



Universidad Internacional de La Rioja

MÁSTER OFICIAL EN INVESTIGACIÓN MUSICAL

Análisis de los elementos armónicos y tímbricos de la familia de la Tuba en contexto de la variación de la intensidad sonora

Trabajo fin de máster
presentado por:

Pablo Guerrero Martín

Directora:

Edith Alonso Sánchez

Resumen

Los instrumentos de viento metal poseen cualidades únicas en su formación del sonido que convierten sus timbres en uno de los más extensos y ricos de la orquesta sinfónica. En su familia más grave, la tuba muestra una versatilidad tímbrica extraordinaria desde el sonido más oscuro y puro, casi desprovisto de armónicos, hasta las sonoridades más brillantes, llegando a contener armónicos complejos que a menudo se identifican con sonidos estridentes. Estas terminologías organológicas: oscuridad, brillantez, proyección, etc; se reseñarán y refundirán bajo un marco teórico sustentado en la acústica y organología, realizando un diseño cuasi experimental acerca de la variación del timbre y los armónicos conformantes del sonido de la familia de la tuba en el dominio de la intensidad sonora. Los resultados aportan un espectro armónico progresivo donde podemos observar la complejidad del sonido de la tuba y su familia, llegando a tener dentro de sus conformantes del sonido elementos que no siguen una serie armónica uniforme y se configuran en interválicas complejas. Estos armónicos son característica de la brillantez y estridencia de los instrumentos de viento metal en sus sonidos potentes.

Palabras Clave: Tuba, Acústica, Armónicos, Análisis espectrográfico.

Abstract

Brass wind instruments have unique qualities in their sound formation that turn their sounds and timbres into one of the most extensive and riches of the Symphony Orchestra. In the Low Brass section, Tuba family show this extraordinary timbre versatility from the darkest and pure almost sinusoidal sound, almost lacking of harmonics, to the brightest sounds, reaching to contain complex harmonics. These organological terminologies; darkness, brilliance, projection, etc. will be reviewed and recast under an acoustics and organology conceptual framework. Through a cuasi-experimental design based on spectrographic analysis will show the variation of the timbre with reliance to the sound intensity and the use of different instrumental techniques. The results provide a unique progressive harmonic spectrum where we can observe the complexity of the sound of the tuba and its family, displaying within its sound conformers, elements that do not follow a uniform harmonic series and are configured in complex intervals. These non-proportional harmonics are characteristic of the brilliance and raucous of brass wind instruments in powerful dynamics contexts.

Keywords: Tuba, Acoustics, Harmonics, Spectrographic Analysis.

Índice

Resumen	2
Abstract	3
1. Introducción.....	6
Justificación y problema	7
Objetivos generales y específicos	8
Objetivos específicos	8
2. Marco Teórico.....	9
Ondas en tubos sonoros	10
La serie armónica en los instrumentos de viento metal.....	12
La sección cónica	14
El diámetro del tubo y la boquilla	17
Ondas de presión	18
El concepto de impedancia de entrada y su relación con la centritud del sonido	20
La afinación en los instrumentos de viento metal	21
La caracterización del timbre en los instrumentos de viento metal.....	23
3. Marco Metodológico	26
Hipótesis de investigación	27
Diseño de investigación	28
Variables medidas e instrumentos aplicados.....	29
Procedimientos	30
Plan de análisis de datos	33

4. Resultados	36
Caracterización del timbre de la Tuba	36
Diferencias entre los ejecutantes	37
Variación del timbre en el dominio de la intensidad sonora	39
5. Discusión y conclusiones.....	44
Limitaciones.....	44
Prospectiva.....	47
6. Bibliografía	49
Anexo 1: Partituras y ejemplos utilizados en los ejercicios.	53
Anexo 2: Espectros y espectrogramas en gran formato.....	58

1. Introducción

La acústica y organología de la música tienen su expresión práctica en la vida del intérprete en el desarrollo de la técnica instrumental, desde la iniciación musical, la ergonomía y coordinación motriz hasta el desarrollo de técnicas específicas, examinando y acogiendo los aspectos expresivos, técnicos y, en ocasiones, físico-acústicos derivados del análisis performativo y fenomenológico de la interpretación musical. Sin embargo, específicamente hablando de aspectos acústicos a menudo no se encuentran puentes de unión entre el vocabulario y las expresiones técnicas de unas y otras disciplinas.

Este hecho es especialmente evidenciado en los instrumentos de viento metal de la orquesta sinfónica. Sus usos y disposiciones han sido y son ampliamente diversificados en el repertorio orquestal y sus timbres han sido objeto de innumerables y perspicaces citas, gran parte de ellas reflejando y satirizando la importancia del balance dinámico y la intensidad.

La potencia dinámica completa del viento metal es una fuerza imperiosa que puede obliterar el sonido del resto de la orquesta, y a menudo es consentido por directores que carecen de autoridad o discriminación auditiva. El límite en sonoridad y peso sonoro de la cuerda y el viento madera es un hecho físico. Forzarlos a competir con el metal simplemente da como resultado un fondo de sonidos desagradables, quedando aún lejos del liderazgo sonoro de los metales.¹ (Piston 1955, p. 203)

En este trabajo se reseñaran los estudios acústicos más relevantes que describen a los instrumentos de viento metal –centrándose en la familia de la tuba– trasladando y explicando terminologías organológicas, expresivas y estéticas relativas al timbre, tales como oscuridad, brillantez, proyección y armónicos para a través de un diseño experimental observar la

¹ (Traducción Propia) [“The full dynamic power of the brass is a dominating force capable of obliterating the sound of the rest of the orchestra, and it is often allowed to do so by conductors lacking either authority or discrimination. The limit of loudness and tone-weight of strings and woodwinds is a physical fact. Forcing them to compete with the brass simply results in disagreeable sounds, with the brass still far in the lead”] (Piston 1955, p. 203)

influencia y variación del timbre en la familia instrumental de la Tuba: tuba tenor , tuba baja y tuba contrabajo, según los factores de dinámica como elemento principal, construcción del instrumento –afinación transpositiva en do o en si bemol– y orden armónico del tono –el lugar que ocupa dentro de la serie armónica constructiva natural de todos los instrumentos de viento metal– como elementos secundarios.

Justificación y problema

El contexto divulgativo de la acústica y organología son y han sido elementos poco inquiridos, confusos y a menudo ignorados por intérpretes, musicólogas y musicólogos y, en general, por el contexto de la música académica. Parece ser una materia inerte y reservada a los aspectos y estudios de la ingeniería y el mecanizado y lutería de instrumentos, encontrando incluso en estos campos grandes casos de tradicionalismo e imitación de modelos históricos, avivando una falta de interés por la conexión entre la acústica y la organología, y la interpretación musical.

El presente trabajo de Fin de Master, de la especialidad de Investigación Musical perseguirá la reseña, síntesis y fundamentación de un accesible pero completo marco teórico acústico que nos permita analizar mediante un proceso de investigación basado en el análisis espectrográfico de situaciones de interpretación y ejercicios técnicos las similitudes y diferencias que puedan significar y argumentar los elementos definatorios del sonido de la familia de la Tuba, abordando del mismo modo las cualidades del sonido en base a criterios interpretativos, con arreglo, argumentación y demostración en valores, tablas y gráficas.

Las finalidades de la investigación son por un lado la reseña y revisión bibliográfica acerca de las características sonoras y tímbricas de la familia de la tuba con un especial interés en los aspectos básicos de la acústica y organología y su translación a elementos técnicos e interpretativos, significando una guía útil, despojada de los elementos más complejos de la física experimental a favor de una conceptualización y marco teórico más cercano a la organología musical y la musicología fenomenológica interpretativa bajo un soporte matemático y lógico conciso y simplificado, basado en investigaciones y análisis de modelos

experimentales y marco teórico en que se fundamentan el diseño, objetivos, hipótesis y conclusiones que comprenden este trabajo de investigación.

En un segundo estadio, el proceso de investigación analizará diferentes contextos interpretativos, interpretados por diferentes instrumentos de la familia y diferentes ejecutantes, siguiendo el modelo y sistema de investigación descrito en el epígrafe 5: Diseño e Investigación. Esto significará la puesta en valores discretos y relacionados de los elementos reseñados en el primer estadio, estudiando específicamente el impacto en el sonido de la tuba y en sus características tímbricas establecidas en el continuo de la intensidad sonora, de modo que se pueda observar la citada evolución del timbre desde la cuasi onda sinusoidal hasta la progresiva aparición de los armónicos complejos propios de la estridencia y potencia del viento metal.

Objetivos generales y específicos

Los objetivos planteados en el siguiente Trabajo Fin de Máster son los siguientes, observándose un orden desde los objetivos principales a los específicos.

- I. Evidenciar a través de elementos métricos del análisis espectral armónico; intensidad, frecuencia, relación armónica, la variación tímbrica del sonido de los instrumentos de la familia de la tuba causada por cambios en la intensidad sonora.
- II. Observar y comparar la influencia de elementos técnicos del instrumento en el fenómeno anterior; conicidad, armónicos principales y secundarios en los elementos acústicos estudiados y su alteración tímbrica reflejada en el espectro armónico.

Objetivos específicos

- a) Dotar de una base acústica a la terminología organológica, interpretativa y técnica de la familia instrumental de la tuba valorando sus características y diferencias que explican la coexistencia de diferentes transposiciones: tuba en Si bemol, tubas en Do, tubas en Mi bemol y tubas en Fa.

- b) Evidenciar métricamente la versatilidad de los timbres de la familia instrumental de la tuba mostrando y comparando sus características en continuo y paralelidad con otros instrumentos musicales.

2. Marco Teórico

Los instrumentos de viento metal son una de las familias instrumentales más primitivas y su devenir histórico ha sido muy heterogéneo y confuso entre otros elementos e instrumentos. Los primeros instrumentos que anteceden a los instrumentos de viento metal fueron construidos con cuernos de animales, troncos vacíos de árboles y curtidos de piel. Sin embargo ya en el 1500 A.C, se encuentran los primeros instrumentos forjados en latón y cobre y otras aleaciones.

Sin embargo no hay que confundir el calificativo actual de viento metal con las cualidades principales que define al instrumento; del mismo modo que una flauta travesera o un saxofón tienen construcciones en latón y otros metales como plata u oro, existen numerosos antecedentes, prototipos y desarrollos actuales de instrumentos de viento metal en diferentes materiales no metálicos. Ejemplo de ello son los citados antecedentes históricos y las nuevas gamas de instrumentos construidos e impresos en materiales plásticos, los cuales abren las puertas a nuevos contextos con grandes avances en la adaptación de instrumentos, de especial interés en el ámbito educativo. Es pertinente pues preguntarnos ¿qué define acústicamente a los instrumentos de viento metal?

Acústicamente los instrumentos de viento metal se engloban dentro de los instrumentos musicales de columna de aire vibrante, o aerófonos, según la clasificación de Erich M. V. Hornbostel y Curt Sachs (1914). Esta clasificación de los instrumentos musicales es la más universalmente aceptada y nos permite además servirnos de herramientas de catalogación y relación entre otras disciplinas, ya que se engloba dentro de la Clasificación Decimal de Dewey (CDD).

Ondas en tubos sonoros

Dentro de los instrumentos aerófonos se diferencian dos grandes categorías acústicas: tubos con extremos abiertos –por ejemplo, flauta travesera– y tubos con un extremo cerrado y otro abierto –por ejemplo, clarinete–. En ambos tubos sonoros y debido a la reflexión natural de las ondas se producen ondas estacionarias teniendo un comportamiento similar a lo que sucede en las cuerdas.

Los instrumentos de viento metal no tienen dos extremos abiertos. Los labios del intérprete están en un extremo y es éste el momento de mayor vibración y excitación de la columna de aire vibrante (Fig. 1).

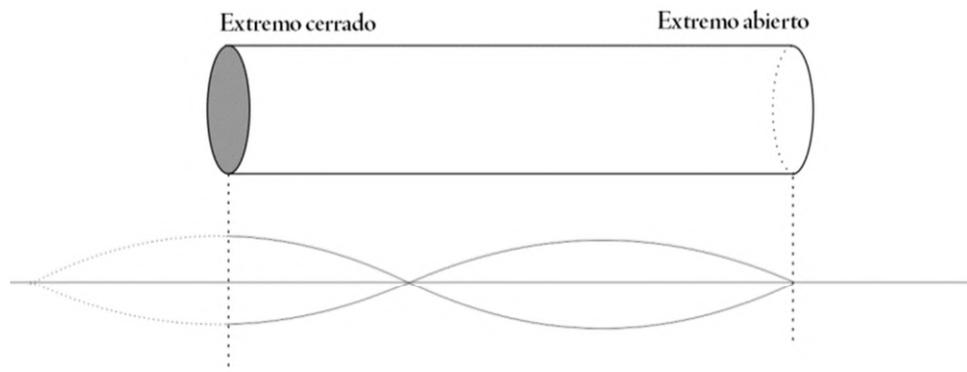


Figura 1: Onda estacionaria fundamental en tubo abierto

En su funcionamiento primario, un instrumento de viento metal tiene similitudes con los instrumentos de doble lengüeta, siendo esta doble lengüeta sucedida por los labios de la intérprete. La familia del *cornetto*² y los instrumentos de viento metal de llaves son ejemplos de antepasados comunes entre ambas familias.

² El **Cornetto** (Fr. cornet-à-bouquin; Ger. Zink; It. cornetto; Sp. Cornetto) es instrumento de viento metal construido en madera o cuero que produce su sonido con la vibración de los labios en una boquilla con forma de copa y la modificación de la columna de aire mediante orificios para los dedos. Se usó principalmente desde finales del siglo XV hasta finales del XVII, pero continuó en uso, principalmente por músicos callejeros, hasta finales del siglo XVIII y, en ocasiones, incluso hasta el XIX. La ortografía en inglés es generalmente "cornet", pero las variantes "cornett" y "cornetto" se han adoptado para evitar su confusión con la corneta de pistones moderna. (Baines, 2002)

Toda onda estacionaria genera un número de armónicos basados modos de vibración. (Kemp, 2002). Sin embargo las características de un tubo cilíndrico cerrado imposibilitan la creación de la serie armónica completa (Fig.2) ya que de esta tendremos que eliminar los armónicos que tienen un nodo en el extremo cerrado; armónicos pares (Pastor, 2009),

Estas frecuencias están en la relación 1: 3: 5: 7, etc., números impares de la serie armónica, o armónicos impares. Los armónicos pares (discontinuos y tachados en la Fig. 2) no cumplen las condiciones de un tubo cilíndrico cerrado en un extremo al comprender un nodo³ en este extremo. (Kemp, 2002)

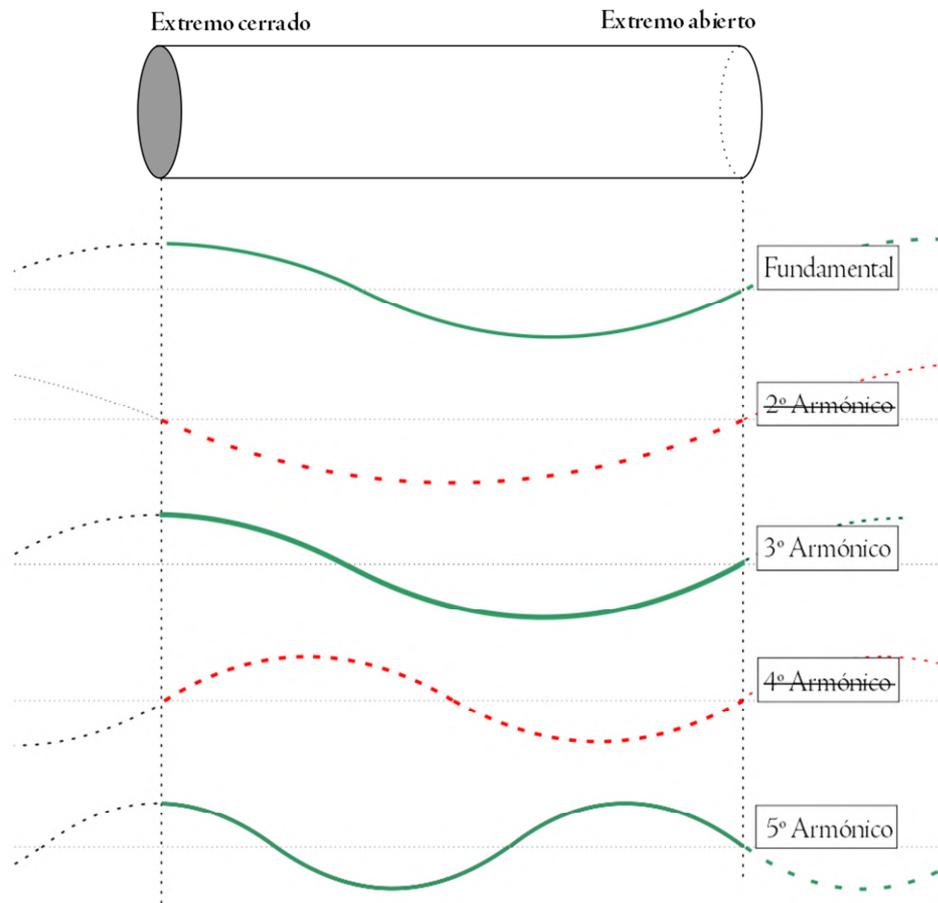


Figura 2 : Series armónicas de un tubo cerrado en un extremo

³ Se entiende como **nodo** todo punto de una onda estacionaria cuya amplitud es cero en cualquier momento.

Sin embargo los instrumentos de viento metal modernos contienen la serie armónica más completa de todos los instrumentos de la orquesta sinfónica y en este fenómeno físico-acústico basan gran parte de su técnica instrumental (Piston, 1955). Pero, ¿cómo consiguen los instrumentos de viento metal sonar convenientemente en la serie armónica que conocemos actualmente?

La serie armónica en los instrumentos de viento metal

Algunos antepasados de los instrumentos de viento metal y la familia instrumental de la Tuba como el citado, corneto, el serpentón (*Cornetto basso*) o el oficleido conservaron la forma cuasi cilíndrica y al igual que las familias de lengüetas simples y dobles, se sirvió de un sistema de orificios y más tarde llaves para modificar la longitud de la columna de aire (Fig. 3). Por ello al igual que un clarinete, estos instrumentos basaron su técnica instrumental en las combinaciones de orificios y llaves y no en su proyección de armónicos. Este sistema de orificios y llaves se conservó hasta bien entrado el siglo XIX no sin soportar numerosos problemas acaecidos por la falta de presión de aire en el instrumento, los cuales describe Héctor Berlioz en su tratado de orquestación de 1844.



Figura 3: Serpentón (ca.1780). Victoria and Albert National Museum of Art, Londres (Izquierda)
Oficleido (ca. 1838) Museum of Musical Instruments, Schloss Kremsegg, Austria (Derecha)

[...] El timbre de su registro grave es rudo y solo da buenos resultados, en algunos casos, en masas de instrumentos de viento-metal. Las notas sobreagudas tienen un carácter salvaje el cual, tal vez, todavía no se haya sabido explotar. El registro medio, sobre todo cuando el ejecutante no es muy hábil, recuerda demasiado a los sonidos del serpentón y del cornetto y creo que raramente haya que dejarlo al descubierto. Nada más grosero, yo diría incluso, nada más monstruoso y menos apto al armonizarse con el resto de la orquesta, que estos pasajes más o menos rápidos, escritos en forma de solos para el registro medio del oficleido en algunas óperas modernas: diríase un toro, el que habiendo escapado del establo, viene a satisfacer sus instintos en el medio de un salón. [...]

(Berlioz, 1855; traducido y citado por Entrena (2015))

Sin embargo el desarrollo de instrumentos de viento metal de lleves en forma de cilindro es una excepcionalidad histórica ya que las trompetas más antiguas que se conservan en la actualidad, encontradas en 1939 en la tumba de Tutankamon (Fig.4) ya muestran y se caracterizan por el elemento más importante de la sonoridad del viento metal y su acústica; la sección cónica final: el pabellón o campana.

Estas trompetas tienen una sonoridad muy cercana a los armónicos actuales de una trompeta en Fa y Si respectivamente pudiendo interpretar los tres primeros armónicos de la serie armónica natural. El 16 de abril de 1939, la emisora de radio estadounidense “BBC Radio 4” retransmitió en directo la demostración de estos sonidos; más tarde las trompetas se conservaron en el Museo Nacional de Egipto, en El Cairo, donde fueron robadas en 2011, pudiendo más tarde recuperarse una de ellas. (Nevine, 2011).



Figura 4: Trompetas de bronce, cobre y oro (Superior) y madera con campana de plata (Inferior) (I. E. S. Edwards, 1977)

Del mismo modo en la bibliografía histórica encontrarnos descripciones, ilustraciones e incluso comentarios técnicos, filosóficos y religiosos acerca de los instrumentos de viento metal, describiendo las trompetas de Tutankhamon, el Salpinx, el Cornu, la Buccina el Lituus y la Tuba romana en su forma, sus usos e incluso mostrando los accesorios y atributos que se observaban en los músicos de la época (Bowyer, 2016).

Una de las descripciones más antiguas sobre una trompeta la encontramos en los textos históricos de Tito Flavio Josefo (Jerusalén, c. 37-c. 100), donde se describe la *Asosra*, trompeta hebréa que aparece en los textos del Antiguo Testamento.

*"[...] fue además, Moisés el inventor de esta forma de trompeta, hecha de plata. En longitud era poco menos que un codo. Estaba compuesta por un tubo estrecho, algo más grueso que una flauta, con la amplitud suficiente para admitir el aire de la boca de un hombre, terminando en forma de campana"*⁴

(Whiston, 1906, citado por Bowyer, 2016)

La sección cónica

Al no ser un cilindro de diámetro uniforme –teniendo una o dos secciones cónicas, en la boquilla y la campana– gran parte de la columna de aire en los instrumentos de viento metal se desarrolla dentro de esta conicidad, teniendo estos ensanchamientos progresivos grandes efectos sobre la sonoridad y la formación de los armónicos. De este modo podemos desplazarnos desde la formación de armónicos impares hasta la serie armónica completa propia de los instrumentos de viento metal actuales.

El efecto de la conicidad del tubo sonoro es por tanto uno de los elementos necesarios de los instrumentos de viento metal y su descripción acústico-matemática ha generado numerosos ámbitos de estudio (Missoum, Vergez, & Doc, 2014; Moore, Gorman, Rokni, Kausel, & Chatziioannou, 2015; Rabenstein & Petrausch, 2008). El no poseer esta forma ha generado numerosas disertaciones donde se comprueban su inutilidad acústica, al no poseer la

⁴ Traducción Propia; texto original: "Moreover Moses was the inventor of the form of their trumpet, which was made of silver. Its description is this; in length it was little less than a cubit. It was composed of a narrow tube, somewhat thicker than a flute, and with so much breadth as was sufficient for admission of the breath of a man's mouth; it ended in the form of a bell, like the common trumpet. It was called in the Hebrew tongue *Asosra*" (Bowyer, 2016), p26-27.

serie armónica completa (Bertsch, 1998). Su descripción básica nos permite comprender por qué la serie armónica de los instrumentos de viento metal es una de las más evidentes y equilibradas de todos los instrumentos musicales, basándose su técnica instrumental en esta cualidad fundamental.

Consideremos primero la sección cónica principal, la campana o pabellón. Todos los instrumentos de viento metal la contienen y su forma es crucial. No es una sección cónica uniforme sin embargo puede ocupar progresivamente gran parte del instrumento. Si el tubo de un instrumento de viento metal fuera una sección cónica uniforme sería simplemente un megáfono y las ondas estacionarias en su interior se moverían directamente fuera de la campana; además al no producirse reflexión, no se crearían las ondas estacionarias. (Amgad, 2011).

Por otro lado si no existiera esta sección cónica estaríamos ante un modelo de tan solo armónicos impares como el observado anteriormente (Fig. 2.) De un modo similar a un tubo abierto por ambos extremos el efecto de la campana abocinada posibilita ondas estacionarias dentro de su longitud permitiendo que parte de la energía del sonido se desplace al aire libre. En los instrumentos de viento metal la mayor parte de la energía vibratoria está en forma de ondas estacionarias pero existen algunas "fugas" a través de la campana al aire libre.

Es por ello que la forma geométrica real no es un cono perfecto si no que es tiene un perfil de hiperboloide de revolución⁵; *“ello es motivo de que el frente de onda en la boca del tubo sea lo más amplia posible aumentando así la eficiencia acústica del instrumento”* (Merino de la Fuente, Jesús Mariano, 2010)

Según la figura a continuación (Fig.5), podemos observar como en longitudes de onda pequeñas, λ_1 , λ_2 , la longitud efectiva del tubo sonoro L_1 y L_2 es mayor que para longitudes de onda mayores, λ_3 y λ_4 , observándose en el caso de $\lambda_4 \approx L_4$ el sonido de frecuencia y nota más baja, fundamental del instrumento, llamado tono fundamental o tono pedal⁶

⁵ Un Hiperboloide de revolución es la figura generada por la rotación de una hipérbola alrededor de uno de sus dos ejes de simetría, su forma es similar a una sección cónica pero su contorno se aproxima a una asíntota teniendo equidistancia entre sus puntos extremos.

⁶ El nombre pedal es tomado frecuentemente en la técnica instrumental de viento metal. Proviene de la organología del órgano, donde los tubos sonoros de notas más graves se interpretan con un conjunto de pedales.

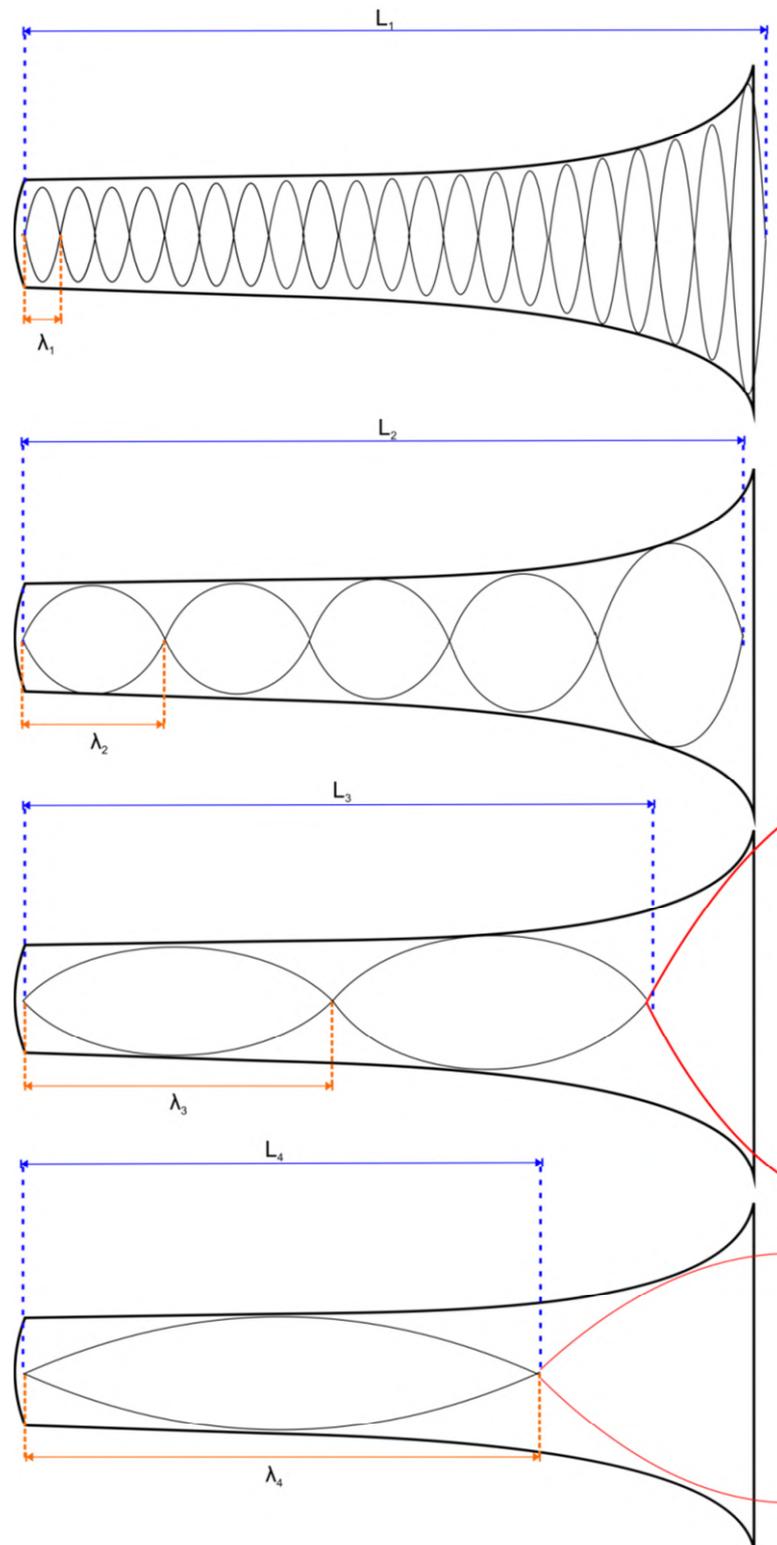


Figura 5: Distancias efectivas del tubo sonoro L_1, L_2, L_3, L_4 según longitudes de onda $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ y λ_4

⁶En la interpretación de instrumentos de viento metal como la trompeta se pueden producir sonidos por debajo de la frecuencia fundamental del instrumento y a menudo se les otorga el nombre de sonidos pedales; véase subepígrafe: Vibración e impedancia de entrada.

Del mismo modo, como veremos en el diseño experimental, el diseño de la campana permite que los armónicos superiores de notas graves y medias se irradien de manera especial con respecto a otros instrumentos. Esto hace que el sonido de la tuba y otros metales graves puedan tener especial intensidad acústica, ya que estos armónicos resonantes se encuentran en el ámbito de mayor sensibilidad acústica del ser humano; del mismo modo agrega al timbre del instrumento el característico “sonido metálico” (Martin, 1942).

No obstante, la radiación o propagación del sonido no se realiza únicamente por campana, sino que es también el cuerpo del tubo. En general, los sonidos graves se transmiten preferentemente por el cuerpo del tubo y las frecuencias altas por la campana tanto en forma de frecuencia fundamental como en forma de armónicos (LoPresto, 2014).

Esta es una razón fundamental de la aparición de armónicos complejos en la serie de los instrumentos de viento metal, cuya fundamentación acústica se pondrá en valores en el diseño experimental.

El diámetro del tubo y la boquilla

A nivel inicial, el diámetro del tubo sonoro, no influye en el desarrollo del sonido, si bien, la reflexión de la onda limita el mismo, ya que si el diámetro del tubo excede la longitud de onda esta no tendría una reflexión necesaria para la interacción en onda estacionaria (Fletcher, 2001). Por ello todos los instrumentos de viento metal tienen una sección inicial delgada, a menudo siendo más delgada que el propio cilindro del instrumento en la boquilla (Merino de la Fuente, Jesús Mariano, 2010; Woldendorp, Boschma, Boonstra, Arendzen, & Reneman, 2016).

Con la boquilla se consiguen varios efectos, el primero de ellos, el ergonómico permite acomodar los labios de la o el intérprete y permitir la conexión entre el instrumento y conjunto excitador: aire y labios. A menudo esta es su principal y más importante función y en ello se determina la calidad del conjunto instrumento e intérprete (Marcinkiewicz, 1999). La idoneidad de una u otra boquilla está determinada casi en exclusiva a cada intérprete, su sonido y su instrumento.

A nivel geométrico, la embocadura posee forma inversa a la campana, siendo un cono, embudo o más correctamente una sección hiperbólica inversa al mismo, –habiendo multitud

de formas—, siendo mucho más articulada y con una longitud mucho más reducida que ésta —dependiendo de la profundidad de la boquilla—. Su forma de embudo filtra algunas vibraciones agudas, y es según su tamaño y volumen de aire encapsulado cuando este efecto se hace más notorio (Yoshikawa, 1995). Esto es especialmente notorio en las boquillas de la trompa y la familia de la tuba ya que su profundidad y sección tienden a ser la más grande de todo el viento metal y con ello se filtran mayor cantidad de vibraciones agudas, consiguiendo un sonido más oscuro; aunque dependiendo de las escuelas interpretativas, los contextos, estilos y las épocas encontramos diferencias notorias en la forma de la boquilla (Norman, 2010).

Del mismo modo la boquilla puede ayudar en la creación de mayor presión sonora, ya que al contener un estrechamiento, contribuye a la creación del sonido aumentando la velocidad del flujo de aire (efecto venturi⁷), y con ello la densidad del mismo, contribuyendo a una mayor presión sonora (Elliott, 1979).

Ondas de presión

El movimiento del aire y su vibración dentro del instrumento genera una presión de aire que en conjunción con los propios modos de vibración de la columna de aire en el volumen del instrumento componen la producción del sonido. Es por ello que a las ondas estacionarias se les conoce también como ondas de presión ya que el fenómeno que crea el sonido es el resultado de la interacción en forma de variaciones de presión.

El modelo de estudio basado en ondas de presión (Fig.6) es considerado el más cercano a la realidad física de la vibración sonora, ya que la representación espacial bidimensional en forma de ondas (Fig.1) solo representa los valores de amplitud y frecuencia dejando de lado la forma y comportamiento de las ondas sonoras, que se acercan más a la oscilación del fluido (aire) en una sección de tubo cerrada.

⁷ El efecto Venturi consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor. El efecto Venturi se explica por el Principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. Si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección. (Elliott, 1979)

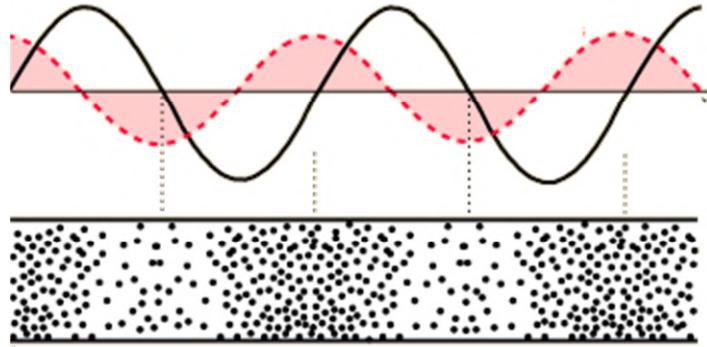


Figura 6: Expresión de onda estacionaria en forma de ondas de presión (Nave, 2011).

En la figura anterior podemos observar a partir de la expresión habitual de la onda longitudinal, la expresión inversa en la variación de la presión –en color rojo–. La translación a la interacción entre partículas de aire se observa en su mitad inferior donde podemos comprobar la mayor o menor concentración de partículas, expresándose la vibración como cambios de presión de las moléculas concentradas en el aire (Nave, 2011).

Existen varios modelos interactivos y multimedia que muestran con mayor precisión este modelo (Rusell, 2012), aunque el modelo experimental físico planteado en el Tubo de Kundt (Mazo, 2015) es quizá uno de los experimentos más ilustrativos al respecto. Se recomienda el visionado de estos videos⁸ para mayor ilustración (Vivar, 2014).

Uno de los pioneros en estos estudios, Bouhuys (1968) estudió el caso desde el punto de vista de tubos sonoros, tanto en instrumentos de viento madera como en viento metal. De sus estudios se extraen varias conclusiones:

- La presión sonora es directamente proporcional a la altura de la nota y es mayor en notas agudas que graves.
- Inversamente a la presión es la velocidad del aire y su caudal aumenta encontrándose un gasto de aire aproximadamente doble entre longitudes de vibración dobles.

⁸Vivar, Alejandro del Mazo. “Tubo De Kundt.” YouTube, 31 Dic. 2014, www.youtube.com/watch?v=3dKvGaZA5lQ.

Del mismo modo numerosos autores argumentan que existe una presión umbral requerida para que suene cualquier nota, y este umbral aumenta acérrimamente con la altura de la nota, llegando a ser particularmente elevado en la interpretación del registro agudo y sobreagudo (Pratt, Elliott, & Bowsheer, 1977; Poirson, Petiot, & Gilbert, 2005a; Macaluso & Dalmont, 2011). Estos umbrales de vibración y presión definen en gran medida la técnica y la interpretación de los instrumentos de viento metal en tanto la participación en torno a estos umbrales es requisito para conseguir un sonido estable, lleno y rico. Para dotar de disquisición a la existencia de estos umbrales se acuña el término impedancia de entrada.

El concepto de impedancia de entrada y su relación con la centritud del sonido

La impedancia de entrada se define como la relación de la presión del flujo y el volumen de la columna de aire. Cuando la frecuencia de la vibración de los labios y la presión de aire umbral cumplen los requisitos de estas resonancias se produce la interacción sonora; del mismo modo existe una retroalimentación que tiende a forzar a los labios a vibrar a esa frecuencia dando como resultado una onda estacionaria.

La retroalimentación de una tuba moderna es tan fuerte que es extremadamente difícil forzar a los labios a oscilar a cualquier frecuencia aparte de las resonancias propias de la columna de aire del instrumento. No obstante existe la capacidad en los labios del ejecutante la capacidad de transgredir estos límites, forzando los labios a vibrar a una frecuencia que no corresponde a una resonancia del instrumento⁹. Sin embargo la adecuación de la impedancia de entrada con la vibración de los labios es el fundamento de lo que se utilizará terminológicamente como la centritud del sonido (Yoshikawa, 1995).

Para decidir para qué frecuencias se cumplen las condiciones para una onda estacionaria sostenible para una tuba es necesario encontrar la impedancia de entrada acústica. La impedancia acústica, que se expresa normalmente con el símbolo Z , es la relación entre la presión acústica p y el volumétrico acústico U . Así definimos $Z = p/U$.

⁹ A esta técnica instrumental se le conoce con el término *bending*.

La impedancia a una frecuencia particular indica cuánta presión de sonido se necesita para generar la vibración del aire a esa frecuencia en un punto específico. Así nos habla de la acústica y rendimiento propios del instrumento de manera objetiva e independiente de quién podría tocarlo, y nos permite comparar diferencias sutiles entre instrumentos e intérpretes (Petiot, Poirson, & Gilbert, 2005).

Sin embargo organológica e interpretativamente el concepto de centritud del sonido tiene componentes de especial interés. Aun teniendo la producción vibrante y presión sonora producida el intérprete una correcta formación, e incluso afinación perfecta y estable, al relacionarse con la impedancia del instrumento, si éstas no se encajan, la producción del sonido no será plena y encontraremos que la resonancia en algunos puntos de la columna de aire y del cuerpo del instrumento no será plena. Acústicamente se observarán impactos importantes en la calidad del sonido del instrumento, habiendo variaciones notorias en los armónicos formantes del sonido. (Chen, Smith, & Wolfe, 2012).

La afinación en los instrumentos de viento metal

La impedancia de entrada de un instrumento de viento metal determinará en gran medida su afinación, ya que esta debe estar suficientemente coordinada con los labios del ejecutante, existiendo una cooperación necesaria para la producción del sonido (Barbenel, Kenny, & Davies, 1988; Yoshikawa, 1995). Esto establece unos umbrales de afinación objetiva centrados en la medida de la columna de aire del instrumento. En el contexto de la acústica y la tecnología instrumental los físicos Joël Gilbert y Jean-François Petiot (1998) y Lopes, N., Hélie, T., y Caussé, R. (2013) han publicado algunas investigaciones mostrando algunos sistemas basados en sistemas de emisión artificiales que imitan el comportamiento de los labios del intérprete, arrojando datos métricos de incalculable valor especialmente en el terreno de la “afinación objetiva” de las impedancias instrumentales.

Estos datos vuelven a aludir a una interacción umbral óptima¹⁰ y recurrir a los conceptos interpretativos de centritud del sonido (R. Edwards, 1978), sonido resonante

¹⁰ Interacción entre la impedancia de entrada y la vibración estimulante se encuentran en el umbral óptimo y en afinación coincidente, desarrollando una vibración uniforme.

(Fletcher & Tarnopolsky, 1999) o buen sonido (Chen et al., 2012) mostrando además que los instrumentos de viento metal poseen una afinación más cercana a la afinación justa que al temperamento igual (Chen, Smith, & Wolfe, 2014).

El temperamento igual¹¹ (Lindley, 2001a), adoptado por la mayoría de los instrumentos y aparatos de afinación actuales, especialmente en cuerda pulsada y percutida, se ha demostrado impreciso e inadecuado para la interpretación de los instrumentos de viento metal (Benade, 1973);(Chen et al., 2014). Los estudios de Elliott y Bowsher (1982), Kopiez (2003) y Flamingan (2008) arrojan datos de una relación estrecha entre la resonancia de los instrumentos de viento metal y su relación con la afinación justa o pura¹² (Lindley, 2001b). Una de los gráficos más orientativos de esta desviación se encuentra en los estudios de Geringer, Madsen, y Dunnigan (2001), indicándose la corrección de afinación que se produce con respecto a la afinación temperada especialmente en los intervalos de terceras y sextas. (Fig. 6).



Figura 6: Desviación de la afinación temperada con respecto a la emisión natural de una trompeta moderna

Sin embargo, la serie armónica objetiva, propia de la impedancia de un instrumento no es una afinación perfecta y por tanto su afinación es un elemento impreciso, encontrándose desviaciones de afinación en los diferentes registros del instrumento (Young, 1967). Esto se

¹¹ Temperamento que consiste en la división de la octava en torno a 12 semitonos iguales $^{12}\sqrt{2}$ (Lindley, 2001a)

¹² Afinación o afinaciones basadas en la racionalidad o relación matemática, evolucionadas desde Pitágoras hasta Euler. Se basa en las relaciones de $L/2$: Octava, $2L/3$: quinta, $3L/4$: cuarta y $4L/5$: Tercera. (Lindley, 2001b).

hace notable en los instrumentos de la familia grave, como la trompa, el trombón y especialmente, el bombardino y la tuba donde para lograr un correcto sonido afinado han de compensarse las longitudes de tubo ponderándose en los diferentes registros del instrumento.

Por ejemplo, una nota aguda de un instrumento de viento metal puede modularse un semitono descendente a través –normalmente– del segundo cilindro o un cambio de posición descendente en trombones. Sin embargo este cambio necesita menor longitud en el registro agudo que en el registro grave, existiendo para salvar este problema diferentes estrategias de afinación. En la tuba y el bombardino existen las siguientes maneras de compensación: el alargamiento de los tubos (donde el ejecutante manualmente corrige las longitudes a través de los tubos móviles de cada válvula), el uso de válvulas adicionales¹³ que añaden un trozo de tubo o accionan disparadores o *triggers*¹⁴ y el sistema de compensación¹⁵ (Bate & Tarr, 2001).

La caracterización del timbre en los instrumentos de viento metal

El timbre de los instrumentos de viento metal es uno de los más variados y plurivalentes de los instrumentos musicales (Adler & Hesterman, 1989) y por ello en su descripción se ha desarrollado evidente y variada bibliografía basada en la percepción y justificación de estas características.

Como se ha reseñado en el inicio del marco teórico los principales factores acústicos que determinan el timbre son los conformantes armónicos. Con el desarrollo del análisis acústico, y específicamente, los espectros y espectrogramas de señales grabadas, hemos asistido

¹³ En el caso de la Tuba existen numerosos modelos con hasta 6 válvulas mecanismos cuya configuración habitual es de: semitono (segunda válvula), tono (primera válvula), tono y medio (tercera válvula), dos tonos y medio (cuarta válvula), tono y un cuarto (quinta válvula), $\frac{3}{4}$ de tono (sexta válvula). Lo más común es tener 4 válvulas.

¹⁴ El *trigger* es un sistema de acción a distancia donde a través de un mecanismo *disparador* (en inglés, *trigger*) se amplía o reduce la longitud del instrumento, corrigiendo la impedancia y afinación en cada sección de su registro. Se recoge en el registro agudo y se amplía en el registro grave. Una de las primeras patentes que incorporan estos mecanismos son las patentes de P. Vito y G. Alvin (1964).

¹⁵ El *sistema de compensación*, en inglés, *compensation system*, es una variante de los sistemas de instrumentos de viento metal dobles. En la trompa doble (desarrollada por el lutier e inventor de instrumentos Walter Kruepe en 1867 y que continúa su sistema en la mayoría de trompas actuales), encontramos adaptados dos juegos de tubos para dos distintas afinaciones y registros, convirtiendo el instrumento en un instrumento en dos afinaciones y aumentando ampliamente su registro. En el sistema compensado se realiza una aportación complementaria a los tubos, sin tener que existir el juego doble completo, sino a través de un segmento de tubo que al añadirse al original, compensa la afinación. Este sistema fue desarrollado por D. Blaikley en 1874. (Bate & Tarr, 2001)

a un periodo esplendente y prolífico en lo que a la investigación del timbre y de la interpretación fenomenológica se refiere, suscitando nuevos ámbitos de estudio en la investigación interpretativa y, caso de este Trabajo Fin de Naster, en la interacción entre la interpretación musical y la acústica y organología.

En general los timbres se han caracterizado tradicionalmente en timbres oscuros o brillantes (Norman, Chick, Campbell, Myers, & Gilbert, 2010), sin embargo, desde la aparición de la síntesis del sonido, los modelos buscan una caracterización instrumental mucho más compleja basada en la síntesis aditiva de ondas emulando las cualidades del sonido y su forma de emisión y propagación (Berners, 1999).

Algunos ejemplos de modelos de síntesis sonora de instrumentos de viento metal son los de autores como Beauchamp (1979), Risset (1982) o Dannenberg (1998), que, sin embargo, no han llegado a caracterizar de una manera eficiente la variabilidad del timbre en diferentes contextos como el de la dinámica, la direccionalidad del sonido y su comportamiento en propagación a partir de la campana (Boutin, Fletcher, Smith, & Wolfe, 2015).

Si bien otros aspectos han sido ampliamente tratados como la impedancia de entrada (Backus, 1976), la emisión sonora (Yoshikawa, 1995), la forma de la sección del tubo y de la campana (Kausel, Chatziioannou, Moore, Gorman, & Rokni, 2015), la forma de la boquilla (Lopes et al., 2013) e incluso los materiales de los componentes del instrumento (LoPresto, 2014); la variabilidad del timbre en el continuo de la dinámica en los instrumentos de la familia instrumental de viento metal tiene precedentes en algunos artículos discretos como el del equipo de investigación de la Universidad Cibernética de Nantes: Poirson, Petiot y Gilbert (2005) titulado “Estudio de la brillantez en el los sonidos de la trompeta” *Study of brightness of trumpet tones*.

En este artículo se establece como elemento de correlación pero no causalidad la potencia en el segundo armónico ($8^a + 5^a$) y la brillantez del sonido y la aparición de mayor energía en armónicos superiores a este, sin llegar a cuantificarlos o reseñarlos.

Este estudio no menciona concretamente de la tuba, del cual no se posee apenas estudios acústicos, menos aún en directa correlación con este Trabajo Fin de Master, lo que generará proyecciones amplias y extendidas.

Si bien a nivel acústico tenemos un poco impacto bibliográfico, a nivel musicológico y organológico, el uso orquestal y solista de los instrumentos de viento metal y en especial de la familia de la tuba ha sido descrito históricamente entre sus muy diversos niveles interpretativos desde el apoyo en el registro grave y fundido con la sección de contrabajos hasta la potencia y el vigor en conjunción con la sección de viento metal, encontrándose momentos de especial interés como un timbre solista, de personalidad propia y distinguible (Forsyth, 1982). Estas características se ha estudiado y reseñando no solo en el estudio de la orquestación de autores como Berlioz (1856), Piston (1955), Rimsky-Korsakov (1964) o Adler-Piston (1989), entre otros, si no en numerosas publicaciones acerca de la interpretación y el uso de la tuba y el bombardino en la orquesta sinfónica y en el ámbito de solista donde se hace ineludible citar el trabajo de agregación y revisión bibliográfica de Clifford Bevan en su tratado, *The Tuba Family* (2000).

Algunos de los adjetivos y descripciones tímbricas recurrentes y generalmente atribuidas a la tuba en estos contextos incluyen:

- Timbre Oscuro (*dark tone*): La oscuridad refiere a la cantidad de armónicos superiores en el sonido. Encontramos en el timbre de la tuba una intensidad extremadamente baja (Fig.7) de armónicos medios y superiores (Denney, 2012).

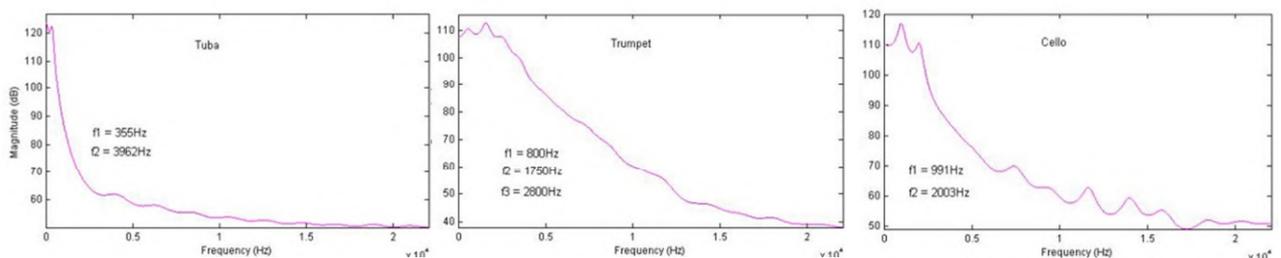


Figura 7: Armónicos conformantes del sonido de la tuba en comparación al sonido de una trompeta (centrada) y un Violonchelo (derecha)

- Timbre Suave / Meloso (*mellow tone*): Refiere al ataque del sonido, que normalmente en el viento metal suele ser marcado; sin embargo, en la tuba se observan articulaciones suaves y carácter *legato*¹⁶ (Adler & Hesterman, 1989) que describen un sonido con un ataque (*attack*) y liberación (*release*) suaves y progresivos.
- Denso (*thick tone*): Un sonido muy centrado y denso. Al contener un gran peso armónico en los armónicos de octava (Denney, 2012), la sensación del sonido fundamental es muy potente y permite un gran fundido con diversidad de timbres y dinámicas.
- Grueso (*fat tone*): Es probablemente uno de los instrumentos acústicos con mayor intensidad en el registro grave, solo superado por un órgano. Ello conlleva que pueda tener preeminencia sobre otros en los *tutti* orquestales en el registro grave (Bevan, 2000) .

En los espectrogramas anteriores (Fig.7) se obvia una vez más la intensidad sonora, y se caracteriza estáticamente un timbre exangüe y neutro que se encuentra lejos de una realidad flexible, continua y dinámica con elementos y desarrollos tímbricos que se afectan principalmente por la intensidad sonora, la cual se evidenciará en el diseño experimental de este trabajo.

3. Marco Metodológico

La metodología de investigación se basará en el análisis acústico reunido y expresado en un lenguaje interpretativo a través de la representación y comentario de diagramas de espectro y espectrogramas procedentes de diseños y ejecuciones planteadas para el análisis del timbre en diferentes situaciones performativas. Siguiendo las líneas de investigación de los autores estudiados, destacando los diseños experimentales de Kausel (2015) y Boutin (2015) se utilizarán modelos y ejercicios que minimizan las variables de la emisión o de la modificación del timbre por parte de los ejecutantes, la boquilla o los instrumentos utilizados;

¹⁶ En notas sucesivas durante la interpretación, conectadas sin ningún silencio intermedio o articulación. (Chew, 2001)

se priorizará el análisis de la variabilidad de los valores a partir de los valores iniciales de impedancia del instrumento.

La investigación ha tenido especial interés en su primer estadio, en la reseña y recopilación de datos acerca de la divulgación de las características tímbricas de los instrumentos de viento metal para, experimentalmente –segundo estadio–, observar y dotar de ilustración técnica y acústica los elementos y observaciones que se realizan en el análisis espectrográfico del diseño experimental. De este modo encontramos una gran importancia en el marco teórico de este trabajo, ya que perseguirá la síntesis e interpretación fenomenológica de los elementos más importantes de la acústica y la organología en un contexto del análisis performativo y la técnica instrumental de la Tuba. En numerosas ocasiones los comentarios acerca de los datos obtenidos tendrán una relación directa con la confirmación y expresión en datos de elementos recogidos en la bibliografía y en su caso la justificación, afirmación o corrección de los mismos.

Los datos se constituirán principalmente en un diseño de estudio de casos comparativo donde se realizara análisis de las diferencias tímbricas en mediciones pre-post, mostrando las diferencias de intensidad acústica y la cuantización ponderada y progresiva de armónicos interválicos simples y complejos. Más que el uso de los datos como elementos determinantes, se usaran los elementos comunes y comparativos de los diferentes diseños para arrojar conclusiones en un diseño cuasiexperimental.

Por ello se plantearan hipótesis de investigación que se pretenderán dotar de base, conclusión y rendimiento a los resultados obtenidos.

Hipótesis de investigación

Cómo elementos de la investigación, los diseños y resultados han arrojado en mayor o menor medida datos que permiten explicar y sustentar las siguientes hipótesis:

- El espectro armónico y tímbrico del sonido de la tuba está principalmente determinado por cualidades intrínsecas a la interpretación como la articulación, la emisión sonora, la posición armónica y especialmente la dinámica, siendo esta última proporcional a la aparición de armónicos superiores y de relaciones

complejas no consonantes. En contextos de mayor dinámica nos desviamos de los armónicos de relaciones interválicas simples y encontramos un timbre más estridente, creado por estos intervalos complejos que causan una sonoridad disonante.

- Los elementos armónicos formantes del sonido de la tuba cambian progresivamente y proporcionalmente a la intensidad del sonido, apareciendo armónicos de relación compleja en las intensidades sonoras elevadas y ondas cuasi sinusoidales, carentes de armónicos, en las intensidades sonoras más bajas.
- El análisis espectrográfico puede ser un método válido, científico, para la investigación y estudio musicológicos, que aporte utilidad y sea de aplicación en un entorno musical “performativo”

Diseño de investigación

Como elemento inicial de la investigación se ha realizado una reseña bibliográfica, analizando las investigaciones y elementos que han desarrollado el marco teórico en el que se fundamenta la investigación. Estas investigaciones han modelado y articulado el diseño experimental, conformando y minimizando los impactos de las variables que pueden suponer la aparición de variables extrañas.

La investigación se ha llevado a término en una sala de características cuasi-anechoicas, no reflejantes del sonido, de tal modo que lo recogido por la microfónica corresponda al emitido por el instrumento sin interacción reflexiva del medio. El proceso de grabación se ha establecido con intervalos mínimos de pausa para evitar cambios del medio y los ejecutantes, de tal modo las mediciones generan una comparación despojada de elementos externos (cambios de temperatura de la sala y el instrumento, cansancio del o de la intérprete, etc.). La duración ha sido de cuatro tandas de 30 minutos; siendo en total de 120 minutos.

Los micrófonos utilizados, son dos micrófonos de condensador *electret* para medición, de respuesta plana y características ultra lineales¹⁷, minimizando el ruido de la medición y el error de medida. De igual modo se han utilizado dos micrófonos de transductor superficial para recibir información directa de la vibración metálica del instrumento y no de la columna de aire. Estas cuatro fuentes de sonido se conectarán a una interfaz de audio digital generando un sistema de medición con una respuesta no inferior al rango 5Hz - 30kHz y con una sensibilidad aceptada de $\pm 1/-3$ dB.

Para la grabación se usará el software libre *Audacity* y para el manejo de los datos se utilizarán las aplicaciones de análisis de audio *Sonic Visualizer*, aplicación de uso libre y las aplicaciones *Sigview* y *Izotope Insight*, programas de licencia, utilizándose igualmente para la posterior representación de espectros y espectrogramas en dos y tres dimensiones.

Para dotar de mayor claridad a la información mostrada a través de los espectros, éstos se modificarán y maquetarán trasladando los valores numéricos a valores en notación tradicional usando el índice acústico científico¹⁸ y la base de afinación: $La_4 = 440$ Hz.

Los intérpretes que se contarán como muestra son 4 profesores de Tuba de la provincia de Málaga y su entorno: D. Rafael Alcántara Terrón (Profesor de Tuba y codirector de la Banda de Música Maestro Quintana), D. Juan Manuel Cornejo Martínez (Profesor de Tuba del Conservatorio Profesional de Osuna), D. Pablo Guerrero Martín (Tuba solista de la Orquesta Sinfónica de Málaga y autor de este trabajo) y D. Miguel Ángel Ramírez Plaza (Profesor de la Academia de Estudios Musicales Adagio y director de la Banda de Música de Moclinejo).

Variables medidas e instrumentos aplicados

Las características tímbricas del sonido se analizarán a partir de la cuantificación de los armónicos según su intensidad. Para ello se establecerán diagramas de espectro basados en valores de frecuencia (eje de abscisas) e intensidad (eje de ordenadas). Para relacionar la

¹⁷ La respuesta plana y ultralineal refiere a la capacidad de recogida de señal sonora en valores estables y prácticamente iguales y planos en todo el ámbito de la frecuencia.

intensidad del sonido con la aparición de determinados armónicos se utilizarán espectrogramas en dos y tres dimensiones: la intensidad se medirá en la intensidad de color (espectrograma en dos dimensiones) o en el plano tridimensional (eje de cota);

Para la codificación de los datos y el análisis organológico se utilizará una transcripción de la frecuencia a notación musical en índice acústico científico¹⁸ (L.S. Lloyd & Rastall, 2001) en base a afinación justa y afinación de $La_4=440$ Hz siguiendo las recomendaciones y análisis acústico descrito en el marco teórico (Kopiez, 2003). Para el posterior análisis y conclusiones se establecerá un margen de error de ± 25 cents, equivalente a un octavo de tono.

Para la medición de la intensidad acústica se usará la medición en decibelios (dB) estableciendo dos variables que anotaremos como intensidad armónica –intensidad del armónico– y su relación con la intensidad sonora –intensidad del sonido completo–. Al existir armónicos naturales dentro de la serie y armónicos extraños se establecerán índices para los primeros y se describirán los extraños de manera que podamos entender su naturaleza.

Para la descripción y anotación de observaciones acústicas se realizará igualmente una acotación de la muestra auditiva comprimiendo la ventana de muestras del espectrograma con un límite superior de 8000 Hz ($\approx Do_8$) e inferior de 32 Hz (Do_1) y normalizando la grabación a 0 dB para evitar el recorte (*clipping*¹⁹) o compresión del espectro dinámico.

Procedimientos

Preparación de la sala

La sala utilizada se encuentra en cesión por parte del ayuntamiento de Málaga a las bandas de música y su estudio sonométrico y acústico (García, 2012) se fundamenta en unas características especiales de aislamiento, linealidad y reverberación. En una de sus salas de menor tamaño (Sala 1) se ha prevenido un diseño y análisis acústico que minimice los factores

¹⁸ Índice acústico que nombra las alturas musicales según la percepción acústica humana dando el valor de Do_0 al umbral inferior de 16 Hz y los siguientes según octava, Do_1 , Do_2 , Do_3 , etc. (L.S. Lloyd & Rastall, 2001).

¹⁹ Efecto de recorte o distorsión que acontece en una grabación sonora cuando el nivel de intensidad es tan alto que supera los límites de la capacidad del medio de reproducción o grabación.

reflexivos y errores de medida. Las características de la sala previenen un modelo casi de reflexión sonora mínima y estable en casi todo el registro. (Fig.8)

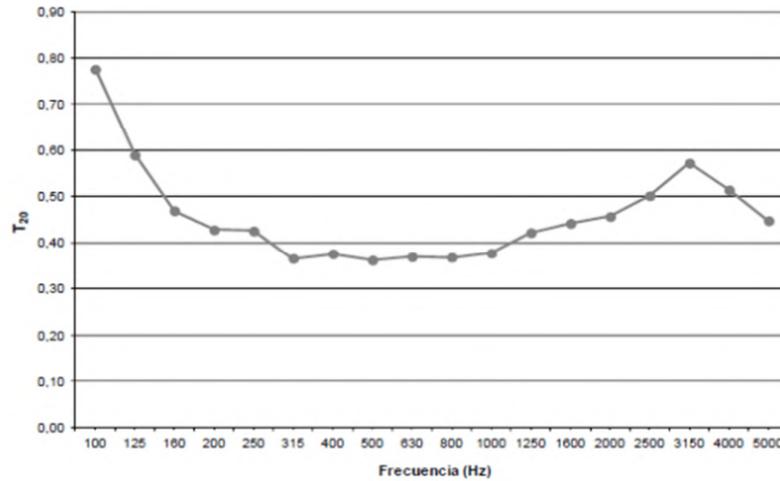


Figura 8. Respuesta acústica reflexiva de la sala utilizada.

Para la realización de la grabación se ha dispuesto un modelo de grabación sencillo siguiendo el siguiente esquema:

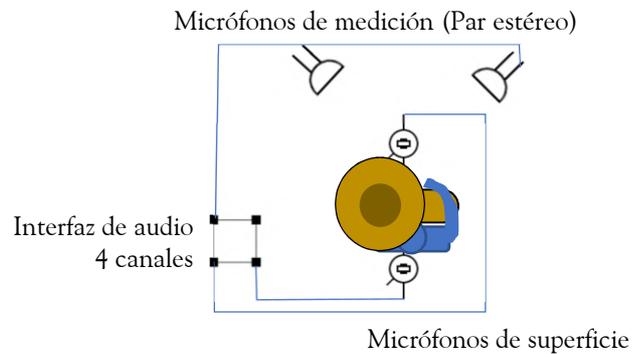


Figura 9: Esquema de situación del intérprete y los micrófonos en sala.

Los micrófonos de superficie se colocaran en el tudel del instrumento para la captación de las vibraciones de la boquilla y en la campana del instrumento para la captación de la vibración de la misma. Para la recogida sonora principal se usaran dos micrófonos a una

distancia de aproximadamente un metro del intérprete y tres entre sí, en Orientación A/B estéreo²⁰.

Ejercicios para la grabación²¹

En un primer estadio se ha realizado un análisis de un contexto de interpretación cómoda, a modo de **1. Calentamiento**, donde se ha elaborado una muestra del sonido de cada intérprete para su posterior análisis. Este ejercicio consta de mediana duración en un matiz *mezzoforte* controlado mediante sonómetro en torno a 40-50 dB (-40 dB) del medio de grabación. Los intérpretes interpretan este calentamiento de unos 2 minutos con cada instrumento (Tuba Contrabaja, Tuba contrabaja en Si bemol y Tuba Baja) del cual se recogen los mismos fragmentos y se extraen para su análisis acústico inicial. De este modo se elabora un perfil acústico inicial de cada instrumento y de cada intérprete que permita comparar de entrada las diferencias tímbricas.

En el segundo estadio **2. Matices *piano* y *pianísimo*** se realiza un ejercicio en torno a las notas Do, Sol y Fa, Re bemol, Mi bemol, Si bemol y La bemol las cuales utilizan en cada instrumento sus armónicos principales, la primera válvula y la segunda y tercera válvula en ese orden. La melodía transcurre desde el armónico principal a su quinta justa y bajada en tonos sucesivos, en el ejercicio para tuba en Do comprende: Do, Sol, Fa, Mi Bemol, en Tuba en Fa: Fa, Do, Sib, Lab y en Tuba en Si bemol y bombardino en SI bemol: Si bemol, Fa, Mi bemol, Re bemol.

El mismo ejercicio se realizará en **3. Matices *mezzoforte* (3.1) y *fortísimo* (3.2)** controlando las respiraciones de un pulso en cada nota y un volumen sonómetro de 80-90 dB

Por último se realizará un ejercicio de **4. *Crescendo* Máximo** donde se interpretara la notas por separado en un ejercicio en *crescendo* desde el piano al forte al máximo *fortísimo*

²⁰ Para esta toma estereofónica se utilizan 2 o 3 micrófonos (mejor si son condensador) idénticos y separados horizontalmente y de forma paralela a una distancia de entre 1 y 3 metros. Se utilizará la regla del 3:1 que consiste en que la distancia entre micrófonos debe ser al menos el triple de la distancia que hay entre la fuente y el conjunto estéreo.

²¹ Las partituras pueden encontrarse en el anexo 1: Partituras y ejemplos utilizados en los ejercicios.

Durante la grabación del primer ejercicio se dispondrá unos niveles de ganancia acordes a los cuatro intérpretes y los tres instrumentos. Haciendo un total de 12 grabaciones de 4 ejercicios.

Plan de análisis de datos

Los datos se analizarán en ficheros de audio AIFF con cuatro canales de audio, dos de los micrófonos estéreo y dos de los micrófonos piezoeléctricos. El análisis se realizará principalmente con el soporte de la aplicación Sonic Visualizer en su versión 3.3 d y SigWiev 4.1. Para unificar las grabaciones se utilizará un sobremuestreo de los 4 canales, pudiendo en el caso de necesitarse, reservarse estas grabaciones para otros usos.

Proceso de grabación, filtrado y normalizado de audio

- Ajuste de la ganancia de entrada y parámetros de grabación ajustándose a los márgenes óptimos por medio de un sonómetro Trotec BS06 y niveles de entrada.
- Grabación y tratamiento de audio con aplicación Audacity.
 - o Grabación en muestreo de 48kHz y cuatro canales a través de interfaz de audio Behringer UMC404HD.
 - o Recorte y etiquetado del audio, realizando un repositorio de las grabaciones y descartando las grabaciones que superen el clip, tengan algún ruido de sala o simplemente no contengan información relevante.
 - o Normalizado a -0,1 dB; generando el mínimo ruido y unificando el volumen máximo de cada muestra en una amplitud adecuada y uniforme.
 - o Exportado de los 4 canales unidos en formato de audio Audio Interchange File Format (AIFF) para minimizar pérdidas de calidad y posibilidad de uso entre los diferentes programas.

Análisis de datos

Para el análisis de espectro y espectrogramas se utilizará el software Sonic Visualizer. Se configurará un panel (*pane*) de análisis de espectro (*spectrum analysis*) con configuración de

escala linear perceptual de la intensidad (0 – 1 dB) en el eje de ordenadas y con una ventana de frecuencias entre 16 - 8000 Hz de escala logarítmica en el eje de ordenadas. (Fig. 10)

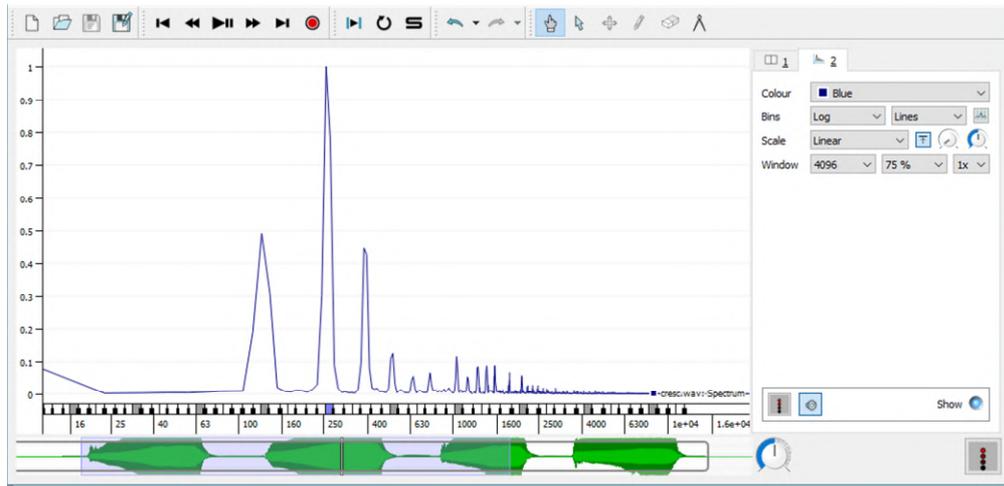


Figura 10: Ventana de configuración usada en análisis de espectro en Sonic Visualizer

Para el análisis de espectrogramas se utilizará el formato estándar de color y escala de este programa, verde-rojo (*green spectrogram scale*) ajustando a la resolución máxima del programa (Muestro de tamaño 32768 y sobremuestreo x8) y utilizando de nuevo la escala logarítmica para el dominio de la frecuencia (16 - 8000 Hz).

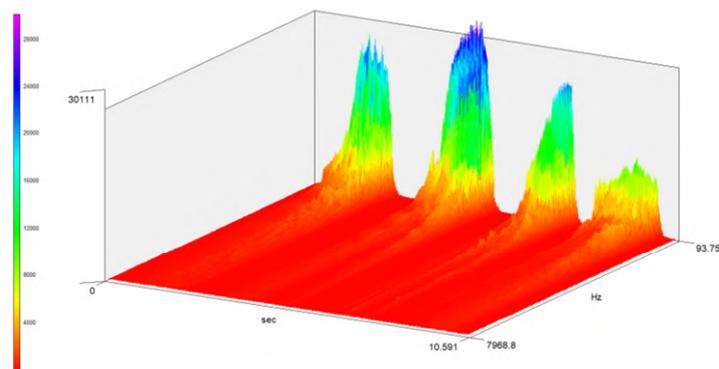


Figura 11: Espectrograma 3D realizado con la aplicación SigView.

Interpretación de los datos

En algunos casos de los espectrogramas y para mayor interactividad con los datos a nivel tangible se han realizado modelos de espectrograma en 3D (Fig. 11) a través de las

aplicaciones *Izotope Insight* (para modelado en tiempo real) y *SigWiev*. Siendo ambas aplicaciones de licencia de uso no gratuita.

Para la interpretación y visualización cómoda de los datos se ha realizado un sobreanálisis con la aplicación *Sonic Visualizer* a través del uso de la herramienta de reglas y herramientas de análisis ajustados a los índices acústicos científicos y a la transcripción a notación en contexto de $La=440$ Hz.

Por último y ya en contexto de maquetaje y edición de los gráficos vectoriales se ha trabajado con *Adobe Photoshop* y *Adobe Illustrator* para lograr la superposición en transparencia y diferenciación en color de varios espectros en diferentes intensidades para lograr establecer similitudes y diferencias entre ellas. (Fig. 12)

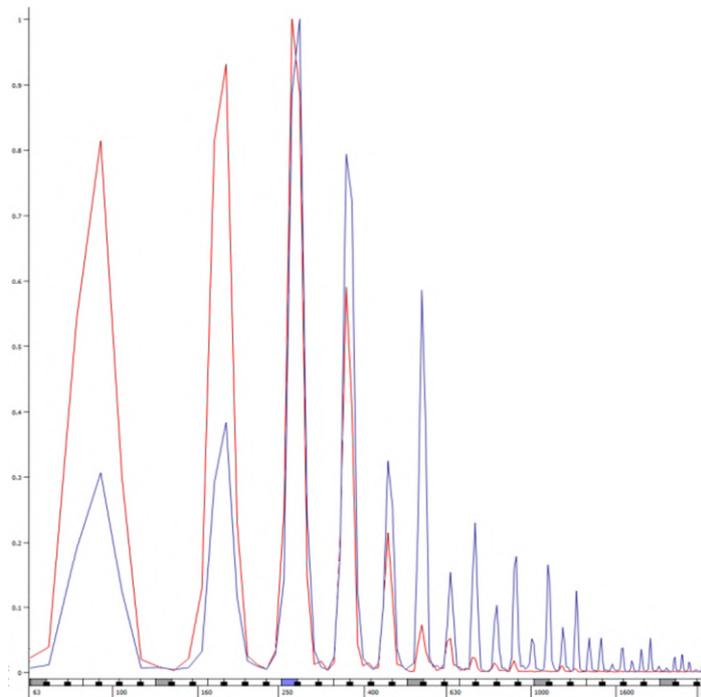


Figura 12: Comparación entre espectros en matiz piano (rojo) y fortísimo (azul)

Con todos estos elementos y herramientas al servicio, a continuación se enumeran los resultados y conclusiones que se extraen y desarrollan a partir del proceso descrito.

4. Resultados

El timbre de la familia instrumental de la tuba: tuba baja y tuba contrabajo, se evidencia como un elemento continuo y dúctil existiendo gran cantidad de elementos que poseen gran variación la variación de los contextos dinámicos. Inicialmente se arroja a continuación los datos acerca de la caracterización del timbre a través de los ejercicios propuestos 1. Calentamiento y 2. Ejercicio en matiz *piano* y *mezzoforte*.

Caracterización del timbre de la Tuba.

La tuba, como cualquier instrumento de viento metal, basa su técnica instrumental básica en la disposición de la serie de armónicos que podemos interpretar en una longitud de tubo, por medio de la modificación y cooperación entre los diversos umbrales de impedancia del instrumento y la impedancia de entrada del conjunto de estímulos de boquilla, labios del intérprete y vibración del aire a través de los mismos.

Sin embargo a diferencia de la trompeta, el trombón y la trompa, el sonido de la tuba es especialmente oscuro, casi carente de armónicos, teniendo prácticamente todo su gran peso y energía en los armónicos de 8^a y 5^a (Fig. 13)

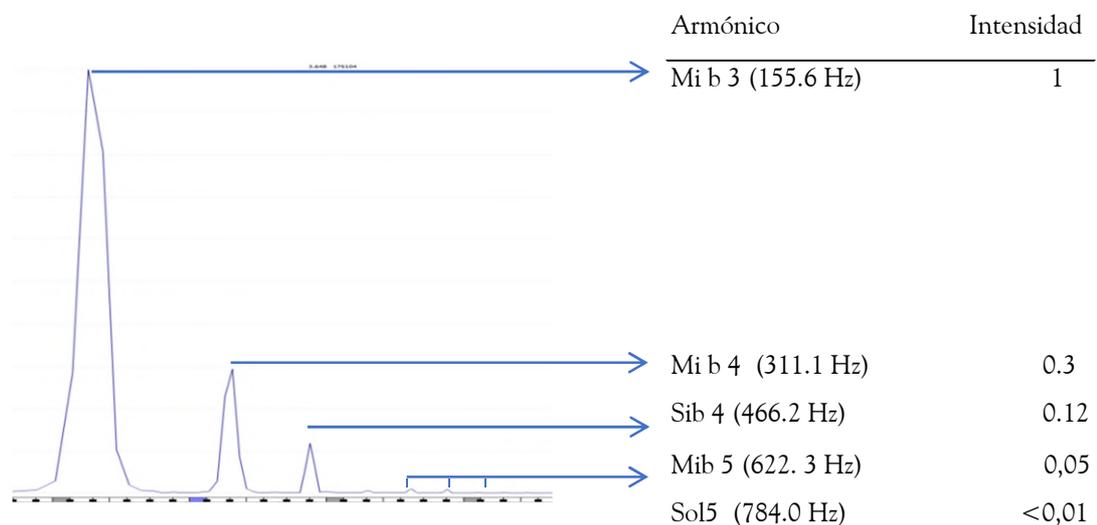


Figura 13: Espectro armónico en matiz *mezzoforte* de nota Mib3 en Tuba baja en Fa²².

²² Figura con referencia 13AA disponible en grandes dimensiones en el Anexo I.

Por ello la caracterización del timbre de la tuba en un contexto dinámico y expresivo normal, entendido éste como el que se realiza habitualmente y de manera cómoda en su interpretación, tiene prácticamente su totalidad de intensidad repartida en los armónicos de octava (A1) y quinta (A2), reforzando su carácter de base armónica potente y estable.

Tabla 1. Valores de intensidad de armónicos en matiz mezzoforte.

Registro	A0 Ppal	A1 8 ^a	A2 5 ^a	A3 8 ^a '	A4 3 ^a	A5 5 ^a	A6 7 ^a	A7 8 ^a ''	A8 9 ^a	A9 3 ^a '	A _n ----
Do2 (65 Hz) CC	0.55	0.72	0.92	1.00	0.40	0.43	0.02	≥0.0	≥0.0	≥0.0	≥0.0
Do3 (130.8 Hz) CC	1.00	0.74	0.18	0.15	0.06	0.05	0.01	≥0.0	≥0.0	≥0.0	≥0.0
Sib1 (58.27 Hz) BB	0.59	0.71	0.18	0.15	0.06	0.21	0.02	0.01	≥0.0	≥0.0	≥0.0
Sib2 (116.5 Hz) BB	1.00	0.68	0.15	0.15	0.15	0.15	0.04	0.04	0.01	≥0.0	≥0.0
Fa3 (174.6 Hz) F	0.72	0.8	0.17	0.15	0.04	0.41	0.08	0.08	0.01	≥0.0	≥0.0
Fa4 (349.2 Hz) F	1.00	0.15	0.15	0.15	0.05	0.37	0.16	0.15	0.02	≥0.0	≥0.0
Sib 3 (233 Hz) Tpt	0.62	1.00	0.70	0.52	0.28	0.22	0.12	0.19	0.04	0.06	0.02
Sib 4 (466 Hz) Tpt	1.00	0.81	0.45	0.55	0.38	0.25	0.10	0.12	0.05	0.05	0.03

CC: Tuba en Do ; BB: Tuba en Si Bemol; F: Tuba en Fa; Tpt. Trompeta

En la tabla anterior (Tabla 1) observamos como la intensidad sonora de la tuba se encuentra especialmente en los armónicos de 8^a y 5^a encontrándose incluso más intensidad en estos que en el armónico principal (A0) en el registro pedal tanto en la tuba como en la trompeta, dispuesta como ejemplo. Sin embargo, en el registro de la trompeta la energía se reparte más equitativamente entre los armónicos superiores observándose un espectrograma más rico en armónicos aunque de menor intensidad. (Fig. 14)

Diferencias entre los ejecutantes

El análisis espectrográfico también arroja información acerca de las similitudes y diferencias encontradas entre los cuatro intérpretes y los tres instrumentos, las cuales se analizan a continuación. Como podremos observar en la superposición de espectros, la

diferencia es mínima en matices piano y mezzoforte (Fig. 14), encontrando desviaciones inferiores al 2% (0.2) en los casos de forte y fortísimo (Fig. 15).

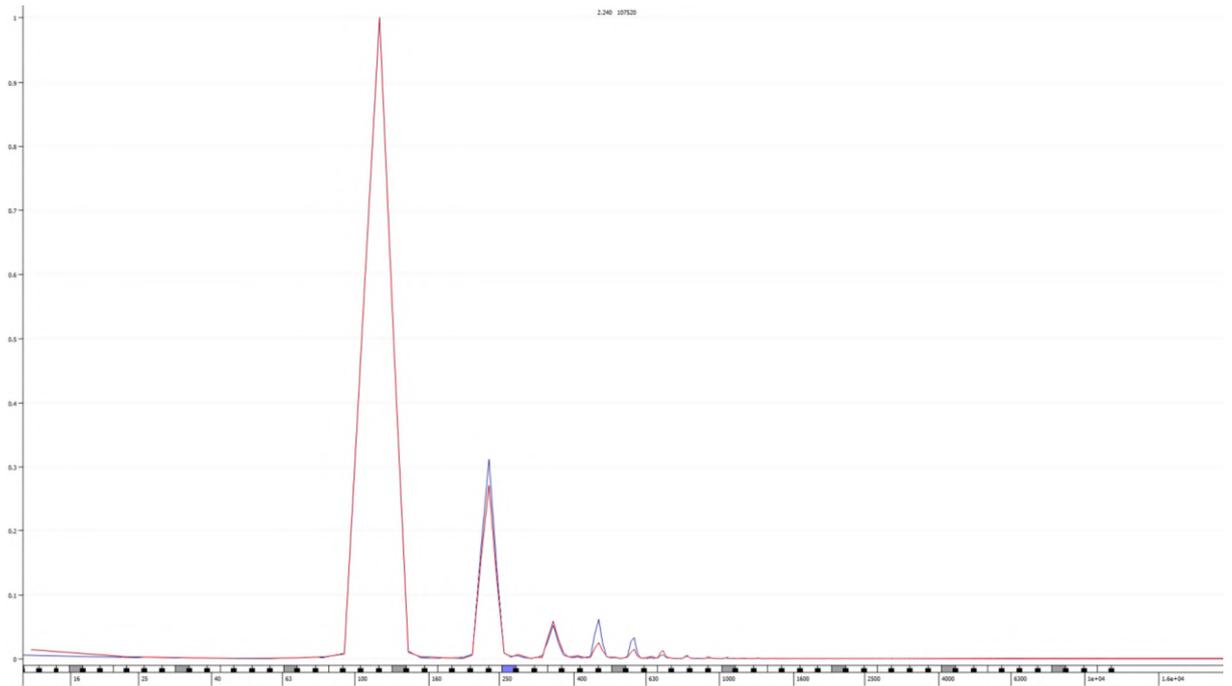


Figura 14: Diferencias en ejercicio *mezzoforte*, nota Sib3 en tuba en Do, ejecutantes A (color azul) y B (rojo).

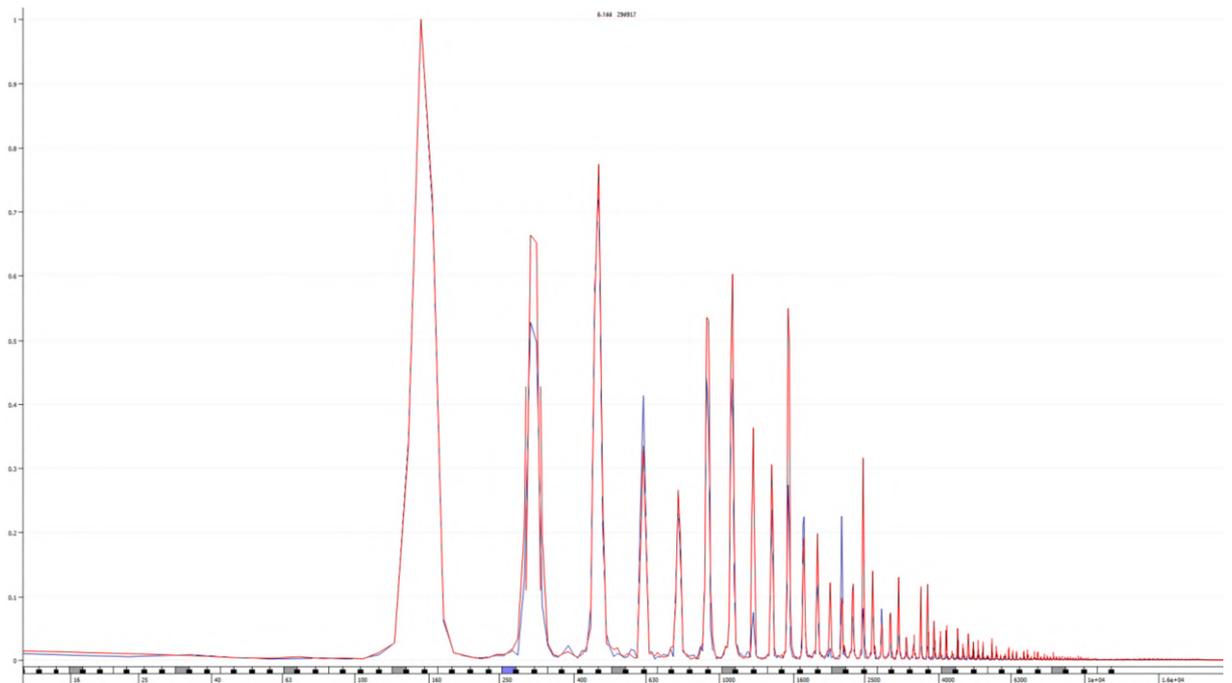


Figura 15: Diferencias en ejercicio *fortissimo*, nota Mib3 en tuba en Fa, ejecutantes C (color azul) y D (rojo).²³

²³ Figuras con referencias 15CDa/b disponibles en grandes dimensiones en el Anexo I.

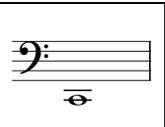
Como veremos a continuación, en cuanto al análisis de la variación tímbrica y la aparición de armónicos disonantes los datos encuentran mayores diferencias en sus valores cuantitativos sin significar sin embargo ser necesariamente determinantes en las conclusiones posteriores.

Variación del timbre en el dominio de la intensidad sonora

La principal hipótesis que plantea la investigación es la aparición de armónicos no naturales y su relevancia en cuanto a sus intensidades justificando la estridencia del sonido y su sensación disonante o desagradable.

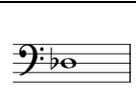
Premilinarmente se analizarán los datos numéricos comparativos entre los matices *piano*, *mezzoforte*, *fortissimo* y *fortísimissimo* y las intensidades de los armónicos principales y superiores en las siguientes tablas.

Tabla 2: Valores de intensidad de armónicos Do2 en tuba en Do y matices progresivos.

Registro: Do2 (65Hz) Tuba CC				Número de armónico e Índice Acústico												
				Matiz	Potencia dB	A ⁰ Ppal	A ¹ Do3	A ² Sol3	A ³ Do4	A ⁴ Mi4	A ⁵ Sol4	A ⁶ Sib4	A ⁷ Do5	A ⁸ Re5	A ⁹ Mi5	A ¹⁰ Fa#5
Intensidad sonora (V)	pp	≤ -60dB	0.67	0.90	0.97	0.83	0.32	0.25	0.12	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	mf	≤ -45dB	0.56	0.92	0.83	1.00	0.35	0.37	0.34	0.11	0.05	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00
	ff	≤ -10dB	0.46	0.70	0.61	0.92	0.32	0.45	0.37	0.11	0.07	0.01	0.04	0.02	0.04	0.03
	fff	≥ -0.1dB	0.28	0.58	0.21	1.00	0.12	0.51	0.52	0.12	0.10	0.08	0.10	0.30	0.23	0.21

Podemos observar en estos datos (Tabla 2) como los valores de armónicos superiores en matices suaves (≤-60dB) llegan a ser inapreciables, teniendo prácticamente toda la energía sonora dispuesta en los armónicos de octava, quinta y 15ª (dos 8ª). En el ámbito dinámico del fuerte encontramos una mayor disgregación de los valores y sin perder intensidad en los armónicos principales, aparecen armónicos superiores. En el límite del *fortísimissimo* encontramos armónicos como el de Sib4 (Sexto Armónico) en conjunción con otros intervalos de menor consonancia como La5 (Duodécimo armónico) o Fa#5 (Décimo armónico).

Tabla 3: Valores de intensidad de armónicos Reb3 en tuba en Fa y matices progresivos,

Registro: Reb3 (138 Hz) Tuba F				Número de armónico e Índice Acústico												
				Matiz	Potencia dB	A ⁰ Ppal	A ¹ Reb4	A ² Lab4	A ³ Reb5	A ⁴ Fa5	A ⁵ Lab5	A ⁶ Dob6	A ⁷ Reb6	A ⁸ Mib6	A ⁹ Fa6	A ¹⁰ Sol6
Intensidad sonora (V)	pp	≤ -60dB	1	0.26	0.11	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	mf	≤ -45dB	1	0.30	0.19	0.06	0.35	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	ff	≤ -10dB	1	0.54	0.44	0.52	0.76	0.36	0.31	0.18	0.05	0.22	0.08	0.14	0.09	0.04
	fff	≥ -0.1dB	1	0.65	0.37	0.81	0.71	0.37	0.15	0.25	0.08	0.25	0.18	0.30	0.18	0.05

En el contexto de datos sobre la tuba baja en Fa (Tabla 3), observamos cómo se hacen más evidentes y abultados estos datos.

En valores de espectro podemos observar la misma nota en contexto progresivo de piano a fortísimísimo (Tabla 4), y este mismo efecto en un espectrograma a continuación.

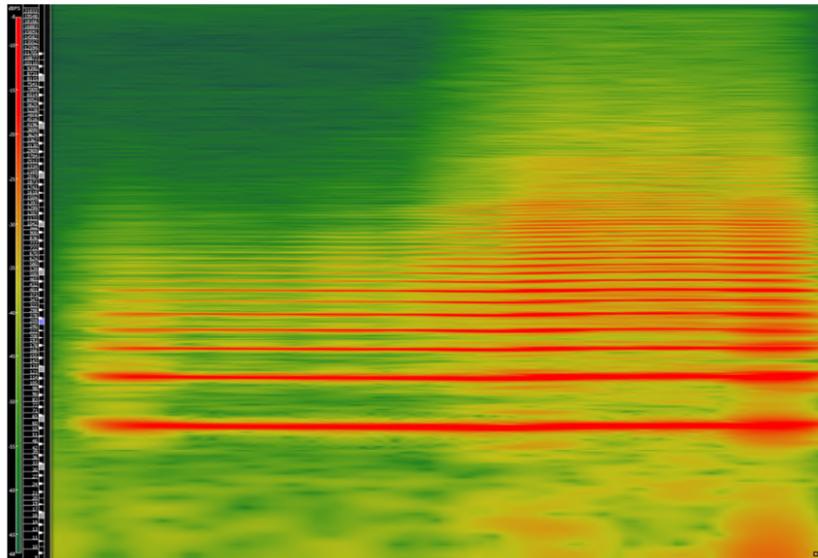
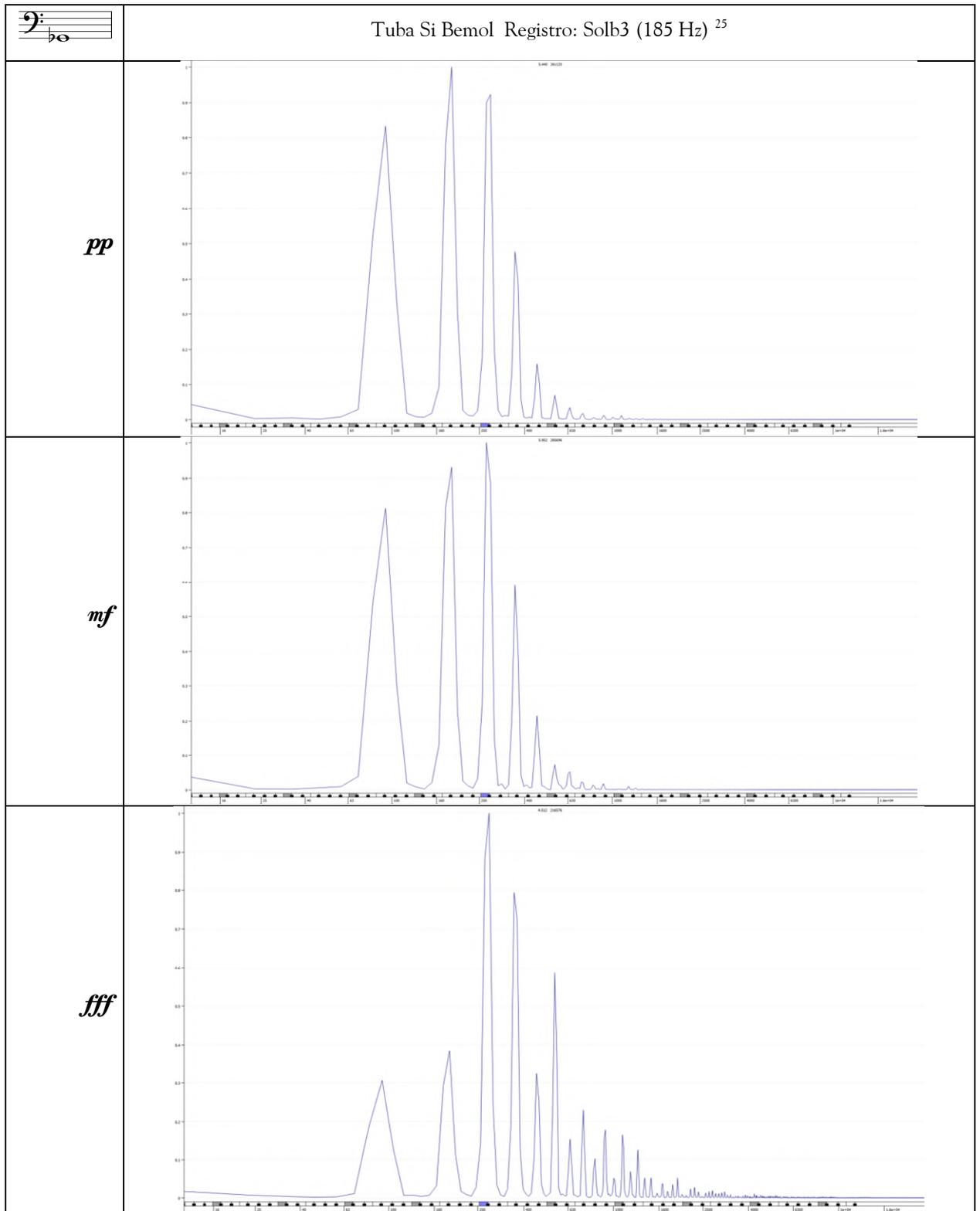


Figura 16: Espectrograma de crescendo de ejercicio 4 interpretado por tuba contrabajo en si bemol²⁴

²⁴ Figura con referencia BBspA disponible en grandes dimensiones en el Anexo I.

Tabla 4: Espectros de intensidad de armónicos de Solb3 en tuba en Sib y matices progresivos.



²⁵ Figura con referencia BBAGb1, disponible en grandes dimensiones en el Anexo I.

Estos datos son representativos de la totalidad de datos que pueden encontrarse en formato de espectros en el Anexo 1: Espectros y espectrogramas. Mediante los tres formatos estudiados podemos observar numérica, comparativa o progresivamente, los valores bajos de intensidad sonora de armónicos superiores en matices suaves y la progresiva aparición de armónicos de 5ª justa que aportan brillantez (Poirson, Petiot, & Gilbert, 2005b) en los matices medios y el crecimiento abultado de los niveles sonoros de armónicos superiores y complejos (Fig.17) que explican la distorsión y sensación estridente del sonido.

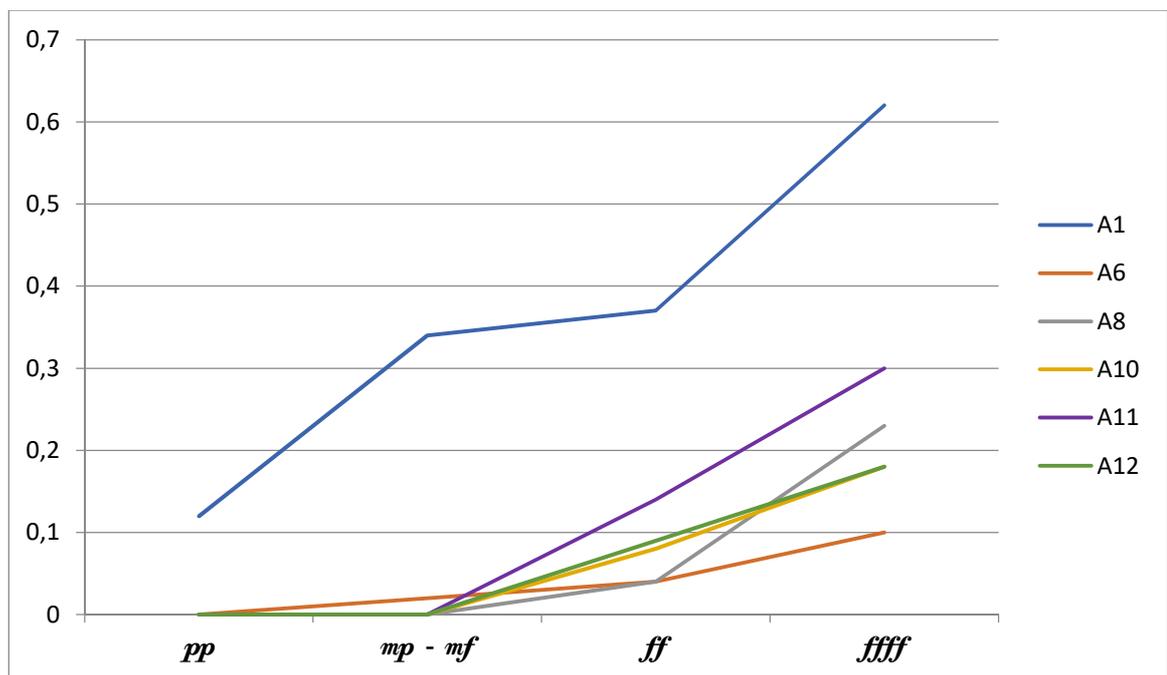


Figura 17: Aparición de armónicos superiores en el continuo de variación dinámica. Datos obtenidos de ejercicio 4 realizado en Tuba en Fa.

La forma de la onda también puede mostrarnos la evolución en su forma la cual es cada vez más compleja, desde una onda cuasi sinusoidal hasta una forma compleja (Fig.18).

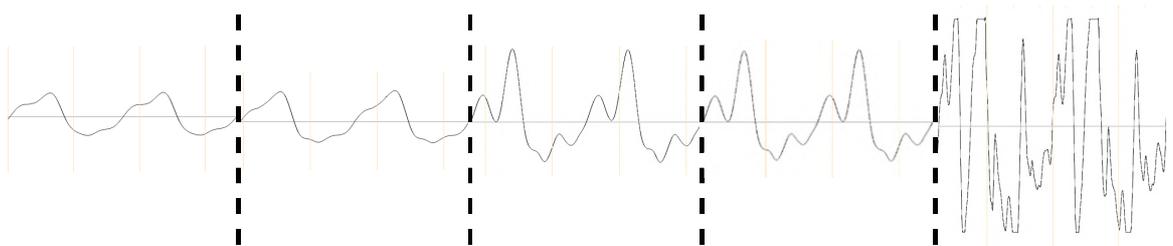


Figura 18: Evolución de la forma de onda de una nota Sib3 en tuba contrabajo en Do, de izquierda a derecha de menor a mayor intensidad.

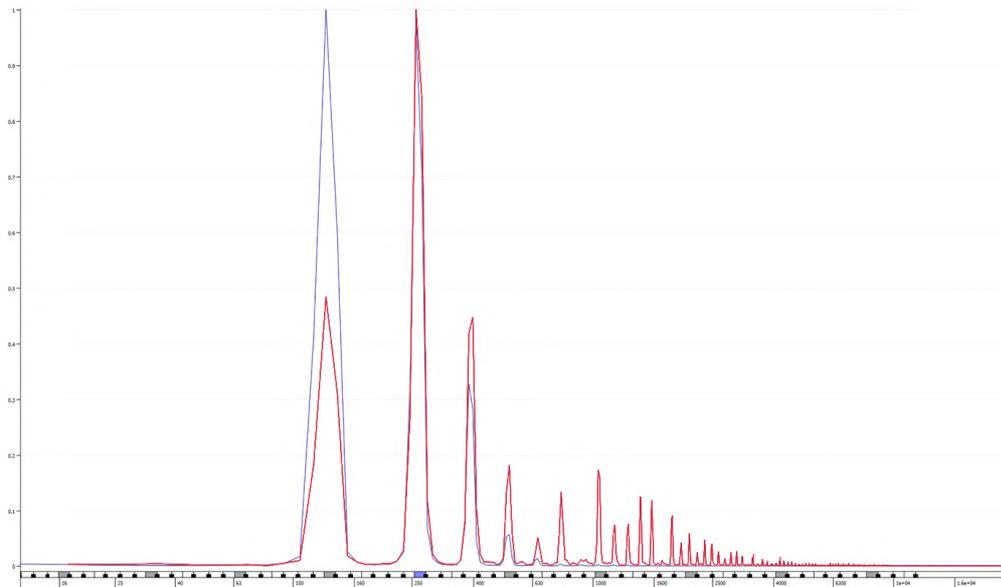


Figura 19: Comparación del espectro de nota piano (azul) y fortísimo (rojo)²⁶

Por ultimo podemos observar la evolución de los armónicos y la aparición progresiva de aquellos superiores en el siguiente diagrama de espectro en 3D, notando la línea del tercer armónico (A^3) de 5^a y aquellos observados en los datos anteriores, que explican el cambio tímbrico hacia la estridencia A^6 , A^8 , A^{10} y A^{11} .

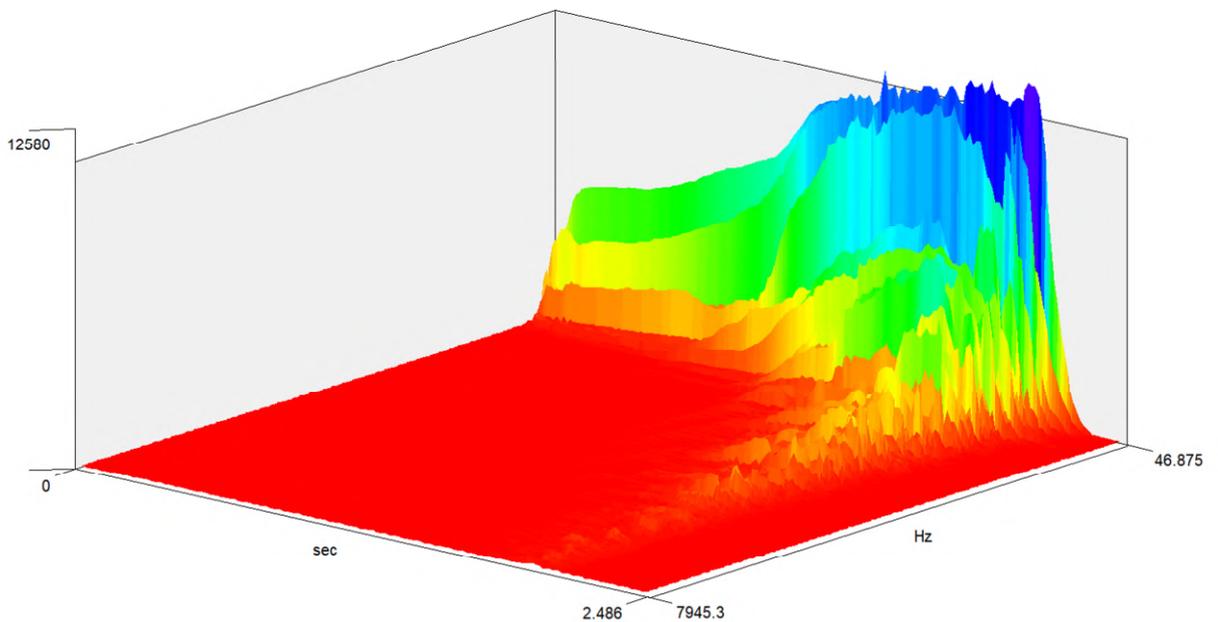


Figura 20: Diagrama tridimensional de ejercicio de crescendo en Reb4, Tuba en Fa.

²⁶ Figura con referencia BBAGb1, disponible en grandes dimensiones en el Anexo I.

Todos los datos anteriores compendian tan solo una muestra de la cantidad de datos extraídos, utilizando estos como ejemplo y pudiendo observarse y compararse con mayor comodidad en los diagramas de mayor tamaño anexados al final de este Trabajo Fin de Master.

Debido a la ingente cantidad de diagramas que se han generado la totalidad de datos están a disposición de la lectora o lector de este trabajo fin de master a través de su solicitud.

5. Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos nos permiten realizar una discusión en torno a los hallazgos y consecución de los objetivos propuestos, así como la confirmación total o parcial de las hipótesis de partida.

Se ha conseguido evidenciar a través de datos empíricos y en diversos contextos e instrumentos diferentes niveles de la variación del contenido espectral armónico y la variación tímbrica del sonido de los instrumentos de la familia de la tuba causada por cambios en la intensidad sonora, llegando a reseñar la aparición observada por la hipótesis de intervalos armónicos complejos que explican la estridencia y sonidos disonantes en contraposición de un sonido oscuro casi sinusoidal (carente de armónicos) en las intensidades sonoras bajas.

Del mismo modo se ha reseñado como la medida de brillantez propuesta por Poirson (2005) en el tercer armónico, pudiendo evidenciarse en el crescendo, la amplitud creciente de este armónico, siendo una línea de apoyo a esta tesis.

En los estudios de además se evidencian ámbitos de estudio y objetivos específicos como la influencia de la sección e impedancia del instrumento, diferenciando el efecto del continuo de la dinámica en los diferentes instrumentos de la familia.

Limitaciones

La elaboración de un Trabajo Fin de Master que incluya elementos de disciplinas de la física y la acústica sin perder el carácter musicológico, interpretativo y organológico del estudio ha planteado un reto de acceso, organizativo y sobretodo condensativo. Espero que

para la lectora o lector de este trabajo no haya significado un obstáculo de entrada o ejercicio soporífero la cantidad de elementos de estudio y conocimientos en acústica demandados y explicados en el marco teórico. Desde el punto de vista del diseño del trabajo, se ha pretendido precaver cualquier necesidad de conocimiento en acústica en su lectura; más allá del diseño y cohesión de los datos, se ha sugerido un acercamiento de carácter indagador y curioso con una base bibliográfica profunda y con un diseño experimental cuyos resultados arrojen un valor e impacto suficientes y generen nuevas perspectivas.

Los elementos del marco teórico parten de su limitación clara en los modelos actuales de análisis acústico. La física clásica ha tratado las partículas vibrantes como ondas sinusoidales y en este modelo solo pueden representarse dos variables, la intensidad y la frecuencia; siendo incluso en el caso de la intensidad una mera aproximación física a un fenómeno acústico cuya percepción es biológica y subjetiva. Los modelos más complejos como el tubo de Kundt o la representación en ondas de presión (Véase Marco Teórico) explican de un modo más cercano la realidad y aún en su desarrollada complejidad no alcanzan a explicar la interacción sonora del interprete y el instrumento musical. Los modelos actuales más utilizados son las curvas de impedancia, y sin embargo sus limitaciones tecnológicas no permiten una medida precisa y accesible para su uso en la investigación. El análisis, escaneado y modelado en tres dimensiones podrá arrojar en un cercano futuro una medida realista y asequible para la realización de modelos físico-acústicos de la impedancia de los instrumentos musicales que puedan tener uso más allá de las fábricas de instrumentos.

Por otro lado, en el presente estudio se han utilizado elementos de medida que pueden incorporar un error aceptado (Véase Variables medidas e instrumentos aplicados), y es especialmente en el ámbito de la sensación acústica y la sensación de elementos tímbricos, donde entran en juego elementos de identificación subjetivos, incorporando variables de carácter psicológico e individual del escuchante. Reflejándose en analogía, del mismo modo que identificamos el timbre de voz de una persona, analizarlo, describirlo o incluso emularlo métricamente plantea limitaciones en su descripción, incorporando elementos que si bien pueden ser descritos mediante cifras no pueden explicarse en cuanto a sus sensaciones, que fundamentan su identificación. Hablar de brillantez u oscuridad en términos cuantizables parte de la idea axiomática de que la brillantez dependa de la distinción extensiva de

determinados armónicos superiores –como los 3^{er} y 6^o armónicos defendidos en las tesis de Poirson (2005) –

Con todo, el principal límite a la cohesión de esta investigación está en la representatividad de la muestra y en su diseño basado en mediciones pre-post. El proyecto se ha basado en una comparación de elementos y cifras concretas en tres instrumentos y cuatro ejecutantes. Las diferencias tímbricas comunes entre unos y otros contextos se han analizado a priori para conociendo sus características realizar inferencias, y por supuesto, en ellas se pueden argumentar algunas variables extrañas. El uso de labios artificiales en los estudios de Gilbert, Ponthus, y Petiot (1998) avalan sin embargo que las diferencias no compensan las limitaciones del mismo.

Por último, la confirmación de la hipótesis de aparición de armónicos de relación no consonante o de relación armónica compleja supone un contexto de interpretación y variables en torno a límites que dependen de elementos no percibidos: el límite acústico del instrumento o cómo según su diseño los armónicos aparecen antes o después, el límite o características físicas del intérprete y como éste puede generar a través de su interpretación diferenciaciones en el timbre incluyendo la aparición de uno u otros armónicos, y por supuesto la contextualización de los diferentes niveles dinámicos sugeridos, que normalmente se evitan en la interpretación del instrumento, debido a que las citadas características de estridencia o disonancia son desaconsejables en un sonido agradable.

Por ello el estudio ha defendido unas conclusiones acerca de lo abultadamente reseñable y cuantizable de entre todos estos contextos y mediciones realizadas, ampliando una atención y reafirmación del contexto tímbrico dinámico y continuo de los instrumentos de viento metal y en especial de la tuba y rompiendo las limitaciones de los modelos clásicos que describen un sonido estático en armónicos en esta familia instrumental. Sin duda aun teniendo las anteriores limitaciones, los datos obtenidos pretenden despertar al intérprete, investigadora y musicólogo de las grandes posibilidades de estudio que aún se pueden encontrar en el estudio acústico de los instrumentos de viento metal.

Prospectiva

El estudio organológico y acústico de la interpretación y la fenomenología musicales son ámbitos aún en fase inicial en cuanto a su estudio musicológico y sobretodo en su estudio interpretativo. Podemos encontrar estudios interpretativos basados en espectrogramas y análisis interpretativos en otras especialidades como el piano o el violín (Blasco, 2000) y sin embargo nulos ejemplos en el terreno de la interpretación solista u orquestal de los instrumentos de viento metal; menos si cabe de la tuba.

Es extraño sin embargo ya que los instrumentos de viento metal han sido y son instrumentos que dedican gran cantidad de su estudio, tanto a nivel interpretativo como a nivel de lutería ingenieryl, al perfeccionamiento del sonido y de las técnicas de creación y formación del mismo. Con todo, no solo a nivel de afinación si no a nivel técnico e interpretativo, las escuelas interpretativas y modos de interpretar la tuba y en general el viento metal, han sido y son muy variadas coexistiendo aún en la actualidad vetos y tradiciones herméticas que excluyen el uso de determinados instrumentos en determinados repertorios –el uso de la tuba en si bemol tradicional de cilindros en Austria y Alemania– y el uso de instrumentos según criterios erradamente historicistas –el uso y nacimiento de la palabra y el instrumento “cimbasso” como instrumento de la familia del trombón y la tuba cuando en realidad es resultado de una mala transcripción de la palabra Corno in Basso, C. in Basso, Cimbasso–. Acerca de la existencia y permanencia histórica de estas prácticas se ha todavía de generar nuevas líneas de investigación de carácter histórico-musicológico que pueden servirse de los análisis y modelos descritos en esta investigación para su análisis acústico y espectrográfico.

Por otro lado, las nuevas y no tan nuevas tecnologías como la síntesis de audio digital, el modelado e impresión de objetos 3D, el análisis y medidas de precisión a través de láser, la tecnología de materiales y nuevas aleaciones e incluso la robótica y las inteligencias artificiales siguen aún introduciéndose muy lentamente en el mundo musical académico e interpretativo y pudieran generar nuevas líneas de investigación acerca de los elementos estudiados en este trabajo proyectándose a su vez en la lutería de instrumentos y/o su desarrollo.

Del mismo modo podrían contribuir en la mejora de la comprensión de las técnicas instrumentales del viento metal, aún muy dissociativas y que a menudo contienen y luchan

entre sí con un resultado nefasto en la docencia. Algunas de estas líneas podrían traducirse en el estudio de las técnicas de *free-buzzing*, o vibración de labios como elemento de desarrollo de la musculatura y el sonido y su impacto en la formación y armónicos del sonido; el uso de determinados materiales plásticos, metálicos, híbridos, para elementos propios del instrumento como la boquilla y/o impropios como la sordina y su análisis acústico o por último, el estudio del sonido de la tuba a través de su emulación en síntesis sonora y a través de su modulación conforme a patrones de inteligencia artificial e interpretación musical por medio de inteligencias artificiales (De Mantaras & Arcos, 2002).

En un ámbito de relación directa con la investigación de este Trabajo Fin de Master, sus prospecciones y ampliaciones pueden llevarlo a su extensión a la familia de viento metal y a la ampliación de los elementos que pueden modificar el timbre: uso de sordinas, nuevas técnicas interpretativas, multifónicos, nuevos materiales y efectos sonoros, etc., y a la mayor indagación técnica y salvaguarda de las limitaciones de la investigación realizada, pudiendo según el desarrollo tecnológico realizarse estudios basados en análisis de la impedancia acústica del instrumento y su comparación según el intérprete salvando los errores fruto de la inferencia de datos a través de varias interpretaciones (Véase epígrafe Limitaciones).

Todos estos ejemplos son muestras de las difíciles convivencias entre la tradición y la innovación que se han confortado en esta convocatoria de investigación, las cuales idealiza significar una pieza hacia la mayor cohesión y despojamiento de los lastres de la música académica y la interpretación musical orquestal.

6. Bibliografía

- Adler, S., & Hesterman, P. (1989). *The study of orchestration* WW Norton New York, NY.
- Amgad, S. (2011). *Good vibrations: The physics of music*, by barry parker
doi:10.1080/00107514.2010.534179
- Backus, J. (1976). Input impedance curves for the brass instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 60(2), 470-480.
- Barbenel, J., Kenny, P., & Davies, J. (1988). Mouthpiece forces produced while playing the trumpet. *Journal of Biomechanics*, 21(5), 417-424.
- Bate, P., & Tarr, E. H. (2001). *Valve (i)* Oxford University Press.
doi:10.1093/gmo/9781561592630.article.28961
- Beauchamp, J. (1979). Brass tone synthesis by spectrum evolution matching with nonlinear functions. *Computer Music Journal*, , 35-43.
- Benade, A. H. (1973). The physics of brasses. *Scientific American*, 229(1), 24-35.
- Berners, D. P. (1999). *Acoustics and Signal Processing Techniques for Physical Modeling of Brass Instruments*,
- Bertsch, M. (1998). *Studien zur tonerzeugung auf der trompete*, Ph.D. dissertation.
- Bevan, C. (2000). *The tuba family Piccolo*.
- Blasco, L. C. (2000). Introducción al análisis espectrográfico de la interpretación musical. *Anuario Musical*, 55, 251-271.
- Boutin, H., Fletcher, N., Smith, J., & Wolfe, J. (2015). Relationships between pressure, flow, lip motion, and upstream and downstream impedances for the trombone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(3), 1195-1209.
- Bowyer, C. S. (2016). *Echoes of the salpinx: The trumpet in ancient greek culture* (Royal Holloway).
- Chen, J., Smith, J., & Wolfe, J. (2012). Do trumpet players tune resonances of the vocal tract? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 722-727.
- Chen, J., Smith, J., & Wolfe, J. (2014). The effect of nearby timpani strokes on horn playing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1), 472-478.
- Chew, G. (2001). *Legato* Oxford University Press.
doi:10.1093/gmo/9781561592630.article.16290
- De Mantaras, R. L., & Arcos, J. L. (2002). AI and music: From composition to expressive performance. *AI Magazine*, 23(3), 43-43.

- Denney, R. W. (2012). The tuba sound. Retrieved from https://www.rickdenney.com/the_tuba_sound.htm
- Edwards, I. E. S. (1977). Treasures of tutankhamun Ballantine Books.
- Edwards, R. (1978). The perception of trombones. *Journal of Sound and Vibration*, 58(3), 407-424.
- Elliott, S. J. (1979). *The Acoustics of Brass Wind-Instruments*,
- Entrena, J. M. C. (2015). *La eneida en la ópera: Los troyanos de berlioz* Punto Rojo Libros.
- Flanigan, G. P. (2008). An investigation of the effects of the use of SmartMusic software by brass players on intonation and rhythmic accuracy. ERIC.
- Fletcher, N. H., & Tarnopolsky, A. (1999). Blowing pressure, power, and spectrum in trumpet playing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(2), 874-881.
- Fletcher, N. H. (2001). Recent progress in the acoustics of wind instruments. *Acoustical Science and Technology*, 22(3), 169-176. doi:10.1250/ast.22.169
- Forsyth, C. (1982). *Orchestration* Courier Corporation.
- Geringer, J. M., Madsen, C. K., & Dunnigan, P. (2001). Trumpet tone quality versus intonation revisited: Two extensions. *Bulletin of the Council for Research in Music Education*, (148), 65-76.
- Gilbert, J., Ponthus, S., & Petiot, J. (1998). Artificial buzzing lips and brass instruments: Experimental results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(3), 1627-1632.
- Kausel, W., Chatziioannou, V., Moore, T. R., Gorman, B. R., & Rokni, M. (2015). Axial vibrations of brass wind instrument bells and their acoustical influence: Theory and simulations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(6), 3149-3162. doi:10.1121/1.4921270 [doi]
- Kemp, J. A. (2002). Theoretical and experimental study of wave propagation in brass musical instruments.
- Kopiez, R. (2003). Intonation of harmonic intervals: Adaptability of expert musicians to equal temperament and just intonation. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 20(4), 383-410.
- L.S. Lloyd, & Rastall, R. (2001). *Pitch nomenclature* Oxford University Press. doi:10.1093/gmo/9781561592630.article.21857
- Lindley, M. (2001a). *Equal temperament* Oxford University Press. doi:10.1093/gmo/9781561592630.article.08900
- Lindley, M. (2001b). *Just intonation* Oxford University Press. doi:10.1093/gmo/9781561592630.article.14564

- Lopes, N., Hélie, T., & Caussé, R. (2013). Control of an artificial mouth playing a trombone and analysis of sound descriptors on experimental data. Paper presented at the Stockholm Music Acoustics Conference 2013,
- LoPresto, M. C. (2014). Mouthpiece and bell effects on trombone resonance. *The Physics Teacher*, 52(1), 26-29.
- Macaluso, C. A., & Dalmont, J. (2011). Trumpet with near-perfect harmonicity: Design and acoustic results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(1), 404-414.
- Martin, D. W. (1942). Directivity and the acoustic spectra of brass wind instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 13(3), 309-313.
- Tubo de Kundt. Mazo, A. (Director). (2015). [Video] Youtube. Retrieved from <https://youtu.be/3dKvGaZA5lQ>
- Merino de la Fuente, Jesús Mariano. (2010). *Las vibraciones de la música*. Alicante: ECU.
- Missoum, S., Vergez, C., & Doc, J. (2014). Explicit mapping of acoustic regimes for wind instruments. doi:10.1016/j.jsv.2014.05.017
- Moore, T. R., Gorman, B. R., Rokni, M., Kausel, W., & Chatziioannou, V. (2015). Axial vibrations of brass wind instrument bells and their acoustical influence: Experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(2), 1233-1240. doi:10.1121/1.4928138 [doi]
- Nave, R. (2011). Pressure and displacement, air column. Retrieved from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Waves>
- Norman, L., Chick, J., Campbell, D., Myers, A., & Gilbert, J. (2010). Player control of 'brassiness' at intermediate dynamic levels in brass instruments. *Acta Acustica United with Acustica*, 96(4), 614-621.
- Norman, L. (2010). Wagner tubas and related instruments: An acoustical comparison. *The Galpin Society Journal*, 63, 143-158.
- Pastor, V. (2009). Introducción a la acústica de los instrumentos de viento-metal. *Revista De Acústica*, 40(1-2), 21-33.
- Petiot, J., Poirson, E., & Gilbert, J. (2005). Study of the relations between trumpets' sounds characteristics and the input impedance. Paper presented at the Proceedings of Forum Acusticum, 747-752.
- Poirson, E., Petiot, J., & Gilbert, J. (2005a). Study of the brightness of trumpet tones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(4), 2656-2666.
- Pratt, R., Elliott, S., & Bowsher, J. (1977). The measurement of the acoustic impedance of brass instruments. *Acta Acustica United with Acustica*, 38(4), 236-246.

- Rabenstein, R., & Petrausch, S. (2008). Block-based physical modeling with applications in musical acoustics. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 18(3), 295. doi:10.2478/v10006-008-0027-6
- Risset, J., & Wessel, D. L. (1982). Exploration of timbre by analysis and synthesis. *The Psychology of Music*, 2, 151.
- Rusell, D. A. (2012). Acoustics and vibration animations. Retrieved from <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/StandingWaves/StandingWaves.html>
- Woldendorp, K. H., Boschma, H., Boonstra, A. M., Arendzen, H. J., & Reneman, M. F. (2016). Fundamentals of embouchure in brass players: Towards a definition and clinical assessment. *Medical Problems of Performing Artists*, 31(4), 232-243. doi:10.21091/mppa.2016.4038 [doi]
- Yoshikawa, S. (1995). Acoustical behavior of brass player's lips. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), 1929-1939.
- Young, R. W. (1967). Optimum lengths of valve tubes for brass wind instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 42(1), 224-235.

Bibliografía realizada con ProQuest - RefWorks y disponible online en:
[<http://www.refworks.com/refshare2?site=070141318996800000/132081549119318753/TFM>]

Anexo 1: Partituras y ejemplos utilizados en los ejercicios.

Ejercicio 1: Caracterización del timbre (calentamiento)

Andante cantabile [$\text{♩} = 63$]

mf

10

20

f

30

mf

40

50

rall.

Extraído de "43 legato studies" M. Bordogni. Ed. Alphonse Leduc

EJERCICIOS PARA TUBA CONTRABAJA EN DO

Ejercicio 2-CC

Musical notation for Exercise 2-CC, showing a four-measure phrase in bass clef. The notes are C2 (whole), B1 (half), Bb1 (half), and Bb1 (half). A slur covers the first two notes, with a dynamic marking of *pp* below the first note.

Ejercicio 3.1 CC

Musical notation for Exercise 3.1 CC, showing a four-measure phrase in bass clef. The notes are C2 (whole), B1 (half), Bb1 (half), and Bb1 (half). A slur covers the first two notes, with a dynamic marking of *mf* below the first note.

Ejercicio 3.2 - CC

Musical notation for Exercise 3.2 - CC, showing a four-measure phrase in bass clef. The notes are C2 (whole), B1 (half), Bb1 (half), and Bb1 (half). A dynamic marking of *fff* is placed below the first note.

Ejercicio 4- CC

Musical notation for Exercise 4- CC, showing a four-measure phrase in bass clef. The notes are C2 (whole), B1 (half), Bb1 (half), and Bb1 (half). A dynamic marking of *pp* is below the first note, and a dynamic marking of *fff* is below the second note. A wedge-shaped hairpin connects the two dynamic markings, with the word *simile* written above the second note.

EJERCICIOS PARA TUBA CONTRABAJO EN SI BEMOL

Ejercicio 2-BB

Musical notation for Ejercicio 2-BB. It consists of a single staff in bass clef with a key signature of one flat (B-flat). The melody is a half-note scale: B-flat, A, G, F. A slur covers the first two notes, B-flat and A. The dynamic marking *pp* is placed below the first note.

Ejercicio 3.1 BB

Musical notation for Ejercicio 3.1 BB. It consists of a single staff in bass clef with a key signature of one flat (B-flat). The melody is a half-note scale: B-flat, A, G, F. A slur covers the first two notes, B-flat and A. The dynamic marking *mf* is placed below the first note.

Ejercicio 3.2 - BB

Musical notation for Ejercicio 3.2 - BB. It consists of a single staff in bass clef with a key signature of one flat (B-flat). The melody is a half-note scale: B-flat, A, G, F. Each note has an accent mark above it. The dynamic marking *ff* is placed below the first note.

Ejercicio 4- BB

Musical notation for Ejercicio 4- BB. It consists of a single staff in bass clef with a key signature of one flat (B-flat). The melody is a half-note scale: B-flat, A, G, F. Each note has an accent mark above it. The dynamic marking *pp* is placed below the first note, and *fff* is placed below the last note. A wedge-shaped hairpin indicates a crescendo from *pp* to *fff*. The word *simile* is placed to the right of the *fff* marking.

EJERCICIOS PARA TUBA BAJA EN FA

Ejercicio 2- F

Musical notation for Ejercicio 2- F, showing a bass clef staff with a whole note F2, a half note F2, a quarter note F2, and a quarter note F2. The dynamic marking is *pp*.

Ejercicio 3.1 F

Musical notation for Ejercicio 3.1 F, showing a bass clef staff with a whole note F2, a half note F2, a quarter note F2, and a quarter note F2. The dynamic marking is *mf*.

Ejercicio 3.2 - F

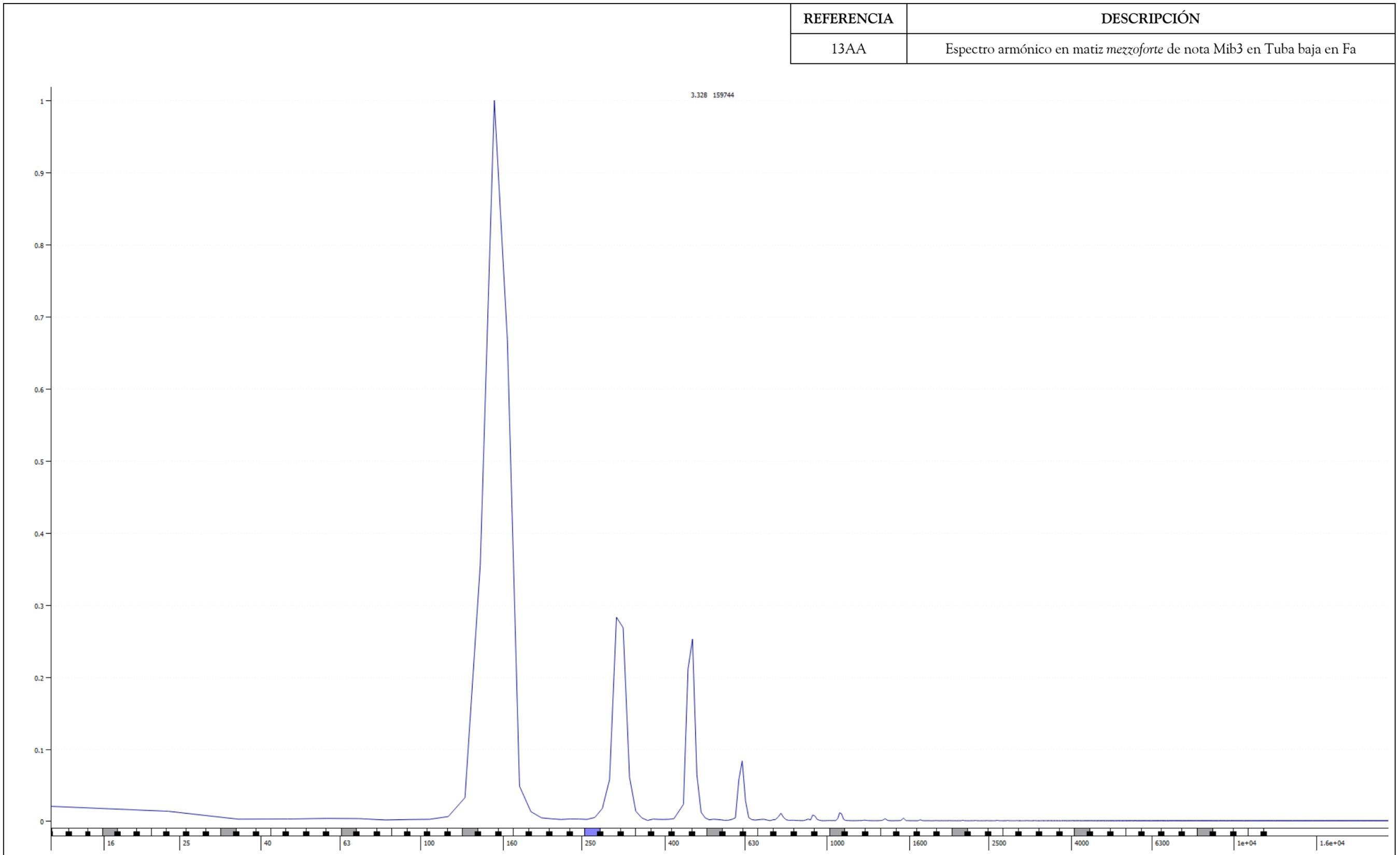
Musical notation for Ejercicio 3.2 - F, showing a bass clef staff with a whole note F2, a half note F2, a quarter note F2, and a quarter note F2. The dynamic marking is *ff*.

Ejercicio 4-F

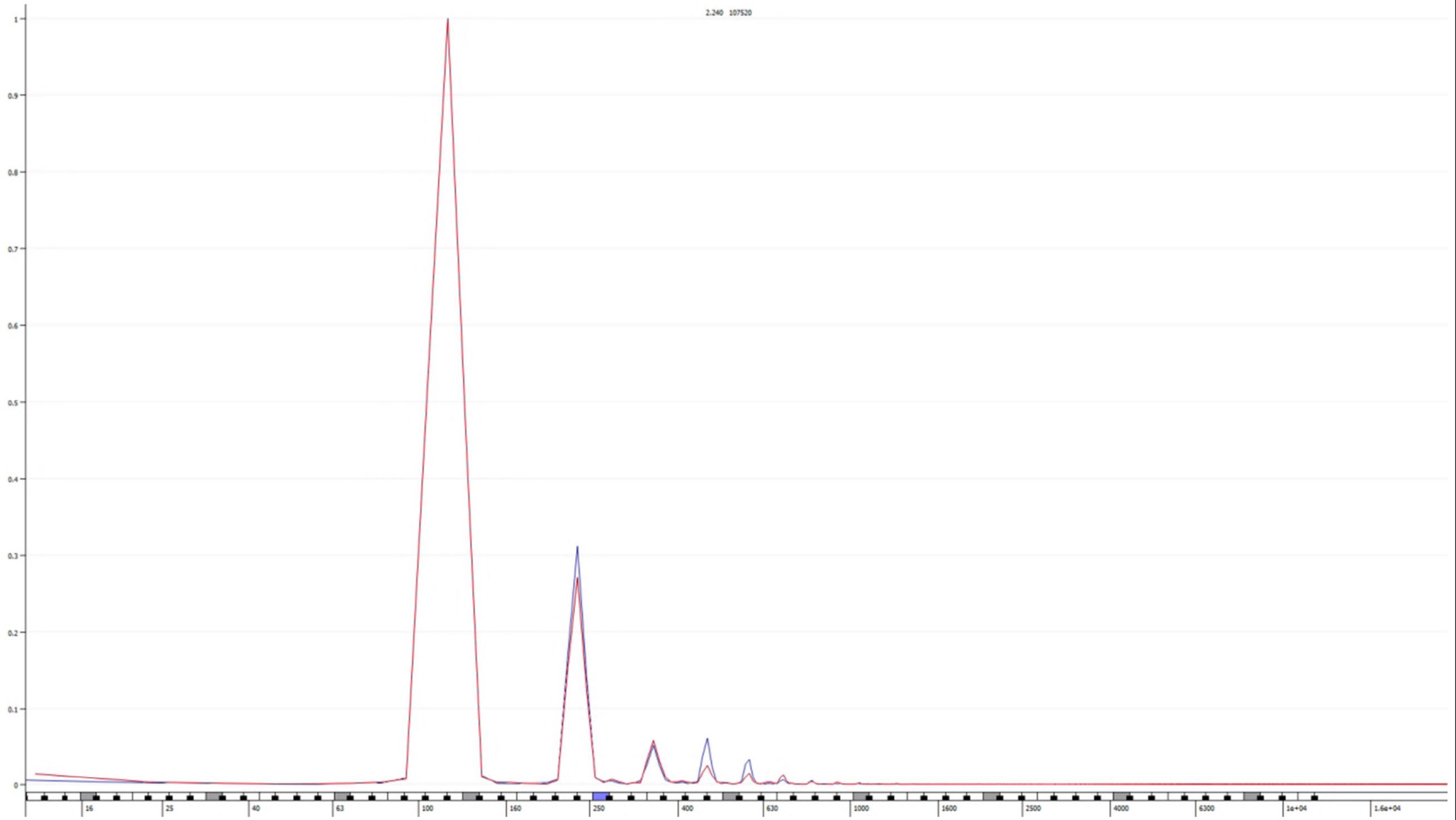
Musical notation for Ejercicio 4-F, showing a bass clef staff with a whole note F2, a half note F2, a quarter note F2, and a quarter note F2. The dynamic marking is *pp < .fff simile*.

Anexo 2: Espectros y espectrogramas en gran formato

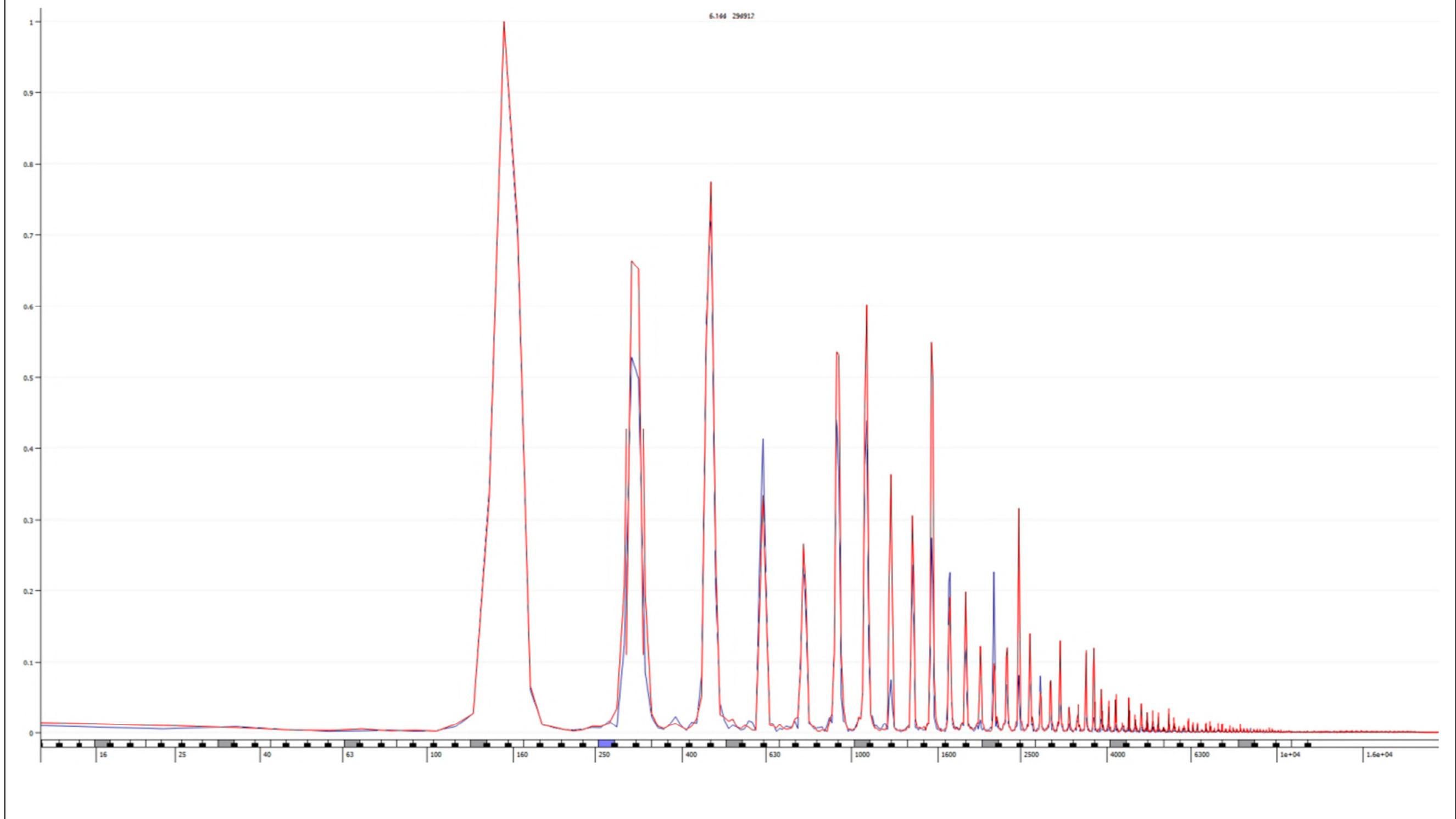
REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
13AA	Espectro armónico en matiz <i>mezzoforte</i> de nota Mib3 en Tuba baja en Fa



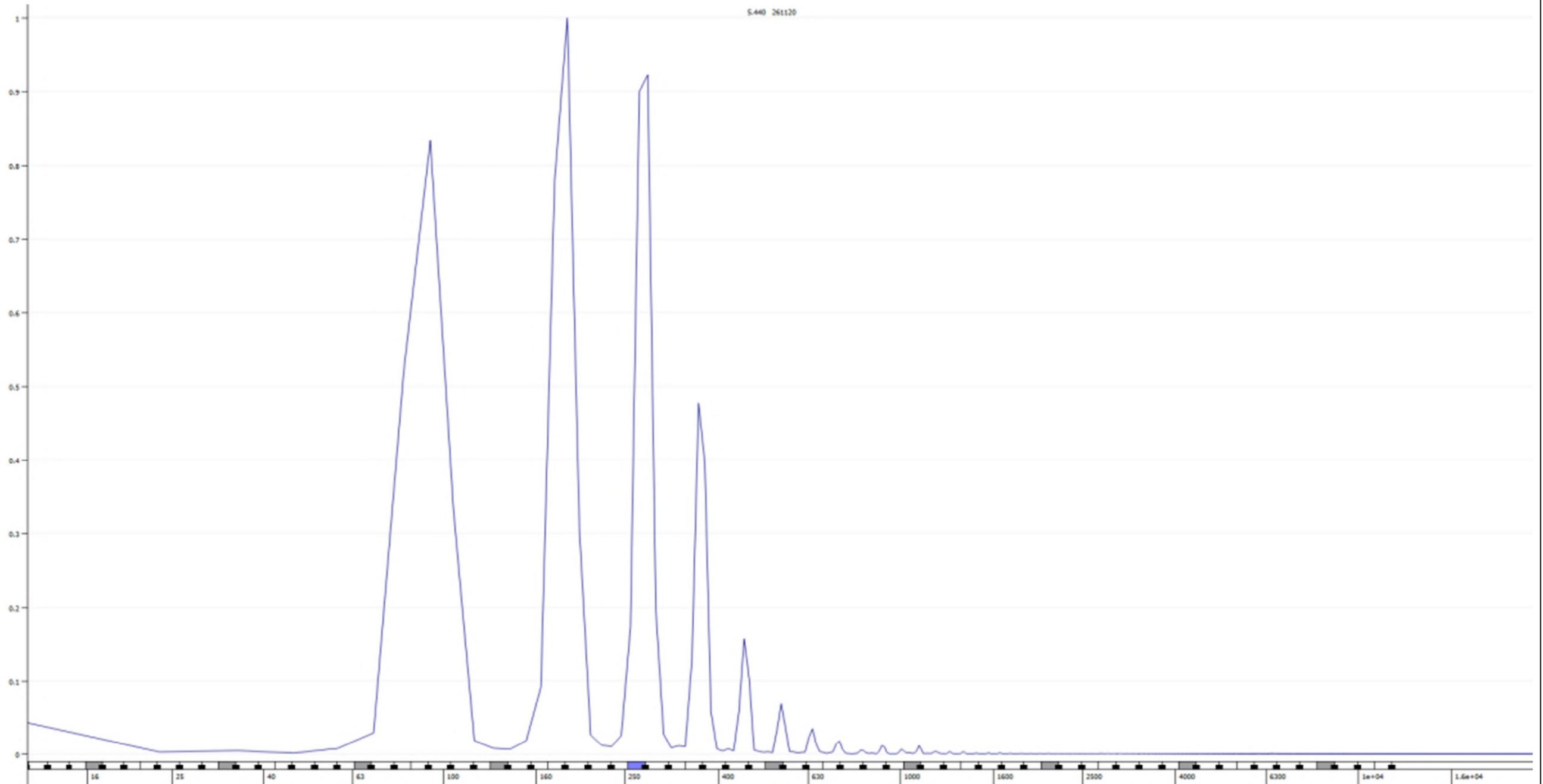
REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
15CDa	Diferencias en ejercicio 2, nota Mib3 en tuba en Fa, ejecutantes C (color azul) y D (rojo). Matiz <i>mf</i>



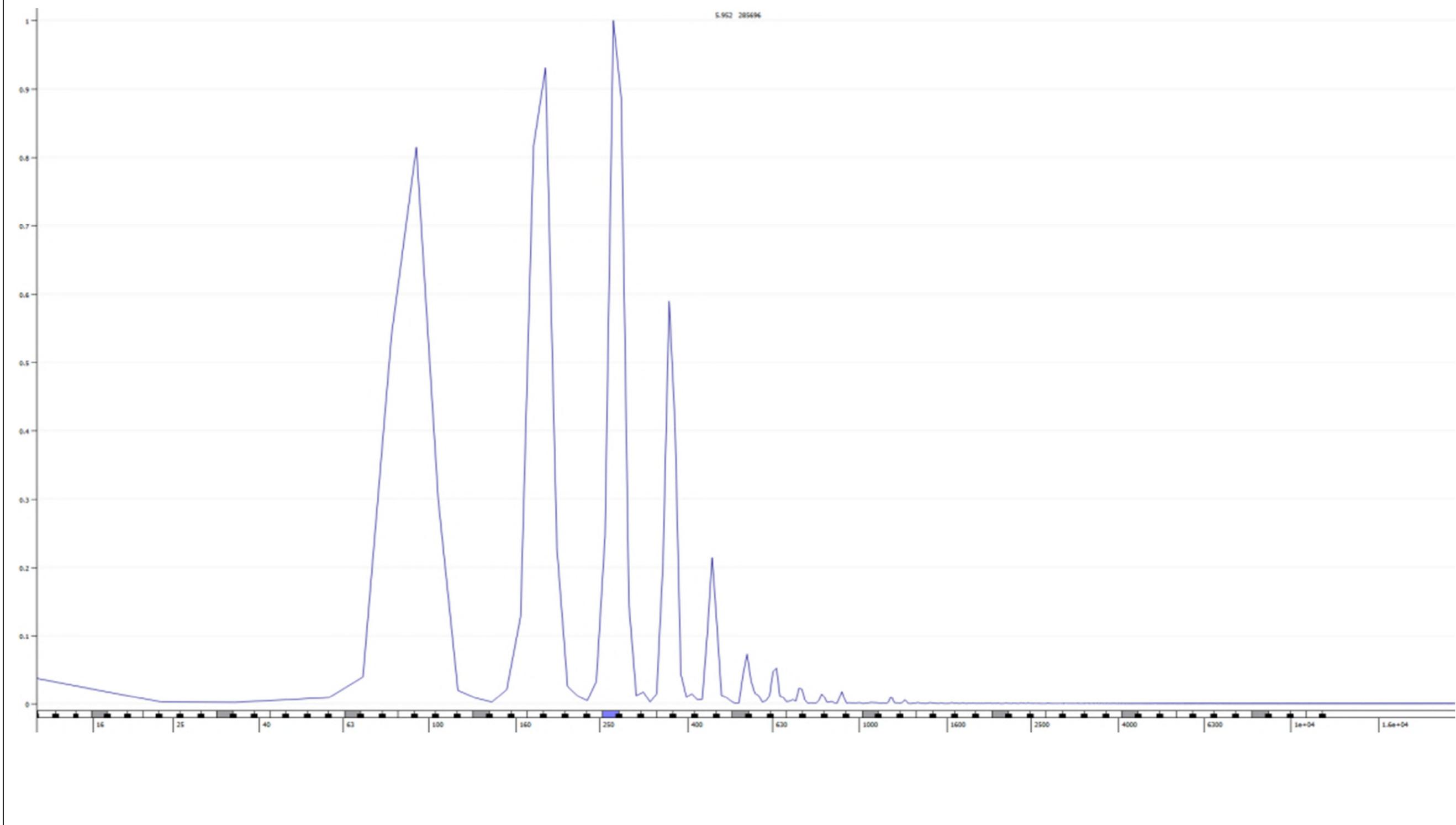
REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
15Cdb	Diferencias en ejercicio 3.2, nota Mib3 en tuba en Fa, ejecutantes C (color azul) y D (rojo). Matiz <i>ff</i>



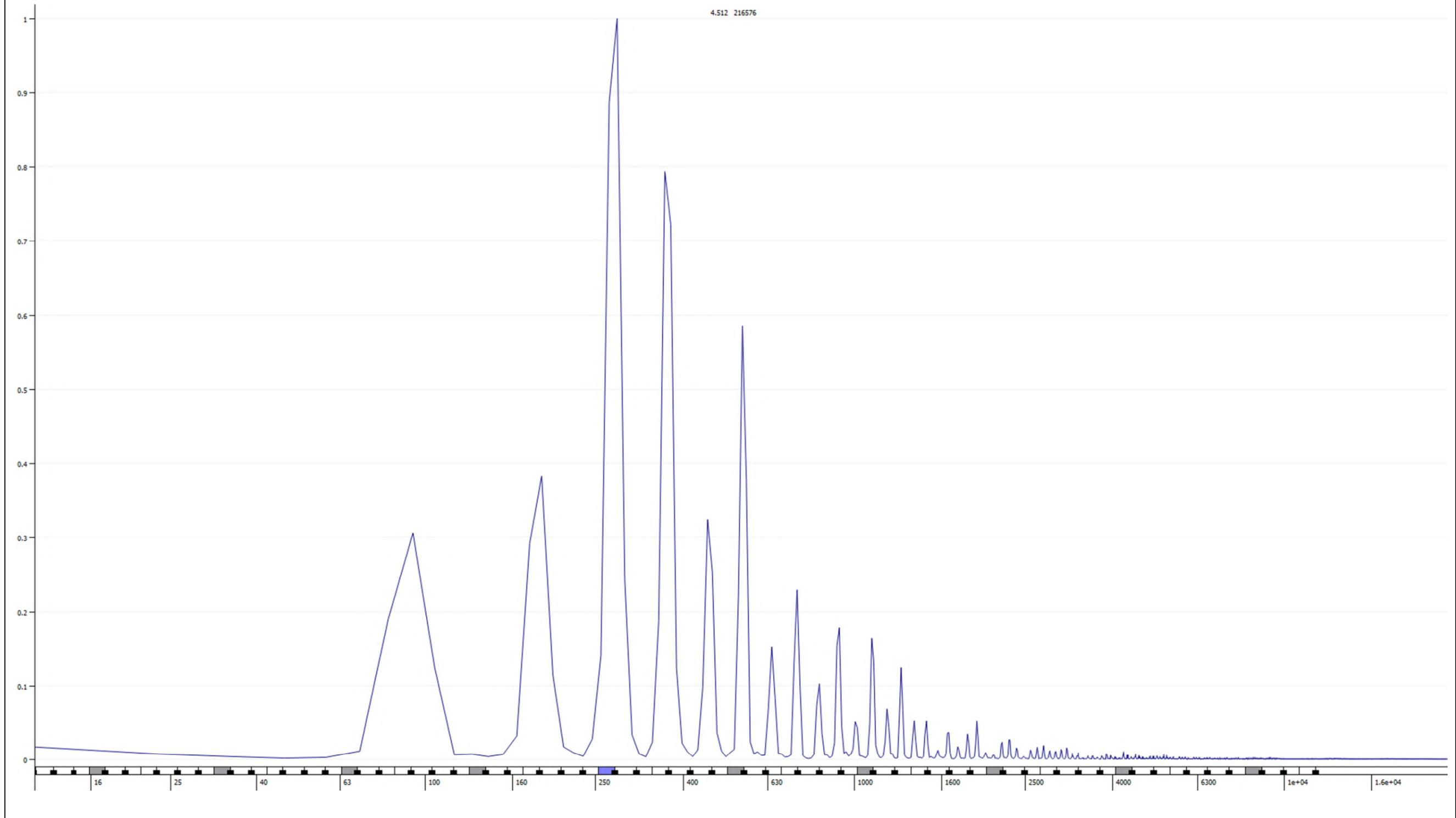
REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
BBAGb1	Tuba contrabajo en si bemol, ejercicio 2 Solb3 - Ejecutante A



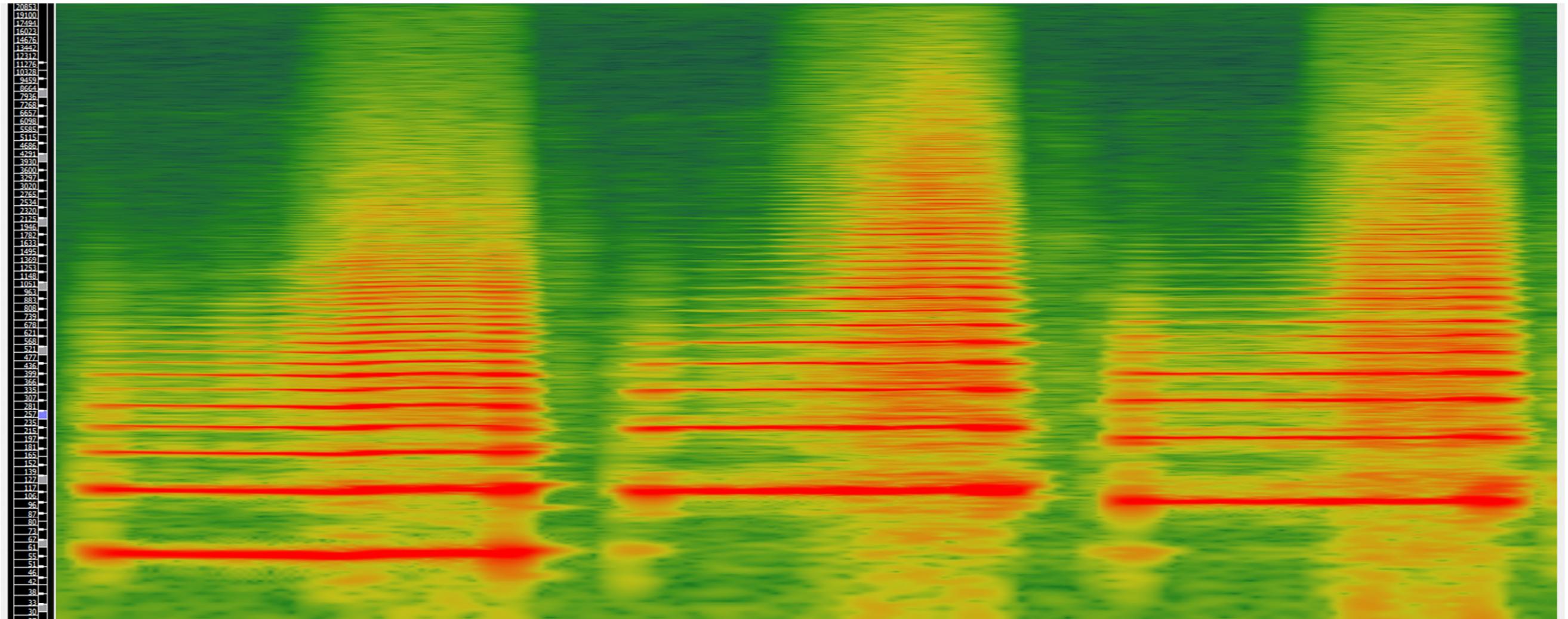
REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
BBAGb2	Tuba contrabajo en si bemol, ejercicio 3.1 Solb3 - Ejecutante A



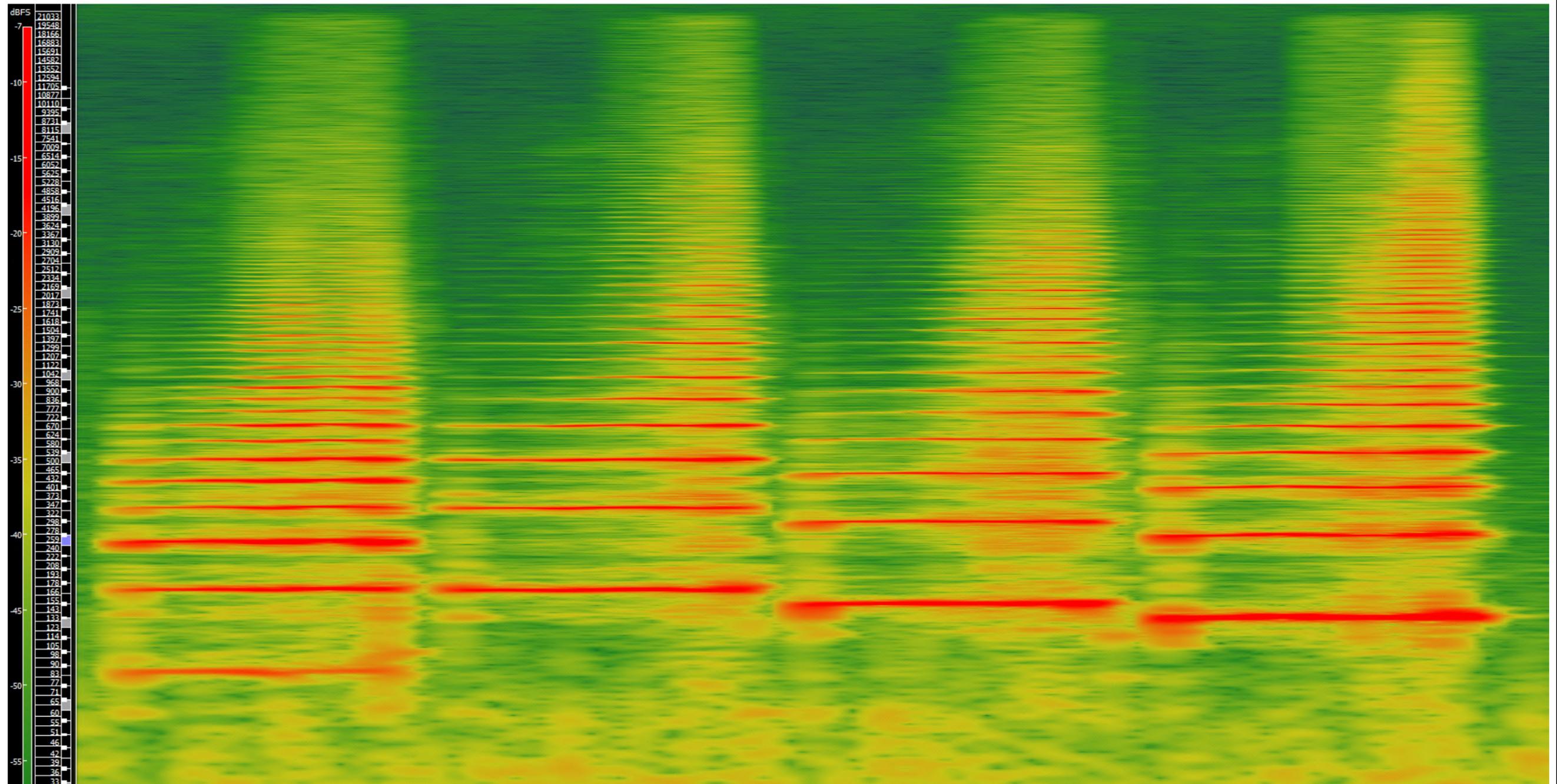
REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
BBAGb3	Tuba contrabaja en si bemol, ejercicio 3.2 Solb3 - Ejecutante A



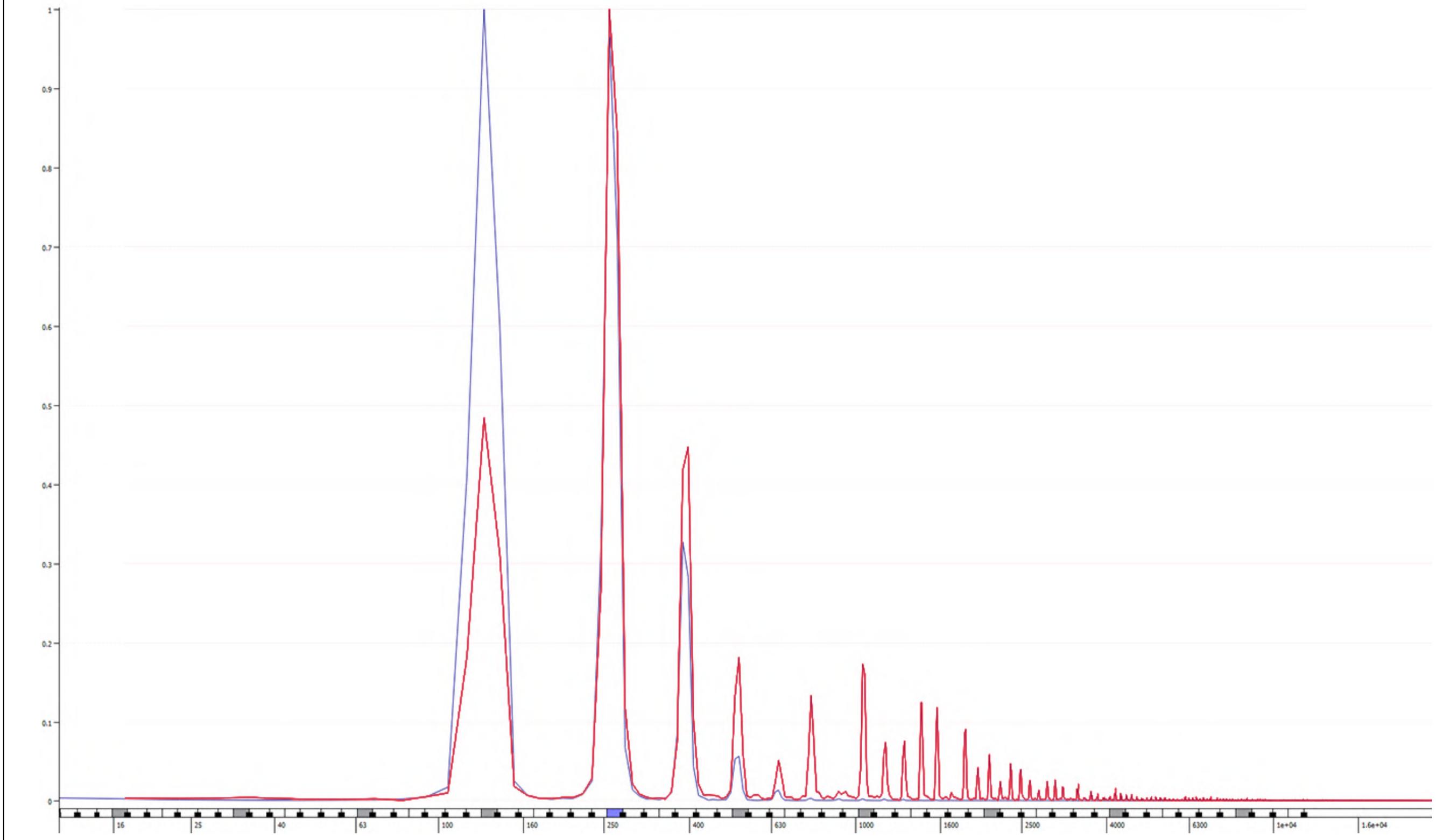
REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
BBspA	Espectrograma ejecución ejercicio 4 tuba en si bemol (Crescendo) ejecutante A



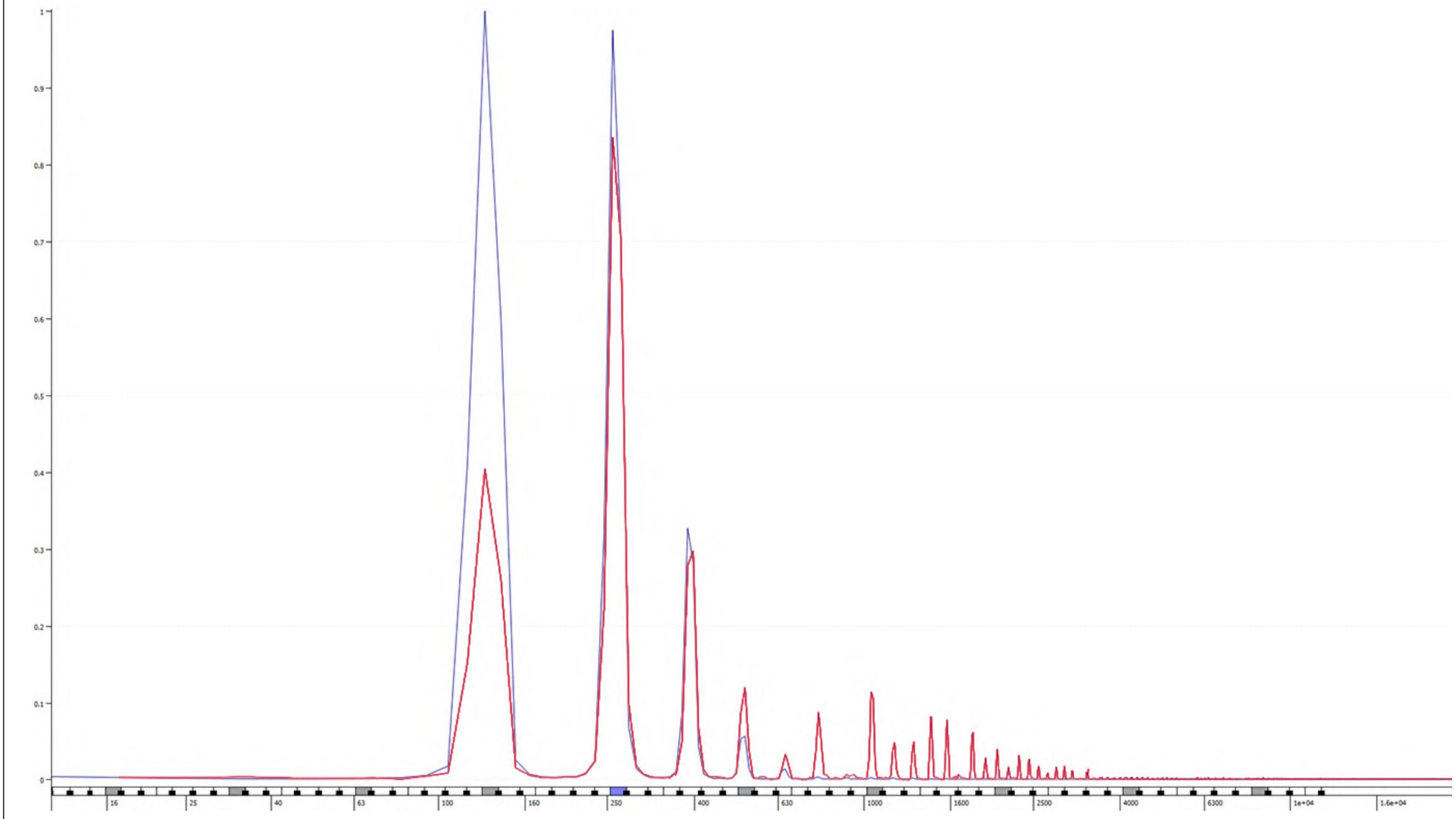
REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
FspB	Espectrograma ejecución ejercicio 4, tuba en Fa (Crescendo) ejecutante B



REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Com231A	Espectros superpuestos ejercicio 2- pp (azul) y 3.2 ff (rojo) , tuba en Do ejecutante A



REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Com231B	Espectros superpuestos ejercicio 2- pp (azul) y 3.2 ff (rojo) , tuba en Do ejecutante B



REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
Com231B	Espectros superpuestos ejercicio 2- pp (azul) y 3.2 ff (rojo) , tuba en Do ejecutante C

