

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# **Comparación de la Percepción Acústica de un Sistema de Afinación de Proporciones Áureas frente a otros Temperamentos Tradicionales**

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:

**D<sup>a</sup>. Sara Sicilia Felipe**

Tutor/a:

**Dr. D. Juan Antonio Martínez Mora**

**Dra. D<sup>a</sup>. Isabel Pérez Arjona**

**GANDIA, 2015**

## RESUMEN

Este trabajo realiza una valoración, desde el punto de vista de la acústica subjetiva, de un sistema de afinación basado en el número áureo en sus tres versiones. Para ello la herramienta fundamental de trabajo ha sido la encuesta, la cual ha sido habilitada *on line* para ser realizada tanto por músicos entrenados como oyentes no expertos. Mediante la comparación de pares, los participantes han podido valorar los citados temperamentos, así como la escala pitagórica y el temperamento igual de doce notas. De las respuestas de los músicos entrenados podemos concluir que los temperamentos basados en el número áureo analizados no son adecuados para su uso en la música occidental, a excepción de vanguardias de los siglos XX y XXI, y música anterior al barroco (estilos en torno a los cuales este trabajo no se pronuncia). Por otro lado, el grupo de oyentes no expertos ha ofrecido unos resultados similares aunque con un mayor grado de dispersión, siendo por tanto menos concluyentes.

DESCRIPTORES: psicoacústica, evaluación subjetiva, sistemas de afinación, escalas musicales, número áureo.

## ABSTRACT

This report makes an assessment, from the psychoacoustic point of view, of a tuning system based on the golden number in its three versions. For this purpose, a web-based questionnaire filled in by professional musicians and non-expert listeners has been the main working tool. Based on paired item comparison tests, participants were able to assess the aforementioned temperaments, as well as the Pythagorean scale and twelve-note equal temperament. From the group of professional musicians' responses we can conclude that the golden-based tuning systems that were analysed are not appropriate to be used in Western music, except for XX-XXI century avant-garde music and early music, which are styles that this report does not deal with. Similar results were produced by the non-expert listeners, although they presented bigger scattering and therefore were not so conclusive.

KEYWORDS: psychoacoustics, subjective testing, tuning systems, musical scales, golden number.

# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	Presentación .....	5
1.2	Objetivos .....	5
1.3	Metodología .....	5
2	SISTEMAS DE AFINACIÓN EMPLEADOS EN ESTE TRABAJO .....	6
2.1	Escalas y temperamentos .....	6
2.1.1	Escala pitagórica .....	7
2.1.2	Temperamento igual.....	9
2.1.3	Temperamentos basados en el número áureo.....	9
3	ELABORACIÓN DE NUESTRA ENCUESTA DE VALORACIÓN SUBJETIVA.....	11
3.1	Diseño de la encuesta .....	11
3.1.1	Antecedentes.....	13
3.1.2	Toma de decisiones. Justificación .....	14
3.2	Preparación y procesado de muestras .....	17
3.2.1	Creación de un fragmento musical .....	17
3.2.2	Procesado de archivos MIDI – software <i>Scala</i> .....	18
3.2.3	Generación de muestras de audio .....	19
4	RESULTADOS .....	20
4.1	Percepción subjetiva escalas basadas en número áureo .....	20
4.1.1	Respuesta de valoración subjetiva del panel de expertos.....	26
4.1.2	Respuesta de valoración subjetiva del jurado no experto .....	28
4.2	Encuesta on line para evaluación subjetiva .....	30
5	CONCLUSIONES .....	31
5.1	Nuevas líneas de investigación .....	31
	REFERENCIAS .....	33

## Índice de tablas y figuras

Tabla 1.	Principio de formación de una escala pitagórica .....	8
Tabla 2.	Razones en progresión geométrica de 8 notas .....	10
Tabla 3.	Valores en frecuencia de sistemas basados en número áureo y comparación frente a escala temperada .....	11
Tabla 4.	Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, DO M .....	21
Tabla 5.	Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, DO M .....	22
Tabla 6.	Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, RE M .....	22
Tabla 7.	Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, Re M.....	23
Tabla 8.	Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, SIb M .....	23

Tabla 9. Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, Slb M .....	24
Tabla 10. Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, LA M .....	24
Tabla 11. Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, LA M .....	25
Tabla 12. Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, SOL M .....	25
Tabla 13. Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, SOL M .....	26
Tabla 14. Resultados estadísticos generales de respuesta de expertos en comparación de pares.....	27
Tabla 15. Caracterización de quintas de las tonalidades de nuestro trabajo, frente a afinación pitagórica.....	28
Tabla 16. Resultados estadísticos generales de respuesta de no expertos en comparación de pares .....	28
Figura 1. Círculo de quintas en afinación pitagórica.....	8
Figura 2. Partición de la octava en temperamento igual.....	9
Figura 3. Ejemplo de pregunta estándar en cuestionario de valoración subjetiva .....	12
Figura 4. Fragmento de muestra en dos pentagramas.....	17
Figura 5. Fragmento de muestra en cuatro pentagramas .....	17
Figura 6. Entorno gráfico principal en Scala.....	18
Figura 7. Ventana de edición de escalas. Ejemplo sobre número áureo bilineal .....	19
Figura 8. Forma de onda de una muestra de audio en dos canales.....	20
Figura 9. Relación numérica entre escala de respuesta y de análisis estadístico .....	21
Figura 10. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, DO M.....	21
Figura 11. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, DO M .....	22
Figura 12. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, RE M .....	22
Figura 13. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, RE M.....	23
Figura 14. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, Slb M.....	23
Figura 15. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, Slb M .....	24
Figura 16. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, LA M.....	24
Figura 17. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, LA M .....	25
Figura 18. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, SOL M .....	25
Figura 19. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, SOL M .....	26

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Presentación

Este trabajo final de grado se engloba dentro del campo de la acústica, concretamente de la denominada acústica subjetiva o psicoacústica. Durante el curso académico 2011-2012, D. Jaime Barberá, alumno del *Máster en Ingeniería Acústica* impartido en la Escuela Politécnica Superior de Gandía presentó en su trabajo final de máster un nuevo sistema de escalas, basadas en la proporción del número áureo.

Motivado por éste, nuestro trabajo tiene como objetivo el llevar a cabo el estudio de la valoración del grado de aceptación musical de tales escalas, comparativamente a otros sistemas tradicionales como son el temperamento igual o la escala pitagórica. A través de este trabajo, por tanto, llegaremos a conocer si tales escalas producen una respuesta subjetiva similar a estos otros sistemas tradicionales, o si por el contrario contribuyen positiva o bien negativamente en la percepción y valoración musical de los individuos.

Como aspecto novedoso con respecto a la metodología convencional de este tipo de estudios sobre percepción de la acústica musical, indicar que la encuesta de valoración subjetiva ha sido realizada a través de una plataforma *on line*, desde la cual se han descargado las respuestas para su posterior análisis estadístico.

## 1.2 Objetivos

Al margen de otros objetivos de corte académico, relativos al uso y dominio de las herramientas para llevar a cabo este trabajo, los objetivos esenciales que articulan nuestro estudio son:

- Evaluar un sistema de afinación específico basado en proporciones áureas, mediante un estudio comparativo de la valoración subjetiva en el que se verá su grado de aceptación respecto a otros sistemas de afinación más convencionales.
- Discernir dicho grado de aceptación en personas que específicamente han recibido un entrenamiento musical profesional.
- Conocer las fortalezas y debilidades de un sistema de encuesta *on line* de evaluación acústica subjetiva, aplicado al estudio de estos sistemas de afinación.

## 1.3 Metodología

Nuestro trabajo, al igual que la mayoría de los estudios sobre psicoacústica, consiste en un análisis cuantitativo basado en encuestas. Para ello, y con el fin de cumplir con nuestros objetivos se han marcado las siguientes etapas:

1. Elaboración de una muestra sonora que pudiera ajustarse a un rango lo más amplio posible de estilos musicales. Se realizó un ejercicio de armonía tradicional a cuatro voces, inicialmente escrito en dos pentagramas. Una vez finalizada, esta muestra se

introdujo en el programa de edición de partituras *Musescore*. Dicho software generaba un archivo en formato MIDI con el fragmento musical en cuestión.

2. A través del programa *Scala* de la Fundación Huygens-Fokker (Holanda), se ha modificado la altura de los diferentes sonidos del fragmento de acuerdo al sistema de afinación que se quería evaluar. A la hora de hacer la traducción de los archivos MIDI, pudo observarse cómo únicamente algunos de los sonidos de la muestra eran reproducidos, y otros obviados. Tras varias pruebas, se observó que este problema era debido al tipo de mensaje de canal de MIDI, y quedó solventado con la reescritura del fragmento musical en el editor de partituras en cuatro pentagramas.
3. Creación de muestras de audio, que se han llevado a cabo mediante una tarjeta *Lexicon Lambda* y el programa de edición de audio *Cool Edit*. La señal entraba por un solo canal, por lo que fue necesario realizar un pequeño procesado.
4. Ordenación aleatoria de los clips de audio y generación de la encuesta: Se buscaba dotarla de cierta capacidad de difusión, por lo que se planteó realizarla en *html*, o bien empleando aplicaciones de *Google* y/o redes sociales. Finalmente se optó por la herramienta proporcionada por [www.onlineencuesta.com](http://www.onlineencuesta.com), ya que cuenta con un convenio con la Universidad Politécnica de Valencia para este propósito.
5. Descarga de resultados y análisis estadístico. En este punto englobamos a su vez el análisis cualitativo que hemos podido realizar del proceso de encuesta *on line*.

## 2 SISTEMAS DE AFINACIÓN EMPLEADOS EN ESTE TRABAJO

---

### 2.1 Escalas y temperamentos

Podemos llamar escala a la ordenación correlativa de una serie de sonidos distribuidos entre una determinada nota de referencia y esta misma nota en la octava superior (es decir, aquel valor que duplica su frecuencia). Esta ordenación correlativa produce una sensación de altura del sonido (magnitud subjetiva que está relacionada con la magnitud física frecuencia asociada a un sonido) que es creciente cuando la escala es ascendente, y decreciente en caso contrario.

En la música occidental estamos habituados a sistemas que dividen la octava en 12 intervalos de semitono, si bien existen otros que trabajan con distancias más cortas, tradicionales de otras culturas no occidentales tales como hindú, turca, indonesia, árabe, caucásica, etc. (Huygens-Fokker Foundation 2015)

En teoría microtonal se considera la división de la octava en 1200 *cents* (existen también otras unidades asociadas a la sensación subjetiva de altura, que no vamos a tratar en este trabajo). Podríamos pensar que si contamos con 12 notas, a cada semitono le corresponderían necesariamente 100 *cents*. Sin embargo históricamente esto no ha sido así, puesto que hasta prácticamente en el S.XVIII (Huygens-Fokker Foundation 2015) no llegó a establecerse dicha correspondencia. (Hablaemos más adelante de este sistema, denominado escala temperada, o temperamento igual.)

Al ser el *cent* una medida logarítmica, aplicando la ley de Weber-Fechner podemos relacionarla con intervalos lineales en hercios, y/o proporciones numéricas:

$$d(f_1, f_2) = 1200 \cdot \log_2 \left( \frac{f_1}{f_2} \right) \text{cents} \quad (1)$$

Aunque en términos generales podemos considerar “afinación” y “temperamento” como equivalentes, en sentido estricto no lo son, en la medida en la que un sistema de afinación se obtiene mediante la aplicación de números racionales a la frecuencia de referencia, mientras que los temperamentos se caracterizan por el uso de valores irracionales (Goldaráz 2004). No obstante, al ser este trabajo de índole práctica, consideramos esta diferenciación como poco relevante, dado que siempre va a ser necesario realizar algún tipo de redondeo o aproximación en alguna de las frecuencias asignadas a los sonidos de la escala.

En general para todos los sistemas de afinación de música occidental se toma como referencia el sonido LA<sub>4</sub> fijado en 440 Hz, tal y como se estableció en la Conferencia Internacional de 1939, así como en posteriores publicaciones de la Organización Internacional de Estandarización (ISO 1975). Para los no iniciados en música, indicar que el subíndice establece el número de octava.

Existen infinidad de sistemas afinación y temperamentos que escapan al objeto de este trabajo. Por ello, nos centraremos únicamente en aquellos con los que sí hemos contado en nuestra comparación. Pasamos a explicarlos brevemente.

### 2.1.1 Escala pitagórica



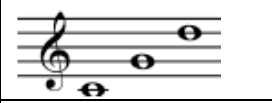
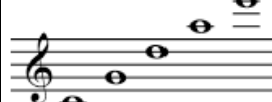
Una de las escalas más conocida es la elaborada por Pitágoras (Samos 570 a.C.- Metaponto 459 a.C.). En esta, la división de la octava se realiza en 12 sonidos, los cuales se obtienen mediante la superposición o encadenamiento de intervalos de quinta (que es la distancia que podemos encontrar entre DO<sub>4</sub> y SOL<sub>4</sub>, por ejemplo).

Pitágoras orientó todos sus esfuerzos a la racionalización y caracterización matemática del universo, sentando las bases de la teoría conocida como la *Armonía de las Esferas*. Esta contempla el movimiento de cada uno de los planetas como generador de un determinado sonido, de tal modo que la combinación de todos ellos produce una “música perfecta” (Michels 1993). Esta teoría de Pitágoras, entre otras, puede ilustrar la muy estrecha relación que encontraba entre música y número.

Mediante experimentos con un monocordio, Pitágoras pudo observar que al mantener una cuerda con tensión constante y hacerla vibrar, se obtenía un intervalo de octava (DO<sub>3</sub>-DO<sub>4</sub>, por ejemplo) si se reducía la longitud a la mitad. Por ello, nombró como 2/1 la fracción que identificaba a este intervalo. Del mismo modo, si se presiona sobre la cuerda a una longitud de 2/3 se produce un sonido una quinta superior. El intervalo se caracteriza, por tanto, como 3/2. Realizó otros muchos experimentos relacionados con esta materia, como el llevado a cabo en una fragua, donde relacionó estos intervalos con la masa de los martillos que producían los sonidos (Ibáñez 2006, p.92).

Para Pitágoras, la obtención de los sonidos de la escala de forma que se generaran verdaderas consonancias, dependía únicamente del cálculo adecuado de sus intervalos. Como ya hemos

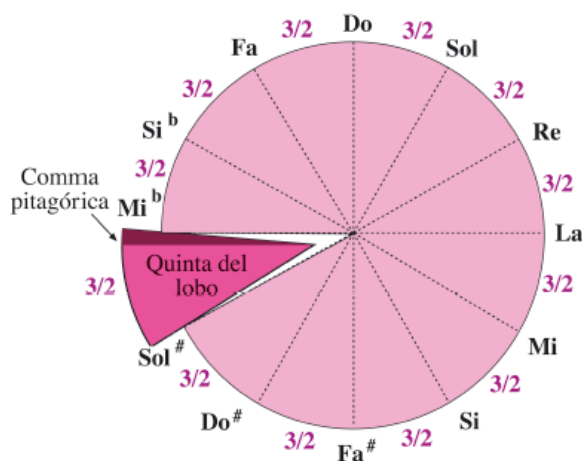
citado, se obtienen mediante el encadenamiento de quintas (identificado mediante  $\frac{3}{2}$ ), con la correspondiente reducción de octavas. Pongamos un ejemplo, en el que empezaremos a formar una escala, tomando como referencia el  $DO_4 = 261.63$  Hz (DO central, en un teclado de piano):

DO-SOL		$SOL = \frac{3}{2} \cdot DO = 392,45$ Hz	<p>ESCALA RESULTANTE</p> 
DO-SOL-RE		$RE = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot DO = \frac{9}{8} \cdot DO$ = 294,33 Hz	
DO-SOL-RE-LA-MI		$MI = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot DO$ $MI = \frac{81}{64} \cdot DO = 331,13$ Hz	

**Tabla 1. Principio de formación de una escala pitagórica**

De este modo, si se aplica sucesivamente el encadenamiento de quintas (con la correspondiente reducción de octavas) llegaremos a obtener las fracciones que caracterizan a cada uno de los intervalos, y las correspondientes frecuencias de las notas resultantes. En sentido ascendente llegaremos a los sonidos con sostenidos, y en sentido descendente, a sonidos con bemoles.

Sin embargo, una vez obtenidos dichos valores, observamos que las frecuencias y/o fracciones resultantes para sonidos como  $DO\#$  y  $REb$  no coinciden. Esto produce la diferenciación de dos tipos de semitono: cromático (representado por la fracción  $\frac{2187}{2048}$ ) y diatónico ( $\frac{256}{243}$ ). La distancia entre ambos es la llamada *comma pitagórica* (ilustración 1: Ibáñez 2008, p.97).



**Figura 1. Círculo de quintas en afinación pitagórica**

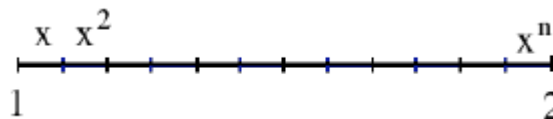
Al no tratarse la escala pitagórica de un sistema cíclico, ocurre que tras la concatenación de once quintas, el intervalo residual restante (denominado “quinta del lobo”) no llega a cubrir la distancia de una nueva quinta natural, faltándole el espacio de una *comma pitagórica*. Esto provoca que no sea posible cerrar el círculo de quintas y por tanto, en la escritura musical, impide modular a determinadas tonalidades.



### 2.1.2 Temperamento igual

Se trata del sistema de afinación que casi exclusivamente se emplea en la actualidad en la música occidental. Es cíclico, es decir, resuelve el problema planteado anteriormente, cerrando el círculo de quintas y por tanto facilitando la posibilidad de modulación a todo tipo de tonalidades. El término “igual” se refiere a la medida en la que este sistema es regular; es decir, todos los intervalos responden exactamente a una misma distancia. Francisco de Salinas (Burgos 1513 - Salamanca 1590) fue el primero en definirlo de una manera matemática exacta (García, 2003), pero como ya se ha citado, no comenzó a extenderse su uso hasta el siglo XVIII.

*Temperamento igual* se refiere, en términos generales, a la división de la octava en un número determinado de partes iguales.



**Figura 2. Partición de la octava en temperamento igual**

Aunque existen otros sistemas de temperamento igual, el más extendido es el de 12 notas. En este, la octava se divide en 12 semitonos iguales, de razón  $\sqrt[12]{2}$ . El resultado de ello es que ninguno de los sonidos obtenidos se corresponde con múltiplos enteros de la frecuencia de la nota fundamental. Por el contrario, todos ellos responden a una aproximación razonable, que compensa y distribuye la *comma pitagórica* a lo largo del citado círculo de quintas.

### 2.1.3 Temperamentos basados en el número áureo

Johannes Kepler consideraba que los “dos grandes tesoros de la geometría” eran el Teorema de Pitágoras y el número Phi ( $\phi$ ) (PhiPoint Solutions 2015). El número Phi, también llamado número áureo, consiste en un número irracional cuyo valor es aproximadamente 1,618... descubierto ya en la antigüedad como proporción que se hallaba presente en múltiples representaciones de la naturaleza y el arte.

Denominado en el Renacimiento como la “divina proporción”, el número Phi aparece en la mayoría de las manifestaciones de belleza y/o armonía. Es común su uso en arquitectura, pintura, fotografía, diseño gráfico e industrial, moda, etc.

El número áureo viene caracterizado por la siguiente expresión:

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \cong 1.6180339887.. \quad (2)$$

Y cumple dos propiedades particulares:

$$\phi^2 = \phi + 1 \quad (3)$$

$$\frac{1}{\varphi} = \varphi - 1 \quad (4)$$

Se relaciona con la secuencia de Fibonacci en tanto que dicha progresión converge en Phi. Esta secuencia comienza por 0 y 1, y a partir de estos cada número de la progresión es la suma de los dos anteriores: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55... Si dividimos cada número de la serie por su inmediatamente anterior, veremos que a medida que avanza la secuencia vamos obteniendo una aproximación cada vez mayor al número Phi.

En música, este valor ha sido utilizado de forma minoritaria en ciertas composiciones de los siglos XX y XXI, aunque siempre a nivel formal, es decir definiendo la estructura de la obra musical. No se ha aplicado, sin embargo, al sistema de afinación en el que se basa la obra.

Los temperamentos que se tratan en este apartado responden íntegramente a los descritos en el citado trabajo final de máster llevado a cabo por D. Jaime Barberá. En esencia se trata de un mismo planteamiento teórico con tres aproximaciones: bilineal, parabólica y exponencial.

Las escalas basadas en el número áureo caracterizadas compatibilizan la distancia de octava (proporción 2:1) con lo que denomina *octava áurea* (proporción  $\varphi$ :1). Se toma como base el temperamento igual de doce notas, el cual se ajustará para que el número áureo esté presente. Para ello, se obtiene el número que caracteriza el semitono temperado y se aplica a la octava áurea. De este modo, se deduce el número de semitonos temperados que entran en dicha octava basada en Phi:

$$x = \sqrt[12]{2} = 1,059 \quad (5)$$

$$1,059 = \sqrt[n]{\varphi} \quad (6)$$

Con esto se obtiene un valor redondeado a enteros  $n=8$ . Por tanto, las razones de la progresión geométrica que caracteriza cada una de las 8 notas de la escala áurea son:

8 notas	
l <sub>1</sub>	1,06
l <sub>2</sub>	1,13
l <sub>3</sub>	1,20
l <sub>4</sub>	1,27
l <sub>5</sub>	1,35
l <sub>6</sub>	1,43
l <sub>7</sub>	1,52
l <sub>8</sub>	1,62

**Tabla 2. Razones en progresión geométrica de 8 notas**

Los cuatro semitonos restantes hasta completar la octava de un teclado de piano se obtienen mediante la siguiente razón:

$$\sqrt[4]{\frac{2}{1.618}} = 1,054 \quad (7)$$

Dado que se cuenta con dos razones diferentes a la hora de realizar la progresión geométrica, se ha identificado a este sistema como *aproximación bilineal*. En el caso de la *aproximación parabólica*, las razones previamente expuestas se redistribuyen siguiendo la ecuación de la parábola (pero fijándose los valores de las posiciones 8 y 12). Igualmente se opera en el caso de la *aproximación exponencial*, con esta otra función. Los valores resultantes se muestran en esta tabla:

Notas	Frecuencias (Hz)				Comparación en Cents con Temperada		
	Temperada	Bilineal	Parabólica	Exponencial	Bilineal	Parabólica	Exponencial
La	440	440	440	440	0,00	0,00	0,00
La# - Sib	466,16	467,28	469,31	469,89	4,14	11,65	13,80
Si	493,88	496,25	499,96	500,88	8,27	21,17	24,34
Do	523,25	527,02	531,95	532,98	12,41	28,53	31,91
Do# - Reb	554,37	559,69	565,27	566,26	16,55	33,72	36,76
Re	587,33	594,39	599,93	600,75	20,68	36,75	39,12
Re# - Mib	622,25	631,24	635,93	636,50	24,82	37,63	39,18
Mi	659,26	670,37	673,26	673,54	28,95	36,40	37,12
Fa	698,46	711,93	711,93	711,93	33,09	33,09	33,09
Fa# - Solb	739,99	750,67	751,95	751,73	24,82	27,75	27,24
Sol	783,99	791,52	793,29	792,96	16,55	20,42	19,70
Sol# - Lab	830,61	834,59	835,98	835,70	8,27	11,15	10,59
La	880	880	880	880	0,00	0,00	0,00

**Tabla 3. Valores en frecuencia de sistemas basados en número áureo y comparación frente a escala temperada**

### 3 ELABORACIÓN DE NUESTRA ENCUESTA DE VALORACIÓN SUBJETIVA

#### 3.1 Diseño de la encuesta

Se ha realizado este trabajo para validar o cuantificar la medida en la que la presencia del número áureo en la proporción de alturas de la escala produce belleza. Para ello hemos planteado un procedimiento de análisis cuantitativo, en el que tanto personas entrenadas musicalmente como aquellas con una formación no profesional realicen una valoración estética, sobre un fragmento musical.

La valoración estética en varios aspectos, y concretamente en el uso de las escalas, en la música occidental a lo largo de la historia ha ido variando. Hasta el siglo XV aproximadamente, era del gusto general la pitagórica, la cual como se ha explicado anteriormente, contempla hasta

el 4º armónico de la serie natural y deduce el resto de intervalos a partir de éstos. Posteriormente, han ido añadiéndose el 5º armónico (como ocurre en el sistema de Zarlino, no tratado en este trabajo), y sucesivos. Sin embargo, dicha inclusión de más armónicos en la obtención de intervalos incrementa la rugosidad del sonido, reduciendo así la sensación de consonancia (Morant 2006), y poniendo por tanto un límite que precisa de una solución de compromiso.

Existe, por tanto, un espacio de aceptabilidad de los sistemas afinación que hace que determinados sistemas queden excluidos, y por consiguiente debemos establecer las herramientas técnicas que caractericen dicho espacio. Dentro de este, entendemos que el gusto general pueda estar sujeto a familiaridad o costumbre, como de hecho así ocurre en la actualidad con el temperamento igual de doce notas (Ibáñez 2008). Asumimos este sistema, por tanto, como punto de referencia de nuestro estudio.

La encuesta que fundamenta este trabajo es del tipo Comparison Category-Rating (CCR) test, consistente en una comparación de pares donde la primera de las muestras es siempre una referencia sobre la cual juzgar la segunda (Howard & Angus 2009, p 391). Para la comparación se ha utilizado una escala numérica de enteros con eje en cero, de tal modo que una mejora estética de la segunda muestra sobre la de referencia se valora con números positivos, y lo contrario con números negativos (ilustración 3). La respuesta estará más alejada de cero, en tanto se considere que el resultado estético difiere de la referencia, siendo el intervalo que se presenta [5,-5].



**Figura 3. Ejemplo de pregunta estándar en cuestionario de valoración subjetiva**

Entendemos que este trabajo cuenta con una particular limitación en cuanto a la validez de sus resultados, ya que a lo largo de la historia de la música se han producido estilos muy dispares. Consideramos que no es posible obtener unos resultados que sean aplicables a todos los estilos de la música occidental, ya que no podemos realizar una única muestra musical representativa de todos ellos. Al mismo tiempo, trabajar con diferentes muestras haría la encuesta impracticable en extensión.

Sin embargo, renunciando a algunos de dichos estilos que podemos considerar minoritarios como la música medieval, renacimiento y vanguardias de los siglos XX-XXI, sí podemos elaborar una muestra de armonía tradicional que, sin ser característica de ningún estilo concreto, sea lo

suficientemente neutra como para poder aparecer en todos ellos (esto incluye música popular, jazz, etc.). Este ha sido, pues, nuestro objetivo principal en el diseño de la muestra.

### 3.1.1 Antecedentes

Existen en la actualidad infinidad de estudios y metodologías de análisis acústico subjetivo, tanto en su aspecto *sensorial* como *afectivo* (*affective measurements*, Bech & Zacharov 2006, p.65). De entre ellas, nuestro trabajo responde al segundo grupo, ya que se valora la aceptabilidad (*acceptance test*) o el gusto (*likeness*) por un determinado estímulo, que en nuestro caso viene determinado por el sistema de afinación.

Tras consultar bibliografía sobre estudios de valoración subjetiva, son minoritarios los casos que analizan concretamente escalas musicales. La mayoría de análisis de valoración subjetiva publicados son referentes a aplicaciones industriales, así como valoración del grado de molestia de distintos focos tales como tráfico rodado, ferroviario, etc. Dentro de este ámbito musical, se percibe un cierto interés por la percepción de la consonancia, como por ejemplo el estudio realizado por Morant, Ubis y Ramis que se presentó en Tecniacústica 2006, o la tesis doctoral llevada a cabo por D. José Ibáñez Barrachina (que ahonda, además, en sistemas de afinación). Existen varios estudios precedentes publicados en el *Journal of the Acoustical Society of America* principalmente, cuyos resultados vienen a recapitularse en los citados trabajos.

Al margen de estudios experimentales de valoración subjetiva, encontramos varios acercamientos teóricos a la caracterización matemática de afinaciones históricas, las cuales parecen resurgir como foco de interés en las últimas décadas. Esto probablemente se produce como respuesta a la corriente interpretativa conocida como *historicismo*, que trata de recrear las condiciones de interpretación que pudieron existir en el momento de composición de una obra.

En lo que a nuestro trabajo respecta, es de destacar el estudio de Joos Vos publicado en 1988, ya que nos hemos basado parcialmente en su metodología: en este se empleaban fragmentos musicales completos (no únicamente intervalos, acordes o escalas aisladas) a los que se les aplicaban diferentes temperamentos, para evaluar su aceptabilidad general. Por contra, nuestro estudio difiere en que los fragmentos empleados contenían únicamente consonancias, ya que estas focalizaban el estudio de su análisis.

En el citado trabajo, Vos estableció experimentalmente unos límites en cents para caracterizar las quintas, dentro de los cuales los sujetos se mostraban conformes en afinación (en su caso la muestra de población era musicalmente entrenada, en su totalidad). Fuera de tales límites, los oyentes notarían alguna anomalía y sentirían la necesidad de afinar el intervalo (es decir, considerarían el intervalo como desafinado). Tomando como referencia la afinación pitagórica ( $T=0$ ), los valores con una aceptabilidad claramente superior fueron:

$$-5,4 \leq T \leq 0,0 \text{ cent} \quad (8)$$

Esto concuerda con las conclusiones de anteriores (y posteriores) estudios, en las que si bien se observan ciertas preferencias hacia el temperamento igual de 12 notas, no existen variaciones importantes en el grado de aceptación con respecto a los otros sistemas de afinación más comunes, tales como la escala pitagórica o el sistema de Zarlino.

Para el diseño de la encuesta y su posterior tratamiento de resultados, nos hemos basado en los siguientes documentos:

- Nordtest Method ACOU 111. ACOUSTICS: Human sound perception – Guidelines for listening tests (2005).
- SAE (*Society of Automotive Engineers*). Guidelines for jury evaluation of automotive sounds (1999).

La ITU (*International Telecommunications Union*) cuenta a su vez con varios documentos de recomendación, en los que en líneas generales coincide con los anteriormente expuestos.

Por último, indicar que aunque la realización web de encuestas de evaluación subjetiva de audio es minoritaria frente al formato presencial, existe bibliografía al respecto y suponemos que poco a poco irá ganando cierto terreno frente a éste. Si bien, es evidente que hay determinadas encuestas que exigen unas condiciones en la escucha que necesariamente limitan a un espacio concreto, y por tanto nunca llegaría a sustituir la metodología tradicional.

### **3.1.2 Toma de decisiones. Justificación**

Son varios los puntos determinantes que han perfilado la encuesta que fundamenta este trabajo. Tratamos a continuación las decisiones que ha sido necesario tomar en torno a estos:

1. El sistema de afinación que tratamos de evaluar en este trabajo presenta una desviación irregular con respecto al temperamento igual, el cual hemos tomado como referencia. Las notas de mayor convergencia se encuentran en torno al intervalo SOL-SI, mientras que las de mayor divergencia son RE-FA# (ver tabla 3). Debido a las funciones tonales que cada sonido desempeña según la tonalidad, se ha considerado necesario realizar la misma muestra en los siguientes tonos:
  - DO mayor
  - RE mayor
  - SIb mayor
  - LA mayor
  - SOL mayor

De este modo, se exploran los diferentes intervalos que se producen entre grados tonales. No se ha considerado necesario introducir tonalidades menores, ya que las funciones tonales de los sonidos no varían particularmente.

2. El escuchar varias veces el mismo fragmento musical con varios sistemas de afinación puede fácilmente inducir a confusión. Por esta razón se ha optado por la comparación de pares, utilizando en todo momento una misma referencia. A su vez, esta referencia puede cumplir la función de calibrado del sistema en cuanto a nivel de volumen, etc.
3. El sistema de afinación de referencia es el temperamento igual, debido a la preferencia general por éste que se desprende de anteriores estudios. Se prevé, por consiguiente, que la evaluación acústica subjetiva de las demás muestras sea inferior a ésta.

4. Según NT ACOU 111, dependiendo el tipo de test puede asumirse una calidad de sonido limitada. Aun así, para garantizar unos mínimos en este estudio se han generado muestras con calidad Audio CD y se ha sugerido a los participantes el uso de cascos y un entorno tranquilo para poder llevar a cabo la encuesta. En un momento dado puede asumirse que el equipo reproductor posea una calidad media, ya que no se trata de un análisis sensorial; se está analizando un mismo fragmento musical con pequeñas variaciones en la frecuencia asignada a cada sonido, lo cual es perceptible con los medios de reproducción digital habituales en nuestra sociedad.

Por esta misma razón se considera que es posible realizar la encuesta *on line*, para de este modo beneficiarnos de la flexibilidad que esto proporciona en cuanto a la difusión y accesibilidad a la misma por parte de los participantes.

5. El test está diseñado para tener una duración de en torno a 15 minutos (NT ACOU 111 sugiere un máximo de 20 min. y la SAE un límite de entre 30 y 45 min.). Los participantes pueden escuchar las muestras tantas veces como necesiten para emitir su juicio, por lo que puede prolongarse este tiempo a voluntad del sujeto.
6. Se ha diseñado una muestra muy breve, de 11 segundos. Se pretende con ello facilitar al oyente la retención en memoria del fragmento completo, para su comparación.
7. Se ha informado a los participantes del objeto de la encuesta, y se ha recalcado que no hay respuestas correctas o incorrectas, sino que se trata de plasmar su valoración personal.
8. Se ha proporcionado un entorno gráfico intuitivo y un tipo de pregunta repetitiva para evitar confusión y que el participante tenga claro cómo proceder en sus respuestas.
9. A modo de introducción, previamente a la escucha de la muestra se realizan algunas preguntas de índole personal: edad (se prevé contemplar únicamente respuestas de adultos), si se padece alguna dolencia auditiva, así como las iniciales de nombre y apellidos.
10. Se pregunta expresamente si el participante tiene un entrenamiento musical profesional, ya que se prevé que las respuestas puedan divergir y por tanto se analizarán resultados por separado. Según NT ACOU 111, el número mínimo para una encuesta con personal no entrenado (*test jury*) es de 16 participantes para un resultado confiable. En el caso del panel de expertos, pueden ser suficientes 10 (aunque idealmente se contemplan 20-30 integrantes).

A este respecto, matizar que aunque se han obtenido respuestas de 57 participantes, no todos ellos han finalizado la encuesta. En el tratamiento de resultados se contemplarán únicamente aquéllos que la han completado. En total, hemos contado con un panel de expertos de 20 músicos profesionales y un *test jury* de 22 integrantes.

11. Por limitaciones en la plataforma de diseño, el abanico de posibles respuestas de los *CCR test* era necesario mostrarlo en horizontal. Se optó por un orden decreciente, puesto que nos parecía más coherente con la lectura izquierda-derecha. Se optó por una escala hasta el número 5 porque consideramos que ofrece un nivel de detalle adecuado, y al

mismo tiempo es un tipo de calificación con la que en nuestra sociedad estamos familiarizados.

12. Entre los tres sistemas basados en el número áureo que se evalúan, hemos introducido otros dos con el objeto de validar el criterio de los oyentes: una comparación con la misma muestra repetida (temperamento igual de 12 notas) y una comparación con afinación pitagórica.

13. En cada una de las tonalidades los sistemas de afinación a comparar aparecen en un orden diferente, según mostramos a continuación:

- DO mayor
  - DO A: Temperamento sobre número áureo -bilineal
  - DO B: Escala pitagórica
  - DO C: Temperamento sobre número áureo -exponencial
  - DO D: Temperamento igual 12 notas
  - DO E: Temperamento sobre número áureo -parabólico
  
- RE mayor
  - RE A: Temperamento sobre número áureo -exponencial
  - RE B: Temperamento igual 12 notas
  - RE C: Temperamento sobre número áureo -parabólico
  - RE D: Escala pitagórica
  - RE E: Temperamento sobre número áureo -bilineal
  
- Slb mayor
  - Slb A: Temperamento igual 12 notas
  - Slb B: Temperamento sobre número áureo -parabólico
  - Slb C: Temperamento sobre número áureo -bilineal
  - Slb D: Temperamento sobre número áureo -exponencial
  - Slb E: Escala pitagórica
  
- LA mayor
  - LA A: Temperamento sobre número áureo -parabólico
  - LA B: Temperamento sobre número áureo -exponencial
  - LA C: Escala pitagórica
  - LA D: Temperamento sobre número áureo -bilineal
  - LA E: Temperamento igual 12 notas
  
- SOL mayor
  - SOL A: Escala pitagórica
  - SOL B: Temperamento igual 12 notas
  - SOL C: Temperamento sobre número áureo -exponencial
  - SOL D: Temperamento sobre número áureo -bilineal
  - SOL E: Temperamento sobre número áureo -parabólico

14. La muestra musical utilizada contiene fragmentos melódicos y armonías (acordes), de tal modo que las desviaciones respecto a la afinación estándar puedan aplicarse a un contexto formal, apelando así a una globalidad estética.



## 3.2 Preparación y procesado de muestras

### 3.2.1 Creación de un fragmento musical

Como ya se ha indicado, el objetivo principal a la hora de elaborar la muestra es que fuera extensible al mayor número posible de estilos musicales, y por tanto muy neutra; sin rasgos característicos de ninguna estética en especial. Se optó por una sucesión armónica estándar y enlaces mediante grados conjuntos, creando escalas, intervalos consonantes e intervalos disonantes, todo ello en una muestra lo más breve posible.

Con sus correspondientes notas de paso y cromatismos (que son los elementos que principalmente generan las disonancias), la secuencia armónica general es:  
 $I - IV - V_4^6 - V_7 - I$ .

El fragmento musical se introdujo en el software libre *Musescore 1.3*, desarrollado principalmente por Werner Schweer. Tras la creación de la partitura, este programa permite guardar el archivo en múltiples formatos, entre ellos MIDI estándar (\*.mid). Inicialmente, la muestra musical se escribió conforme a la ilustración 4.



**Figura 4. Fragmento de muestra en dos pentagramas**

Como se pudo observar experimentalmente, esta escritura genera un archivo MIDI con dos canales de información. Sin embargo, en cada canal aparece más de una nota para caracterizar, y esto provocaba problemas a la hora de transformar las frecuencias en el programa *Scala*, ya que eliminaba varios de los sonidos en la muestra resultante. Por esta razón, la escritura se modificó a cuatro pentagramas, es decir, cuatro canales de información diferente, conforme se muestra en la ilustración 5.



**Figura 5. Fragmento de muestra en cuatro pentagramas**

El fragmento que se muestra está en la tonalidad de DO mayor. En el propio programa se realizó el transporte al resto de tonalidades, generando los correspondientes archivos MIDI.

### 3.2.2 Procesado de archivos MIDI – software *Scala*

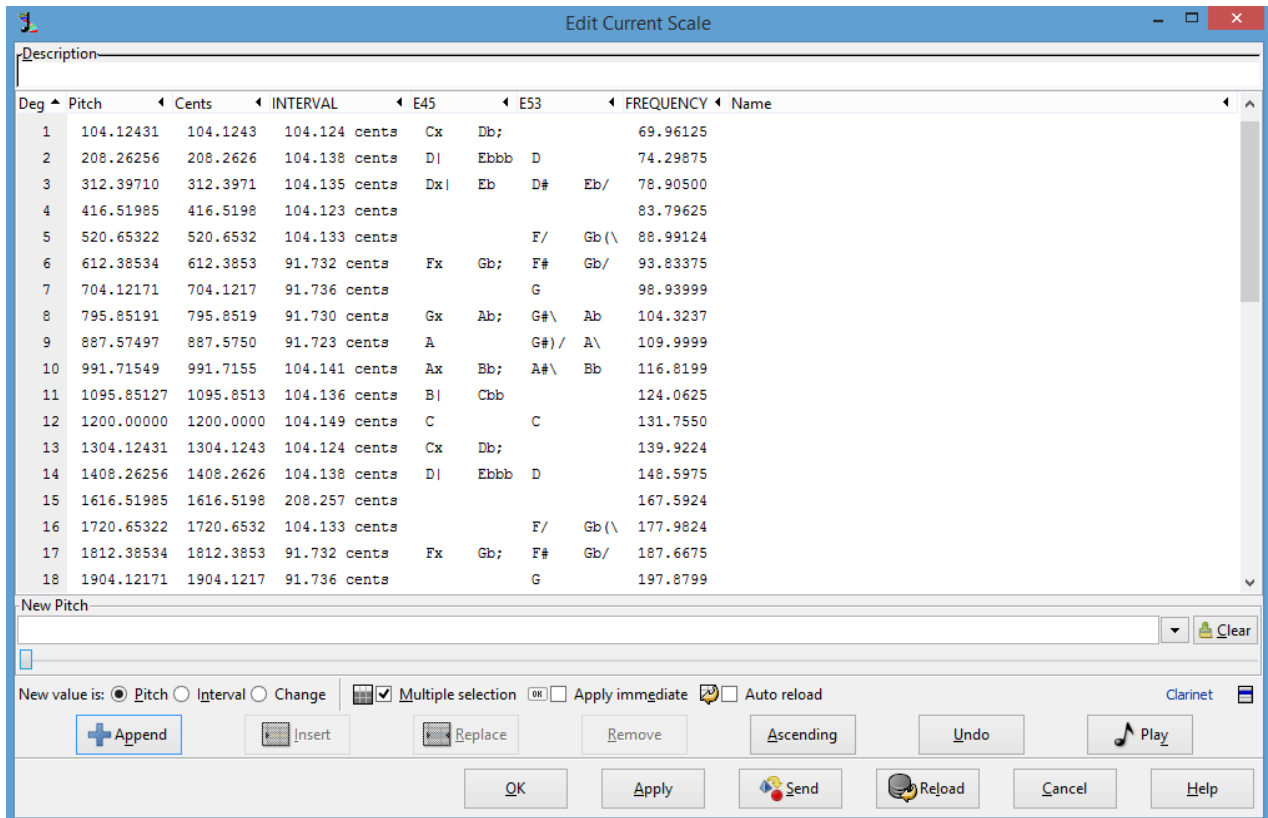
*Scala* es en la actualidad el software libre de referencia para trabajar con microtonalidad. Ha sido desarrollado en lenguaje Ada por Manuel Op de Coul, de la fundación Huygens-Fokker. Esta organización se dedica a promover la música microtonal, construyendo incluso instrumentos específicos para ello. El más famoso es el *órgano de 31 notas Fokker*, desarrollado por Adriaan Fokker (Bogor 1887 – Beekbergen 1977) en la década de los 40 en base a teorías elaboradas por Christiaan Huygens (La Haya 1629 – i.d. 1695). Como se desprende de su nombre, este instrumento está afinado en base al temperamento igual de 31 sonidos por octava.

Si bien no es un programa intuitivo, ofrece una gran flexibilidad a la hora de modelar infinidad de escalas musicales, tanto históricas como contemporáneas o incluso orientales.



**Figura 6. Entorno gráfico principal en *Scala***

Permite tanto la modelización numérica de la escala por ratios o fracciones, como la introducción directa de las frecuencias a asignar a cada sonido, conforme a la ventana de diálogo de la ilustración 7. Sin embargo, a la hora de memorizar una escala únicamente retiene las proporciones entre sonidos, siendo necesario en cada sesión establecer la frecuencia de referencia.



**Figura 7. Ventana de edición de escalas. Ejemplo sobre número áureo bilineal**

Una vez caracterizada la escala a la que se desea transferir el fragmento musical, la herramienta de re-afinación solicita un archivo MIDI de origen, y un destino en el que ubicar el nuevo archivo MIDI que se genera conforme al nuevo sistema de afinación. De este modo se han generado los 25 archivos de muestra.

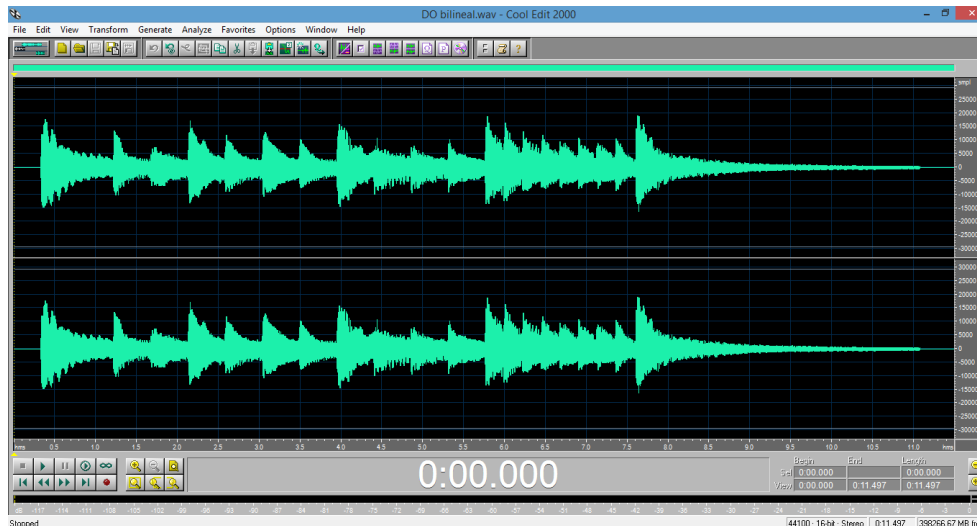
La norma MIDI (Musical Instruments Digital Interface) apareció a principios de los años 80, y surgió del acuerdo de los principales fabricantes del sector para hacer que sus máquinas pudieran intercambiar información musical, ofreciendo además más posibilidades expresivas a sus músicos (Palomo 1995). A diferencia de los archivos de audio, en los que la información digital responde exactamente a un muestreo de la forma de onda del sonido, los archivos MIDI contienen únicamente información digital sobre características musicales (comienzo y final de un sonido, altura, intensidad, etc.). De este modo, mientras un fragmento musical breve con calidad audio CD (16 bit, 44.1 KHz) puede suponer un archivo de varios megabytes, el archivo MIDI equivalente puede estar del orden de los KB. El sonido se materializa en el destino, donde un sintetizador de sonido ejecuta todas las órdenes transmitidas en el archivo MIDI.

### 3.2.3 Generación de muestras de audio

En base a lo que acabamos de mencionar, no era posible dejar las muestras para la encuesta en archivos MIDI, ya que de ser así no se podía garantizar que cada participante fuera a escuchar exactamente lo mismo (puesto que el resultado musical final queda en manos de la tarjeta de sonido del equipo de reproducción). Para normalizar esto, necesariamente había que crear archivos de audio.

Inicialmente se planteó la posibilidad de importar los archivos MIDI en CUBASE, pero se pudo comprobar que este editor de sonido no trabaja adecuadamente con microtonalidad. Por ello, se optó por reproducir los archivos introduciendo la salida de audio del equipo en la entrada de una tarjeta LEXICON LAMBDA. Por su facilidad de manejo, se decidió introducir la señal en el editor de audio COOL EDIT.

Una vez registrada la señal, se realizó una pequeña edición consistente en ajustar los límites de comienzo y final, y en el duplicado de la señal de entrada, que aparecía inicialmente en un único canal.



**Figura 8. Forma de onda de una muestra de audio en dos canales**

Una vez editadas las 25 muestras de audio, era necesario insertarlas en nuestra encuesta, siguiendo el orden que se ha presentado anteriormente. La plataforma empleada ([www.onlineencuesta.com](http://www.onlineencuesta.com)) no permitía insertar archivos de audio de forma directa. Sin embargo, sí era posible hacerlo incrustando *iframes* de html. Era necesario, por tanto, alojar dichos archivos en alguna otra plataforma *on line*, hacia la que establecer la referencia. Para este objetivo se empleó *SoundCloud*.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Percepción subjetiva escalas basadas en número áureo

En este apartado vamos a analizar estadísticamente las respuestas de los participantes. Como se ha indicado, suponemos que músicos entrenados harán una valoración diferente a oyentes no expertos, por lo que tratamos separadamente sus respuestas.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la escala numérica con la que los participantes emitían su valoración era decreciente y consistía en el intervalo  $[5, -5]$ . A cada una de esas posibles respuestas, para el tratamiento estadístico de resultados *onlineencuesta* atribuye un valor numérico diferente, siguiendo orden creciente y consistiendo en el intervalo  $[1, 11]$ . El siguiente ejemplo de resultados de evaluación subjetiva tomado de la propia plataforma *on line*, muestra esta relación.

Número de participantes: 42

a la izquierda	5		4		3		2		1		0		-1		-2		-3		-4		-5		a la derecha		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	
	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	Σ	%	0	±	
Mucho mejor	-	-	1x	2,38	2x	4,76	5x	11,90	3x	7,14	21x	50,00	6x	14,29	1x	2,38	3x	7,14	-	-	-	-	Mucho peor	5,86	1,51

Figura 9. Relación numérica entre escala de respuesta y de análisis estadístico

Por tanto, los valores numéricos de resultados estadísticos que se expresan a continuación van referenciados a esta segunda escala, en la que el eje de simetría (o valor numérico equivalente al 0, que establece una valoración similar a la referencia) viene identificado por el número 6.

En primer lugar, vamos a mostrar los resultados de valoración acústica subjetiva por tonalidades musicales. Las analizaremos en el mismo orden en que fueron presentadas a los participantes de la encuesta. Para la representación gráfica de las respuestas hemos optado por un histograma, en el que vemos de forma conjunta la frecuencia de respuesta encontrada para cada uno de los sistemas de afinación musical analizados. Seguidamente, se presenta una tabla con los correspondientes resultados de media, desviación típica, varianza y coeficiente de variación de Pearson, para cada uno de ellos.

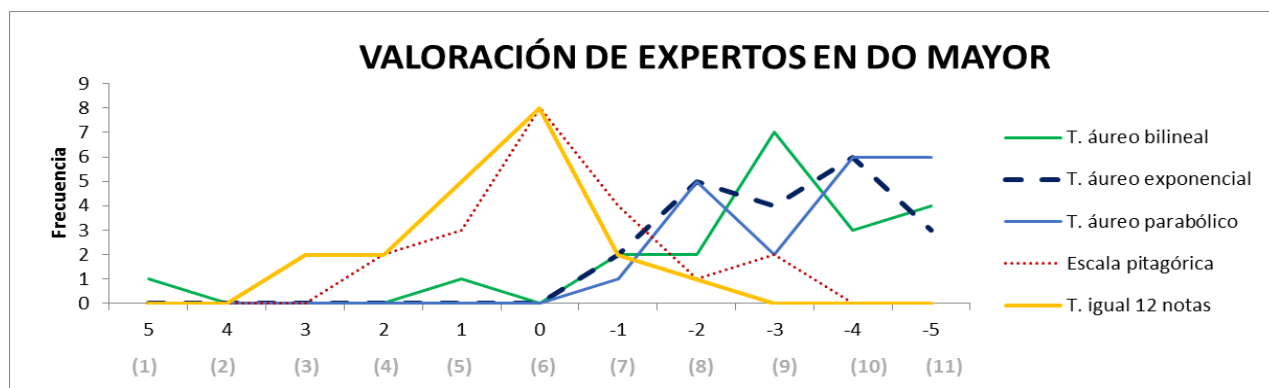


Figura 10. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, DO M

DO M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,450	6,250	8,650	9,150	9,550
Desv. típ.	1,276	1,372	2,368	1,268	1,317
Varianza	1,629	1,882	5,608	1,608	1,734
Coef. Var	23%	22%	27%	14%	14%

Tabla 4. Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, DO M

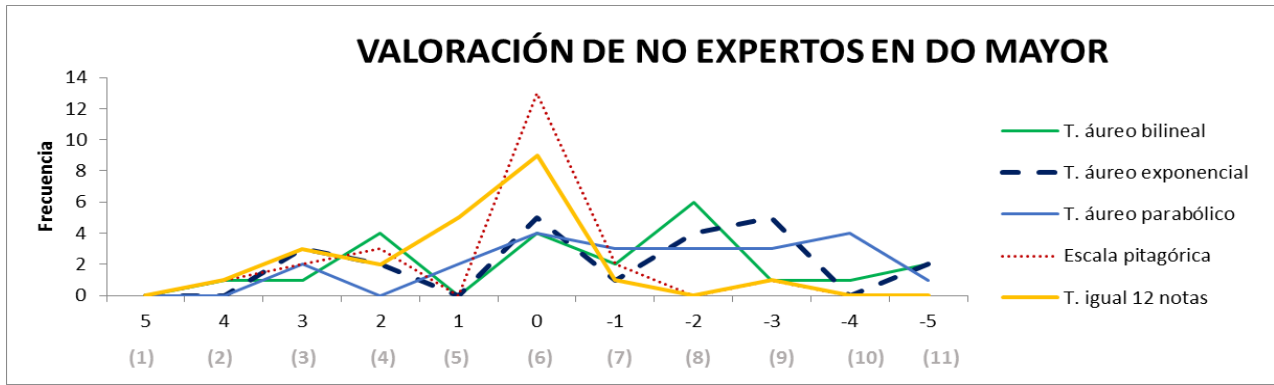


Figura 11. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, DO M

DO M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,182	5,500	6,727	6,955	7,409
Desv. típ.	1,563	1,566	2,492	2,459	2,261
Varianza	2,442	2,452	6,208	6,045	5,110
Coef. Var	30%	28%	37%	35%	31%

Tabla 5. Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, DO M



Figura 12. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, RE M

RE M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,850	7,550	8,550	10,250	9,900
Desv. típ.	1,137	1,572	1,356	0,910	1,447
Varianza	1,292	2,471	1,839	0,829	2,095
Coef. Var	19%	21%	16%	9%	15%

Tabla 6. Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, RE M

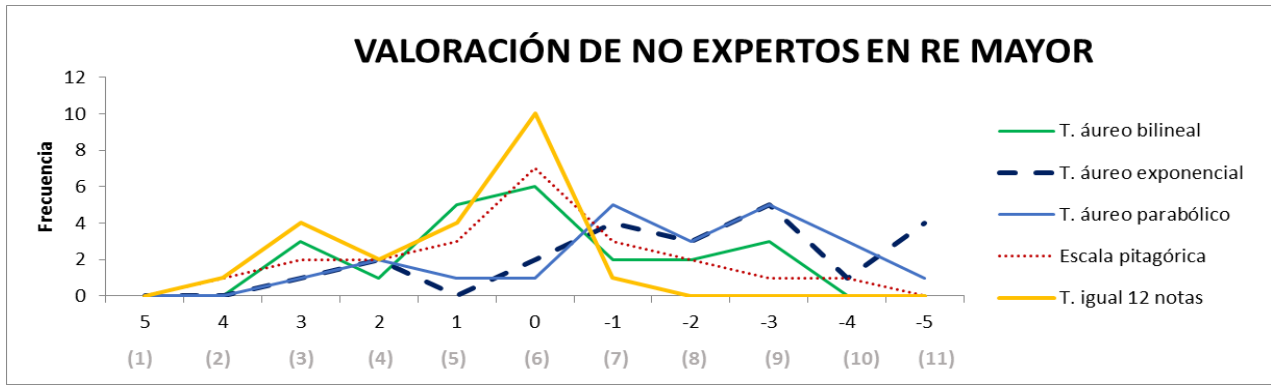


Figura 13. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, RE M

RE M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	4,955	5,864	5,955	7,909	7,591
Desv. típ.	1,397	1,959	1,864	2,328	2,153
Varianza	1,950	3,838	3,474	5,420	4,634
Coef. Var	28%	33%	31%	29%	28%

Tabla 7. Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, Re M



Figura 14. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, Sib M

Sib M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,150	6,700	9,150	9,650	10,000
Desv. típ.	1,496	1,525	1,226	1,089	1,076
Varianza	2,239	2,326	1,503	1,187	1,158
Coef. Var	29%	23%	13%	11%	11%

Tabla 8. Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, Sib M



Figura 15. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, Sib M

Sib M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,273	5,909	7,000	7,545	8,045
Desv. típ.	1,279	1,900	2,093	2,502	2,786
Varianza	1,636	3,610	4,381	6,260	7,760
Coef. Var	24%	32%	30%	33%	35%

Tabla 9. Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, Sib M



Figura 16. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, LA M

LA M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,250	6,650	8,100	10,200	10,550
Desv. típ.	1,293	1,182	1,165	1,105	0,759
Varianza	1,671	1,397	1,358	1,221	0,576
Coef. Var	25%	18%	14%	11%	7%

Tabla 10. Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, LA M



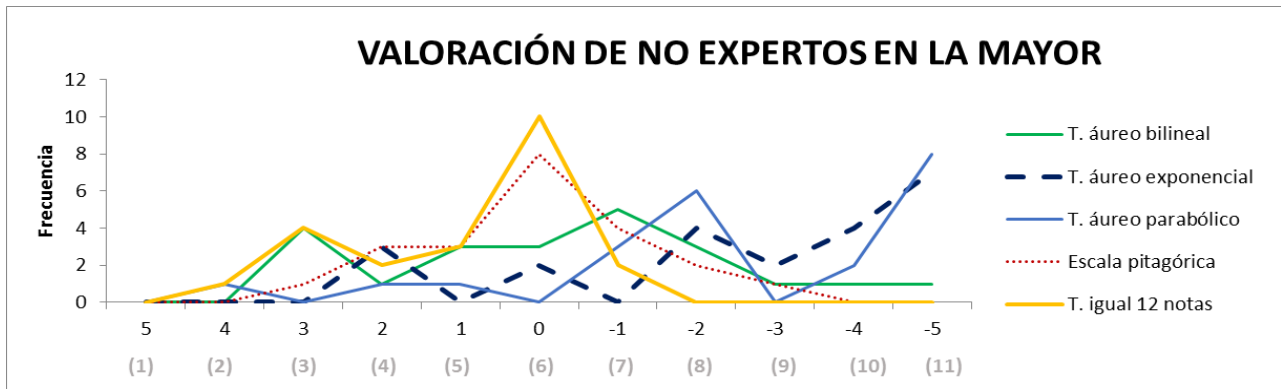


Figura 17. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, LA M

LA M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,045	5,955	6,273	8,682	8,545
Desv. típ.	1,463	1,463	2,272	2,457	2,558
Varianza	2,141	2,141	5,160	6,037	6,545
Coef. Var	29%	25%	36%	28%	30%

Tabla 11. Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, LA M



Figura 18. Histograma de frecuencia de respuesta de expertos en comparación de pares, SOL M

SOL M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,600	6,900	8,250	9,700	9,300
Desv. típ.	1,536	1,165	1,020	0,979	1,129
Varianza	2,358	1,358	1,039	0,958	1,274
Coef. Var	27%	17%	12%	10%	12%

Tabla 12. Resultados estadísticos de respuesta de expertos en comparación de pares, SOL M



Figura 19. Histograma de frecuencia de respuesta de no expertos en comparación de pares, SOL M

SOL M	Temp. igual de 12 notas	Escala pitagórica	Temp. basado nº áureo bilineal	Temp. basado nº áureo exponencial	Temp. basado nº áureo parabólico
Media	5,545	5,909	6,045	7,455	7,455
Desv. típ.	1,262	1,342	1,647	2,464	2,220
Varianza	1,593	1,801	2,712	6,069	4,926
Coef. Var	23%	23%	27%	33%	30%

Tabla 13. Resultados estadísticos de respuesta de no expertos en comparación de pares, SOL M

En todas las figuras y tablas anteriores aparecen ciertos aspectos de la valoración que son repetitivos, como por ejemplo el orden de preferencia de los distintos sistemas de afinación analizados, de acuerdo a los valores de media. También podemos observar que los valores de media del jurado no experto son menos extremos que en el caso de músicos entrenados. Del mismo modo, encontramos coeficientes de variación de Pearson mucho menores en el panel de expertos, generalmente tanto más cuanto más negativa es la valoración acústica subjetiva realizada.

Por tanto, dado que en todos los casos los temperamentos basados en el número áureo han recibido una valoración negativa frente a otros sistemas tradicionales, se podemos deducir que de forma general se perciben como “desafinados”. Dicha desviación aparece de forma bastante homogénea en todas las tonalidades musicales muestreadas. Por ello, en el análisis por grupos que realizamos a continuación consideraremos los resultados globales, promediando todas las muestras de cada tipo de sistema de afinación, independientemente de la tonalidad musical a la que pertenece cada muestra.

#### 4.1.1 Respuesta de valoración subjetiva del panel de expertos

Los valores globales promediados correspondientes a la valoración acústica subjetiva del grupo de músicos entrenados se muestran en la siguiente tabla. En ella podemos observar cómo los temperamentos basados en el número áureo que se han analizado generan valores que se sitúan entre 8 y 10 (-2 y -4 respectivamente, según la escala mostrada a los participantes). Del mismo modo, podemos observar cómo la desviación típica es similar en todos los sistemas de afinación, y como consecuencia de ello el coeficiente de variación de Pearson se reduce hasta valores del 12% en aquéllos más alejados del eje.

<b>GLOBAL</b>	<b>Temp. igual de 12 notas</b>	<b>Escala pitagórica</b>	<b>Temp. basado nº áureo bilineal</b>	<b>Temp. basado nº áureo exponencial</b>	<b>Temp. basado nº áureo parabólico</b>
<b>Media</b>	5,460	6,810	8,540	9,790	9,860
<b>Desv. típ.</b>	1,352	1,412	1,520	1,131	1,223
<b>Varianza</b>	1,827	1,994	2,312	1,279	1,495
<b>Coef. Var</b>	25%	21%	18%	12%	12%

**Tabla 14. Resultados estadísticos generales de respuesta de expertos en comparación de pares**

Hemos aplicado un análisis de varianza (ANOVA) de una vía a todos los datos en su conjunto. Tras comprobar que se aceptara la hipótesis alterna con un 95% de confiabilidad, se ha realizado un Test de Tukey, del cual se ha extraído una diferencia honestamente significativa (HSD) de 0,515. Los temperamentos basados en el número áureo con aproximación exponencial y logarítmica han dado medias con valores muy próximos, por lo que al realizar la diferencia entre estos hallamos un resultado de 0,07. Dado que este valor es inferior a la HSD, no podemos considerar que las respuestas subjetivas de estos temperamentos contengan una diferencia estadísticamente significativa. En el resto de los casos, la valoración subjetiva de cada uno de los sistemas de afinación proporciona respuestas que sí superan dicho HSD y por tanto son estadísticamente diferentes.

De todo lo anterior podemos concluir que el grupo de expertos percibió los temperamentos basados en el número áureo como sistemas que empeoraban el resultado musical del fragmento entre un 40% y un 80%. Dentro de esta apreciación general, se percibe una diferencia significativa en el caso del temperamento basado en número áureo con aproximación bilineal, más favorable que en el caso de las otras aproximaciones.

Del mismo modo, se percibe una diferencia clara entre el sistema temperado de doce notas y la escala pitagórica, siendo el citado temperamento igual el que cuenta con un mayor nivel de aceptación. A este respecto, cabe destacar el hecho particular de que la comparación de pares en el caso del temperamento igual ha dado una valoración positiva de la segunda muestra frente a la de referencia (siendo que se estaban comparando dos muestras idénticas). Probablemente esto sea un efecto de respuesta debido al contraste con la sensación producida por el resto de pares, aunque no vemos adecuado atribuir una razón categórica sin un estudio más pormenorizado.

Estos resultados concuerdan con las conclusiones de Joon Vos, expuestas en el epígrafe 3.1.1 de este trabajo. Según éstas, los sistemas de afinación cuya distancia de quinta no esté recogida en el intervalo dispuesto en la ecuación 8, se perciben como desafinados a oídos de una población entrenada musicalmente. En este caso, las tonalidades que hemos escogido para este trabajo presentaban la siguiente caracterización de sus intervalos de quinta (T), referenciados a la afinación pitagórica:

<b>Intervalos de quinta (cents)</b>	<b>Temp. igual de 12 notas</b>	<b>Temp. basado nº áureo bilineal</b>	<b>Temp. basado nº áureo exponencial</b>	<b>Temp. basado nº áureo parabólico</b>
<b>SOL Mayor</b>	-1,95	2,19	14,38	17,46
<b>LA Mayor</b>	-1,94	26,99	34,44	35,16

<b>Slb Mayor</b>	-1,94	26,98	19,48	17,34
<b>DO Mayor</b>	-1,95	2,17	-10,09	-14,15
<b>RE Mayor</b>	-1,96	-22,64	-38,70	-41,07

**Tabla 15. Caracterización de quintas de las tonalidades de nuestro trabajo, frente a afinación pitagórica**

Dado que todos los intervalos de quinta que se muestran en relación a los temperamentos basados en el número áureo se encuentran fuera del intervalo marcado por Joon Vos, bien por superarlo o bien por no alcanzarlo, era previsible esperar una respuesta como la que se ha producido.

Hasta ahora hemos podido concluir que los sistemas de afinación basados en el número áureo generan una respuesta desfavorable frente a otros sistemas tradicionales como el temperamento igual de doce notas o la escala pitagórica. Sin embargo, no hemos establecido hasta el momento un criterio de aceptabilidad. Por ejemplo, sabemos que la escala pitagórica ha producido una respuesta que no es tan adecuada como el temperamento igual, pero eso no significa necesariamente que no sea aceptable musicalmente. Para establecer un criterio objetivo de nuevo nos basaremos en el mencionado estudio de Joon Vos.

Uno de los extremos del límite de aceptabilidad establecido por Vos lo marcaba precisamente la escala pitagórica ( $T=0$  cents). Es por ello que para establecer un límite objetivo, tomaremos la respuesta obtenida en nuestro estudio a dicha escala pitagórica, y le aplicaremos la HSD en sentido “desfavorable”:

$$Lim.Ac. = 6,810 + 0,515 = 7,325 \quad (9)$$

De este modo, los temperamentos cuya media de valoración acústica subjetiva supera dicho valor son apreciados como significativamente peores y por tanto los consideramos no aceptables para su uso en la música occidental, con las excepciones estilísticas que se han comentado anteriormente.

#### 4.1.2 Respuesta de valoración subjetiva del jurado no experto

Como ya se ha comentado anteriormente, este grupo mostraba el mismo orden de preferencia en cuanto a los sistemas de afinación analizados, si bien los valores numéricos de media no distan tanto del eje, ya que los temperamentos basados en el número áureo reciben esta vez valoraciones globales entre 6 y 8 (0 y -2 respectivamente, según la escala mostrada a los participantes). Los valores globales promediados correspondientes al jurado no entrenado se muestran en la siguiente tabla.

<b>GLOBAL</b>	<b>Temp. igual de 12 notas</b>	<b>Escala pitagórica</b>	<b>Temp. basado nº áureo bilineal</b>	<b>Temp. basado nº áureo exponencial</b>	<b>Temp. basado nº áureo parabólico</b>
<b>Media</b>	5,200	5,827	6,400	7,709	7,809
<b>Desv. típ.</b>	1,387	1,642	2,095	2,466	2,402
<b>Varianza</b>	1,923	2,695	4,389	6,080	5,771
<b>Coef. Var</b>	27%	28%	33%	32%	31%

**Tabla 16. Resultados estadísticos generales de respuesta de no expertos en comparación de pares**

Respecto a la desviación típica de las respuestas, observamos que ésta es generalmente creciente cuanto mayor es el valor de la media. Ello provoca que contemos con coeficientes de variación de Pearson prácticamente constantes, en torno al 30%, para todos los sistemas de afinación ensayados. Recordemos que esto no ocurría en el panel de expertos, ya que los coeficientes de variación en la percepción de los temperamentos basados en el número áureo se ajustaban hasta valores sobre el 10%-12%. Asimismo, encontramos valores de varianza de hasta 6, mientras que en el panel de expertos puntualmente se superaba el 2. Encontramos por tanto, un nivel de dispersión particularmente alto si lo comparamos con los resultados del panel de expertos.

Al igual que se realizó en el grupo de músicos entrenados, hemos aplicado a los resultados del jurado no experto un análisis de varianza (ANOVA) de una vía a todos los datos en su conjunto. Tras comprobar que se acepta la hipótesis alterna con un 95% de confiabilidad, se ha realizado un Test de Tukey, del cual se ha extraído una diferencia honestamente significativa (HSD) de 0,752. Si comparamos entre sí las medias que hemos obtenido de cada uno de los sistemas de afinación analizados, vemos que a diferencia de lo que ocurría con el panel de expertos, hay varios eventos en los que no podemos afirmar una diferencia estadísticamente significativa. Son los siguientes;

1. Temperamento igual y escala pitagórica.
2. Escala pitagórica y temperamento basado en el número áureo con aproximación bilineal.
3. Temperamentos basados en el número áureo con temperamentos exponencial y parabólico.

Únicamente en el tercero de los casos los resultados concuerdan en este sentido con los extraídos del panel de expertos. Por lo tanto, los dos restantes podríamos atribuirlos al mayor grado de dispersión que origina un menor entrenamiento musical.

De nuevo, el temperamento igual de 12 notas recibe la valoración más alta, si bien en esta ocasión incluso la escala pitagórica aparece por encima del eje de puntuación (es decir, ambos se han percibido como mejores en su conjunto que la propia referencia). El mismo efecto encontrado en el panel de expertos, por tanto se repite, en la medida en la que en la comparación de pares idénticos de nuevo se ha valorado mayoritariamente como mejor la segunda de las muestras.

Finalmente, en base a la argumentación llevada a cabo en el punto anterior, establecemos el límite de aceptabilidad para este grupo:

$$Lim.Ac. = 5,827 + 0,752 = 6,579 \quad (10)$$

De este modo, observamos que sí podemos afirmar que los temperamentos basados en el número áureo con aproximaciones exponencial y logarítmica quedan excluidos de dicho límite de aceptabilidad. Sin embargo, con este grupo no experto, no podemos hacer esta afirmación en torno al temperamento que cuenta con la aproximación bilineal, ya que nuestra población lo ha valorado de tal modo que no tiene una respuesta significativamente diferente a la escala pitagórica.

## 4.2 Encuesta *on line* para evaluación subjetiva

En este apartado analizaremos el formato de encuesta *on line* como herramienta para la realización de estudios de evaluación subjetiva, y lo haremos desde un punto de vista cualitativo.

A la vista de los resultados que hemos presentado en el apartado anterior, se comprueba que el trabajo produce conclusiones coherentes entre sí, así como respecto a anteriores estudios, ya que era previsible una respuesta desigual entre músicos entrenados y no expertos, al igual que también era previsible que todos los sistemas de afinación analizados presentaran valoraciones inferiores a la del temperamento igual de 12 notas.

En base a lo anterior, hemos podido comprobar que la herramienta ha sido eficaz, ofreciendo unos resultados que con toda probabilidad habrían sido los mismos de haberse realizado de forma presencial.

Respecto a los participantes, es cierto que no existe una selección de población como tal, y que se confía en la honestidad de los mismos a la hora de otorgar sus respuestas. Sin embargo, el propio test supone un filtro en sí mismo, ya que resulta repetitivo y en cierto modo tedioso, y esto supone que los participantes no comprometidos terminan abandonándolo antes de llegar a finalizarlo. No obstante, aunque en este trabajo se ha realizado la encuesta *on line* de forma abierta y voluntaria, también existen mecanismos para limitar su acceso a solo determinados participantes, como códigos de identificación, etc.

Respecto al factor humano, según hemos podido observar, el hecho de realizar la encuesta *on line* sí ha supuesto un inconveniente. Algunos de los participantes, especialmente los no expertos, experimentaban una sensación de confusión al sentir que “todas las muestras les sonaban igual”. Por el contrario, algunos de los músicos manifestaron lo desagradable que les resultaba escuchar “muestras tan desafinadas”. La impersonalidad de este sistema hace que no se pueda proporcionar ningún tipo de apoyo durante la prueba, si bien no parece que ello haya supuesto un detrimento de los resultados del test. Consideramos, por tanto, que este inconveniente es de orden menor.

Otro inconveniente que se presentó en algunos casos es de perfil técnico, dado que la fluidez del test depende de las condiciones de la conexión a internet, del buen funcionamiento de las plataformas *on line* con las que se cuenta (en nuestro caso, *SoundCloud* y *onlineencuesta*), y de la capacidad del procesado del propio dispositivo de reproducción (ordenador personal, *ipad*, etc.). En algunos de los casos hubo participantes que tuvieron problemas a la hora de que se cargaran los archivos de audio, y tuvieron que reiniciar el test (pudimos observar en el listado de respuestas, que en varias ocasiones aparecían participaciones con las mismas iniciales y respuestas personales, en las que únicamente la última de ellas se había completado).

A la vista de la experiencia de este trabajo, consideramos que las ventajas en cuanto a la flexibilidad tanto geográfica como de horarios que supone para los participantes poder realizar la encuesta desde un lugar en el que se encuentren cómodos, compensa ampliamente los inconvenientes que se han presentado, tanto técnicos como de otras índoles. Teniendo en cuenta esto junto con los resultados que se han obtenido, valoramos muy positivamente el uso de esta herramienta en su versión *on line*.

## 5 CONCLUSIONES

---

En este trabajo se ha analizado la respuesta de valoración acústica subjetiva de un sistema de afinación basado en el número áureo con tres aproximaciones diferentes, para posteriormente poder establecer si estos temperamentos pueden ser adecuados para la práctica musical. Se ha analizado por separado la respuesta de músicos profesionales y de oyentes no entrenados, con el resultado de que si bien ambos grupos confluyen en líneas generales, es la población de expertos quien nos proporciona unos resultados con bajo grado de dispersión, y por tanto más altamente concluyentes. Destacar además, que en general las valoraciones acústicas subjetivas del jurado no entrenado han sido más favorables que las del panel de expertos.

A través del análisis de resultados de dicho grupo de músicos profesionales, hemos podido determinar que los temperamentos basados en el número áureo que se han estudiado no son adecuados para su uso en la música occidental (con las excepciones que se han indicado, y que se citan de nuevo más adelante), ya que han ofrecido resultados de valoración acústica subjetiva claramente inferiores a los contemplados como aceptables en anteriores publicaciones (en nuestro estudio, temperamento igual de 12 notas y escala pitagórica). Del mismo modo, hemos podido comprobar que de entre las tres aproximaciones que se han analizado sobre los temperamentos basados en el número áureo, la identificada como bilineal cuenta con una valoración menos desfavorable que las otras dos (exponencial y logarítmica), las cuales además producen una respuesta estadística similar entre sí.

Por otro lado, estos resultados de valoración acústica subjetiva concuerdan, de forma general, con la caracterización de aceptabilidad subjetiva de sistemas de afinación en base a la consonancia de su intervalo de quinta, establecida por Vos en 1988.

Sobre la no aceptabilidad de los temperamentos basados en el número áureo analizados, recordar que este estudio cuenta con una limitación en torno a los diferentes estilos artísticos a lo largo de la historia de la música occidental, ya que hemos considerado que no es posible hallar una única muestra musical representativa o aplicable a todos ellos, sin excepción. Es por ello, que las conclusiones de este trabajo excluyen los estilos musicales previos al barroco, así como las vanguardias de los siglos XX y XXI, para los que no se puede descartar que dichos temperamentos puedan producir resultados musicalmente interesantes.

Por último, hemos podido comprobar que la encuesta en su formato *on line* ha resultado una herramienta eficaz para llevar a cabo nuestro estudio experimental, dotándolo de una flexibilidad que no habría sido posible de haberse realizado de forma presencial, y contribuyendo por tanto a una mayor economía de tiempo y recursos.

### 5.1 Nuevas líneas de investigación

Al margen de lo que hemos concluido en torno a nuestro estudio experimental, se ha observado un suceso llamativo en relación a la respuesta de valoración acústica subjetiva que se ha producido cuando, en la comparación de pares, ambas muestras consistían en el temperamento igual de 12 notas, y por tanto eran idénticas. Tanto en el jurado no experto como en el grupo de músicos profesionales, la respuesta mayoritaria ha sido la de considerar que la segunda muestra sonaba “mejor” que la primera. Probablemente esto sea un efecto debido al contraste con la sensación producida por el resto de comparaciones de pares, pero no obstante, consideramos

interesante indagar en este fenómeno en futuras investigaciones, para llegar así a caracterizar su respuesta.

Por otro lado, al realizar el análisis en distintas tonalidades musicales, hemos producido diferentes intervalos de quinta, algunos de los cuales distaban más que otros de los valores aceptables de  $T$  (*cents*) marcados por Vos. Aunque en cuanto a aceptabilidad hemos visto que tal caracterización es válida, las respuestas de los temperamentos no aceptados no se han desviado de forma proporcional. Entendemos por tanto, que existen otros factores que, si bien no son tan determinantes, influyen de forma secundaria en la aceptabilidad acústica de un sistema de afinación. Sería necesario, por tanto, llegar a descubrir cuáles son estos otros factores, y en qué proporción condicionan la valoración acústica subjetiva por variaciones en frecuencia.



## REFERENCIAS

---

- BARBERÁ SAIZ, J. (2012). *Sistema de afinación musical de proporciones áureas*. Trabajo final de máster. Gandía: Escuela Politécnica Superior de Gandía.
- BECH, S. y ZACHAROV, N. (2006): *Perceptual audio evaluation. Theory, method and application*. Nueva York : Wiley.
- CALVO-MANZANO, A. (1991): *Acústica Físico-Musical*. Madrid: Real Musical.
- ENUVO GmbH. *On line encuesta*.  
<<https://www.onlineencuesta.com/s/49ddc75>> [Consulta : 21 de agosto de 2015]
- GARCÍA PÉREZ, A. S. (2003): *El número sonoro. Las matemáticas en las teorías armónicas de Salinas y Zarlino*. Salamanca: Caja Duero.
- GOLDÁRAZ GAÍNZA, J.J (2004): *Afinación y temperamento en la música occidental*. Madrid: Alianza Editorial.
- HOWARD, D. M. y ANGUS, J. (2009): *Acoustics and Psychoacoustics*. Oxford: Focal Press.
- HUYGENS – FOKKER FOUNDATION. *Centre for microtonal music*.  
<<http://www.huygens-fokker.org>> [Consulta : 26 de agosto de 2015]
- IBÁÑEZ BARRACHINA, J. (2008). *Métodos exactos y heurísticos de afinación. Aplicación a la trompeta*. Tesis. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 16:1975*  
<[http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=3601](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=3601)> [Consulta : 21 de agosto de 2015]
- MICHELS, U. (1993): *Atlas de la música, I*. Madrid: Alianza Editorial.
- MIDI MANUFACTURERS ASSOCIATION  
<<http://www.midi.org>> [Consulta : 20 de agosto de 2015]
- MORANT, R., UBIS, J. y RAMIS, J. (2006): “Percepción de la consonancia musical” en *TECNIACÚSTICA: 37º Congreso Nacional de Acústica*. Gandía
- NORDIC COUNCIL OF MINISTERS (2005): *NT ACOU 111. Acoustics: Human sound perception - Guidelines for listening tests*. Espoo: Nordtest.
- OTTO, N., AMMAN, S., ATON, C., y LAKE, S. (1999): *Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds (SAE Technical Paper 1999-01-1822)*, Warrendale: SAE International.

PALOMO, M. (1995): *El estudio de grabación personal. De las ideas musicales la disco compacto*. Madrid: AMUSIC.

PHIPOINT SOLUTIONS LLC

<<http://www.goldennumber.net>> [Consulta : 18 de agosto de 2015]

VOS, J. (1988): "Subjective acceptability of various regular twelve-tone tuning systems in two-part musical fragments" en *Journal of the Acoustic Society of America*, vol 83, nº6, 2383.