(3), pp. 415-423.

PREZELJ, J., Lipar, P., Belšak, A. y Čudina, M. (2013). On acoustic very near field measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 40(1), pp. 194-207. doi:10.1016/j.ymssp.2013.05.008.

PRODAN, J.C. (1977). The Effect of the Intonation of the Crow of the Reed on the Tone Quality of the oboe. *Journal of the International Double Reed Society*, 5.

RECUERO López, M., Rodríguez Rodríguez, A. J., Vaquero Fernández, M., Gil González, C., Tabernero Gil, F. e Instituto Oficial de Radio y Televisión. (1992). *Técnicas de grabación sonora*. Madrid: IORTV.

ROEDERER, Juan. (1997). *Acústica y Psicoacústica de la Música*. Ricordi.

ROMERO, J., Alba J. y Ramis, J. (2006). Estudio preliminar del comportamiento de cañas de oboe. *Procedente del 37^a Congreso Nacional de Acústica TechnAcustica*. Gandia: Universidad Politécnica de Valencia.

SHIMIZU Michiko, Toshikatsu NAOI, y Tohru IDOGAWA (1989). *Vibrations of the reed and the air column in the bassoon*. Journal of the Acoustical Society of Japan.

SMITH, J. O. (2011). *Spectral audio signal processing*. Estados Unidos: W3K. [En línea]. Recuperado de: <<http://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/>>.

VERGEZ, Christophe. (2000). *Trompette et Trompettiste: un Système Dynamique Non-linéaire à Analyser, Modéliser et Simuler dans un Contexte Musical*. PhD thesis. Universidad de Paris.

WEGST, Ulrike G. K. (2006). Wood for sound. *American Journal of Botany*, 93 (10), pp. 1439-1448. [En línea]. Recuperado de: <<http://www.amjbot.org/content/93/10/1439.full.pdf+html>>. [Fecha de consulta: 01 de marzo de 2016].

10. ANEXO I

- Serie armónica de fa :

F F 5 F 3 5 17 F 2 3 #4 5 16 17 7 F

- Serie armónica de si b:

F F 5 F 3 5 17 F 2 3 #4 5 16 17 7 F

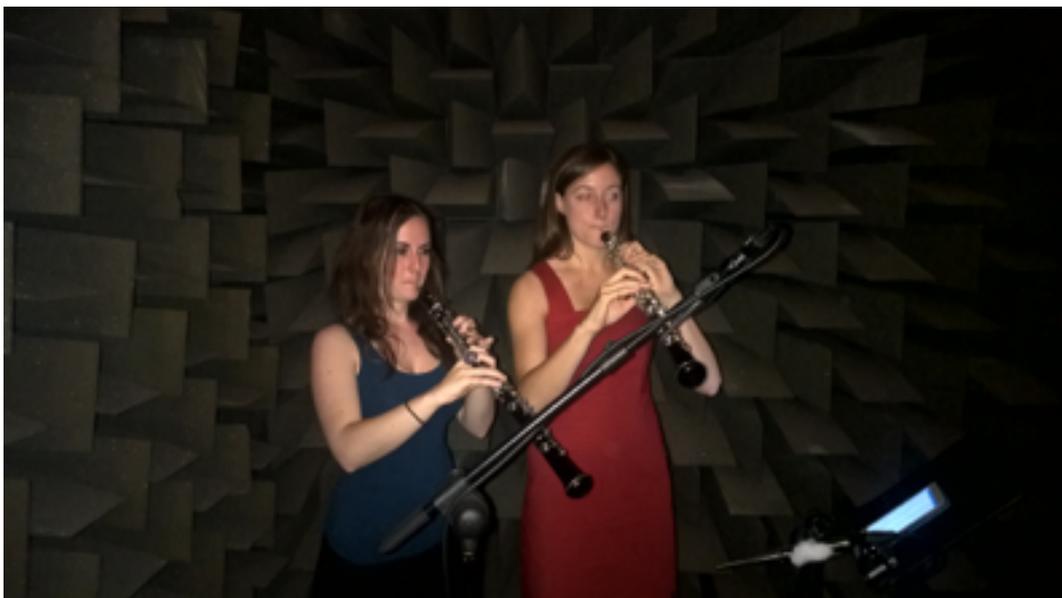
- Serie armónica de do:

F F 5 F 3 5 17 F 2 3 #4 5 16 17 7 F

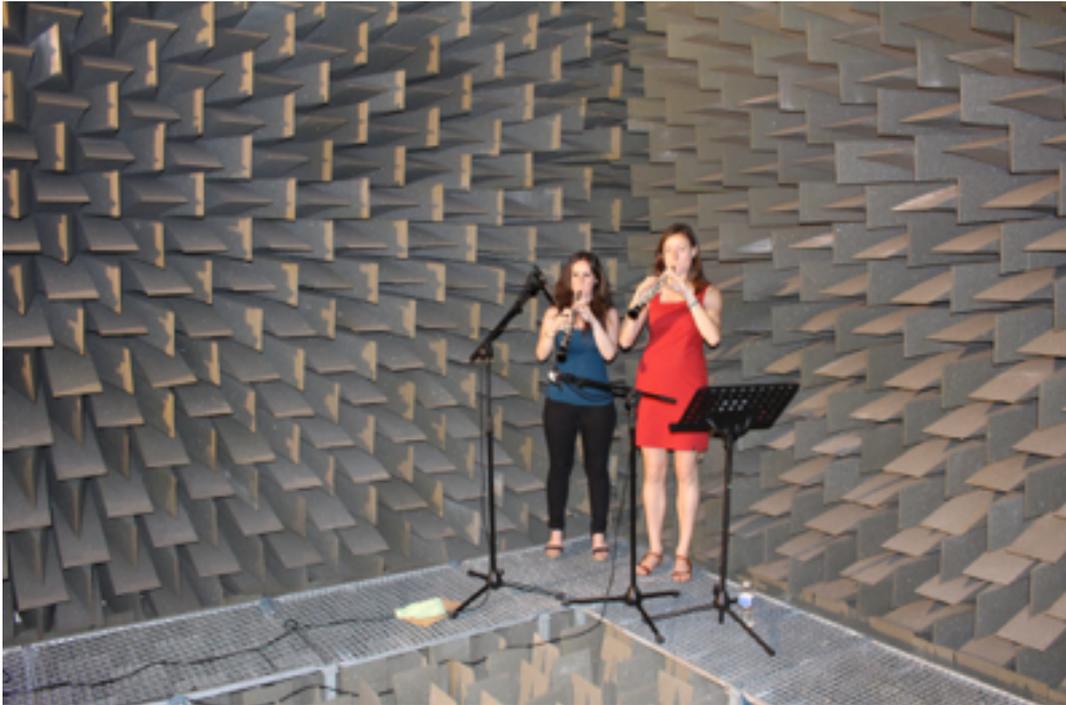
11. ANEXO II



Fotografía 1: Grabación de un oboe en la cámara anecoica.



Fotografía 2: Grabación de dos oboes en la cámara anecoica.



Fotografía 3: Imagen de la cámara anecoica durante la grabación.

