



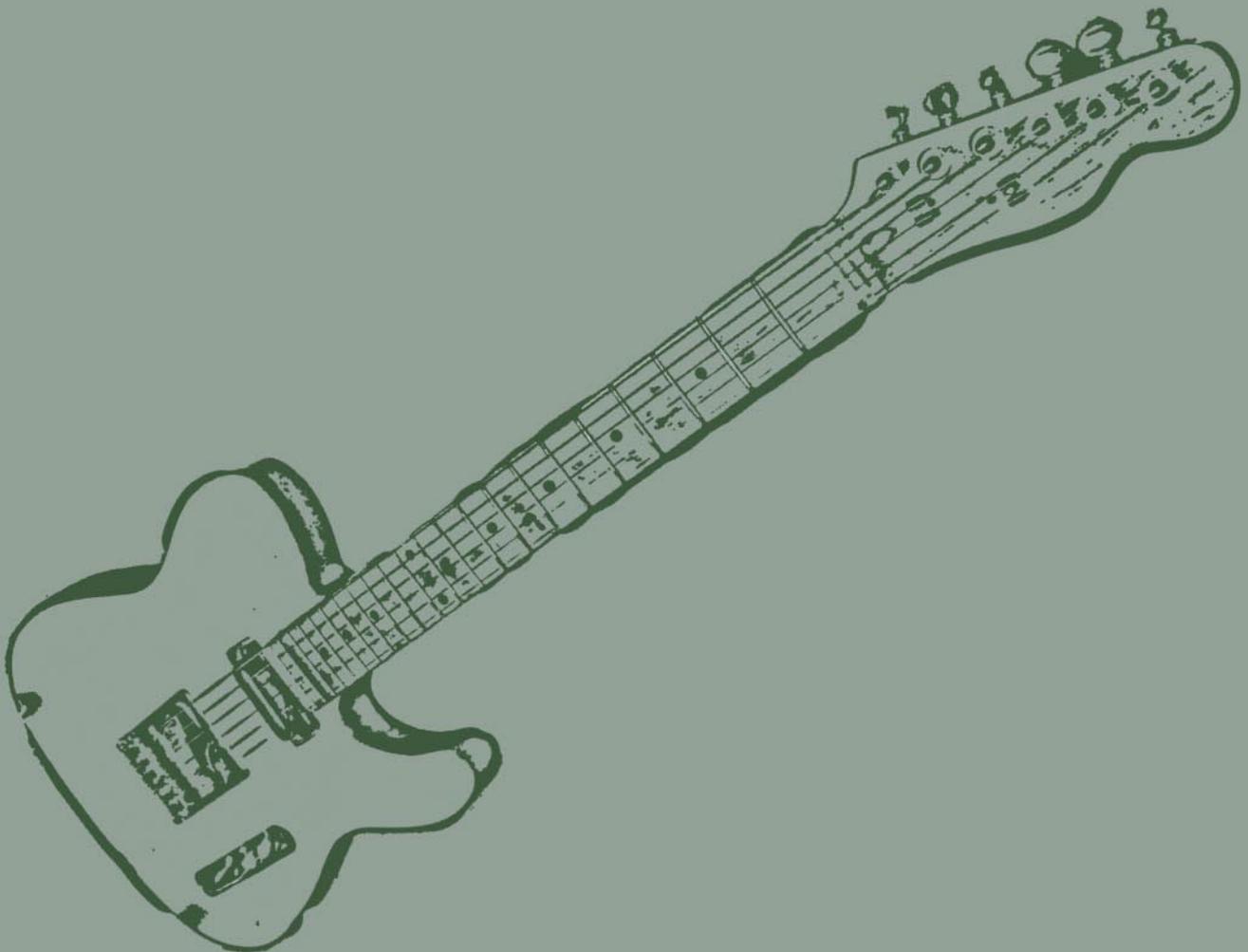
UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



Departamento de Comunicación Audiovisual, Documentación e Historia del Arte

# EL TIMBRE EN LA GUITARRA ELÉCTRICA SÓLIDA: DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA RELATIVA DE CADA COMPONENTE EN EL TIMBRE DEL INSTRUMENTO.

TRABAJO FINAL DEL MÁSTER UNIVERSITARIO EN MÚSICA  
por Vicente Juliá Fernández



Dirigido por:  
Carlos Alberto Hernández Franco  
Jorge Sastre Martínez

Valencia, a 24 de julio de 2012



## RESUMEN:

El objetivo del presente trabajo consiste en determinar cuanto pueden influir en el timbre de la guitarra eléctrica cada uno de sus distintos componentes, así como algunos factores de éstos.

Para ello se ha construido una guitarra eléctrica sólida y 13 variantes de la misma, que sólo difieren de la original en un único componente o factor, y se han tomado varias muestras de sonido de todas ellas.

Se han determinado las características principales del timbre de estas muestras midiendo sus principales constituyentes, y se ha calculado el incremento que suponen respecto a la guitarra de referencia. Las muestras también han sido sometidas a un test de percepción en el que los sujetos han valorado la similitud-diferencia de estas variantes respecto a la guitarra de referencia.

Con los datos obtenidos hemos podido establecer qué componentes o factores son capaces de alterar más el timbre de la guitarra eléctrica sólida. También hemos hallado una alta correlación entre la percepción de distancia subjetiva respecto de la guitarra de referencia y la variación de la Irregularidad Espectral y la energía en el armónico 15, identificando estas magnitudes como las más significativas en la percepción del timbre del instrumento.

### **Palabras clave:**

Guitarra eléctrica sólida, timbre.

**ABSTRACT:**

The aim of this work is to determine the dimension of the influence on the timbre of the solid body electric guitar of each and every of its components as well as some of their factors.

For this purpose, a solid electric guitar has been made together with 13 variations of it which differ in only one component or factor from the original one. Sound samples have been taken from all of them.

The main features of the timbre of these samples have been determined by measuring their main constituents and their increment with regards to the reference guitar has been calculated too. In addition, the samples have also been submitted to a perception test in which the subjects have evaluated the similarity-difference of these variations regarding the reference guitar.

With the resulting data, we have been able to establish which components or factors can alter the timbre of the solid body electric guitar more. Furthermore, we have found out a high correlation between the perception of the subjective distance regarding the reference guitar and the variation of the Spectral Irregularity and the energy in the 15th harmonic, these constituents of the timbre being identified as the most significant in the perception of the timbre of the instrument.

**Key words:**

Solid body electric guitar, timbre.

## TABLA DE CONTENIDOS

1. Motivación.....	1
I. MARCO TEÓRICO.....	5
2. Breve resumen de los orígenes de la guitarra eléctrica.....	7
3. Componentes de la guitarra eléctrica sólida.....	11
3.1. <i>El cuerpo de las guitarras eléctricas</i> .....	11
3.2. <i>El mástil</i> .....	15
3.3. <i>Los transductores electromagnéticos</i> .....	16
3.4. <i>El circuito electrónico</i> .....	18
3.5. <i>El puente</i> .....	18
4. El timbre.....	21
4.1. <i>Metodologías de investigación psicofísicas</i> .....	22
4.2. <i>Los constituyentes del timbre</i> .....	23
4.2.1. La envolvente global de la onda.....	23
4.2.2. La distribución de la energía sonora a lo largo del espectro de frecuencias.....	25
4.2.3. La variación de la amplitud en el espectro en función del tiempo.....	29
II. MARCO EMPÍRICO.....	31
5. Objetivos.....	33
6. Método.....	35
6.1. <i>Componentes utilizados</i> .....	35
6.1.1. El modelo Telecaster.....	35
6.1.2. Los cuerpos.....	36
6.1.3. Los mástiles.....	37
6.1.4. Las pastillas.....	38
6.1.5. Los puentes.....	39
6.1.6. Las clavijas.....	40
6.1.7. Las cejuelas.....	41
6.1.8. El circuito electrónico.....	41
6.1.9. Las cuerdas.....	42
6.1.10. El cable.....	42

6.1.11. Las púas.....	43
6.2. <i>Proceso de construcción</i> .....	43
6.2.1. Cuadro resumen de las guitarras construidas.....	46
6.3. <i>Estímulos</i> .....	47
6.4. <i>Tareas</i> .....	49
6.4.1. Test físico.....	49
6.4.2. El test de percepción.....	51
6.5. <i>Sujetos</i> .....	53
7. Resultados y análisis.....	55
7.1. <i>Test físico</i> .....	55
7.2. <i>Test de percepción</i> .....	57
7.2.1. Fiabilidad de la prueba.....	57
7.2.2. Análisis de frecuencias.....	58
7.2.3. Diferencias entre grupos de sujetos.....	59
7.3. <i>Correlaciones entre el test físico y el test de percepción</i> .....	61
7.4. <i>Análisis respecto a la naturaleza de cambios</i> .....	63
8. Conclusiones y perspectivas.....	65
8.1. <i>Grado de cumplimiento de los objetivos</i> .....	65
8.1.1. Objetivo 1.....	65
8.1.2. Objetivo 2.....	67
8.1.3. Objetivo 3.....	68
8.1.4. Objetivo 4.....	68
8.2. <i>Debilidades y oportunidades de la presente investigación</i> .....	69
8.3. <i>Futuras investigaciones</i> .....	69
9. Agradecimientos.....	71
10. Bibliografía.....	73
III. ANEXO I: CUESTIONARIO DEL TEST DE PERCEPCIÓN.....	77
IV. ANEXO II: ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS MUESTRAS.....	81
V. ANEXO III: COMPARATIVAS DEL ANÁLISIS ESPECTRAL ENTRE LAS VARIANTES Y SUS GUITARRAS DE REFERENCIA.....	87

## TABLAS

Tabla 1: Resumen de los componentes utilizados para la construcción de las guitarras utilizadas en este trabajo.....	47
Tabla 2: Frecuencias de las muestras y su variación respecto de Do4.....	49
Tabla 3: Datos medidos en las 14 guitarras eléctricas.....	55
Tabla 4: Análisis de fiabilidad de los grupos (Alpha de Cronbach).....	57
Tabla 5: Análisis de frecuencias de las respuestas consideradas fiables.....	58
Tabla 6: Resultados de la prueba Mann-Whitney entre los grupos de Músicos y No músicos.....	59
Tabla 7: Resultados de la prueba Mann-Whitney entre los subgrupos Guitarristas y No guitarristas..	60
Tabla 8: Medianas de la distancia subjetiva para cada par.....	62
Tabla 9: Coeficientes de correlación de Person entre las medianas de las respuestas de distancia subjetiva y la variación en las magnitudes físicas medidas, y su significatividad.....	62
Tabla 10: Racking de guitarras que se perciben como más diferentes de su referencia.....	67

## ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Guitarra de tres conos resonadores.....	7
Ilustración 2: The frying-pan guitar.....	8
Ilustración 3: The Log.....	9
Ilustración 4: Análisis espectral de un Do4 tocado por una guitarra.....	26
Ilustración 5: A la izquierda el cuerpo de fresno, a la derecha el cuerpo de caoba.....	36
Ilustración 6: Arriba el mástil de arce, abajo el mástil de caoba.....	38
Ilustración 7: De izquierda a derecha, la pastilla simple de material cerámico, la pastillas simple de Alnico V, y la pastilla doble de material cerámico.....	39
Ilustración 8: A la izquierda el puente con anclaje posterior, a la derecha el puente con anclaje a través del cuerpo.....	40
Ilustración 9: De izquierda a derecha, la clavija Stellah (clavija0) y la clavija sperzel (clavija1).....	40
Ilustración 10: Arriba la cejuela de plástico, abajo la de bronce.....	41
Ilustración 11: Detalle del circuito en el momento de su ensamblaje.....	42
Ilustración 12: Las cuerdas utilizadas.....	42
Ilustración 13: Las púas utilizadas.....	43
Ilustración 14: G0, la guitarra referencia compuesta por los componentes 0.....	44
Ilustración 15: A la izquierda un detalle de la posición de la pastilla0 en G1, a la derecha la pastilla2 sin la cubierta, en G3.....	45
Ilustración 16: A la izquierda la primera versión de G13, a la derecha la versión definitiva.....	46

## GRÁFICOS

Gráfico 1: Frecuencia de respuestas de los sujetos.....	58
Gráfico 2: Promedio de distancia subjetiva entre las variantes y las guitarras de referencia.....	67
Gráfico 3: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G0.....	83
Gráfico 4: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado 2ª cuerda al aire (subida medio tono) en G0.....	83
Gráfico 5: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G-1.....	83
Gráfico 6: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G1.....	83
Gráfico 7: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G2.....	84
Gráfico 8: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G3.....	84
Gráfico 9: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado 2ª cuerda al aire (subida medio tono) en G4.....	84
Gráfico 10: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G5.....	84
Gráfico 11: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G7.....	85
Gráfico 12: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado 2ª cuerda al aire (subida medio tono) en G8.....	85
Gráfico 13: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G9.....	85
Gráfico 14: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G10.....	85
Gráfico 15: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G11.....	86
Gráfico 16: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G12.....	86
Gráfico 17: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G13.....	86
Gráfico 18: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G-1.....	81
Gráfico 19: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G1.....	89
Gráfico 20: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G2.....	98
Gráfico 21: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G3.....	98
Gráfico 22: Energía porcentual en los armónicos de G0(2) y G4.....	90
Gráfico 23: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G5.....	90
Gráfico 24: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G7.....	90
Gráfico 25: Energía porcentual en los armónicos de G0(2) y G8.....	90
Gráfico 26: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G9.....	91
Gráfico 27: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G10.....	91
Gráfico 28: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G11.....	91
Gráfico 29: Energía porcentual en los armónicos de G2 y G12.....	91
Gráfico 22: Energía porcentual en los armónicos de G2 y G13.....	92

## **1. Motivación.**

Uno de los factores que otorga la belleza a la música es el timbre de los instrumentos que la interpretan. Cada vez más músicos iniciamos una investigación en pos de entender y mejorar el timbre de nuestros instrumentos. En esta línea ya se han desarrollado varios trabajos en este Departamento, tanto en el Máster Universitario en Música como en el Programa de Doctorado en Música.

Mi instrumento es la guitarra eléctrica, instrumento protagonista de la segunda mitad del siglo XX, al menos en lo que a música popular se refiere. No existen muchas publicaciones científicas entorno a este instrumento (Wiese y Rossing, 2002; Hanaka, 2007; Kaieda et al., 2009) y ninguno de ellos aborda un estudio del timbre del instrumento.

Tratar de encajar la guitarra eléctrica dentro de las clasificaciones clásicas de la organología no es tarea sencilla. Podemos clasificarla como un cordófono de cuerda pulsada, como la guitarra clásica, el laúd o la mandolina, pero carece de la caja de resonancia de estos instrumentos, al menos las guitarras eléctricas sólidas, en las que centraremos nuestro estudio.

Al carecer de caja de resonancia el sonido no se genera por la excitación del aire, sino que la vibración de las cuerdas ferromagnéticas es convertida en electricidad, al alterar estas cuerdas el campo magnético de un electroimán. Esta señal eléctrica es posteriormente amplificada y emitida por unos altavoces.

Tenemos pues un instrumento en que el sonido se genera en un entorno acústico y posteriormente es transformado en electrónico antes de ser escuchado. Este diseño es único, solamente compartido por el bajo eléctrico, y diferente del de otros instrumentos de naturaleza electrónica (mejor que eléctrica) como el sintetizador, que carece de parte acústica.

Esta naturaleza híbrida es similar a la de los instrumentos electro-acústicos aparecidos en los últimos años, como guitarras, violines, contrabajos, etc. Pero en

estos últimos es la vibración de la madera, mediante un sensor piezo-eléctrico, la que es transformada en electricidad y no la de la cuerda.

Por tanto, este instrumento, nos permite lanzar hipótesis que serían descabelladas en otros instrumentos. Estoy seguro que nadie me tomaría en serio si planteara la hipótesis de que la madera en la que fueron construidos los violines Stradivarius no influye (o influye poco significativamente) en el timbre de los mismos, o que el material en el que se construyen los órganos Hammond o los sintetizadores influye en su timbre. Pero no me parece tan descabellado plantear dudas en la influencia significativa en el timbre de la guitarra eléctrica sólida de las maderas utilizadas en su construcción.

Como hemos visto, la cuerda metálica de una guitarra eléctrica provoca al vibrar una perturbación en el campo magnético de un imán al que se le ha rodeado con una bobina de conductor, esta perturbación induce una corriente en la bobina que contiene un espectro de frecuencia similar, que no igual, al que contiene la vibración de la cuerda, ya que Lemarquand y Lemarquand (2007) y Horton y Moore (2008) demostraron que existen diferencias entre ambos espectros de frecuencia. Esta corriente circula a través de un circuito electrónico y es transmitida por un conductor a un amplificador, que emite la señal. ¿En qué momento del proceso influye la madera en la generación del sonido?

Sin embargo, la creencia general entre los guitarristas es que la madera en la que se construye es fundamental para el timbre de la misma. La guitarra eléctrica sólida no es un instrumento barato, has de gastarte varios miles de euros para conseguir un buen instrumento. La mayor parte de este gasto se debe a las maderas utilizadas en su construcción, que suelen ser nobles, antiguas y con un tratamiento de secado especial. Pero, ¿es la madera la variable más relevante de cuantas interviene en la determinación del timbre de una guitarra?

Además, hay un factor ecológico a tener en cuenta, ya que muchas de las maderas en las que se construyen los cuerpos y mástiles de la guitarra eléctrica provienen de especies de árboles protegidos, y tal vez no sea necesario utilizarlas.

Una de las primeras cuestiones a abordar, entonces, en una investigación sobre el timbre de la guitarra eléctrica sólida, es determinar si es el carácter acústico o el electrónico el que tiene más peso específico en el timbre final del instrumento.

Incluso podríamos ir más allá y considerar la hipótesis de que todos y cada uno de los componentes que forman una guitarra eléctrica influyen en el timbre final de la misma, pero no todos ellos contribuirán de igual manera. Incluso es posible que los componentes más caros no sean los que incidan de forma más determinante en el timbre global del instrumento. La identificación de la importancia relativa en el timbre de cada componente es, por tanto, un buen inicio a la investigación.

Mi formación universitaria en Ingeniería me lleva a abordar el estudio desde una perspectiva distinta a la de otros estudios en este campo: Entender profundamente el timbre de la guitarra eléctrica se me antoja una oportunidad de mejorar la calidad de su sonido, abaratar sus costes, e incluso conseguir un instrumento más ecológico.

La forma más inteligente que se me ocurre para abordar una cuestión tan amplia como la planteada, es la de hacerlo por partes. El primer paso lógico será determinar cuánto afecta la variación de cada uno de estos componentes, individualmente, en el timbre obtenido, para, en pasos posteriores, dedicar el tiempo y los recursos adecuados a cada uno de ellos, según la importancia relativa que posean en el timbre final.

Para ello plantearemos un experimento en el que a partir de una guitarra eléctrica sólida, que tomaremos como referencia, se irán creando variantes de la misma en las que un único componente haya cambiado cada vez, con objeto de comprobar, al comparar estas variantes con la guitarra de referencia, cuánto es capaz de cambiar el timbre ese componente. Buscaremos, por tanto, los componentes más distintos de entre los que dispongamos en el mercado a fin de causar la mayor variación de timbre posible.

Añadiremos a esta experiencia variantes de guitarra con los mismos componentes que la de referencia pero en las que habrá variado algún factor, como la posición de la pastilla, la masa del cuerpo, etc.

Llevo tocando la guitarra eléctrica alrededor de 25 años y durante todo este tiempo he escuchado una serie de axiomas contradictorios que son aceptados por la mayor parte de los intérpretes:

- La madera en la que está construido el cuerpo de las guitarras eléctricas determina el timbre<sup>1</sup> de la misma.

---

*1 Normalmente los términos que se usan entre los guitarristas son color, tono o sonido en lugar de timbre, pero se entienden como sinónimos en este contexto*

El timbre en la guitarra eléctrica sólida:

Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

---

- Si sustituyes las pastillas<sup>2</sup> de una guitarra eléctrica cambias totalmente su timbre.
- La madera en la que se construye el mástil de la guitarra varía sustancialmente el timbre de la misma, al ser uno de los nodos de vibración de la cuerda.
- Un buen guitarrista suena bien con cualquier guitarra.

¿Pueden ser simultáneamente ciertas estas cuatro afirmaciones o no? Creo que ha llegado el momento de averiguarlo.

---

<sup>2</sup> El término pastilla hace referencia al transductor electromagnético que transforma la variación que la vibración de la cuerda pulsada provoca en su campo magnético en corriente eléctrica

## I. MARCO TEÓRICO



## 2. Breve resumen de los orígenes de la guitarra eléctrica.

*“Los primeros pioneros de la guitarra eléctrica vieron en la amplificación el vehículo que les permitiría competir con los vientos. Fue liberador, una herramienta que permitiría, no sólo formar parte de la sección de vientos en los pasajes de tutti conjunto, sino también convertirse en solistas en términos de igualdad con los más destacados saxofonistas y trompetistas.” (Ingram, 2001. p. 14)*

Con la aparición del amplificador muchos músicos experimentaron con él. Era la segunda década del siglo xx y las *Big Bands* habían irrumpido en la escena musical. En estas formaciones tanto guitarristas como contrabajistas tenían un serio problema de volumen. Era imposible que sus cajas de resonancias pudieran competir con una sección de viento-metal.

En 1926, Jonh Dopyera un *luthier* de violines checoslovaco, emigrado a Estados Unidos registró la patente de la Guitarra resonadora (Simth, 1987), que podemos ver en la ilustración 1. Una guitarra construida en aluminio y con tres conos resonadores. Esto amplificó considerablemente la sonoridad de la guitarra, pero también cambió radicalmente su timbre, convirtiéndolo en fuerte y estridente. Esta guitarra se puede apreciar en las grabaciones de la época de algunos músicos de blues como Bo Carter o Bukka White.

Otros fabricantes como Martin o Gibson cambiaron las cuerdas de tripa por cuerdas de acero, y ampliaron sustancialmente la caja acústica de la guitarra hasta transformarla en lo que hoy conocemos como guitarra acústica.

Paralelamente se daban los primeros pasos en la fonocaptación eléctrica. Lloyd Loar ya había inventado en 1923 el antepasado de la pastilla



**Ilustración 1: Guitarra de tres conos resonadores**

de guitarra eléctrica convencional. Un burdo imán que es bobinado con hilo de cobre y era capaz de captar los cambios en el campo magnético que producía una cuerda de guitarra de acero al vibrar. Pero la compañía Gibson, empresa para la que trabajaba decidió no comercializar el producto debido a la poca viabilidad que tenía la amplificación en aquellos años.



**Ilustración 2: The frying-pan guitar**

La empresa Rickenbacker, sin embargo sí comercializó la primera guitarra eléctrica en 1932, la cual fue conocida como *La Sartén* (ver Ilustración 2). En esta guitarra utilizó un fonocaptador, conocido como la pastilla de herradura, desarrollado en 1931 por George Beauchamp.

En 1936 la empresa Gibson lanzó su modelo ES-150 en el que la guitarra mantenía su aspecto habitual en forma de 8, y presentaba una novedosa pastilla, la *Charlie Christian*.

Pero estas primeras guitarras eléctricas construidas sobre la caja de resonancia de una guitarra clásica, a la que se le sustituía la boca por la pastilla, tenían un gran problema de diseño. La caja de resonancia provocaba retroalimentación (*feedback*) en la pastilla.

De estas guitarras se desarrollaron las actuales guitarras de cuerpo hueco (*hollowbody*) y las semisólidas. Estas guitarras de cuerpo hueco son similares a las guitarras clásicas y acústicas, y pueden crear sonido por sí mismas, aunque no están diseñadas para sonar sin amplificación. Algunas guitarras de cuerpo hueco tienen agujeros en forma de f en la tapa y otras carecen de agujeros (Young, 2004). Una guitarra semisólida es aquella de cuerpo hueco a la que se le añade un bloque de madera en la parte central de la caja a lo largo del cuerpo, desde el mástil hasta la cola, que actúa de forma similar al alma de un violín, y mejorando el *sustain* del instrumento y disminuyendo los problemas de *feedback*.

Lester Polfus, más conocido como Les Paul, empezó a experimentar con la amplificación en 1929, instalando un micrófono de teléfono debajo de la tapa de su guitarra y utilizando la radio de su padre como amplificador. Estas experimentaciones le llevaron a diseñar la primera guitarra eléctrica de cuerpo sólido, comercializada por Gibson en 1941 y conocida popularmente como “el Tronco” (*The Log*).

Como se puede apreciar en la ilustración 3 la guitarra era un largo mástil sobre el que se tallaba el diapason en la parte superior y se insertaban las pastillas, una cerca

del mástil y otra cerca del puente. A este mástil se le acoplaban dos partes de madera sólida para darle la forma tradicional de guitarra al instrumento.



**Ilustración 3: The Log**

Según reconoció el propio Les Paul en varias entrevistas, estas partes de madera sólo tenían un efecto decorativo. Durante un par de años fue a todas las empresas constructoras de guitarra tratando de vender su invento, al cual aún no había añadido los “embellecedores” y ninguna empresa le quería comprar su patente y le llamaban el “chico de la escoba” o el “chico del tronco”. En 1941 se le ocurrió añadir dos piezas de madera a su invento dándole forma de guitarra.

Y es aquí, justo en el nacimiento de la guitarra eléctrica sólida, cuando nace también la primera de las eternas polémicas sobre la madera y el timbre de las guitarras. Si Les Paul sólo utilizaba la forma de la guitarra para embellecerla ¿qué importancia puede tener la madera en el timbre de las guitarras?



### **3. Componentes de la guitarra eléctrica sólida.**

El diseño básico de una guitarra eléctrica consiste en una pieza de madera llamada cuerpo, que puede recordar más o menos a una guitarra clásica, a la que se le encola o atornilla un listón de madera, conocido como mástil. Este mástil contiene pequeños alambres dispuestos transversalmente a unas determinadas distancias, que se conocen como trastes y finaliza en la cejuela, que es una pieza que sirve como punto de apoyo de las cuerdas, y como guía para la trayectoria de las mismas. La parte superior del mástil, que se conoce como pala, contiene las clavijas que sirven para fijar y tensar las cuerdas. Sobre el cuerpo, y alineados con el mástil, se disponen una o varias pastillas (o transductores electromagnéticos) que se conectan a un circuito electrónico, que normalmente está formado por un selector de pastillas (siempre que haya más de una pastilla) y al menos un potenciómetro que controla el volumen y al menos otro que controla el tono filtrando la señal a través de un condensador que actúa como un filtro de paso-bajo. El circuito acaba en un conector hembra, normalmente del tipo *jack 1/4*. En el cuerpo también se atornilla una pieza, normalmente metálica, que sirve para fijar el otro extremo de las cuerdas, y posiblemente para transmitir la vibración de la cuerda al cuerpo. Esta pieza se conoce como puente.

#### **3.1. El cuerpo de las guitarras eléctricas.**

El cuerpo de la guitarra eléctrica es la pieza fundamental, al menos a nivel estructural, ya que a ella van unidos el resto de componentes que conforman el instrumento. A lo largo de la historia del instrumento se han utilizado materiales distintos a la madera, basándose en la hipótesis de que el material en que se construya el cuerpo no tendrá influencia en el timbre final del instrumento. Podemos destacar los cuerpos de aluminio de la marca *Spruce Hill Guitars*, los cuerpos de Plexiglass de las Ampeg de finales de los 60, o el modelo *The Handle* de la marca *Jim Reed* construida en fibra de carbono.

Estos materiales alternativos no han calado sobre el gran público, y la inmensa mayoría de marcas y modelos se construyen con madera. Esto no siempre se debe

a que el constructor crea que fabricar el cuerpo en madera otorgará mejor calidad sonora al instrumento. Por ejemplo los constructores de guitarras eléctricas de la empresa *DD Guitars* alojan en su web<sup>1</sup> un artículo, *Guitar physics and wood*, en el que defienden la no influencia de la madera en el timbre de la guitarra; o la empresa Danelectro que fabrica sus cuerpos en aglomerado de madera (como los muebles de cocina). Sin embargo la mayor parte de constructores y usuarios sí defienden la influencia de la madera del cuerpo en el timbre del instrumento, y por tanto buscan maderas de calidad, encareciendo el producto.

Según Brosnac (1978) la explicación a esta influencia reside en la masa del cuerpo, o más concretamente en cómo esta masa es capaz de absorber y almacenar la energía vibratoria, ya que cuanto más energía se almacena más dura el sonido producido por la cuerda (mayor *sustain*). La estructura interna de la madera apenas disipa energía durante la propagación de la energía, lo que la convierte en un material idóneo. Además apunta que la rigidez de la madera determina el espectro de frecuencias del sonido, disminuyendo el volumen pero aumentando el contenido de altas frecuencias cuanto más rígida sea.

El artículo de la web de *DD Guitars* sin embargo, apunta a que la cuerda pierde mucha energía cuando la transmite al cuerpo, reduciendo considerablemente su tiempo de vibración.

Entre los guitarristas existen otras teorías de cómo afecta la madera al sonido de la guitarra: (1) la vibración de la cuerda se transmite, a través del puente metálico a la madera, está vibra y vuelve a transmitirse por el puente a la cuerda, lo que varía la composición armónica de la vibración y por tanto determina el espectro de frecuencias característico del timbre de esa guitarra; y (2) la vibración de la cuerda llega al cuerpo, a través del puente, y lo hace vibrar, las pastillas que están fijadas al mismo vibran también, siendo esta doble vibración (la de la cuerda y la del transductor) la que caracteriza el sonido.

Algunos opositores a (1) argumentan que, de ser cierta, se debería escuchar un cambio brusco en el timbre, ya que la corriente viaja a la velocidad de la luz y sería transmitida tal y como la genera la vibración de la cuerda durante el tiempo en que el sonido que viaja a la velocidad de propagación del mismo en la madera recorriendo toda la superficie de la madera de ida y vuelta antes de alterar la vibración de la cuerda. Una simple reflexión basta para demostrar el porqué de la inexistencia de este cambio brusco en el timbre, aunque la electricidad por el cable

<sup>1</sup> <http://www.ddcustomguitars.com/guitarphysics.html>. Documento consultado el 18 de diciembre de 2011.

circula prácticamente a la velocidad de la luz (300.000 Km/s) mientras el sonido lo hace a través de la madera a una velocidad aproximada de 3.700 m/s, esta velocidad es suficiente para que en un milisegundo haya recorrido 3,7 m, lo que significa que en un milisegundo podría recorrer una distancia entre el puente y el punto más alejado de la guitarra de 1,85 m.

Los detractores de (2) plantean que si varios de los modelos más populares de guitarra eléctrica, como la *Fender Stratocaster*, fijan sus pastillas sobre una pieza de plástico atornillada al cuerpo mientras muchos otros muchos, como la *Fender Telecaster*, atornillan directamente las pastillas sobre el cuerpo hemos de suponer que no existe una diferencia significativa entre hacerlo de un modo u otro.

La realidad es que se selecciona cuidadosamente la madera con la que se va a construir un cuerpo de guitarra, tanto en el tipo que se utiliza, el corte del bloque y el secado del mismo. Existe numerosas variedades de madera utilizadas, según marca y modelo, y cada una de ellas, supuestamente, aporta matices concretos al sonido de la guitarra.

Haciendo una búsqueda por Internet<sup>2</sup> fácilmente se descubre que la mayoría de los artículos que abordan las cualidades sonoras de las maderas han sido plagiados los unos de los otros. Todos ellos, además, utilizan una terminología ambigua: *es más cálida, tiene más punch, muerde*, etc., pero ni rastro de un dato científico.

Estos artículos citan como principales cualidades de la maderas más comúnmente usadas para construir las guitarras eléctricas sólidas las siguientes:

**Aliso** (Nombre Inglés: *Alder*, nombre científico: *Alnus Glutinosa*)

Es ligera y de porosidad suave, similar al tilo, pero su grano cerrado provoca una excelente respuesta en todas las frecuencias, con un balance muy equilibrado entre graves y agudos. Es junto con el fresno la madera que utiliza la empresa Fender para sus modelos. Su densidad media a 12% de humedad es de 0,41 g/cm<sup>3</sup> y su módulo de elasticidad de 79.900 kg/cm<sup>2</sup>.

**Arce** (*Maple, Acer Saccharum*)

Es muy dura, pesada y de grano fino, destaca su respuesta en agudos y medios

---

<sup>2</sup> Documentos consultados entre el 18 y el 23 de diciembre de 2011:  
<http://jose.gs/la-madera-en-la-guitarra-y-el-bajo-tipos-y-tonos/>  
<http://luthier.fororama.com/t43-informe-tipos-y-caracteristicas-de-la-madera>  
[http://www.guitarbuild.com/?page\\_id=108](http://www.guitarbuild.com/?page_id=108)  
<http://www.guitarraprofesional.com/maderas/maderas.htm>  
<http://www.guitarristas.org/index.php?pid=43>  
<http://www.ispmusica.com/articulo.asp?id=1157>

agudos, y da graves sólidos pero escasos. Es muy usada en la construcción de mástiles. Otra de las principales utilidades es usarla de tapa sobre un cuerpo de madera más cálida (con menos agudos y más graves) como la caoba. Su densidad media a 12% de humedad es de 0,63 g/cm<sup>3</sup> y su módulo de elasticidad de 105.000 kg/cm<sup>2</sup>.

**Caoba** (Mahogany, *Kahya*)

Tiene un peso medio-alto, una alta densidad y es relativamente dura. Su estructura la dota de buenos graves y medios graves y una alta atenuación de las frecuencias más altas. Su tono se describe como caliente y con mucho *sustain*. Es la madera que la marca Gibson® utiliza para su modelo *Les Paul*, seguramente el más popular. Su densidad media a 12% de humedad es de 0,56 g/cm<sup>3</sup> y su módulo de elasticidad de 90.000 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tilo** (Basswood, *Tilia*)

Es una madera blanda aunque con el granulado bastante compacto, y es la preferida en las series bajas ya que es barata. Carece de agudos brillantes y de bajos potentes, sin embargo posee una amplia gama de medios. Su densidad media es de 0,42 g/cm<sup>3</sup> y su módulo de elasticidad es de 68.000 kg/cm<sup>2</sup>.

**Fresno de los pantanos** (Swamp Ash, *Fraxinus Pennsylvanica*)

Tiene grandes poros abiertos, que se alternan con capas duras y blandas de los diferentes anillos. Conserva su capacidad resonante a lo largo de todo el espectro de frecuencias, con agudos cristalinos, medios bien definidos y bajos vigorosos. Su densidad media es de 0,66 g/cm<sup>3</sup> y su módulo de elasticidad es de 129.000 kg/cm<sup>2</sup>.

Además de estas cinco maderas las webs mencionan hasta un total de 19, y me parece destacable que sólo una de ellas, la Pícea, pertenece al orden de las Gimnospermas, mientras el resto son Angiospermas.

Algunos cuerpos de guitarra son cubiertos por una tapa de otra madera, supuestamente con un comportamiento acústico diferente. Se cree que la madera de la tapa influirá en las frecuencias agudas de la guitarra, mientras la madera del cuerpo lo hará en las graves. Las maderas favoritas para las tapas son el Arce y las exóticas.

También se considera que el uso de barnices y/o pinturas hace variar el sonido de la guitarra. En general, para pintar cuerpos de guitarra eléctrica, se usan barnices de nitrocelulosa o pinturas de poliuretano.

Como vemos existen numerosas teorías sobre cuánto, cómo y por qué influye la madera del cuerpo en el sonido de la guitarra eléctrica, pero ninguna prueba documentada. El único artículo científico, no publicado, que he localizado es el de Soper (2007), en el que realiza una experiencia utilizando dos cuerpos de guitarra eléctrica distintos, y concluye que la incidencia de la madera es mínima en el timbre final de la guitarra. Cabe destacar que en dicha experiencia el autor utiliza dos maderas muy similares, el Fresno y el Aliso, y además supone que el espectro de frecuencias del sonido es representación suficiente del timbre del mismo, lo que como veremos más adelante no es una simplificación válida

### **3.2. El mástil.**

Los mástiles se fabrican, en su práctica totalidad, en madera. Es una de las piezas fundamentales de la guitarra, ya que la afinación de la misma depende de la buena fabricación del mástil.

El mástil es un listón de madera, que normalmente se corta transversalmente a los anillos de crecimiento de la madera. Puede ser de una pieza, en cuyo caso la madera utilizada suele ser el arce, o ser de dos, donde una tapa conocida como diapasón va encolada encima del mástil. Los diapasones se suelen construir en maderas duras y pesadas principalmente en Palo de Rosa o Palo de Hierro (el Palo Santo, antaño el más popular ya no se puede utilizar al ser una especie protegida).

Sobre el diapasón se fijan las cuerdas al ser pulsadas por el dedo, convirtiéndose junto al puente en los dos nodos principales de vibración de la cuerda, por tanto y al estar en contacto directo con la cuerda cuando se produce el sonido se estima que es de gran importancia tanto en las altas frecuencias, como en el *sustain* o duración de los sonidos.

En lo que no se puede negar que influye el diapasón y el mástil es en el “tacto” de la guitarra, es decir, en la sensación y la comodidad que transmite al intérprete cuando está tocando. La madera del diapasón ha de ser suave al tacto, y el grosor y la curvatura del mástil adecuados a la mano del intérprete.

Existen dos formas de fijar el diapasón al cuerpo de la guitarra, el atornillado y el encolado. Cada marca o artesano tiene sus preferencias, pero todos destacan la necesidad de que el ajuste entre mástil y cuerpo ha de ser perfecto evitando fricciones y disipación de energía, para que la vibración del mástil pueda transmitirse también al cuerpo, sin embargo la reparación típica que realizan la mayor parte de Luthiers

cuando el mástil no encaja bien es añadir un naípe. Se supone que los mástiles encolados transmiten mejor la vibración al cuerpo que los atornillados.

Sobre el diapasón, y a unas distancias determinadas, se insertan los trastes. Los trastes son piezas metálicas en forma de alambre, cuyo parte inferior encaja en las marcas que el diapasón lleva a tal efecto, y la parte superior sobresale del mismo, facilitando la afinación de la nota respecto de los mástiles sin trastes (como el del violín). Realmente, cuando la cuerda es apretada contra el mástil queda apoyada sobre el traste inmediato inferior a la posición del dedo, limitando la vibración de la cuerda entre esta posición y el puente. Existen diseños de trastes con distintas anchuras y alturas, referidas obviamente a la parte que sobresale. Los trastes son fundamentales para la afinación del instrumento, pero se supone que influyen principalmente en la comodidad de ejecución más que en el sonido final.

En el extremo superior del diapasón se fija la cejuela. La cejuela, normalmente construida en hueso, plástico, grafito o latón, tiene como función ser el apoyo, o nodo, de la cuerda cuando no se pulsa sobre ningún traste y la de mantener las cuerdas equidistantes y paralelas a la superficie del mástil, para ello lleva unos surcos o carriles donde se encajan las cuerdas.

El mástil acaba en la pala, que es la zona posterior a la cejuela donde se insertan las clavijas que sirven para fijar y afinar las cuerdas. Al igual que ocurre con los trastes los diferentes materiales y diseños de las clavijas no parecen destinados a cambiar el sonido del instrumento, sino, únicamente, a mejorar y/o facilitar la afinación.

### **3.3. Los transductores electromagnéticos.**

Las pastillas (llamadas erróneamente en ocasiones micrófonos) que se usan en los instrumentos de cuerdas son una variación de la bobina inducida, una aplicación de la ley de Faraday. Se fabrican enrollando hilo de cobre alrededor de un imán permanente o de un núcleo de hierro dulce sobre un marco de imán. El flujo en el campo magnético se ve afectado por la vibración de las cuerdas cercanas que causa un cambio en la impedancia de la bobina. La corriente inducida es proporcional a la amplitud del movimiento y la frecuencia igual a la oscilación de la cuerda (Brosnac,1978).

Este sistema de captación requiere una posterior amplificación, debido a que genera corrientes con voltajes muy débiles, de entre 100 mV a 1V.

Los imanes o magnetos que se utilizan principalmente en la fabricación de pastillas de guitarra eléctrica son una aleación de aluminio, níquel y cadmio, conocida como Alnico, aunque también se fabrican modelos con materiales cerámicos, ferrosos o con cobalto.

Los Alnicos se clasifican según su composición y el campo magnético que generan, y se comercializan los tipos Alnico II, Alnico III, Alnico IV, Alnico V y Alnico VII.

La intensidad de los campos magnéticos de las diferentes pastillas crean diferencias en el timbre del instrumento, incluyendo el rango de armónicos que genera cada nota, como demostraron Lemarquand y Lemarquand (2007), presentando un modelo de correlación entre la vibración acústica y la variación del campo magnético en función de las dimensiones del imán y de las vueltas de la bobina de cobre. Por tanto no existe una linealidad entre la vibración y la corriente inducida, sino que existe una distorsión ocasionada por diversos factores, como pueden ser la geometría y localización de la pastilla, las no-uniformidad del campo magnético, etc.

Además de las diferencias en los materiales en las que son construidas hay otra diferencia fundamental en el sonido producido por las pastillas, el número de espiras de cada bobina y el grosor del conductor. Estos factores afectan a la capacidad de la bobina, ya que ésta al tener la espiras de conductor muy juntas actúa como un condensador que estuviera en paralelo con la bobina, lo que genera una respuesta en frecuencia<sup>3</sup> típica. Estos factores también influyen en el voltaje de la corriente inducida. Como regla general cuantas más espiras mayor voltaje pero también mas distorsión y menor rango de frecuencias registradas.

Por último también consideraremos el número de bobinas que presenta la pastilla. Así podemos clasificar las pastillas en dos grandes grupos, las de bobinado simple (*single coil*) y las de doble bobinado (*humbuckers*).

Las pastillas *single coil* muestran una mejor respuesta de frecuencias altas y tienen una impedancia alta, pero su principal problema de diseño es que captan las interferencias de la red eléctrica (50 o 60 Hz) y sus armónicos provocando un zumbido (*hum*) característico. (Brosnac, 1978).

Ya en los años 40 la empresa Gibson encontró una solución colocando dos pastillas *single coil* una al lado de la otra pero con la polaridad y el sentido de las espiras

---

<sup>3</sup> La respuesta en frecuencia es el rango de frecuencias que la pastilla puede inducir, y la amplificación o atenuación que le aplica a cada frecuencia

invertido y las conectó juntas, cancelando la interferencia de este modo. Este tipo de pastillas se denominan *humbucker* que literalmente significa bloqueador de zumbido.

### **3.4. El circuito electrónico.**

El circuito electrónico de una guitarra eléctrica es muy simple, consiste en conectar un extremo de las bobinas de las diferentes pastillas a un conmutador que actúa como selector de pastillas, y el otro a la masa de la guitarra. Normalmente presentan además potenciómetros que manipulan el volumen y el tono de la guitarra. En concreto, los potenciómetros de tono suelen ir conectados a condensadores de distintos materiales, normalmente cerámicos, que actúan como filtro de paso bajo filtrando más cantidad de señal conforme aumenta la resistencia del potenciómetro. El circuito acaba en un conector hembra que permite conectar la guitarra a un amplificador mediante un cable macho-macho.

Existe infinidad de diseños de circuitos desde los muy simples a los muy complejos. Cabe destacar algunos diseños que incorporan filtros activos, para reforzar graves o agudos, inversores de fase, interruptores para convertir un *humbucker* en un *single coil*, etc. El diseño y los materiales del circuito han de influir en el tono final del instrumento, ya que por ellos circula la corriente inducida antes de ser amplificada y emitida.

### **3.5. El puente.**

El puente es la pieza, normalmente de metal, que insertada en el cuerpo sirve para fijar uno de los extremos de la cuerda. Principalmente los podemos dividir, según su sujeción al cuerpo, en fijos, flotantes y con *vibrato*.

El diseño más sencillo es el puente fijo, que consiste en una pieza de metal alineada con el mástil y fijada en un determinado punto al cuerpo de la guitarra. La posición del mismo determina la longitud de la cuerda, y por tanto la correcta afinación del instrumento.

El puente flotante, sin embargo, no está fijado al cuerpo. Las cuerdas van fijadas a otra pieza posterior, y reposan sobre este puente, que normalmente es metálico en el lugar donde contactan las cuerdas y de madera en donde apoya con el cuerpo. Pese a no estar fijo la correcta colocación del mismo es igual de importante para la afinación que en los puentes fijos.

El puente con *vibrato* es un puente fijo al que se le ha añadido algún muelle, lo cual le permite cierta fluctuación hacia arriba y/o hacia abajo (o mucha fluctuación en el caso del modelo *Floyd Rose*). Este muelle es accionado apretando y soltando (algunos también permiten levantar) un brazo que es de fácil acceso para la mano derecha del guitarrista, y provoca una variación rápida de la afinación, al sonido de la guitarra.

Los tres tipos de puente suelen presentar elementos móviles, conocidos como selletas, que sirven para alargar o acortar individualmente la longitud de cada cuerda, permitiendo una afinación más precisa.

Además de esta división podemos agruparlos según la forma en la que se anclan las cuerdas, en anclaje posterior, donde las cuerdas se pasan por unos agujeros practicados en la parte posterior del mismo puente, o anclaje a través del cuerpo, donde se anclan a la parte posterior del cuerpo de la guitarra y entran al puente a través de unos agujeros practicados en la parte inferior del mismo.

Como ya hemos indicado anteriormente el puente hace de transmisor de la energía de vibración acústica entre la cuerda y el cuerpo, y por tanto es presumible que parámetros como volumen, densidad, peso, material o tipo de anclaje harán variar el timbre de la guitarra eléctrica.



#### 4. El timbre.

Timbre es un término engañosamente sencillo... (McAdams, 1999).

El timbre es una cualidad de los sonidos musicales. Eliminemos de un sonido musical la afinación, la intensidad y la duración y todo lo restante será el timbre. Esto se deduce de la definición de *sonancia* de Seashore (1938) como la cualidad tonal global que resulta de la fusión del cambio de timbre, altura e intensidad de un sonido. La primera referencia al timbre se debe a Helmholtz (1877), aunque él utilizaba el término cualidad musical del tono en lugar de timbre

La complejidad del timbre proviene de su misma naturaleza, ya que mientras la altura, la intensidad y la duración son magnitudes físicas bien definidas y como tales las podemos medir y asignarles un valor, el timbre es una magnitud psicofísica y por tanto sólo podemos medir los cambios en la percepción que provocan las distintas variables físicas que intervienen. Por tanto, el timbre carece de unidad de medida, además estas variables físicas conforman una magnitud multidimensional con multitud de atributos, muchos de los cuales varían en función del tiempo. Estos últimos, debido a su complejidad, todavía no se comprenden tan bien como los parámetros globales estáticos (Hadja, 1999).

De este modo, un estudio completo sobre el timbre ha de implicar trabajar en dos vertientes, por un lado la determinación de la variación en la percepción, mediante metodologías de investigación psicofísicas, y por otro la determinación de los atributos constituyentes del timbre mediante mediciones físicas.

Según Risset y Wessel (1999) “*el término timbre hace referencia a la cualidad del sonido. Es el atributo perceptivo que nos permite distinguir entre distintos instrumentos orquestales que están tocando una misma nota con un volumen similar.*”, y yo añadiría que también nos permite diferenciar un buen y un mal instrumento, o incluso a un intérprete de otro.

#### **4.1. Metodologías de investigación psicofísicas.**

El primer problema que nos surge al tratar con variables psicofísicas es el componente subjetivo que lleva implícita la medida, es decir sólo podemos medir aquello que los sujetos describen acerca de los estímulos.

Las dos metodologías más utilizadas en los estudios del timbre son la diferenciación semántica y la similitud o escala de proximidad.

La primera de ellas consiste en puntuar la muestra en una escala en cuyos extremos el investigador sitúa dos adjetivos opuestos, por ejemplo brillante y sordo (originalmente *brightness* y *dullness*) o duro y suave (Litche, 1941; Von Bismarck, 1974). Una variante de esta metodología, conocida como VAME o Estimación de la Magnitud de un Atributo Verbal, fue introducida por Kendall y Carterette (1993) y consiste en sustituir los atributos opuestos por la negación del primero, así tendríamos una escala brillante-no brillante o suave-no suave. Esta variante facilita la tarea de los sujetos, y por tanto diferencia más significativamente los estímulos que la anterior.

La metodología de similitud presenta los estímulos emparejados, y los sujetos valoran esta similitud en una escala, obteniendo una distancia subjetiva entre cada par. Emparejando cada estímulo con el resto obtendremos una matriz de similitud entre los estímulos. Esta matriz se puede reflejar en un espacio multidimensional mediante las técnicas de Escalado Multidimensional (MDS) introducidas por Richardson en 1938.

*“Los algoritmos de escalado multidimensional dibujan un mapa de la distancia subjetiva de las relaciones en un espacio geométrico con un número de dimensiones especificadas por el investigador”* (Grey, 1977. Pág. 1.270).

Es decir mediante alguno de los algoritmos MDS se obtiene una representación espacial en  $n$  dimensiones de las distancias entre los estímulos. Las dimensiones  $n$  son fijadas por el investigador en base a qué representación tiene mejor correlación con los parámetros que investiga, y pueden representar tanto variables físicas como extramusicales (Familia de instrumento, nota fundamental, etc.).

Normalmente el timbre es representado en dos o tres dimensiones, aunque Shepard (1982) llegó a representar el timbre hasta en 6 dimensiones.

La aplicación de estas metodologías de escalado multidimensional han permitido identificar qué magnitudes físicas presentan altas correlaciones con estas

dimensiones creadas, lo que ha llevado a considerar estas magnitudes como los principales constituyentes del timbre.

En el siguiente apartado profundizaremos en estos constituyentes.

#### **4.2. Los constituyentes del timbre.**

Si pensamos en una misma nota interpretada a un volumen similar por un violín, por una trompeta y por una guitarra eléctrica, podemos intuir en cuántos distintos atributos podemos diferenciar estos sonidos.

*“El timbre es producto de un sistema dinámico”* (Hadja, 1999. P. 1) en el que intervienen distintas variables físicas, no totalmente identificadas todavía. Las distintas investigaciones sobre el timbre consisten, principalmente, en alterar alguna (o algunas) variable e identificar qué cambios en la percepción del timbre provocan. Podemos observar que estas investigaciones principalmente buscan la identificación de las dimensiones del espacio MDS del timbre creado o la identificación y/o la síntesis de sonidos musicales, sin embargo son menos las que buscan aplicaciones organológicas, como la presente investigación.

Mediante la aplicación de las metodologías anteriormente descritas, las investigaciones previas han identificado los principales constituyentes del timbre, que son en función de su importancia:

- La envolvente global de la onda, o dicho de otro modo la variación de la amplitud de la onda sonora en función del tiempo.
- La distribución de la energía sonora a lo largo del espectro de frecuencias.
- La variación espectral, o los cambios en la amplitud de cada componente de frecuencia en función del tiempo.

##### **4.2.1. La envolvente global de la onda.**

Helmholtz (1877) describió el modelo clásico de la envolvente global de la onda, en el que se identifican cuatro estadios o fases del sonido: el **ataque**, o fase de excitación de la onda desde su inicio hasta el momento en que alcanza su punto máximo (o un porcentaje sobre el máximo) de amplitud; la **decadencia**, o fase en la que la amplitud cae pronunciadamente hasta que se produce una inflexión en su pendiente descendente; el **estado estacionario**, o fase en la que la amplitud

se mantiene (o decrece de forma suave y constante) hasta su siguiente punto de inflexión (o, en caso de caída suave y constante, hasta un porcentaje determinado del valor máximo de la amplitud de la onda); y el **desvanecimiento**, o fase en la que la amplitud decrece hasta confundirse con la del ruido de fondo.

Pero este modelo clásico no encaja con la envolvente global de la onda sonora generada por todos los instrumentos. Se ha identificado como una característica común a todos los instrumentos de cuerda pulsada, entre los que se incluye la guitarra eléctrica, la inexistencia de los cuatro estadios, que quedan reducidos a dos únicos segmentos identificables, el ataque y el resto de la onda (Caetano, Burred y Rodet, 2010). Esto se explica, según Hadja (1999) porque “*El timbre de un tono musical tiene muchos atributos, algunos de los cuales son únicos de un instrumento en particular o de una familia de instrumentos, y otros son comunes a todos los instrumentos musicales.*” (Pág. 1).

Por tanto es posible tomar como valor referencial de medida de la envolvente de la onda los tiempos de ataque y de desvanecimiento de las ondas sonoras de la guitarra eléctrica.

El primer trabajo que identificó la significatividad del tiempo de ataque en la percepción del timbre se debe a Stumpf (1883/1890). En su trabajo observó que si eliminaba el estado de ataque de sus muestras muchos instrumentos, tan dispares como el chelo y el fagot, eran fácilmente confundibles. Sus estudios, sin embargo, fueron cuestionados por no relevar cómo había editado los sonidos, aunque posteriormente fueron corroborados por Winckel (1960/1967) quien cortó los sonidos de la cinta magnética donde habían sido grabados, el problema de Stumpf es que el magnetófono se inventó después de su muerte.

Desde entonces, se han realizado multitud de experiencias sobre la envolvente global de la onda. En algunas se ha demostrado su importancia evaluando la dificultad de identificación de un instrumento cuando se presenta al oyente inversamente, de atrás hacia delante (Berger, 1964; Hadja, 1999). Otras han demostrado que no siempre es un factor necesario ni suficiente para la identificación del timbre (Hadja, 1999), eliminando estadios de la envolvente en las muestras de instrumentos que se han de identificar. Incluso Kendall et al (1999) demostraron que la envolvente es capaz de enmascarar al resto de factores, presentando muestras que contenían los componentes de frecuencia de un instrumento con la envolvente de otro. Son mucho los estudios, además, que han identificado la envolvente global de la onda

con la primera dimensión del timbre (Krumhansl, 1989; Iveron y Krumhansl, 1993; McAdamas, 1999, Kendall et al, 1999) en los espacios MDS.

De entre los cambios de estadio, se ha identificado como el predominante el cambio de estadio entre el ataque y el resto de la onda. A lo largo de los estudios se han utilizado diversos criterios para determinar cual es este punto, un determinado intervalo de tiempo, el punto de máxima amplitud, o un punto determinado de la pendiente ascendente hasta el máximo. Este punto determinado es definido de forma distinta en diferentes métodos de cálculo: el método de los esfuerzos (Peeters, 2004), el tiempo de ataque perceptual o PAT (Bejarano, 2009) o el modelo de la trayectoria de la amplitud/centroide o ACT (Hadja, 1999; Caetano, Burred y Rodet, 2010). En este ámbito merece destacar el trabajo de Dixon (2006) recopilando los métodos de detección de *onset* más comunes de los últimos años.

El modelo de la trayectoria de la amplitud/centroide define el ataque como el tiempo en que la amplitud crece mientras el centroide decrece, y por tanto determina el fin del ataque como el punto del tiempo en el que la pendiente del centroide varía de dirección. La utilización para el cálculo de la trayectoria del centroide espectral, que trataremos en el siguiente apartado, demuestra lo intrínsecamente relacionadas que están las tres variables principales del timbre (tiempo, energía y frecuencia).

#### **4.2.2. La distribución de la energía sonora a lo largo del espectro de frecuencias.**

Las primeras investigaciones (Helmholtz, 1877; Seashore, 1938) consideraban el timbre como una propiedad invariable en el tiempo, y por tanto bastaba con medir el timbre únicamente de unos cuantos ciclos del estado estacionario de la onda y tratarlos como si de un sonido infinito e invariable en el tiempo se tratara. De este modo y mediante la Serie de Fourier descomponían esta señal en la suma de ondas sinusoidales de distinta frecuencia, fase y amplitud, y podían representar el contenido espectral del timbre. En los sonidos musicales estas frecuencias se corresponden, aproximadamente, a los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y se denominan armónicos.

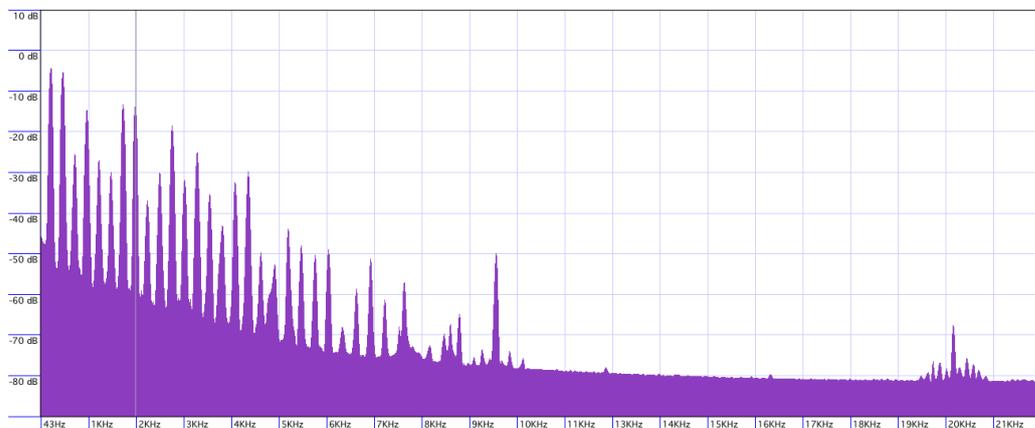
Este modelo aún es usado hoy en día como simplificación válida en el estudio del timbre en instrumentos musicales en los que el estado estacionario de la onda prevalece sobre el resto de estados, como el clarinete (Pastor, 2005).

Pero la realidad de la guitarra eléctrica es muy diferente, sus sonidos, como ya mencioné antes, carecen de estado estacionario y por tanto la variación de sus

componentes armónicos en el tiempo no puede ser desestimada para abordar esta investigación.

Para entender la diferencia entre considerar la onda sonora como invariable en el tiempo o no, podemos recordar los sonidos MIDI de los años 80 y 90, donde únicamente se tenía en cuenta para generar un sonido la envolvente de la onda y sus componentes armónicos.

En el ámbito de los sonidos de duración finita en el tiempo no es posible la aplicación de la Serie de Fourier (sino la de su transformada), ya que al ser su duración finita no existe un periodo en la onda. Para poder analizar la onda debemos observarla a través de “ventanas” de tiempo, y analizar cada fragmento o *frame*. El tamaño de estas ventanas viene determinado por el principio de indeterminación o la relación inversa que existe entre la duración de la onda observada y el ancho de banda que se observa (Basso, 2001). Es decir que, al contrario del espectro obtenido por la Serie de Fourier, la energía no se haya únicamente en las frecuencias múltiples enteras del sonido fundamental, sino en todas las frecuencias. En las frecuencias próximas a las múltiplos de la fundamental se forman unas ondas u olas de energía que se denominan ancho de banda, y que se ensanchan o encogen en función de la duración del sonido, como se observa en la Ilustración 4.



**Ilustración 4: Análisis espectral de un Do4 tocado por una guitarra.**

Para el cálculo del ancho de banda en cada armónico se determinan las frecuencias cercanas que presentan un 70% de la energía de dicho máximo. Como la representación energía-frecuencia tiene forma parabólica para cada armónico obtenemos dos frecuencias que cumplen esta condición, y el ancho de banda será la diferencia entre estas frecuencias y se mide en Herzios.

La medida más común de la distribución de la energía en función del espectro la introdujo Knopoff (1963) y se conoce como centroide espectral.

**El centroide espectral** es un concepto para la onda sonora análogo al del centro de gravedad para un sólido, es decir, es el punto medio de las frecuencias si las ponderamos con la energía que presenta cada una de ellas. El centroide espectral se determina por la siguiente fórmula:

$$SC(t) = \frac{\sum_{k=1}^K f_k(t) A_k(t)}{\sum_{k=1}^K A_k(t)} \quad (1)$$

donde  $f_k$  y  $A_k$  son la frecuencia y la amplitud lineal del  $k$ -ésimo componente de frecuencia respectivamente.

El promedio del centroide espectral a lo largo del tiempo de un sonido es considerado como la medida canónica de la distribución de la energía sonora a lo largo del espectro de frecuencias, y también se mide en Herzios. En ocasiones puede ser representado como una curva en función del tiempo, como en el método de detección ACT del onset o ataque, como vimos en el apartado anterior.

Ehresman y Wessel (1978) hallaron un coeficiente de correlación de Pearson del orden de 0,9 entre el promedio del centroide espectral y el brillo del sonido. McAdams (1999) encontró una alta correlación entre el centroide espectral y la segunda dimensión del espacio MDS de Krumhansl (1989).

No se debe confundir el centroide espectral con la mediana de las frecuencias, pues la distribución de una onda sonora en raras ocasiones presenta una distribución normal, Grey y Gordon (1978) determinaron que el promedio del centroide espectral encaja mejor con la segunda dimensión del espacio MDS que la mediana del mismo.

El centroide espectral nos indica cómo se distribuye la energía entre las altas y las bajas frecuencias, siendo mayor cuanto más energía presenten los armónicos superiores de la onda, pero no nos proporciona toda la información sobre cómo está distribuida esta energía. Es por ello que existen otros indicadores para hacernos una idea más exacta de esta distribución.

**La irregularidad espectral**, o suavidad espectral, representa la regularidad con la que se distribuye la energía sonora entre armónicos adyacentes. Cuando la distribución de la energía entre armónicos, como en el sonido de una trompeta, es uniforme este indicador muestra valores bajos, mientras instrumentos como el clarinete donde los armónicos pares presentan una energía significativamente menor a los pares presentan valores altos.

Krimphoff et al. (1994) definieron la irregularidad con la siguiente fórmula:

$$SS = \log_{10} \left( \sum_{k=2}^{n-1} \left| 20 \log_{10}(A_k) - \frac{20 \log_{10}(A_{k+1}) + 20 \log_{10}(A_k) + 20 \log_{10}(A_{k-1})}{3} \right| \right) \quad (2)$$

Donde  $A_k$  es la amplitud lineal del k-ésimo armónico y n es el número de armónicos considerado.

Como podemos deducir de la fórmula, si la distribución de la energía es regular o suave el valor de sustraendo se aproximará al del minuendo, obteniendo un valor pequeño para la irregularidad, de la misma forma si la distribución es irregular el sustraendo mostrará un valor alejado del minuendo, obteniendo valores más altos.

Por tanto, la irregularidad espectral es un indicador de la “rugosidad” de un sonido musical. McAdams (1999) encontró una correlación significativa entre la irregularidad y la tercera dimensión del espacio MDS creado por Krumhansl (1989).

**El ratio armónicos impares/pares** es otro indicador de la distribución de la energía sonora respecto de sus componentes de frecuencia. Observando la serie armónica de un sonido musical, donde sus parciales son múltiplos de la frecuencia fundamental, vemos cómo los armónicos impares aportan nueva información al sonido y añaden características al mismo, mientras los armónicos pares, que se sitúan una o varias octavas por encima de alguno de los armónicos impares refuerzan las sensaciones.

El armónico 1, o fundamental, define la altura, el 3 añade sensación de nasalidad, el 5 calidez, el 7, 11, 13, 15 aspereza, etc. mientras los armónicos obtenidos al multiplicar el orden de éstos por potencias de 2 (o sus múltiplos) refuerzan estas sensaciones.

Hadja (1999) hace referencia a la definición que Guyot (1992), en su trabajo de DEA, hace de este ratio como la división de la suma de la energía sonora en los armónicos pares entre la suma de la energía en los impares superiores a 1, lo que podemos expresar matemáticamente como:

$$R_{oe} = \frac{\sum_{k=1}^M A_{(2k)}}{\sum_{k=1}^M A_{(2k+1)}} \quad (3)$$

donde  $M = (n-1)/2$  y  $n$  es el número de armónicos .

Este ratio es un indicador de la “pureza/complejidad” del sonido. Además cuanto menor sea este ratio más simétrica será la representación de la amplitud de la onda en función del tiempo, ya que los armónicos pares añaden asimetría a la onda<sup>1</sup>.

#### 4.2.3. La variación de la amplitud en el espectro en función del tiempo.

Si imaginamos la evolución temporal de la onda como la suma de las diferentes evoluciones de sus componentes de frecuencia, observaríamos cómo estas últimas también son variables en el tiempo.

La importancia relativa de esta variación en la percepción de timbre se entiende fácilmente recordando los primeros sonidos sintéticos que imitaban instrumento reales. En ellos únicamente se tenían en cuenta las envolventes de ondas y los componentes espectrales de los instrumentos lo que provocaba un sonido muy alejado de aquél al que quería representar.

Desde la década de los noventa los campos de síntesis y reconocimiento de sonidos ha incidido en la investigación de esta variación temporal a fin de lograr sonidos más naturales e índices de reconocimiento de instrumentos mejores.

La variación de la amplitud en el espectro en función del tiempo ha recibido diferentes nombres en los diferentes estudios, y también ha sido calculada de distintas formas. De entre ellas destacaremos las dos siguientes:

**El flujo espectral**, que es una medida de la rapidez con la que varía la amplitud en el espectro. McAdams (1999) estudió este índice comparando la variación de la amplitud para las frecuencias observadas en segmentos adyacentes del sonido. Para ello utilizó la siguiente fórmula:

$$SF = \frac{1}{M} \sum_{p=1}^M |r_{p,p-1}| \quad (4)$$

---

<sup>1</sup> Este concepto de asimetría de la onda está íntimamente relacionado con la amplificación de las guitarras eléctricas, donde los amplificadores a válvulas son preferidos por la mayor parte de instrumentistas a los mas modernos amplificadores a transistores porque estos últimos atenúan los armónicos pares. Si bien es cierto que la preferencia de unos sobre otros está más relacionada con el comportamiento que presentan ante la saturación de la señal.

Donde  $M = T/\Delta t$ ;  $T$  es la duración total del sonido;  $\Delta t = 16$  ms; y  $r_{p,p-1}$  es el coeficiente de correlación de Pearson<sup>2</sup>.

El flujo espectral analiza el grado de similitud (correlación) entre los espectros de frecuencias de la señal en dos intervalos de tiempo consecutivo, y luego obtiene el promedio de esta variación. Es decir, si todas las frecuencias varían de un mismo modo en los sucesivos *frames* el valor del Flujo Espectral tomará el valor 1, disminuyendo cuanto más desigualmente se produzca la variación en cada frecuencia.

McAdams (1999) encontró una correlación moderadamente significativa entre este índice y la tercera dimensión del espacio MDS generada por él mismo y otros en 1995.

**La fluctuación espectral** o varianza espectral, representa la variación media de la energía entre los componentes de frecuencia, y viene determinada por la siguiente fórmula:

$$CV = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{\sigma}{\mu}}{n} \quad (5)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la amplitud en el k-ésimo componente de frecuencia,  $\mu$  es la amplitud media de este componente y  $n$  es el número de componentes que observamos.

En este índice medimos cuánto varía cada frecuencia en el tiempo, a través de la relación entre la desviación estándar y el promedio de la energía que presenta esa frecuencia, y posteriormente calculamos el promedio de estos índices en todas las frecuencias observadas.

Este coeficiente tiene una alta correlación con la percepción de trémolo<sup>3</sup> (Kendall y Carterette, 1993) y una correlación moderada con la segunda dimensión del espacio MDS generado por Kendall et al. (1999). Sirva para hacerse una idea del carácter de esta magnitud indicar que un violín presenta una alta fluctuación espectral mientras una trompeta no.

---

<sup>2</sup> Este índice es el más comúnmente utilizado en estadística para medir la correlación entre dos variables, y toma valores entre -1 y 1. Por tanto el flujo espectral calculado con esta fórmula obtendrá valores entre 0 y 1.

<sup>3</sup> El trémolo describe una rápida variación en el volumen de un sonido musical.

## II. MARCO EMPÍRICO



## **5. Objetivos.**

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes, en orden de relevancia:

**Primero:** Establecer si en el timbre de la guitarra eléctrica sólida influyen más los factores acústicos o los electrónicos, o si por el contrario ambos aspectos son igualmente influyentes.

**Segundo:** Determinar qué componentes de la guitarra eléctrica sólida son más determinantes en el timbre final del instrumento, lo que nos permitirá destinar el tiempo y los recursos adecuados a cada uno de ellos en futuras investigaciones.

**Tercero:** Determinar, mediante el estudio de las correlaciones entre las magnitudes físicas medidas y los resultados del test de percepción, si alguno de los constituyentes del timbre tienen mayor influencia en la percepción del timbre de la guitarra eléctrica sólida.

**Cuatro:** Adquirir experiencia en la investigación del timbre, tanto en la preparación de estímulos, como en las medidas físicas y de percepción.



## **6. Método.**

Para el presente experimento seguiremos el siguiente método:

Construiremos una guitarra eléctrica sólida con los componentes que nombraremos con el sufijo 0, posteriormente construiremos 8 variantes de esta guitarra sustituyendo en cada una de ellas un único componente a los que nombraremos con los sufijos 1 o 2; construiremos, además, 3 variantes de la guitarra original en los que alteraremos un único factor de alguno de los componentes 0 y que denotaremos como prima (‘) o doble prima (’); y 3 variantes más en las que cambiaremos alguno de los elementos que no son componentes de la guitarra eléctrica propiamente dichos, y que también denominaremos con el sufijo 1.

Obtendremos muestras de sonido de estas guitarras conectándolas directamente mediante una tarjeta de sonido Alesis io26 firewire a un ordenador iMac 6.1. Para la grabación de las muestras utilizaremos el software de grabación Logic Pro 9.

Las muestras obtenidas serán sometidas a un análisis físico, en el que cuantificaremos los constituyentes del timbre que identificamos en la sección 4 del presente trabajo; y a un test de percepción, en el que los sujetos cuantificarán en una escala de similitud las diferencias de timbre que perciben entre la guitarra original y cada variante.

Por último calcularemos los incrementos producidos entre los constituyentes del timbre de la guitarra de referencia y de las variantes, que junto a los datos obtenidos en el test de percepción serán sometidos a un análisis de correlaciones.

### **6.1. Componentes utilizados.**

#### **6.1.1. El modelo Telecaster.**

El modelo *Telecaster* se encuentra sin duda entre los 3 diseños más populares de guitarras eléctricas sólidas, aunque el modelo está registrado por la empresa Fender, son numerosas las marcas y luthieres que construyen bajo este diseño. Encontramos, por tanto, adecuado utilizar este diseño para nuestro experimento pues existen

gran variedad de componentes y repuestos disponibles en el mercado, lo que facilita nuestro objetivo. También, a priori, supusimos que al pertenecer todos los componentes al mismo diseño serían fácilmente intercambiables, minimizando los ajustes a realizar para el perfecto ensamblaje de nuestras guitarras. Esta suposición se comprobó falsa.

El diseño de la *Fender Telecaster* es originario de 1951, aunque se comercializó originariamente con el nombre de *Esquire* y poseía una única pastilla. En 1952, con la inclusión de la segunda pastilla, su nombre cambió al de *Broadcaster*, en honor a las emisoras de radio, pero un conflicto de patentes (la empresa *Gretsch* comercializaba una batería denominada *Broadkaster*) determinó que brevemente el modelo se comercializara sin nombre (las denominadas *Nocaster*) y que finalmente adoptara el archiconocido nombre de *Telecaster*, en honor a la emergente televisión (Bacon, 2005).

Originariamente estas guitarras se fabricaban con cuerpo de fresno y mástil de arce, posteriormente, por motivos económicos Fender pasó a fabricarla con cuerpo de aliso, más barato y de similares características. También podemos encontrar multitud de modelos con mástil de arce y diapasón de Palisandro.

Existe un variante del modelo semisólida, la *Telecaster Thinline* con una boca en forma de F (similar a la de los violines).

### 6.1.2. Los cuerpos.

Para este experimento hemos utilizado dos cuerpos de diferente madera y acabado. Por un lado tenemos el cuerpo 0, que es de fresno y cuyos bordes son redondeados, y por otro un cuerpo 1 que es de caoba y posee bordes en ángulo recto (ambos acabados son muy comunes en los diferentes modelos comercializados por Fender). La Ilustración 5 muestra ambos cuerpos .



Ilustración 5: A la izquierda el cuerpo de fresno, a la derecha el cuerpo de caoba.

El motivo de la elección de estas maderas para los cuerpos 0 y 1 se debe a que son los que utilizan las marcas más famosas de guitarras eléctricas sólidas, Fender y Gibson. Si bien Fender en la actualidad se decanta por el aliso en lugar del fresno por motivos económicos.

Utilizamos fresno en lugar de aliso debido a su disponibilidad, ya que la empresa Madinter Trade. SL<sup>1</sup>, con sede en Madrid, comercializa cuerpos de Telecaster de Fresno por 53,7 Euros, a los que hay que sumar 8,25 euros de gastos de envío, siendo éste el precio más asequible de cuantos encontramos.

El cuerpo de caoba lo adquirimos a través de Ebay a un luthier italiano. Nos costó 45,50 euros, a los que hubo que añadir otros 25 euros de gastos de envío. Este cuerpo nos planteó el primer problema de compatibilidad entre las piezas, ya que tenía el hueco para el mástil un milímetro más estrecho que el estándar y cuatro milímetros menos de profundidad, por tanto requirió de un rebajado de la madera para poder ajustar los mástiles.

Ambos cuerpos han sido pintados con 5 capas de pintura nitrocelulósica, de color turquesa pálido, y 5 capas de laca nitrocelulósica, tratando que la cantidad de pintura y laca en ambas sea lo más similar posible. De esta manera consideraremos el cuerpo 0' como el cuerpo de fresno antes de ser pintado, obteniendo la primera variante en el factor pintura.

También valoramos en este experimento qué variaciones introduce en el timbre un cambio de masa en el cuerpo de la guitarra, para ello cortamos 400 g de madera del cuerpo original (sexta parte del peso total), obteniendo el cuerpo 0''.

### **6.1.3. Los mástiles.**

Elegimos como mástil 0 uno construido en arce, con un diapasón también de arce (dos piezas encoladas), que es el más comúnmente utilizado para este modelo de guitarra. Lo adquirimos en Ebay por 45 euros más 14 de gastos de envío.

Para mástil 1 buscamos que fuera lo más diferente posible a mástil 0, y adquirimos un mástil construido en caoba con un diapasón de palo rosa. De este modo, si las diferentes maderas empleadas para construir tanto el mástil como el diapasón producen cambios en el timbre deberán aparecer en nuestra experiencia. Adquirimos

---

*1 Cabe destacar que pese a que en la mayor parte de foros de Internet en los que consultamos los miembros opinaban que cuerpos que suministra la empresa Madinter tienen un exceso de humedad, y que había de someterlos a un tratamiento de secado, encontramos el cuerpo en perfecto estado, con una calidad sonora más que aceptable.*

este mástil a la empresa de Reino Unido CH Guitars por 95,52 euros más 24,48 en gastos de envío, siendo con mucho el componente más caro de los utilizados. Este mástil también ha sido rebajado, pues era 1 milímetro más ancho que el hueco para el mástil de los cuerpos.

Ambos mástiles tienen una escala de 64,8 milímetros (esta escala es la distancia que presenta la guitarra entre la cejuela y el puente) y poseen 22 trastes, el último de los cuales sobresale del mástil. Ninguno de los mástiles ni de los diapasones han sido pintados. La ilustración 6 podemos ver ambos mástiles.

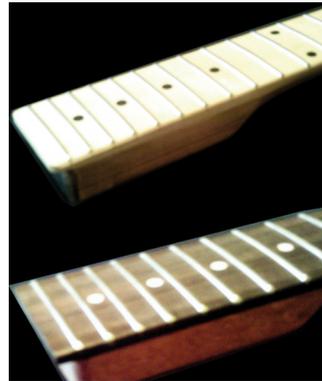


Ilustración 6: Arriba el mástil de arce, abajo el mástil de caoba.

#### 6.1.4. Las pastillas.

Como hemos descrito, las guitarras eléctricas pueden tener una, dos o tres pastillas, situadas en el cuerpo, entre el mástil y el puente. A fin de reducir la complejidad del experimento optamos por utilizar una única pastilla para cada variante de guitarra, la situada junto al mástil.

Describir las pastillas utilizadas en el instrumento es bastante complicado, puesto que ningún fabricante nos revela datos como el número de vueltas en la bobina, el grosor del cable, etc. cuando adquieres unas pastillas nuevas (normalmente sólo hacen referencia al material magnético y la impedancia de salida de las pastillas), la dificultad aumenta aún más cuando las adquieres de segunda mano, o reutilizas pastillas sustituidas de otras guitarras.

La pastilla 0 la adquirimos junto a su pareja en Ebay y ambas costaron 19,59 euros más 4,9 en gastos de envío. Por tanto y haciendo un cálculo fácil, la pastilla utilizada para este experimento costó aproximadamente 9,8 euros y 2,45 en gastos de envío. La pastilla 0 tiene núcleo de material cerámico y una única bobina (single coil).

La pastilla 1 también tiene una única bobina, pero el material del núcleo magnético es de Alnico V, esta pastilla es la que traía de serie una *Fender Telecaster made in Japan*, de 1986.

La pastilla 2 es de dos bobinas y su núcleo también es de material cerámico. Es un *humbucker Filtertron* que traía de serie una *Gretsch 6120* de 1990. La ilustración 7 muestra las tres pastillas.



**Ilustración 7:** De izquierda a derecha, la pastilla simple de material cerámico, la pastillas simple de Alnico V, y la pastilla doble de material cerámico

Se consideró la pastilla simple de material cerámico por tener el mismo diseño que la de Alnico, y el mismo material en el núcleo que el humbucker, de esta forma podremos sacar algunas conclusiones sobre el diseño y el material.

Además consideraremos el factor de la posición de la pastilla, así pues tendremos la pastilla 0' situando la pastilla 0 dos centímetros más separada del mástil que en la posición estándar.

#### **6.1.5. Los puentes.**

En lo referente a los puentes existe poca variedad en cuanto al material en que se fabrican para las guitarras Telecaster. Todos los que encontramos disponibles se fabrican en cromo. Sí existen, sin embargo, variaciones en el diseño, como pueden ser el número de selletas que presentan, el lugar por donde se fijan las cuerdas, o la cavidad que presentan para fijar la pastilla del puente.

Ante esta circunstancia, hemos elegido el lugar por donde se fijan las cuerdas como la variante a estudiar, y así adquirimos en Ebay el puente 0 usado por 6,11 euros más 6,11 en gastos de envío que permite la fijación de las cuerdas tanto por la parte posterior del puente, como atravesando el mismo, aunque únicamente utilizaremos la de la parte posterior con este puente. Resulta curioso que el hueco practicado para la pastilla del puente en el cuerpo 0 no encaja con el que presenta este puente, sin embargo encaja a la perfección en el del cuerpo 1.

Por otro lado adquirimos como puente 1 uno nuevo que únicamente permite el fijado a través del cuerpo de las cuerdas, y además presenta un hueco para la pastilla del tipo humbucker (mucho más ancho). Este puente, comprado a la empresa Secoguitars del Reino Unido nos costó 12,96 euros más 3,16 en gastos de envío, y era el más económico que encontramos de estas características.

El cuerpo 0 está preparado para utilizar un puente *through body* (a través del cuerpo), pues presenta 6 oquedades para pasar las cuerdas desde la parte posterior del mismo, mientras el cuerpo 1 no está preparado para estos puentes. En la ilustración 8 podemos ver ambos puentes.



Ilustración 8: A la izquierda el puente con anclaje posterior, a la derecha el puente con anclaje a través del cuerpo.

#### 6.1.6. Las clavijas.

Al igual que ocurre con los puentes, no existe diferencia en cuanto al material en el que se fabrican las clavijas. Todas las que encontramos disponibles eran de cromo. Las diferencias más destacables las encontramos en el ratio, es decir el número de vueltas que hay que darle a la clavija para que la pieza donde se fija la cuerda dé una vuelta completa, que varía entre el más bajo 13:1 y el más alto 20:1, cuanto más alto es el ratio más precisa es la afinación, aunque también es más incómoda la instalación de un juego nuevo de cuerdas; la forma en la que se fijan las cuerdas, que puede ser la tradicional, que es un simple agujero, o con bloqueo, en las que una pieza de metal deslizante fija la cuerda una vez pasada por el agujero; y por último, y en lo que más variedad se encuentra, el precio.

Para este experimento decidimos probar como clavijas 0 las más económicas que encontramos, unas Stellan MH-05, que presentan la fijación tradicional, un ratio 14:1, y que nos costaron 12,9 euros y envío gratuito; y como clavijas 1 unas de la marca Sperzel, una de las más reputadas y caras del mercado. Las clavijas 1 tienen autobloqueo y un ratio de 18:1, y las adquirimos de segunda mano, aunque en perfecto estado, por 42 euros más 5 en gastos de envío. Estas clavijas nuevas superan los 100 euros de precio. El motivo para seleccionar las primeras frente a las segundas como componente



Ilustración 9: De izquierda a derecha, la clavija Stellan (clavija0) y la clavija sperzel (clavija1).

de la guitarra de referencia es que al poseer un ratio menor se reduce el tiempo de cordaje de la guitarra, por lo que encontramos preferible utilizar éstas para el mayor número posible de variantes.

La ilustración 9 muestra una de las clavijas de cada conjunto.

### 6.1.7. Las cejuelas.

Las cejuelas para las guitarras, tanto clásicas como acústicas o eléctricas, se fabrican en cuatro materiales básicamente. En hueso, que son las tradicionalmente empleadas en las guitarras clásicas, plástico, fibra de carbono y bronce.

Para este experimento, probaremos la variación de timbre entre la cejuela de plástico que viene instalada en el mástil de arce que adquirimos (cejuela 0), y una de bronce comprada a la empresa Secoguitars que nos costó 6,12 euros más 1,97 en gastos de envío (cejuela 1). Podemos observar ambas en la ilustración 10.



Ilustración 10: Arriba la cejuela de plástico, abajo la de bronce.

La cejuela 1 era dos milímetros más ancha del hueco disponible en el mástil de arce, y aunque en circunstancias normales lo lógico es ampliar este hueco, para este experimento hemos tenido que limar la cejuela para poder intercambiarlas sin problemas.

### 6.1.8. El circuito electrónico.

Ante la gran variedad de elementos, potenciómetros, condensadores, conmutadores, conductores, etc. que podemos encontrar en cualquier circuito, hemos decidido hacer la prueba más simple de todas, instalar un circuito (circuito 1) o no en la guitarra (circuito  $\emptyset$ ). Dedicidimos que la guitarra de referencia no tuviera circuito para evitar buena parte de las soldaduras.

De este modo comprobaremos las diferencias que hay entre conectar directamente la pastilla al conector hembra de jack  $\frac{1}{4}$ " al que se conecta el cable, e instalar un circuito completo que hemos adquirido a la empresa MGL Guitarparts del Reino unido por 12,9 euros más 4 en gastos de envío.

Este circuito tiene dos potenciómetros de 500 KOhms, un conmutador de tres posiciones para seleccionar la pastilla (aunque en nuestro experimento no lo necesitamos al emplear una única pastilla) y un capacitor dieléctrico de 473  $\mu$ F,

como filtro de paso bajo. Este circuito, que podemos observar en la ilustración 11, venía completamente ensamblado, y únicamente requiere soldar los cables que provienen de las pastillas y los que se conectan al jack.



Ilustración 11: Detalle del circuito en el momento de su ensamblaje.

### 6.1.9. Las cuerdas.

El primero de los componentes que no pertenecen a la guitarra eléctrica propiamente dicha que investigaremos serán las cuerdas. Existe una amplia variedad de cuerdas para guitarras eléctricas en el mercado. Esta variedad incluye distintos materiales, como níquel, acero, oro, latón cromado, etc., y distintas aleaciones o combinaciones de estos materiales; distintos calibres para cada cuerda, e infinitas combinaciones de ellos en un juego; el estilo en que se entorchan (recubren) las cuerdas gruesas, que puede ser redondeado o plano, y si la tercera cuerda va entorchada o es lisa.

Para el presente experimento utilizaremos como cuerdas 0 unas Daddario EXL110, fabricadas en níquel, con calibres de .010, .013, .017, .026, .036 y .046, de entorchado redondo, que son las que normalmente utilizo; y como cuerdas 1 unas Dean Markley Blue Steel LT 9-42, cuerdas de acero, sometidas al proceso Cryo-Tech<sup>2</sup>, de calibres .009, .011, .016, .024, .032 y .042. En la ilustración 12 vemos los paquetes de embalajes de ambos sets de cuerdas.



Ilustración 12: Las cuerdas utilizadas.

### 6.1.10. El cable.

Del mismo modo que las cuerdas, el cable tampoco es un componente de la guitarra eléctrica, pero junto con el circuito electrónico y la (o las) bobina de las pastilla actúan como un condensador, y por tanto la elección de uno u otro modelo puede alterar la carga del mismo.

---

<sup>2</sup> Según la publicidad del paquete de cuerdas este proceso alinea y reorganiza la estructura molecular de las cuerdas, lo que proporciona brillo, graves poderosos y más duración.

El cable es simplemente un conductor rodeado (apantallado) por una malla de conductores que actúan como masa, y que lleva en ambos extremos un conector del tipo jack ¼" macho, que se conectan a la hembra de la guitarra y del amplificador, permitiendo la transmisión de la corriente generada en la pastilla.

De la enorme variedad de calidades, tamaños y precios que nos ofrece el mercado en cuanto a cables, seleccionaremos un cable (cable 0) de buena calidad, de 3 metros y otro (cable 1) de una calidad baja de 1,5 metros, tratando así de comprobar qué diferencia existe entre ambos.

### 6.1.11. Las púas.

La púa es sin duda el elemento más económico de los relacionados con las guitarras eléctricas. Si bien es cierto que algunos guitarristas utilizan sus dedos en lugar de una púa, realizaremos una prueba variando la habitual púa que utilizo, una Dunlop de tortex<sup>3</sup> de 1 milímetro (púa 0) por una púa Jim Dunlop de 0,46 milímetros de nylon (púa 1). Ambas se muestran en la ilustración 13.



Ilustración 13: Las púas utilizadas

## 6.2. Proceso de construcción

Para la elaboración de los estímulos que utilizaremos en el presente experimento hemos seguido el siguiente proceso de construcción, nombrando a cada guitarra con un número que no coincide con el orden en que se construyeron, sino con el orden en que se planificaron construir.

La guitarra **G-2** es la que construimos tal y como recibimos los componentes 0 de los respectivos proveedores. Aunque esta guitarra no será utilizada en el experimento por distar en dos cambios de la guitarra de referencia (no tenía hueco para instalar el humbucker y su cuerpo no estaba pintado), tomamos muestras de sonido de ella, por si las necesitáramos para posteriores investigaciones, y hemos de destacar la sorprendente calidad sonora<sup>4</sup> que presentaba para haber costado 127,60 euros.

---

<sup>3</sup> Tortex es un material plástico patentado por la empresa Dunlop.

<sup>4</sup> Tanto nos sorprendió lo bien que sonaba que invitamos a probarla a Batiste Bosch, guitarra profesional con más de 25 años de experiencia, tanto en estudio como en directo, quien, con incredulidad, corroboró nuestras sensaciones, y resalto el buen timbre y el equilibrio de todas las frecuencias que presentaba G-2.

Posteriormente desmontamos la guitarra y agrandamos el agujero que llevaba el puente para la pastilla del puente hasta que permitiera la instalación de pastilla<sup>2</sup>. Volvimos a montar la guitarra a la que denominamos **G-1**, y grabamos sus muestras de sonido.

El siguiente paso, tras desmontar la guitarra de nuevo, fue lijar ambos cuerpos y aplicarles 3 manos de tapaporos, posteriormente 5 capas de pintura nitrocelulósica, y por último 5 capas de laca nitrocelulósica. Entre cada capa dejamos un período de secado de entre 6 y 12 horas, y los cuerpos fueron lijados usando cada vez una lija de poro más fino. La pintura se aplicó con brocha, ya que no era un objetivo del experimento obtener un acabado perfecto de los cuerpos, sino que hubiera una considerable cantidad de pintura aplicada sobre ellos para estudiar su efecto en el timbre.

Tras el pintado dejamos secar cuerpo<sup>0</sup> 21 días y volvimos a montar la guitarra. Ésta, denominada **G0** (ver ilustración 14) es la que se ha utilizado como guitarra



**Ilustración 14: G0, la guitarra referencia compuesta por los componentes 0.**

de referencia, y por tanto el resto han sido comparadas a ella<sup>5</sup>. En una misma sesión grabamos las muestras sonoras de G0, cambiamos de púa y grabamos las de **G7**, y cambiamos el cable y grabamos las de **G6**.

La siguiente fase consistió en desplazar pastilla<sup>0</sup> a la posición pastilla<sup>0</sup>' (ver ilustración 15), para ello simplemente desatornillamos las sujeciones, desplazamos la pastilla al extremo inferior del hueco del humbucker y volvimos a atornillar la pastilla. Una vez montada **G1** obtuvimos sus muestras de sonido y, sin quitar las cuerdas, desoldamos pastilla<sup>0</sup> y la retiramos e instalamos y soldamos pastilla<sup>1</sup>, obteniendo **G2** y sus muestras de sonido, repetimos el proceso instalando pastilla<sup>2</sup> y construyendo así **G3** (ver ilustración 15) para grabar sus correspondientes muestras de sonido. Tras desinstalar pastilla<sup>2</sup> volvimos a instalar pastilla 0 y añadimos circuito<sup>1</sup>, para obtener **G5** y sus muestras.

El siguiente paso fue construir **G4**, y para ello bastó con desinstalar circuito<sup>1</sup>, aflojar las cuerdas y sustituir cejuela<sup>0</sup> por cejuela<sup>1</sup> para obtener las muestras de

---

<sup>5</sup> Salvo G12 y G13 como veremos más adelante.



**Ilustración 15:** A la izquierda un detalle de la posición de la pastilla<sup>0</sup> en G1, a la derecha la pastilla<sup>2</sup> sin la cubierta, en G3.

sonido. Para instalar o desinstalar una cejuela basta con empujar con fuerza desde un costado, ya que las cejuelas no suelen ir pegadas al mástil, sino encajadas en él.

Para construir **G8** tuvimos que retirar las cuerdas, desinstalar las clavijas<sup>0</sup> e instalar las clavijas<sup>1</sup> y encordar de nuevo la guitarra antes de grabar las muestras de sonido. Tras deshacer el proceso anterior aprovechamos la ocasión para instalar el juego de cuerdas<sup>1</sup> y grabar las muestras correspondientes a **G9**.

El montaje de **G10** requirió retirar las cuerdas<sup>1</sup>, desatornillar puente<sup>0</sup>, atornillar puente<sup>1</sup> e instalar un juego nuevo de cuerdas<sup>0</sup>, ya que las anteriores estaban deterioradas tras el cambio de clavijas. Después de la correspondiente grabación, desencordamos la guitarra restituímos puente<sup>0</sup>, de nuevo, y sustituimos mástil<sup>0</sup> por mástil<sup>1</sup>, con las clavijas<sup>0</sup> y la cejuela<sup>0</sup> instaladas sobre él y volvimos a encordar, obteniendo así **G11**. Para utilizar este mástil tuvimos que ajustar el alma, que es una pieza de metal insertada dentro del mástil que permite enderezarlo para evitar trasteos en la guitarra.

Para construir **G12** tuvimos de nuevo que desmontar toda la guitarra y montarla sobre cuerpo<sup>1</sup>. Durante este proceso uno de los extremos de la bobina de pastilla<sup>0</sup> se desoldó del cable de salida. Al intentar repararlo, el finísimo cable de la bobina se partió haciendo imposible seguir utilizando esta pastilla. Este fue uno de los momentos más críticos de todo el experimento, pues ya no disponíamos de uno de los componentes que debíamos utilizar en las dos guitarras restantes, que además correspondían a dos de las variantes de estudio más importantes en nuestro experimento, la relación de la variación del timbre con el tipo de madera del cuerpo, y con la cantidad de masa del mismo.

Para poder seguir adelante con el experimento decidimos utilizar pastilla<sup>1</sup> en lugar de pastilla<sup>0</sup>, y utilizar como guitarra de referencia frente a G12 y G13 a G2, ya que

cumplía las premisas básicas de este experimento, sólo difiere de G12 en el cuerpo utilizado, y de G13 en la cantidad de madera del cuerpo. Así pues, tanto en el test de percepción como en las mediciones físicas la guitarra de referencia para G12 y G13 será G2, conservando la esencia del experimento, es decir comparar el timbre de dos guitarras en las que sólo varía un único elemento para poder atribuir el cambio a éste.

Una vez finalizada la grabación de G12, y tras desmontarla procedimos a quitarle masa a cuerpo0 para convertirlo en cuerpo0”. Para ello inicialmente practicamos tres orificios en el cuerpo con un taladro de corona. Pero tras el montaje y ante el escaso cambio de timbre que percibimos, decidimos cortar con una sierra tanto el



Ilustración 16: A la izquierda la primera versión de G13, a la derecha la versión definitiva.

cuerno del *cutaway* como la parte inferior del cuerpo, obteniendo así la irregular **G13**, cuyo cuerpo pesa 400 gramos menos que el original. Ver ilustración 16.

Antes de cada grabación la guitarra fue ajustada tanto en la altura como en la longitud de las cuerdas, mediante las selletas del puente, para asegurar una perfecta afinación y evitar trasteos no deseados. La altura de las pastillas en toda las guitarras se ajustó a 3 milímetros tanto de la cuerda 1 como de la 6, evitando alteraciones derivadas de la distancia entre las pastillas y las cuerdas.

### 6.2.1. Cuadro resumen de las guitarras construidas.

	Cuerpo	Mástil	Pastilla	Clavijas	Cejuela	Puente	Circuito	Cuerdas	Cable	Púa
G-1	0'	0	0	0	0	0	∅	0	0	0
G0 <sup>1</sup>	0	0	0	0	0	0	∅	0	0	0
G1	0	0	0'	0	0	0	∅	0	0	0
G2 <sup>2</sup>	0	0	1	0	0	0	∅	0	0	0
G3	0	0	2	0	0	0	∅	0	0	0
G4	0	0	0	0	1	0	∅	0	0	0
G5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
G6	0	0	0	0	0	0	∅	0	1	0
G7	0	0	0	0	0	0	∅	0	0	1
G8	0	0	0	1	0	0	∅	0	0	0
G9	0	0	0	0	0	0	∅	1	0	0

	Cuerpo	Mástil	Pastilla	Clavijas	Cejuela	Puente	Circuito	Cuerdas	Cable	Púa
G10	0	0	0	0	0	1	∅	0	0	0
G11	0	1	0	0	0	0	∅	0	0	0
G12	1	0	1	0	0	0	∅	0	0	0
G13	0 <sup>2</sup>	0	1	0	0	0	∅	0	0	0

1 Guitarra de referencia frente a G-1, G1, G2, G3; G4, G5, G7, G8, G9, G10 y G11

2 Guitarra de referencia frente a G12 y G13

**Tabla 1: Resumen de los componentes utilizados para la construcción de las guitarras utilizadas en este trabajo**

### 6.3. Estímulos.

Las muestras de sonido grabadas para cada guitarra son:

1. Escala de do mayor (posición VII) en dos octavas, ascendente y descendente, con acorde final.



2. Arpeggios sobre la progresión de acordes Do mayor, La menor, Re menor y Sol 7, en posición abierta.



3. Variación de un riff<sup>6</sup> de boogie -boogie sobre Mi mayor y La Mayor, utilizando cuerdas al aire.



4. Variación de un final típico de Blues, en Mi mayor, con acorde final con alguna de las cuerdas al aire.

<sup>6</sup> El término riff se emplea en el argot de los guitarristas eléctricos para denominar fraseos típicos.



5. Riff en La mayor (tocado únicamente por quintas) con doble aproximación cromática.



6. Nota Do de la octava cuatro, dejándolo sonar hasta la extinción del sonido, tocada en las siguientes posiciones:
- En el quinto traste de la tercera cuerda, pulsando la cuerda con una cejilla para evitar diferencias en la pulsación del dedo, para las guitarras G0, G-1, G1, G2, G3, G5, G6, G7, G9, G10, G11, G12 y G13.
  - En la segunda cuerda al aire, subiendo la afinación estándar de esta cuerda de Si a Do<sup>7</sup>, para G0, G4 y G8.

La sexta muestra de sonido será la utilizada como estímulos para el test físico, para ello y como es práctica habitual en investigaciones anteriores sobre el timbre (Grey, 1975; Wessel, 1979) editamos los estímulos para evitar cambios en la afinación, volumen y duración, al ser éstos atributos ajenos al timbre.

Por tanto fijamos la duración en 4 segundos, incluyendo un *fade out* o desvanecimiento de 0,5 s. al final de cada estímulo, y la amplitud fue normalizada con un pico máximo de -3 dBs, mediante el programa Audacity, que tiene licencia pública general GNU (GPL). La afinación no fue corregida, ya que no encontramos ninguna diferencia significativa.

Como se muestra en la tabla 2, en la que se ha resaltado en gris las muestras grabadas con la cuerda al aire, todas las diferencias fueron menores a medio Hz respecto de la frecuencia de la nota Do4 (261,626 Hz) .

Se utilizó la nota Do4 por ser una de las centrales de la tesitura de la guitarra eléctrica, nuestros mástiles permiten tocar desde 21 semitonos por debajo de esta

---

<sup>7</sup> Al ser los cambios en G4 y G8 relativos a los nodos de la cuerda al aire (cejuela y clavijas) decidimos grabar una muestra en la que no se pulsara el mástil para evitar interferencias. Para la guitarra G0 se grabaron tanto esta muestra como la anterior, para tener referencias de los cambios en ambos casos.

El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

	G0	G0(2)	G-1	G1	G2	G3	G4	G5
<b>Afinación (hz)</b>	261,738	261,627	261,525	261,671	261,88	261,928	261,699	261,687
<b>Δ respecto a Do4</b>	0,112	0,001	-0,101	0,045	0,254	0,302	0,073	0,061
	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	
<b>Afinación (hz)</b>	261,927	261,832	262,04	262,011	261,797	261,724	261,745	
<b>Δ respecto a Do4</b>	0,301	0,206	0,414	0,385	0,171	0,098	0,119	

**Tabla 2: Frecuencias de las muestras y su variación respecto de Do4**

hasta 25 semitonos por encima. Además también es la misma nota utilizada por Kaieda et al (2009) en el experimento más similar al nuestro de los publicados, lo que nos permite tener cierta referencia en los datos.

También podemos apreciar en la tabla 2 que no hay datos sobre G6, esto se debe a que la muestra de sonido obtenida para esta guitarra no era adecuada para el análisis, ya que tenía dos ataques de púa en lugar de uno, como el resto de los estímulos. Al no ser el factor estudiado en G6, las diferencias de timbre debidas al cable usado, parte fundamental de nuestro estudio decidimos eliminar esta guitarra del experimento.

De las cuatro primeras muestras de sonido se extrajeron los seis mismos pasajes para cada guitarra, de entre 1,5 y 3,5 segundos de duración. Normalizamos también estos estímulos mediante el programa Audacity con un pico máximo de -3 dBs. Debido a la naturaleza de estos estímulos no era posible obtener una misma duración exacta para cada tipo de estímulo, sino aproximada.

La muestra de sonido 5 fue descartada ya que se encontraron diferencias sustanciales de ejecución entre las grabaciones de las distintas guitarras.

## 6.4. Tareas.

### 6.4.1. Test físico

El test físico, o medición física, se llevó a cabo en dos etapas similares. En ambos casos realizamos un análisis del espectro de frecuencias de los estímulos, mediante el software Audacity, que además nos permite la exportación de los datos en un fichero de texto, facilitando la realización de los cálculos requeridos.

En la primera etapa se realizó el análisis sobre el total de cuatro segundos de cada muestra, utilizando una ventana tipo *Hamming* y un muestreo de 4.096 frecuencias.

El resultado ha sido exportado a Excel, donde se han localizado los máximos de amplitud más cercanos a las frecuencias correspondientes a los armónicos esperados de la nota, y mediante una función de interpolación y utilizando este punto, así como los dos inmediatos anteriores y posteriores, hemos calculado los máximos reales de amplitud así como las frecuencias exactas a las que se producen. Además, con esta función de interpolación calculamos para cada armónico las dos frecuencias en las que la amplitud tenía un valor del 70% de la amplitud del máximo, lo que nos permite calcular el ancho de banda de cada armónico, que será la resta de ambas frecuencias (Basso, 2001).

Con estos datos se ha obtenido la representación en el dominio de frecuencia de las muestras, la energía medida en los quince primeros armónicos, la irregularidad espectral, y el ratio armónicos impares/pares de cada muestra.

En segundo lugar y utilizando las bases descritas por Hadja (1999) en su experimento sobre la importancia de las variaciones en el tiempo de la señales en la percepción del timbre, hemos realizado un análisis del espectro de frecuencias en 60 frames contiguos, de 16,6 ms de duración cada uno, correspondientes al segmento de 500 ms entre  $t= 300$  ms y  $t= 800$  ms de cada una de las muestras.

Hadja utilizó en su experiencia un segmento de 500 ms correspondiente al estado estacionario de la onda pero, como hemos mencionado con anterioridad, los instrumentos de cuerda pulsada carecen de estado estacionario, pudiendo únicamente distinguir dos fases en su envolvente (Caetano, Burred y Rodet, 2010). Por tanto nuestros segmentos se tomaron de la zona donde el ataque y la pendiente más pronunciada del *decay* ya se han producido, y la onda aún conserva una energía elevada.

Sobre estos 60 segmentos se ha realizado un análisis espectral utilizando una ventana de *Hamming* y un muestreo de 512 frecuencias, ya que debido al principio de incertidumbre, que determina que el ancho de banda es inversamente proporcional a la duración de la señal (Basso, 2001), no se obtenían datos útiles al utilizar un muestreo de banda mayor.

Los datos obtenidos han sido utilizados para el cálculo del centroide espectral, el flujo espectral y la fluctuación espectral de las muestras.

#### 6.4.2. El test de percepción

El test de percepción se ha desarrollado en tres etapas sucesivas.

En la primera se elaboró un test que contenía 42 pares estímulos que los sujetos tenían que valorar en una escala de similitud-diferencia otorgándoles valores entre 1 y 3 (siendo 1 igual y 3 diferente). Una de las cuestiones principales fue la de la asignación de la escala. Las experiencias de este tipo suelen presentar escalas de 1-9 (Wessel, 1979); 1-30 (Grey, 1976) e incluso 1-100 (Hadja, 1999), si bien es cierto como apuntan Traube et al (2003) que no se pueden utilizar unos mismos ejes cuando se diferencian distintos instrumentos orquestales (como es el caso de aquellos estudios) que cuando diferenciamos diferentes matices del timbre de un único instrumento, en el primer caso se trata de una visión macroscópica del timbre, mientras en el segundo es una visión microscópica. Nuestro caso sería el segundo, y hemos de contar que alguna de las variaciones estudiadas son muy sutiles. Esta es la razón que nos llevó a utilizar una escala tan corta.

Antes de comenzar el test a los sujetos se les mostraban 5 pares de estímulos, de entre los que después escucharían, que contenían, a nuestro juicio, una muestra de las diferencias que iban a valorar.

Los pares de estímulos consistían en uno de los pasajes grabados con la guitarra de referencia (G0 o G2, según el caso) y tras un segundo de silencio el mismo pasaje grabado con otra de las guitarras. Cada una de las guitarras a evaluar aparecía en tres pares diferentes, y también se incluyó tres pares consistentes en uno de los pasajes grabados con G0 y tras el segundo de silencio el mismo pasaje exactamente, para utilizarlo a modo de control. De esta forma los 45 estímulos pertenecían a tres comparaciones de cada una de las 13 variantes de guitarra<sup>8</sup> y tres más de control.

Los tres pasajes a utilizar para cada una de las variantes se seleccionaron de entre los cinco disponibles por similitud de ejecución con el mismo pasaje de la guitarra usada como referencia. En algunos casos, debido a estas diferencias de ejecución no disponíamos de estímulos lo suficientemente similares, en cuyo caso se utilizó el estímulo que ha sido utilizado para el test físico (cuatro segundos de la nota Do4, con un *fade-out* en el último medio segundo), ya que estas muestras sí eran iguales en duración, afinación y volumen.

---

<sup>8</sup> Originalmente eran 14 variantes, pero se eliminó G6 por el error en la grabación del estímulo del test físico como ya mencionamos.

Este test fue pasado a 8 sujetos, todos ellos músicos profesionales o semiprofesionales, con alrededor de 20 años de experiencia, dos guitarristas eléctricos, dos baterías, un bajista, un pianista, un violonchelista y un saxofonista.

Tras contestar el test se les entrevistó para obtener su opinión acerca del mismo, y la mayoría concluyeron que el test era algo largo (entre 20 y 25 minutos, dependiendo de la rapidez de respuesta del sujeto), y también identificaron problemas con alguno de los pares de estímulos para determinar si las diferencias que percibían se debían a la ejecución o al timbre, de hecho al preguntarles sobre los pares incluidos en las que se oía un única nota (las del test físico) todos, a excepción de los dos guitarristas, consideraban más sencilla la valoración de timbre en ellos que en las que se oían pasajes.

El análisis de los resultados mostraba una gran disparidad en la evaluación de los tres pares de algunas de las guitarras, y escuchando atentamente el par cuya valoración difería de los otros se descubría fácilmente diferencias de ejecución (un golpe de púa más fuerte en alguna nota, diferencias en la técnica, diferencias en el tempo, notas fantasma, etc.). También resultó evidente que el orden de aparición también era un factor determinante, ya que tras dos pares muy iguales cualquier diferencia en el siguiente se magnificaba.

Tras sacar conclusiones de esta primera prueba, realizamos una segunda experiencia. En esta ocasión se utilizaron únicamente los estímulos que habían sido generados para el test físico, de nuevo emparejados del siguiente modo: estímulo de la guitarra referencia, un segundo de silencio, estímulo de la variante, además de incluir el par de control en el que el par de la guitarra de referencia está duplicado.

Generamos tres órdenes aleatorios de presentación de estos 14 pares, y en cada uno de ellos repetimos los seis primeros al final, obteniendo un total de 20 pares. De este modo se explicaba a los sujetos que durante los seis primeros estímulos debían fijar su escala de referencia, y que en caso de considerarlo oportuno, podían variar su estrategia de respuestas después del sexto par, análogamente a lo realizado por Caclin et al (2005).

Utilizamos para este segundo test 12 sujetos, 6 músicos profesionales y 6 personas que no tocan ningún instrumento. Así, cada orden aleatorio fue valorado por 2 sujetos de cada grupo. Ya que queríamos eliminar la variable del orden de nuestro experimento siguiendo el consejo del Dr. Héctor Monterde, profesor de Psicometría de la Universitat de València, que nos ha asesorado en el diseño del experimento.

De los resultados obtenidos deducimos que el mejor orden de los tres posibles era el tercero, pues presentaba el mismo número de errores en la respuesta control que el primero, y sus promedios tenían un mejor coeficiente de correlación de Pearson con los promedios globales que aquél, 0,97 frente a 0,95.

Además los sujetos fueron nuevamente entrevistados tras finalizar el test, en esta ocasión sobre la escala empleada, y un considerable número de ellos, principalmente del grupo de los músicos, comentaron que para alguno de los pares cuya respuesta había sido 3 hubieran necesitado un número mayor, y que para alguno de los que respondieron 2 hubieran necesitado el 1,5 o el 2,5.

Por tanto, en el test definitivo se amplió la escala a cinco posibles respuestas, y se sustituyó la escala numérica, también por consejo del Dr. Monterde, por la siguiente escala verbal: Igual – Algo diferente – Moderadamente diferente – Bastante diferente – Muy diferente. En el Anexo I se incluye un modelo de la plantilla de respuestas.

El test definitivo constaba de 20 pares de estímulos, en el orden determinado como mejor, y a los sujetos se les explicaba que iban a escuchar pares de sonidos que tenían que evaluar según la diferencia que percibieran entre ellos, que cada estímulo del par era igual en afinación, duración y volumen. También se les explicaba, como en el test anterior, que durante los seis primeros pares debían fijar su estrategia de respuestas.

Todos los sujetos realizaron la experiencia en el mismo ordenador, un Macbook Pro y mediante unos auriculares Sennheiser HD518, que tienen una respuesta en frecuencia de 14 a 26.000 Hz, un nivel de presión sonora de 108 dB, una impedancia de 50 $\Omega$ , y un distorsión armónica total <0,2%, tanto en este test como en los dos previos.

### **6.5. Sujetos.**

Para el presente experimento se ha encuestado a 42 sujetos, encuadrados en dos grupos de 21 sujetos cada uno. En el primero los sujetos son músicos profesionales o semiprofesionales y en el otro personas que no tienen relación directa con la música. El grupo de músicos se ha dividido a su vez en dos subgrupos, uno compuesto por 10 guitarristas eléctricos y el otro por 11 músicos cuyo instrumento principal no es la guitarra eléctrica. La edad de los sujetos varía entre los 15 y los 53 años. 28 eran hombres y 14 mujeres, hemos de mencionar que sólo tres sujetos del grupo de músicos eran mujeres y ninguna pertenece al subgrupo de guitarristas eléctricos.

El timbre en la guitarra eléctrica sólida:

Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

---

Si existen diferencias de percepción entre estos grupos podríamos deducir qué necesidades de sonoridad tendrían distintas gamas del instrumento (gama baja-Todos los sujetos; gama media-Músicos; y gama alta-Guitarristas). Esto nos podría ser de utilidad para el propósito global de mejora y abaratamiento del instrumento.

## 7. Resultados y análisis.

### 7.1. Test físico.

Además de los constituyentes del timbre descritos en la sección 4.2. de este trabajo, se han incorporado a los resultados el promedio del ancho de banda en los 15 primeros armónicos de los estímulos, y el valor porcentual referido al armónico 1 de estos armónicos. Las mediciones obtenidas se muestran en la tabla 3:

	G0	G0(2) <sup>1</sup>	G-1	G1	G2	G3	G4	G5	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13
A <sub>2</sub>	99,0	101,5	98,7	98,2	101,4	98,7	102,2	104,8	96,3	101,0	97,8	99,4	100,5	96,5	95,8
A <sub>3</sub>	78,6	99,9	81,1	90,0	79,7	82,6	99,9	80,4	74,3	99,3	77,9	75,9	83,5	75,3	76,8
A <sub>4</sub>	89,8	79,9	90,8	85,4	90,3	91,1	79,7	95,3	78,2	79,5	90,9	86,3	94,4	84,8	85,1
A <sub>5</sub>	77,3	92,6	71,4	69,2	67,9	80,8	83,6	74,7	81,4	86,6	69,4	83,3	87,9	65,9	66,7
A <sub>6</sub>	74,5	87,4	72,2	84,1	72,7	78,9	84,2	73,3	70,3	79,7	72,8	66,0	72,6	67,0	70,1
A <sub>7</sub>	90,7	81,1	86,2	68,9	85,3	88,1	83,7	89,5	82,0	82,6	86,5	80,5	72,2	84,5	84,6
A <sub>8</sub>	90,1	74,7	88,1	87,3	89,3	88,6	70,5	92,2	79,5	70,0	87,9	83,9	83,0	83,5	85,2
A <sub>9</sub>	66,5	87,8	70,8	83,2	71,3	68,3	83,7	71,4	59,9	84,1	69,8	62,1	75,3	63,8	70,5
A <sub>10</sub>	74,2	91,9	64,1	62,5	63,7	73,7	83,9	69,6	79,4	85,4	62,4	73,9	79,0	64,2	65,8
A <sub>11</sub>	85,4	87,6	77,6	74,6	80,7	83,6	73,3	80,5	82,8	80,1	81,2	76,0	81,6	77,3	75,7
A <sub>12</sub>	72,4	70,2	69,9	82,8	71,5	75,6	63,8	71,3	64,3	62,7	71,0	57,2	70,3	59,5	61,6
A <sub>13</sub>	79,0	68,2	76,9	78,6	80,0	76,4	74,6	80,0	50,3	69,6	79,3	70,3	69,2	74,1	76,4
A <sub>14</sub>	68,8	77,4	74,2	60,0	77,3	69,1	80,0	77,2	74,1	76,2	74,1	72,4	81,1	67,3	75,4
A <sub>15</sub>	52,8	82,5	53,5	49,8	55,0	67,6	77,7	55,8	66,0	79,6	49,2	51,5	74,9	49,3	56,8
AB	44,38	44,31	49,84	46,36	46,23	48,38	43,08	44,33	43,76	42,92	48,69	45,19	44,63	44,56	39,58
SC	2.161,80	2.174,80	2.131,20	2.129,00	2.157,00	2.174,10	2.088,40	2.128,90	2.153,60	2.114,70	2.150,70	2.047,20	2.128,00	2.061,10	2.121,60
I	0,948	0,735	0,937	0,941	0,989	0,800	0,733	0,994	1,031	0,807	1,007	1,056	0,817	1,048	0,974
R <sub>pi</sub>	1,072	0,972	1,078	1,090	1,089	1,051	0,979	1,096	1,091	0,953	1,085	1,079	1,067	1,066	1,062
SF	0,936	0,935	0,944	0,947	0,945	0,941	0,928	0,933	0,941	0,933	0,941	0,939	0,948	0,939	0,949
CV	0,252	0,208	0,276	0,258	0,255	0,305	0,255	0,273	0,306	0,296	0,298	0,252	0,265	0,345	0,214

<sup>1</sup> G0(2) es el estímulo correspondiente a un Do4 tocado en la segunda cuerda sin pulsar.

**Tabla 3: Datos medidos en las 14 guitarras eléctricas.**

En la tabla anterior A<sub>x</sub> es el valor porcentual de la amplitud en el armónico x respecto del armónico 1. AB es el promedio del Ancho de Banda en los 15 primeros armónicos, medido en Hz. SC es el valor medio del Centroide Espectral, medido en Hz. I es la Irregularidad Espectral medida en los 15 primeros armónicos. R<sub>pi</sub> es el

Ratio de la energía en los armónicos pares e impares, medida en Db. SF es el Flujo Espectral. CV es la Fluctuación Espectral.

Los códigos de colores de la tabla 3 corresponden al incremento porcentual respecto a su estímulo de referencia<sup>1</sup> según la siguiente leyenda:

Entre -5% y -10%	Entre -10% y -15%	Entre -15% y -20%	Entre -20% y -25%	Menos de -25%
Entre 5% y 10%	Entre 10% y 15%	Entre 15% y 20%	Entre 20% y 25%	Más de 25%

La Tabla 3 no contiene valores del tiempo de ataque de los estímulos, pese a que éste tiene una alta correlación con la primera dimensión del timbre de los espacios MDS definidos en investigaciones anteriores, como demostraron Krumhansl (1989), Iverson y Krumhansl (1993), McAdams (1999) o Kendall et al (1999) entre otros, ya que no parece un factor determinante en nuestra experiencia al no haber encontrado variación alguna en los tiempos de ataque entre todos los estímulos analizados. El tiempo de ataque medido en todos ellos es de 9 ms.

Sí se han incluido los valores del Ratio impares/pares y del Flujo Espectral al encontrar variaciones en las medidas, aunque ninguna de ellas es una variación significativa ( $\geq 5\%$ ). Estos constituyentes tampoco parecen ser determinantes en el timbre de la guitarra eléctrica. Ninguna de las variantes consiguió modificar significativamente los datos medidos de estas magnitudes.

Los cambios en el Centroide Espectral se perciben claramente a partir de una variación del 2,5%, como ha ocurrido, en G4, G8, G10 y G12. Destacamos, además, el hecho de que únicamente G3 tiene un Centroide Espectral mayor que el de su guitarra de referencia, mientras el resto de variaciones presentaban uno menor.

La Fluctuación espectral es la magnitud en la que más cambios medimos, la mitad de las variantes, G3, G4, G7, G8, G9, G12 y G13, varían en más de un 15% respecto a su guitarra de referencia, y únicamente en G13 medimos un valor menor.

La Irregularidad Espectral es el segundo constituyente del timbre que más ha variado. En siete de las variantes encontramos cambios significativos. Cabe destacar que el cambio de cejuela no ha representado prácticamente ninguna variación en este constituyente, siendo el menor cambio registrado de todos los medidos.

El Anexo II incluye los análisis espectrales de los estímulos empleados, según las curvas calculadas con la función de interpolación.

---

<sup>1</sup> El estímulo de referencia para G-1, G1, G2, G3, G5, G7, G9, G10 y G11 es G0; para G4 y G8 es G0(2); y para G12 y G13 es G2

El Anexo III incluye las gráficas comparativas, para cada par, de la distribución de la energía sonora en los armónicos, que permite un análisis visual de los cambios.

## 7.2. Test de percepción

En el siguiente subapartado la nomenclatura G0, G1, etc. hace referencia a los pares de estímulos (G0-G0, G0-G1, etc.) y no a las guitarras del experimento.

En primer lugar recordemos que los seis primeros pares de estímulos que se presentaban en el test a los sujetos eran simplemente para que fijaran la estrategia de respuestas, tal y como se les informaba y siguiendo la metodología empleada por Caclin et al (2005), y por tanto no han sido tenidos en cuenta en el análisis.

### 7.2.1. Fiabilidad de la prueba.

Eliminamos también todas las encuestas correspondientes a aquellos sujetos que habían considerado la distancia subjetiva del par G0, donde se mostraba el mismo estímulo dos veces, como Moderadamente Diferente o mayor, eliminando de este modo 11 sujetos, 8 pertenecientes al grupo de los No músicos y 2 al de los Músicos (de ellos 1 pertenecía al subgrupo de Guitarristas y otro al de No guitarristas).

Una vez eliminados estos sujetos hemos medido la consistencia de nuestros grupos de sujetos comparando sus respuestas en el formulario. Recordemos que partimos de la base de que los distintos grupos y subgrupos de sujetos percibirán de forma distinta la distancia subjetiva entre los diferentes estímulos.

Para comprobar esta consistencia hemos utilizado el Alpha de Cronbach, basado en la correlación media entre cada sujeto y el resto, obteniendo los siguientes valores

<b>Grupos</b>	<b><math>\alpha</math></b>
<b>Todos</b>	0,97
<b>Músicos</b>	0,97
<b>No músicos</b>	0,86
<b>Guitarristas</b>	0,94
<b>No Guitarristas</b>	0,97

Tabla 4: Análisis de fiabilidad de los grupos (Alpha de Cronbach).

Como podemos observar en la Tabla 4, los altos valores obtenidos nos muestran una alta consistencia en los grupos definidos, no siendo necesaria la eliminación de ningún sujeto, además de los ya eliminados.

### 7.2.2. Análisis de frecuencias.

Una vez determinado la muestra de sujetos y la consistencia de los grupos, realizamos un análisis de frecuencia de respuestas para cada par de estímulos, que se muestra en la Tabla 5. Para los cálculos de media aritmética, desviación estándar y mediana hemos sustituido las etiquetas verbales por un valor numérico, que indica de menor a mayor el grado de diferencia subjetiva percibida.

	Igual	Algo diferente	Moderadamente diferente	Bastante diferente	Muy diferente	MEDIA	DESV. EST.	MEDIANA
G0	23	8	0	0	0	1,26	0,45	1
G-1	6	15	8	2	0	2,19	0,83	2
G1	1	7	8	11	4	3,32	1,08	3
G2	11	14	4	2	0	1,9	0,87	2
G3	2	1	3	6	19	4,26	1,18	5
G4	4	8	11	4	4	2,87	1,2	3
G5	3	5	8	10	5	3,29	1,22	3
G7	0	3	7	16	5	3,74	0,86	4
G8	9	11	3	7	1	2,35	1,23	2
G9	15	12	2	2	0	1,71	0,86	2
G10	2	3	6	11	9	3,71	1,19	4
G11	0	3	5	10	13	4,06	1	4
G12	0	14	8	5	4	2,97	1,08	3
G13	9	13	3	5	1	2,23	1,15	2

Tabla 5: Análisis de frecuencias de las respuestas consideradas fiables.

Como podemos observar, únicamente 7 de los pares no contienen respuestas en toda la escala; G0, G-1, G2 y G9 que no recibieron ninguna respuesta de Muy diferente; y G7, G11 y G12 que no recibieron ninguna de Igual. El Gráfico 1 muestra los porcentajes de respuesta de los sujetos.

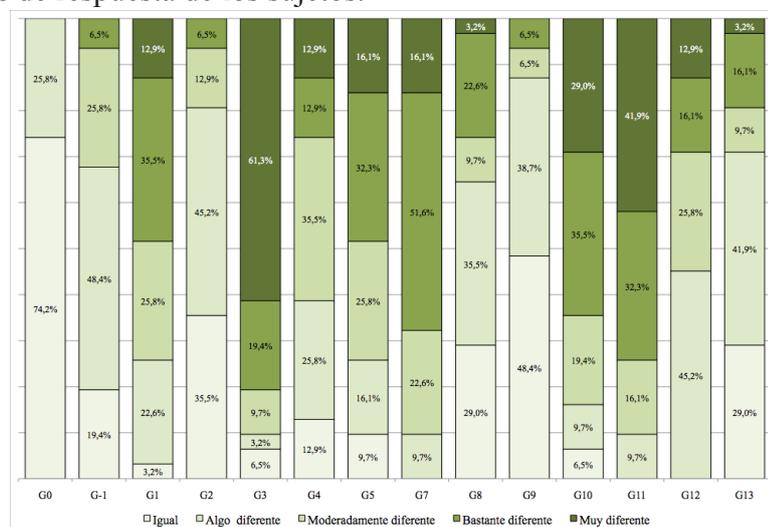


Gráfico 1: Frecuencia de respuestas de los sujetos.

### 7.2.3. Diferencias entre grupos de sujetos

Posteriormente realizamos una prueba de Mann-Whitney, que es adecuada para nuestra experiencia al tener una variable de respuesta ordinal dentro de una escala similitud-diferencia, aunque los cuestionarios de respuesta presentaran etiquetas nominales. El objetivo de esta prueba es determinar si existen diferencias entre las respuestas de los distintos grupos (y subgrupos) y si éstas se deben al azar o a que los sujetos de estos grupos pertenecen a dos muestras poblacionales diferentes. Las Tablas 6 y 7 muestran los resultados obtenidos en estas pruebas al realizarlas entre grupos y entre subgrupos, respectivamente.

Variable	Grupo	N	Promedio	Rango Medio	U	P
G0	Músicos	19	1,21	15,26	100,0	--
	No Músicos	12	1,33	17,17		
G-1	Músicos	19	2,11	15,37	102,0	--
	No Músicos	12	2,33	17,00		
G1	Músicos	19	3,16	14,42	84,0	--
	No Músicos	12	3,58	18,50		
G2	Músicos	19	1,84	15,66	107,5	--
	No Músicos	12	2,00	18,50		
G3	Músicos	19	4,74	19,13	54,5	0,006
	No Músicos	12	3,50	11,04		
G4	Músicos	19	2,74	14,97	94,5	--
	No Músicos	12	3,08	17,62		
G5	Músicos	19	3,05	14,26	81,0	--
	No Músicos	12	3,67	18,75		
G7	Músicos	19	3,63	14,84	92,0	--
	No Músicos	12	3,92	17,83		
G8	Músicos	19	2,42	16,47	105,0	--
	No Músicos	12	2,25	15,25		
G9	Músicos	19	1,53	14,76	90,5	--
	No Músicos	12	2,00	17,96		
G10	Músicos	19	4,00	17,68	82,0	--
	No Músicos	12	3,25	13,33		
G11	Músicos	19	4,32	18,16	73,0	--
	No Músicos	12	3,67	12,58		
G12	Músicos	19	2,47	12,24	42,5	0,002
	No Músicos	12	3,75	21,96		
G13	Músicos	19	1,63	11,79	34,0	0,001
	No Músicos	12	3,17	22,67		

**Tabla 6: Resultados de la prueba Mann-Whitney entre los grupos de Músicos y No músicos. N es el número de muestras; U el estadístico de Mann-Whitney; y P la sigficatividad.**

El timbre en la guitarra eléctrica sólida:

Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

Variable	Grupo	N	Promedio	Rango Medio	U	P
G0	Músicos	9	1,44	12,22	25,0	0,021
	No Músicos	10	1,00	8,00		
G-1	Músicos	9	2,11	10,11	44,0	--
	No Músicos	10	2,10	9,90		
G1	Músicos	9	3,11	9,44	40,0	--
	No Músicos	10	3,20	10,50		
G2	Músicos	9	2,11	11,83	28,5	--
	No Músicos	10	1,60	8,35		
G3	Músicos	9	4,78	10,00	45,0	--
	No Músicos	10	4,70	10,00		
G4	Músicos	9	3,00	11,06	35,5	--
	No Músicos	10	2,50	9,05		
G5	Músicos	9	4,00	14,28	6,5	0,001
	No Músicos	10	2,20	6,15		
G7	Músicos	9	3,56	9,44	40,0	--
	No Músicos	10	3,70	10,50		
G8	Músicos	9	3,00	12,44	23,0	--
	No Músicos	10	1,90	7,80		
G9	Músicos	9	1,67	11,00	36,0	--
	No Músicos	10	1,40	9,10		
G10	Músicos	9	4,00	10,33	42,0	--
	No Músicos	10	4,00	9,70		
	No Músicos	10	4,10	8,75		
G12	Músicos	9	2,44	9,72	42,5	--
	No Músicos	10	2,50	10,25		
G13	Músicos	9	1,78	11,11	35,0	--
	No Músicos	10	1,50	9,00		

Tabla 7: Resultados de la prueba Mann-Whitney entre los subgrupos Guitarristas y No guitarristas.

Estos resultados confirman nuestra hipótesis sobre las diferencias en la percepción de distancia subjetiva entre grupos en 5 de los 14 pares de estímulos.

Respecto a nuestro análisis entre los grupos de Músicos y No músicos, los primeros han mostrado una mayor sensibilidad, estadísticamente significativa ( $P = 0,006$ ), en el par que muestra un cambio de pastilla (G3), y sorprendentemente el grupo de No músicos ha sido más sensible a los cambios en el cuerpo de la guitarra eléctrica (G12 y G13), mostrando incluso una significatividad estadística más alta ( $P = 0,002$  y  $P = 0,001$  respectivamente).

Una posible explicación a estas diferencia puede estar en que el grupo de Músicos ha evaluado los pares de estímulos más condicionados por el hecho de que se trataba de sonidos de guitarras eléctricas, y pueden haber prestado más atención a aquellas características del sonido más asociadas al instrumento que el grupo

de No músicos. De esta forma han considerado mayor la distancia subjetiva entre los estímulos cuando el cambio ha sido de un componente electrónico que de un componente acústico.

En el análisis entre los subgrupos de Músicos, Guitarristas – No guitarristas, es estadísticamente significativa ( $P=0,001$ ) la diferencia hallada en el par G5, que puede ser explicada por el hecho de que los guitarristas suelen ajustar a menudo los controles del circuito electrónico de su instrumento, y por tanto pueden ser más sensibles a los cambios de sonido que produce éste que los No guitarristas.

Las diferencias encontradas en el par G0 ( $P=0,021$ ), aquél que servía para determinar la fiabilidad del sujeto, y en el que los Guitarristas han percibido una distancia subjetiva mayor a los No guitarristas (en este caso mayor distancia significa mayor error) puede explicarse por la gran diferencia de respuestas Igual que presentan ambos grupos a lo largo del test. Los Guitarristas, como promedio, contestaron 1,9 veces Igual ante los 14 pares de estímulos, mientras los No guitarristas lo hicieron 3,4 veces. Es muy posible que se deba a que los primeros han condicionado sus respuestas al hecho de conocer de antemano que se trataban de pares de estímulos de guitarra eléctrica en los que se había variado un componente o factor de la misma, y han tratado de encontrar diferencias incluso donde no las había. En futuras experiencias evitaremos proporcionar información previa que pueda condicionar las respuestas.

### **7.3. Correlaciones entre el test físico y el test de percepción.**

En este subapartado, como en el anterior, la nomenclatura G0, G1, etc. hace referencia a los pares de estímulos.

Para poder hallar las posibles correlaciones que existan entre los datos medidos en ambos tests hemos de calcular los incrementos, en valor absoluto, que se han producido en las magnitudes físicas de las variantes respecto a las guitarras de referencia, para poder compararlos con los obtenidos en el test de percepción<sup>2</sup>.

Como dato representativo de la distancia subjetiva percibida utilizaremos las medianas de las respuestas, ya que utilizamos una escala discreta y el uso de la media aritmética nos mostraría unos decimales que no existen en las respuestas. Las medianas utilizadas son las correspondientes a todos los sujetos, el grupo de Músicos y el subgrupo de Guitarristas, y se muestran en la Tabla 8.

---

<sup>2</sup> El par G0-G0 no ha sido utilizado, pues al calcular su incremento lógicamente obteníamos 0 para todas las magnitudes.

El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

Par de estímulos	Todos los Sujetos	Músicos	Guitarristas
G-1	2	2	2
G1	3	3	3
G2	2	2	2
G3	5	5	5
G4	3	3	3
G5	3	3	4
G7	4	4	4
G8	2	2	3
G9	2	1	2
G10	4	4	4
G11	4	5	5
G12	3	2	2
G13	2	2	2

Tabla 8: Medianas de la distancia subjetiva para cada par.

Con estos valores y los incrementos en las magnitudes físicas entre pares hemos realizado un análisis de correlaciones bivariadas de Pearson, utilizando una prueba de significación bilateral. La Tabla 9 muestra los coeficientes de Pearson y la significatividad halladas.

Magnitudes físicas	Total Sujetos		Músicos		Guitarristas	
	Pearson	Sig.	Pearson	Sig.	Pearson	Sig.
Ancho Banda	-0,396	--	-0,423	--	-0,508	--
Centroide	0,091	--	0,016	--	-0,033	--
Irregularidad	0,739	0,004	0,691	0,009	0,753	0,003
Ratio p/i	0,144	--	0,046	--	-0,086	--
Flujo	0,054	--	0,196	--	0,016	--
Fluctuación	-0,081	--	-0,255	--	-0,176	--
Armónico 2	-0,189	--	-0,231	--	-0,208	--
Armónico 3	0,343	--	0,341	--	0,212	--
Armónico 4	0,364	--	0,32	--	0,277	--
Armónico 5	-0,083	--	0,075	--	0,058	--
Armónico 6	0,211	--	0,136	--	0,099	--
Armónico 7	0,321	--	0,45	--	0,363	--
Armónico 8	0,399	--	0,397	--	0,343	--
Armónico 9	0,138	--	0,168	--	0,099	--
Armónico 10	-0,581	--	-0,488	--	-0,446	--
Armónico 11	-0,225	--	-0,135	--	-0,186	--
Armónico 12	0,168	--	0,063	--	-0,064	--
Armónico 13	0,479	--	0,46	--	0,374	--
Armónico 14	-0,014	--	0,037	--	0	--
Armónico 15	0,706	0,007	0,756	0,003	0,733	0,004

Tabla 9: Coeficientes de correlación de Person entre las medianas de las respuestas de distancia subjetiva y la variación en las magnitudes físicas medidas, y su significatividad.

Como se observa, hemos hallado una alta correlación entre la variación de la Irregularidad Espectral y la distancia subjetiva percibida, con un coeficiente de 0,74, que se eleva a 0,75 en el subgrupo de Guitarristas, en ambos casos con una alta significatividad estadística ( $P < 0,01$ ). Las cuatro mayores distancias percibidas entre los pares de guitarras corresponden a las cuatro mayores variaciones en la Irregularidad Espectral, y prácticamente en el mismo orden.

Las únicas excepción las encontramos en G9, que pese a ser el 7º par con más cambio en la irregularidad es el de menos distancia subjetiva de todos, y en G4 que pese a no mostrar cambios en la Irregularidad Espectral ocupa la 8ª posición en cuanto a distancia subjetiva.

Como vimos en el subapartado 4.2.2. la Irregularidad Espectral es el constituyente del timbre asociado con la etiqueta verbal “rugosidad”, y ésta es una etiqueta que se puede aplicar al sonido de la guitarra eléctrica, incluso la de “estridente”. Es posible que éste sea el motivo por el que los sujetos se muestran tan sensibles a los cambios en esta magnitud.

La Irregularidad Espectral tiene, además, una alta correlación con la tercera dimensión del espacio MDS de Krumhansl (1989), como demostró McAdams (1999).

Las variaciones de la energía que presenta el armónico 15 también están correlacionadas con la percepción de distancia subjetiva (0,70;  $P < 0,01$ ). Siendo esta correlación mayor para el grupo de músicos (0,75;  $P < 0,01$ ).

El armónico 15 se encuentra a una distancia de 3 octavas y una séptima mayor por encima de la fundamental (ligeramente baja), y es uno de los armónicos considerados disonantes, y que por tanto modifican la sensación de “aspereza” del sonido. Ésta es otra etiqueta verbal aplicable al sonido de la guitarra eléctrica, y la influencia en las respuestas puede deberse a ello.

#### **7.4. Análisis respecto a la naturaleza de cambios.**

Unos de los objetivos que marcamos era el de determinar si en el timbre de la guitarra eléctrica tenía una mayor influencia las características acústicas o las electrónicas.

En nuestra experiencia hemos incorporado 4 variantes claramente electrónicas (G1, G2, G3 y G5), mientras el resto eran de naturaleza acústica. En estas últimas

podemos distinguir dos tipos, aquellas relacionadas con el cuerpo resonante (G-1, G12 y G13), y el resto relacionadas con la vibración de la cuerda y sus nodos.

Al realizar un análisis de varianzas (ANOVA), tanto de los datos físicos como de las respuestas del test, utilizando como factor la naturaleza de la variante, no obtenemos ninguna diferencia significativa, tanto si agrupamos la naturaleza en electrónicos-acústicos, como si lo hacemos en electrónicos-resonantes-nodales.

Por tanto no podemos concluir que exista una naturaleza predominante en el timbre del instrumento, al menos con la presente experiencia.

## **8. Conclusiones y perspectivas.**

### **8.1. Grado de cumplimiento de los objetivos.**

El cumplimiento general de los objetivos ha sido satisfactorio aunque desigual en cada uno de ellos.

#### **8.1.1. Objetivo 1**

El diseño de nuestro experimento no nos permite alcanzar una conclusión precisa respecto a nuestro primer objetivo, determinar si en el timbre de la guitarra eléctrica sólida influyen más las características acústicas o electrónicas, lo que nos invita a profundizar en la investigación con un diseño más adecuado. Aún así podemos sacar algunas conclusiones observando los datos obtenidos en las variantes.

Respecto a la electrónica, el cambio de la pastilla0 por la pastilla2 provocó más de un 60% de las respuestas Muy diferente, lo que coloca a este cambio en 1ª posición en cuanto a distancia subjetiva, salvo para el grupo de No músicos. Sólo 6 de los sujetos calificaron el cambio como Moderadamente diferente o menos. Además produjo cambios significativos en la Irregularidad Espectral, identificada en el presente trabajo como el constituyente del timbre más relevante para la guitarra eléctrica. Sin embargo resulta sorprendente el poco cambio, físico y perceptivo (penúltima posición), que ha provocado el cambio de pastilla0 por pastilla1. La única explicación plausible es que ambas, al tratarse de pastillas básicas para guitarras del modelo Telecaster hayan sido diseñadas para la obtención de un sonido similar.

La posición en la que se ubique la pastilla también resulta bastante relevante. Respecto a la distancia subjetiva sería la 5ª mayor (6ª para los guitarristas), y físicamente es en la que se ha medido mayor variación general de la energía sonora en sus armónicos.

La distancia subjetiva percibida entre los sonidos de una guitarra eléctrica con o sin circuito varía de un Bastante diferente para los guitarristas eléctricos a un Algo diferente para el resto de sujetos. Tal vez se deba a que los guitarristas están

familiarizados con el circuito electrónico. Esta variante se sitúa, en general, en la 6ª posición respecto a distancia subjetiva, pero si únicamente consideramos a los guitarristas ocuparía la 3ª posición (empatado con el cambio de puente), aunque entre los Músicos No Guitarristas se situaría en la 8ª.

Por tanto, y excluyendo a la variante G2, podemos concluir que los cambios en la electrónica de una guitarra eléctrica influyen sustancialmente en el timbre percibido.

Con respecto a la vibración de la cuerda, los dos nodos principales de vibración que se formarían entre el mástil y el puente son determinantes, como también lo es la púa con la que se pulsa la cuerda. Estos factores ocupan la 2ª, 3ª y 4ª posición en distancia subjetiva, y aquellos cambios más sutiles para la vibración, como las clavijas o las cejuelas ocupan el 8º y 9º lugar, superando con creces las expectativas que a priori teníamos sobre estos cambios.

Sin duda una de las sorpresas del estudio es la escasa influencia en el timbre de la misma cuerda, que se deduce de la última posición que ocupa respecto a la distancia subjetiva, y más considerando que las cuerdas utilizadas eran diferentes, tanto en el calibre como en el material en que se habían fabricado.

En su conjunto, todos los componentes relacionados con la vibración de la cuerda han presentado un cambio significativo en la Irregularidad espectral, salvo el cambio de cejuela.

Por último, al fin nos encontramos en condiciones de responder a la pregunta que nos llevó a iniciar este trabajo ¿Influye la madera en la que se construye el cuerpo de una guitarra eléctrica sólida en el timbre final del instrumento? Y la respuesta es sí. Ninguno de los sujetos encuestados (incluyendo los eliminados por no fiables) respondieron Igual ante el par de estímulos que presentaba las guitarras construidas con el cuerpo0 y el cuerpo1, esta circunstancia sólo se dio en este par y en el de la púa. Además la energía sonora se atenuó significativamente en 10 de los 15 armónicos estudiados, lo que representó un descenso de casi 96 Hz en el Centroide espectral (el segundo más grande medido); y varió significativamente tanto la Irregularidad Espectral como la Fluctuación Espectral

Pero ante la escasa distancia subjetiva del par, que sitúa esta variante en la posición central de todas, y que en el subgrupo de los Guitarristas desciende hasta la 9ª posición, surge una nueva pregunta ¿Pagarías 1.000 euros extra porque una guitarra esté fabricada de una determinada madera? Y, en esta fase de la investigación, a esta pregunta yo respondería que no.

Igual de decepcionantes han sido los resultados de la variante de la pintura, que en foros y revistas especializadas consideran fundamental, o de la disminución de la masa. La escasa diferencia en este último factor puede ser la razón de que existan modelos tan diversos en cuanto a formas y tamaños de guitarras eléctricas sólidas.

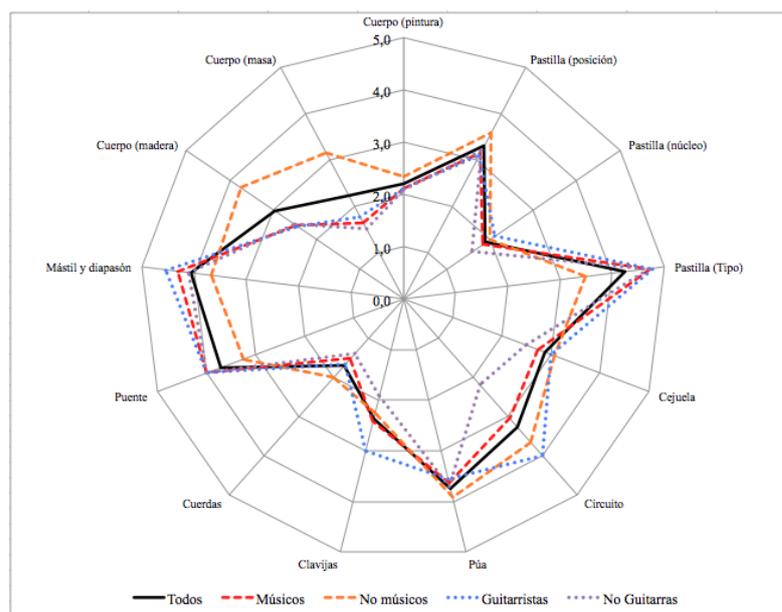
### 8.1.2. Objetivo 2.

Respecto a nuestro segundo objetivo, determinar la contribución relativa de cada componente de la guitarra eléctrica sólida al timbre del instrumento, creo que lo hemos resuelto satisfactoriamente. La distancia subjetiva obtenida del test nos permite determinar cuáles de los componentes o factores tienen mayor influencia en el timbre. Recordemos que hemos utilizado los componentes más distintos de cuantos había en el mercado para buscar el mayor cambio en el timbre que nos podía proporcionar este componente.

Ordenando de mayor a menor los promedios de distancia subjetiva percibida por cada grupo obtenemos un *ranking* de las guitarras como se muestra en la Tabla 10:

	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
<b>Todos</b>	Pastilla (Tipo)	Mástil y diapasón	Púa	Puente	Pastilla (posición)	Circuito	Cuerpo (madera)	Cejuela	Clavijas	Cuerpo (masa)	Cuerpo (pintura)	Pastilla (núcleo)	Cuerdas
<b>No músicos</b>	Púa	Cuerpo (madera)	Mástil y diapasón	Circuito	Pastilla (posición)	Pastilla (Tipo)	Puente	Cuerpo (masa)	Cejuela	Cuerpo (pintura)	Clavijas	Pastilla (núcleo)	Cuerdas
<b>Músicos</b>	Pastilla (Tipo)	Mástil y diapasón	Puente	Púa	Pastilla (posición)	Circuito	Cejuela	Cuerpo (madera)	Clavijas	Cuerpo (pintura)	Pastilla (núcleo)	Cuerpo (masa)	Cuerdas
<b>Guitarristas</b>	Pastilla (Tipo)	Mástil y diapasón	Puente	Circuito	Púa	Pastilla (posición)	Cejuela	Clavijas	Cuerpo (madera)	Cuerpo (pintura)	Pastilla (núcleo)	Cuerpo (masa)	Cuerdas
<b>No Guitarristas</b>	Pastilla (Tipo)	Mástil y diapasón	Puente	Púa	Pastilla (posición)	Cejuela	Cuerpo (madera)	Circuito	Cuerpo (pintura)	Clavijas	Pastilla (núcleo)	Cuerpo (masa)	Cuerdas

**Tabla 10: Ranking de guitarras que se perciben como más diferentes de su referencia.**



**Gráfico 2: Promedio de distancia subjetiva entre las variantes y las guitarras de referencia.**

En el gráfico 2 se muestra la distancia subjetiva percibida entre la guitarra de referencia y cada una de las variantes.

Esta información nos será de gran utilidad en los siguientes pasos de nuestra investigación.

Pese a ello, será necesario profundizar en algunas variantes relativamente poco influyentes, pues estamos seguros que un gran número de guitarristas no se van a convencer con esta investigación de la relativamente escasa influencia de la madera del cuerpo en el timbre, al igual que ocurrirá con las cuerdas o la pintura.

### **8.1.3. Objetivo 3.**

Nuestro tercer objetivo era identificar aquellos constituyentes del timbre más relevantes para la guitarra eléctrica, y en este caso ha sido exitoso, al hallar altas correlaciones entre la percepción y la variación de la Irregularidad Espectral y de la energía presente en el armónico 15.

Ambas magnitudes se corresponden con dos etiquetas verbales aplicables al sonido de la guitarra. Esto nos hace reflexionar sobre la necesidad de identificar qué etiquetas verbales son adecuadas a nuestros futuros estudios para poder realizar tests de percepción más ajustados al objetivo general buscado.

### **8.1.4. Objetivo 4.**

Con el desarrollo de esta investigación hemos adquirido experiencia, tanto en la preparación de estímulos, como en la realización de mediciones físicas y de percepción, siendo satisfactorio el grado de cumplimiento del objetivo cuatro.

Recordemos que la inexperiencia en la preparación de estímulos nos llevó a desechar aquéllos que preparamos para la realización de la prueba de percepción como todos los relativos a la variante G6.

Con la experiencia adquirida también podremos evitar condicionar, en futuras investigaciones, a los sujetos en sus respuestas al test de percepción, pues creemos haberlos condicionado en esta experiencia, al menos a los guitarristas, al suministrarles más información de la necesaria.

Todos estos errores nos ayudarán a ser más precisos en futuros trabajos, pues de los errores se aprende.

## **8.2. Debilidades y oportunidades de la presente investigación.**

Identificar las debilidades de nuestro trabajo las convierte en oportunidades de mejora para el futuro, por tanto hemos reflexionado bastante sobre ellas.

La primera de ellas es que hemos circunscrito el estudio a una nota central de entre las del instrumento, y es posible que los cambios que producen las variantes no sean lineales, y sean más evidentes en algunos rangos de frecuencia que en otros. No poseemos un estudio que nos permita extrapolar las características del timbre desde una nota al resto de ellas. Por tanto debemos investigar si existe un patrón que nos permita reducir los estudios a una nota, o por el contrario necesitamos incorporar más a futuras investigaciones.

Es necesario que encontremos una forma de pulsar la cuerda mecánicamente, pues pese a haber tenido mucho cuidado en tratar de pulsar siempre en el mismo punto y con la misma fuerza no podemos tener seguridad de haberlo conseguido.

Hemos reducido al estudio a los 15 primeros armónicos de la serie, y tras comprobar la importancia en la percepción del timbre del último de ellos tal vez deberíamos ampliar el número de armónicos considerados.

Es necesario mejorar el sistema que hemos empleado para la medición física. Existe software que nos permitiría trabajar de una forma más rápida, como MIRtoolbox para Matlab, desarrollado por Lartillot y Toiviainen (2007) miembros del Departamento de Música de la Universidad de Jyväskylä (Finlandia), que permite la extracción directa de los datos, pero con nuestro nulo dominio de Matlab el software nos entorpecía más que nos ayudaba.

Por último, el método empleado para realizar el test de percepción, con un único ordenador y unos auriculares han convertido la labor en ardua y tediosa, siendo recomendable para futuras investigaciones el uso de un aula y la audición de los estímulos en común, en lugar de individualmente.

## **8.3. Futuras investigaciones.**

Como indicamos en la motivación, esta investigación nos sirve de base para determinar qué tiempo y recursos dedicar a cada componente en futuros trabajos.

La determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre final del instrumento nos proporciona una visión general de cuánto podemos variar el timbre del instrumento variando cada uno de sus componente, pero no nos proporciona

información sobre si este cambio ha mejorado o empeorado su timbre. En este trabajo hemos utilizado aquellos componentes que hemos supuesto más distintos de entre los que oferta el mercado, pero no hemos determinado qué tipo de relación existe entre las características del componente y el cambio producido.

Por tanto, para completar nuestro objetivo general de comprender el timbre de la guitarra eléctrica sólida y así conseguir instrumentos mejores y más económicos será necesario recorrer aún un largo camino.

Este camino nos ha de conducir necesariamente a determinar las variaciones del timbre en función de las características físicas de los componentes (por ejemplo y en el caso de la madera, estas características serían la densidad, porosidad, grado de humedad, coeficiente de elasticidad, etc...); también deberemos determinar cómo interactúan las variaciones del timbre provocadas por cada componente cuando cambiemos más de un componente (o factor) a la vez; y por último deberemos identificar cuáles son las características deseables del timbre de la guitarra eléctrica para hallar la forma más económica y ecológica de conseguirlo.

Valencia, a 24 de julio de 2012.

## **9. Agradecimientos.**

A Jorge y a Carlos, por su dirección, sus indicaciones y sobre todo por su apoyo.

A Héctor por sus consejos, indicaciones y su paciencia, sin él todo lo relativo a la percepción y la estadística hubiera sido un infierno.

A mis compañeros, casi hermanos, de los Jacobinos y los Pataconas por haber realizado más tests de los que hubieran deseado. Al resto de personas que participaron en esta experiencia.

A mis profesores y compañeros del Máster por todo lo que me han enseñado.

A la gente de administración de la Unidad de Máster Universitario y del Departamento de Comunicación Audiovisual, Documentación e Historia del Arte, por su trabajo, tan invisible como imprescindible.

A Pilar, porque el tiempo que dediqué a este trabajo se lo robé a ella y porque sin ella nada tiene sentido.



## 10. Bibliografía.

BACON, T. (2005). *Six Decades of the Fender Telecaster: The Story of the World's First Solidbody Electric Guitar*. USA: Backbeat Books. ISBN: 0879308567.

BASSO, G. (2001). *Análisis Espectral. La transformada de Fourier en la música*. 2ª edición. La Plata. Buenos Aires. Argentina: Ediciones al margen. ISBN: 950-34-0150-X

BEJARANO, F. (2009). *Efecto de los Difusores Acústicos en el Timbre de los Sonidos: cálculo del tiempo de ataque perceptual*. Trabajo Final de Máster. Universitat Politècnica de València.

BERGER, K. W. (1964). *Some factors in the recognition of timbre*. Journal of the Acoustical Society of America, 36(10), 1888-1891.

BISMARCK, G. v. (1974). *Timbre of steady sounds: A factorial investigation of its verbal attributes*. Acustica, 30(3), 146-159.

BROSNAC, D. (1978). *An introduction to scientific guitar design*. 2ª edición. Westport, Connecticut. USA: The Bold Strummet, LTD.

CACLIN, A., McADAMS, S., SMITH, B.K. y WINSBERG, S. (2005) *Acoustic Correlates of Timbre Space Dimensions: A Confirmatory Study using Synthetic Tones*. The Journal of the Acoustical Society of America, 118 (1), 471-482. ISSN 0001-4966.

CAETANO, M., BURRED, J. J., y RODET, X. (2010). *Automatic Segmentation of the Temporal Evolution of Isolated Acoustic Musical Instrument Sound Using Spectro-Temporal Cues*. Graz, Austria.

DD GUITARS. *Guitar. Physics and Wood*. Consultado el 18 de diciembre de 2011. Disponible en <http://www.ddcustomguitars.com/guitarphysics.html>.

DIXON, S. (2006). *Onset detection revisited*. Proc. of the 9th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-06), Montreal, Canada, September 18-20, 2006, 133-137.

EHRESMAN, D., y WESSEL, D. (1978). *Perception of timbral analogies*. IRCAM Technical Report 13/78, Paris: Centre Georges Pompidou.

GREY, J. M. (1975). *An exploration of musical timbre*. Tesis Doctoral. Department of Music. Standford University.

GREY, J. M. (1977). *Multidimensional Perceptual Scaling of Musical Timbres*. The Journal of the Acoustical Society of America, 61(5), 1270-1277.

GREY J. M. y GORDON, J. W. (1978). *Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres*. The Journal of the Acoustical Society of America, 63(5), 1493-1500.

GUYOT, F. (1992). *Etude de la pertinence de dewc criteres acoustiques pour caracteriser la sonorité des sons iz spectre reduits*. No publicado, trabajo de DEA. Université du Maine, Le Mans, France.

HAJDA, J. M. (1999). *The effect of time-variant acoustical properties on orchestral instrument timbres*. Tesis doctoral. University of California.

HANADA, K. (2007). *Study on the timbre of an electric guitar sound with distortion*. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 35(SUPPL), PP.96-99

HELMHOLTZ, H. L. F. V. (2007). *On the Sensations of Tone Cosimo*.

HORTON, N. y MOORE, T. R. (2009). *Modeling the magnetic pickup of an electric guitar*. American journal of physics, 77(2), 144-150.

INGRAM, A. (2001). *A Concise History of the Electric Guitar*. Mel Bay Publications.

IVERSON, P., y KRUMHANSL, C. L. (1993). *Isolating the dynamic attributes of musical timbre*. Journal of the Acoustical Society of America, 94(5), 2595-2603.

KAIEDA, S., KAWAY, K., YANO, T. y ANDO, Y. (2009). *A study on measures of timbre of electric guitar sounds in terms of powerspectrum and auto correlation function*. Journal of Temporal Design, 9 (1), 43-46.

KENDALL, R. A. y CARTERETTE, E. C. (1993). *Verbal attributes of simultaneous wind instrument timbres: II. adjectives induced from piston's orchestration*. Music Perception, 10(4), 469-502.

KENDALL, R. A., CARTERETTE, E. C., y HAJDA, J. M. (1999). *Perceptual and acoustical features of natural and synthetic orchestral instrument tones*. Music Perception, 16(3), 327-364.

KNOPOF, L. (1963). *An index for the relative quality among musical instruments*. Ethnomusicology, 7(3), 229-223.

KRIMPHOFF, J., S. McADAMS, y WINSBERG, S. (1994). *Caractérisation du timbre des sons complexes. II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique*. Journal de Physique Iv, Colloque C5, supplément au Journal de Physique III, 4, 625-628.

KRUMHANSL, C. L. (1989). Why is musical timbre so hard to understand? In S. Nielzén, y O. Olsson (Eds.), *Structure and perception of electroacoustic sound and music: proceedings of the Marcus Wallenberg Symposium held in Lund, Sweden, on 21-28 August 1988* ( pp. 53). Suecia: Excerpta Medica.

LARTILLOT, O. y TOIVIAINEN, P. (2007). *A Matlab toolbox for feature extraction from audio*. Proc. of the 10th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07), Bordeaux, France, September 10-15, 2007.

LEMARQUAND, G., y LEMARQUAND, V. (2007). *Calculation method of permanent-magnet pickups for electric guitars*. IEEE Transactions on Magnetics, 43(9), 3573-3578.

LICHTE, W. H. (1941). *Attributes of complex tones*. Journal of Experimental Psychology, 28, 455-480.

McADAMS, S. (1999). *Discrimination of musical instrument sounds resynthesized with simplified spectrotemporal parameters*. The Journal of the Acoustical Society of America, 105(2), 882.

PASTOR, V. (2005). *Estudio y analisis sobre la acústica y organología del clarinete y su optimización*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de València.

PEETERS, G., (2004). *A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project*. Informe del Proyecto.

RISSET, J., y WESSEL, D. L. (1999). Exploration of timbre by analysis and synthesis. In D. Deutsch (Ed.), *The Psychology of Music* (2nd ed., pp. 113-170). Londres: Academic Press.

SEASHORE, C. E. (1938). *Psychology of music*. Dover Publications.

SHEPARD, R. N. (1982). Structural representations of musical pitch. In D. Deutsch (Ed.), *The Psychology of music* (pp. 334-390). San Diego, CA: Academic Press. ISBN: 0122135601

SMITH, R. R. (1987). *The history of Rickenbacker guitars*. Centerstream Pub.

SOPER, K. J. (2007). *Body woods and an electric guitar's frequency spectrum*. No publicado. Consultado el 26 de diciembre de 2011. Disponible en [http://www.stormriders.com/guitar/telecaster/guitar\\_wood.pdf](http://www.stormriders.com/guitar/telecaster/guitar_wood.pdf).

STUMPF, C. (2010). *Tonpsychologie* (2 Volumenes). General Books LLC. Memphis. Tennessee. USA. ISBN: 9781152072145.

RICHARDSON, M. W. (1938). *Multidimensional psychophysics*. Psychological Bulletin, 35, 659-660.

TRAUBE, C., DEPALLE, P., y WANDERLEY, M. *Indirect acquisition of instrumental gesture based on signal, physical and perceptual information*. Proceedings of the 2003 Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME-03), Montreal, Canada. 42-47.

WESSEL, D. L. (1979). *Timbre space as a musical control structure*. Computer Music Journal, 3(2), 45-52.

WINCKEL, F. (1967). *Music, sound and sensation: A modern exposition* (Traducción Binkley, T.). New York: Dover.

WIESE, C. y ROSSING, T. D. (2002) *Modal análisis of an archtop guitar*. Journal of the Acoustical Society of America, 112 (5), 2.410

YOUNG, S. (2004). *All about... Music Technology in Worship*. Milwaukee, Hal Leonard Corporation. p. 82. ISBN 0-634-05449

**III. ANEXO I:  
CUESTIONARIO DEL TEST DE PERCEPCIÓN**



El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

---

**Marque con una X en la celda adecuada según la respuesta**

Instrumento que toca:

Edad:

	Igual	Algo diferente	Moderadamente diferente	Bastante diferente	Muy diferente
Muestra 1	<input type="checkbox"/>				
Muestra 2	<input type="checkbox"/>				
Muestra 3	<input type="checkbox"/>				
Muestra 4	<input type="checkbox"/>				
Muestra 5	<input type="checkbox"/>				
Muestra 6	<input type="checkbox"/>				
Muestra 7	<input type="checkbox"/>				
Muestra 8	<input type="checkbox"/>				
Muestra 9	<input type="checkbox"/>				
Muestra 10	<input type="checkbox"/>				
Muestra 11	<input type="checkbox"/>				
Muestra 12	<input type="checkbox"/>				
Muestra 13	<input type="checkbox"/>				
Muestra 14	<input type="checkbox"/>				
Muestra 15	<input type="checkbox"/>				
Muestra 16	<input type="checkbox"/>				
Muestra 17	<input type="checkbox"/>				
Muestra 18	<input type="checkbox"/>				
Muestra 19	<input type="checkbox"/>				
Muestra 20	<input type="checkbox"/>				

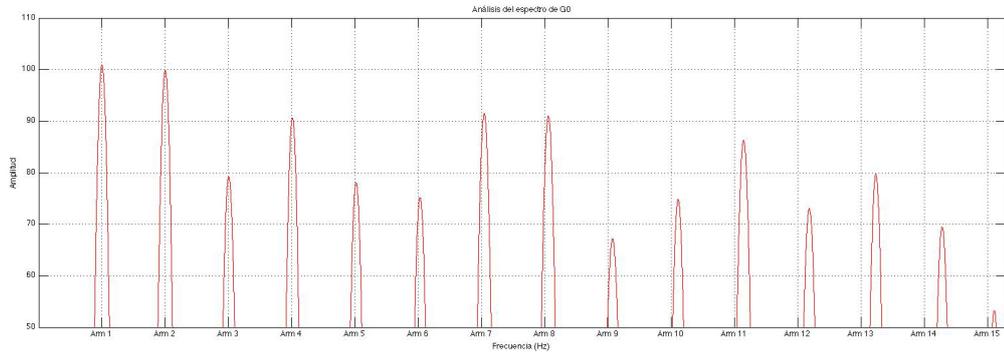


IV. ANEXO II:  
ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS MUESTRAS

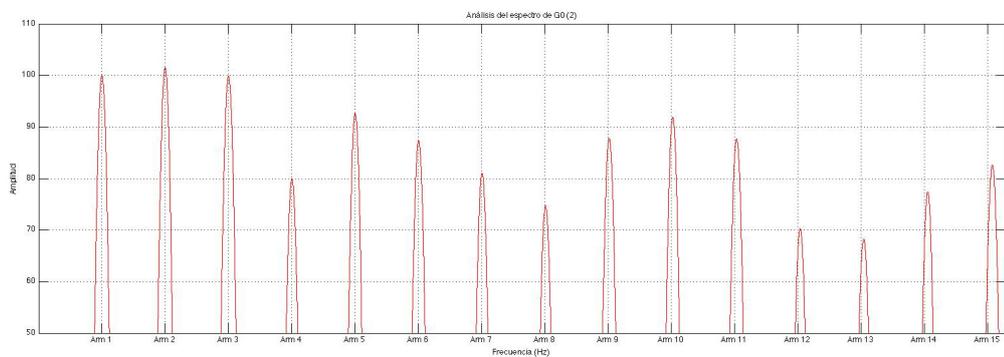


El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

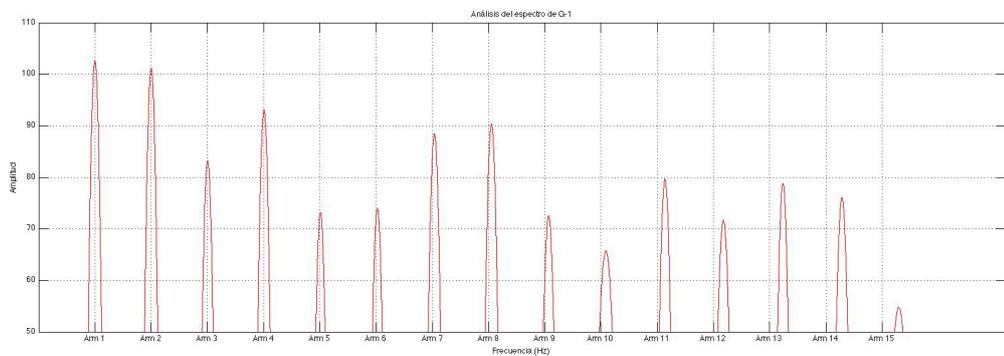
En las siguientes gráficas mostramos la energía sonora en el dominio de la frecuencia, las etiquetas del eje x muestran la posición teórica del armónico.



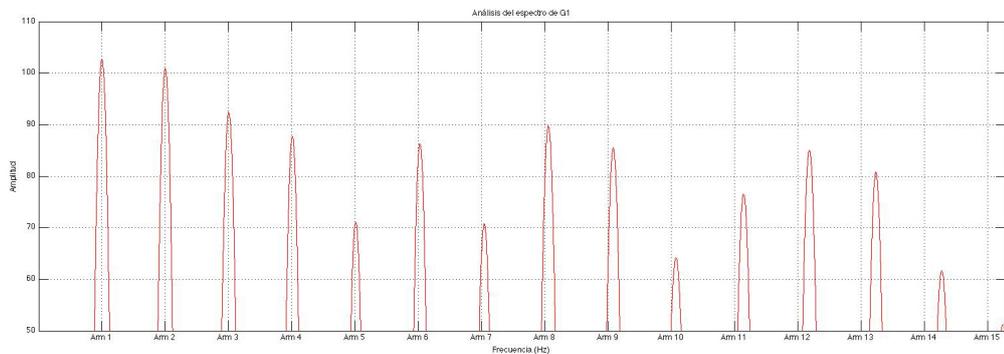
**Gráfico 3: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G0**



**Gráfico 4: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado 2ª cuerda al aire (subida medio tono) en G0**

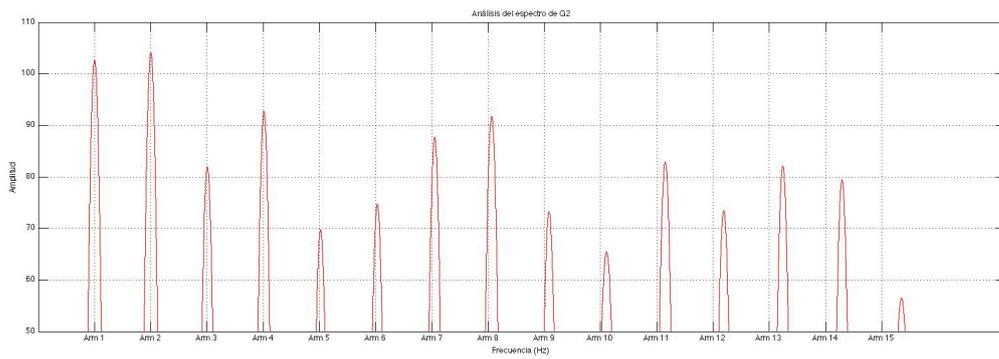


**Gráfico 5: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G-1**

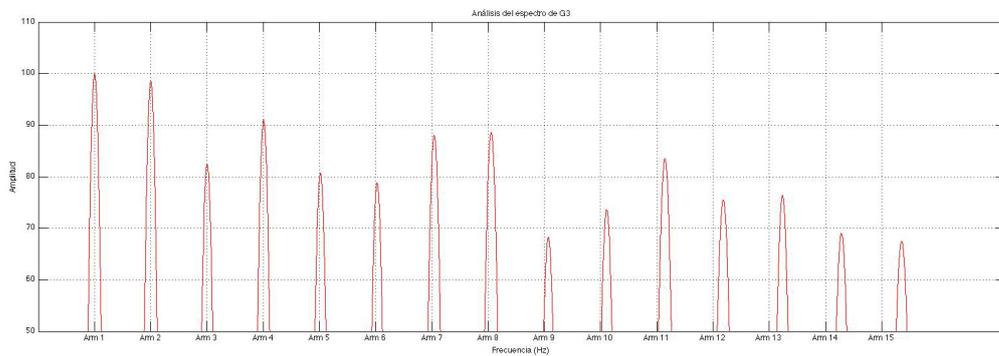


**Gráfico 6: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G1**

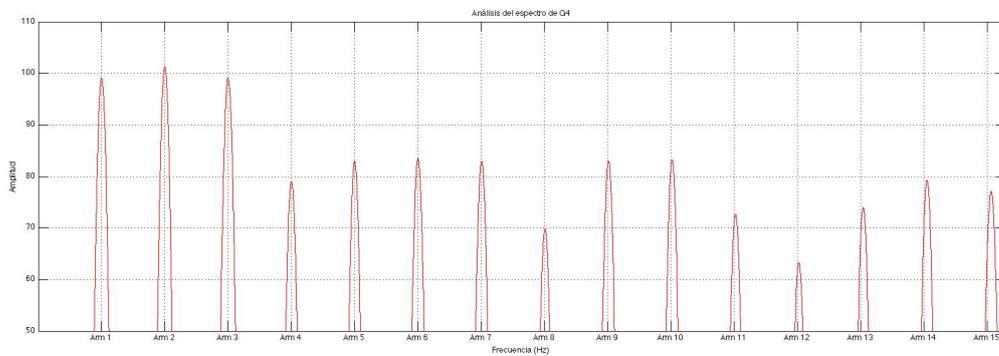
El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.



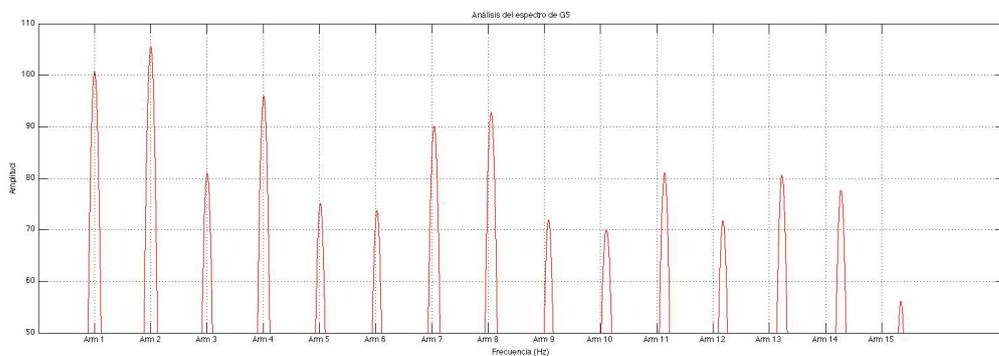
**Gráfico 7: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G2**



**Gráfico 8: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G3**



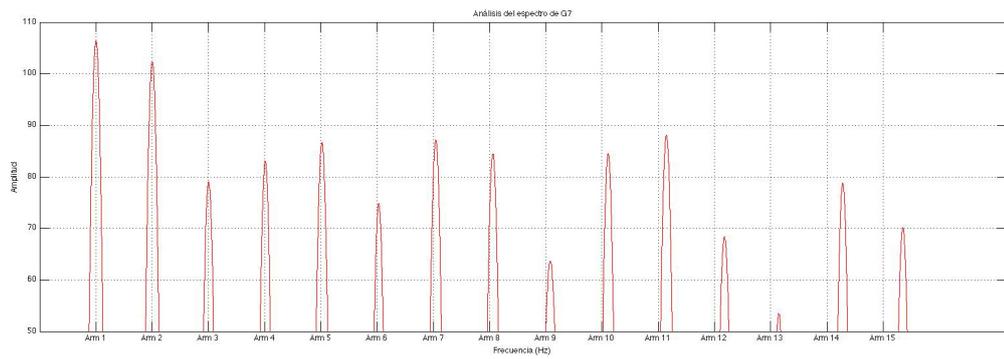
**Gráfico 9: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado 2ª cuerda al aire (subida medio tono) en G4**



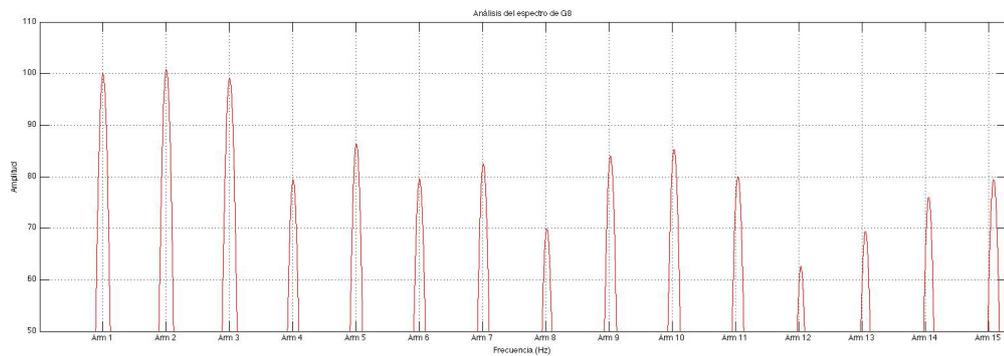
**Gráfico 10: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G5**

El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

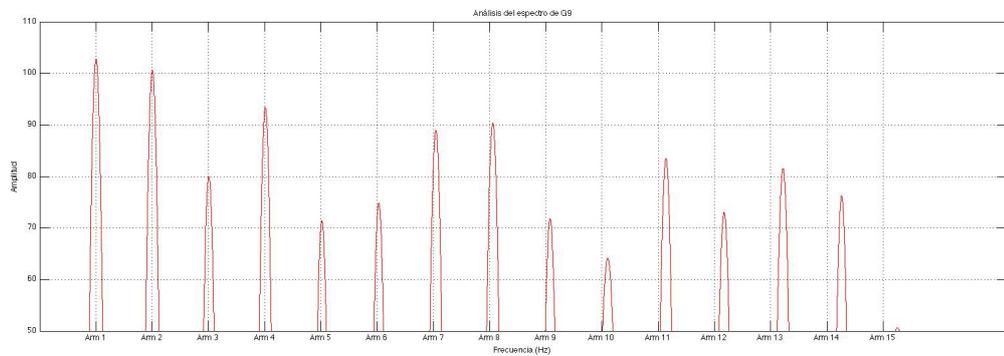
---



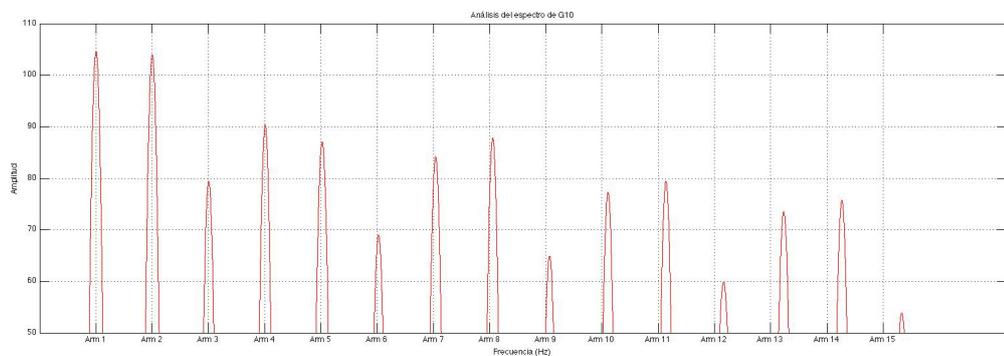
**Gráfico 11: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G7**



**Gráfico 12: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado 2ª cuerda al aire (subida medio tono) en G8**

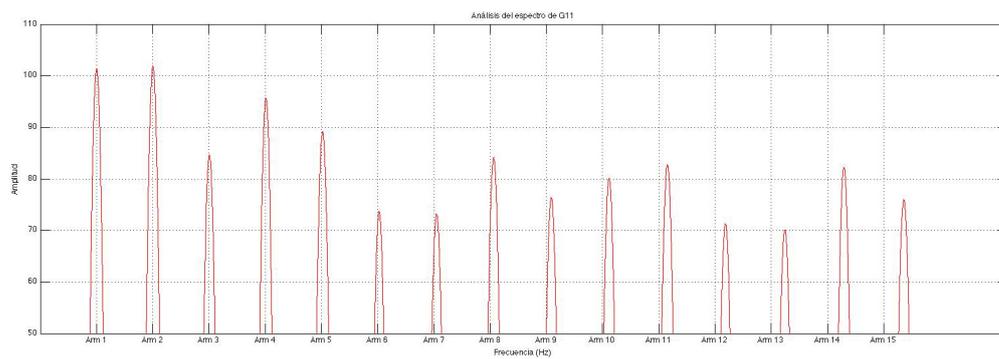


**Gráfico 13: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G9**

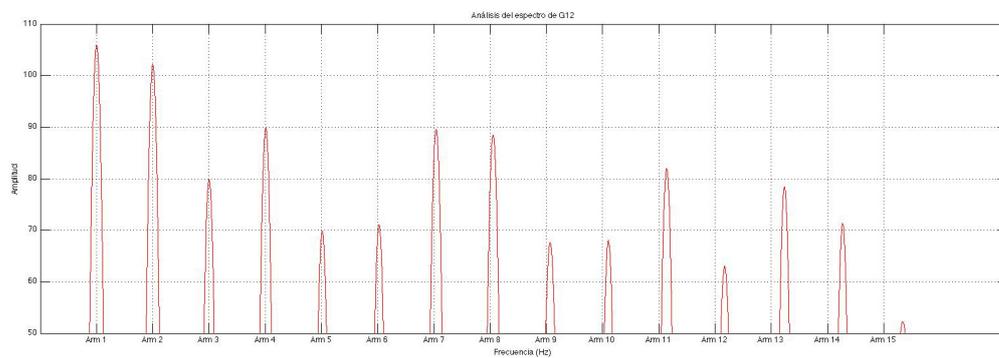


**Gráfico 14: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G10**

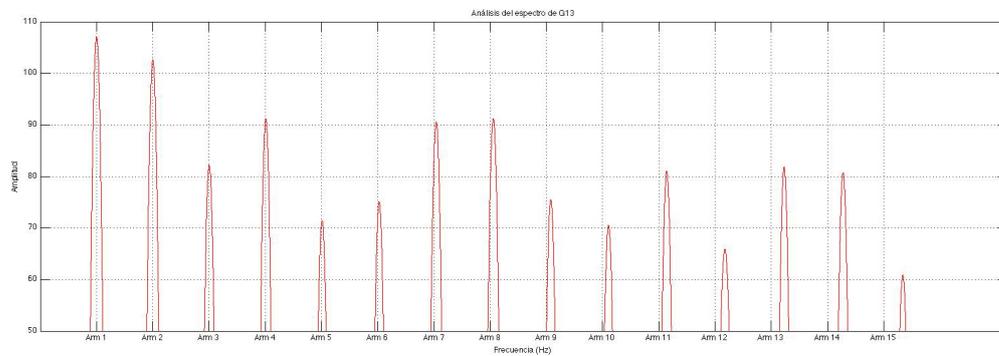
El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.



**Gráfico 15: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G11**



**Gráfico 16: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G12**



**Gráfico 17: Espectro de Frecuencias de Do4 tocado en el 5º traste de la 3ª cuerda en G13**

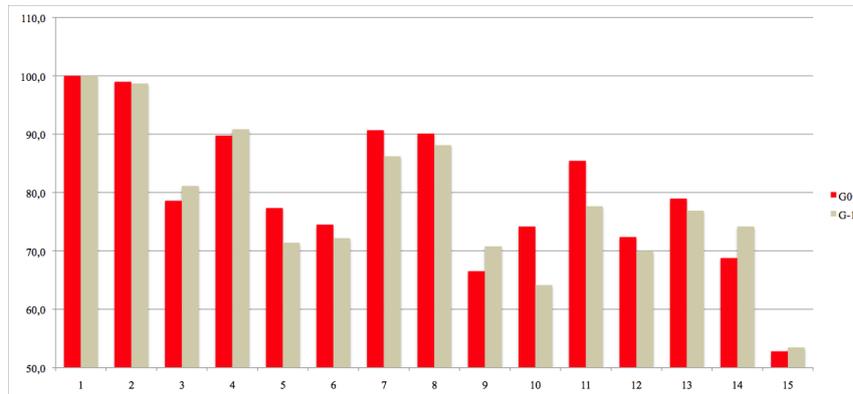
I. ANEXO III:  
COMPARATIVAS DEL ANÁLISIS ESPECTRAL  
ENTRE LAS VARIANTES Y  
SUS GUITARRAS DE REFERENCIA.



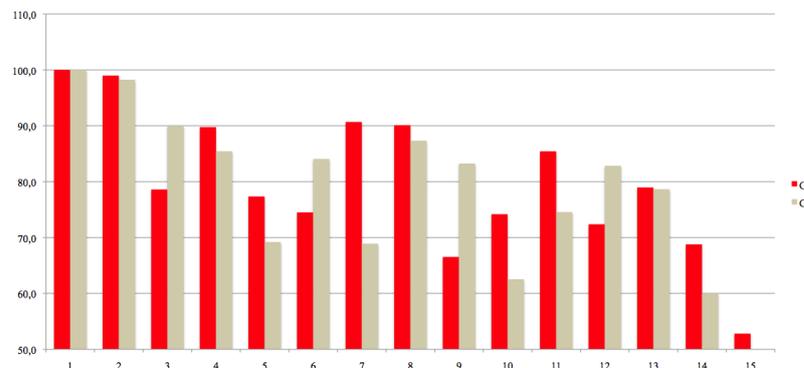
El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

---

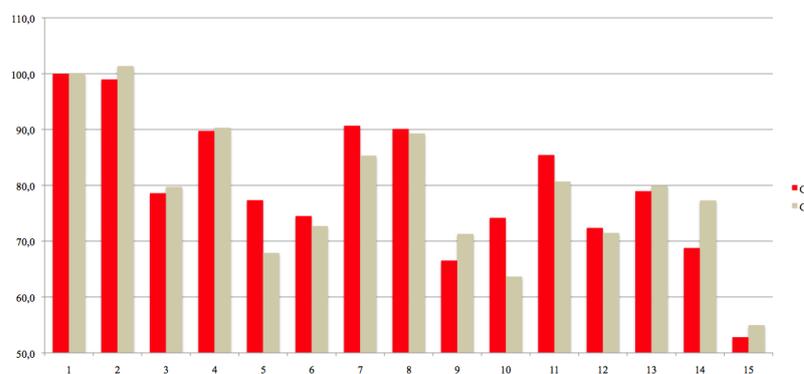
Los siguientes gráficos muestran una comparativa de la energía en los armónicos entre las guitarras de referencia y las variantes.



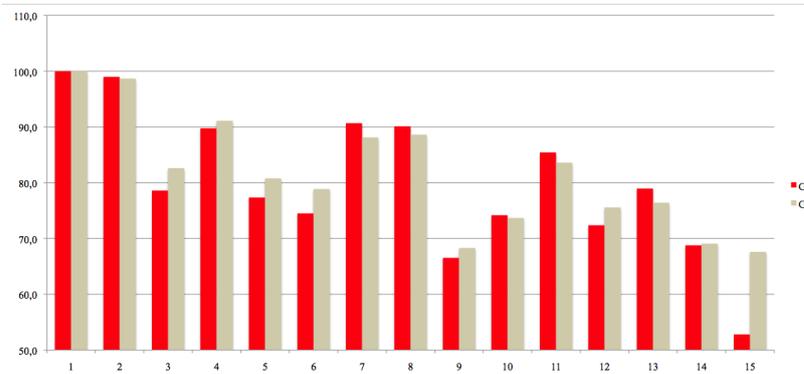
**Gráfico 18: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G-1**



**Gráfico 19: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G1**



**Gráfico 20: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G2**



**Gráfico 21: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G3**

El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
 Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

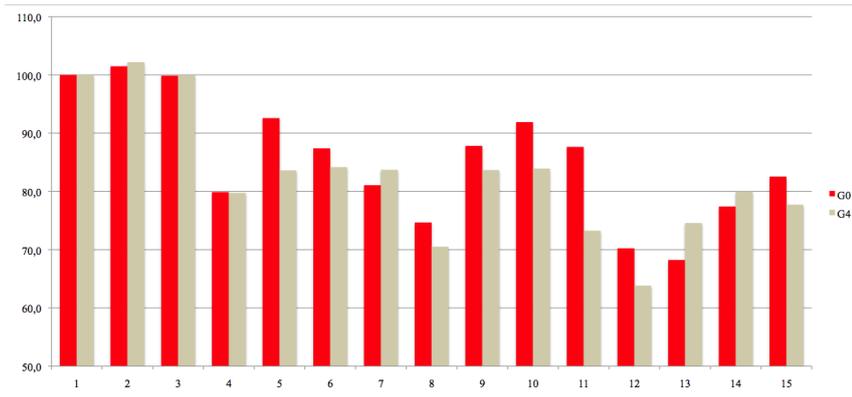


Gráfico 22: Energía porcentual en los armónicos de G0(2) y G4

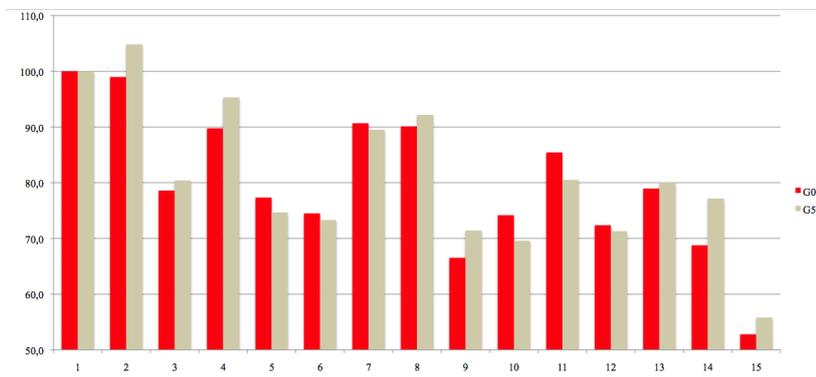


Gráfico 23: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G5

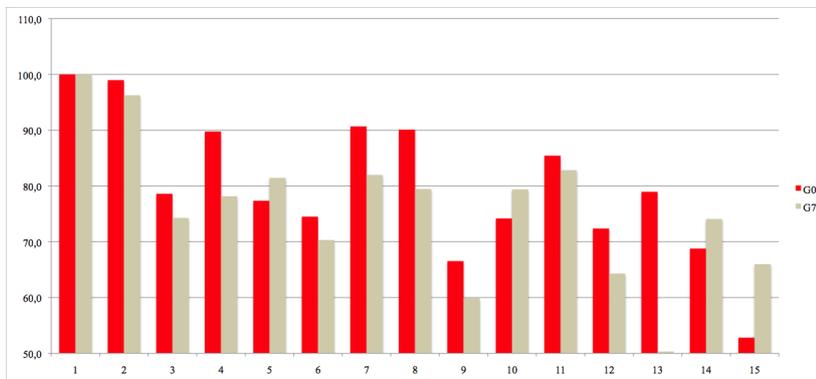


Gráfico 24: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G7

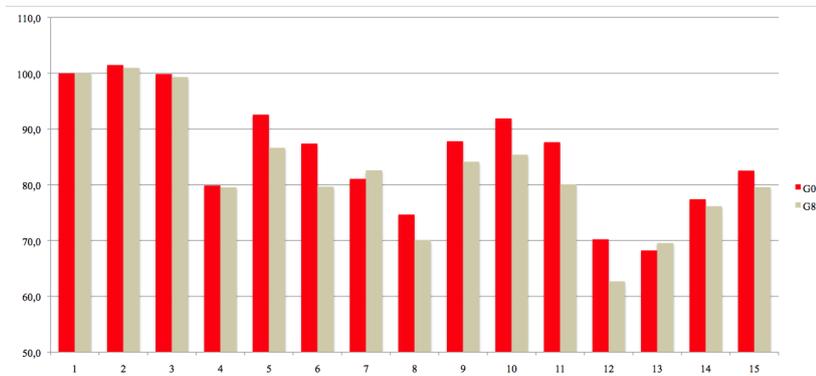
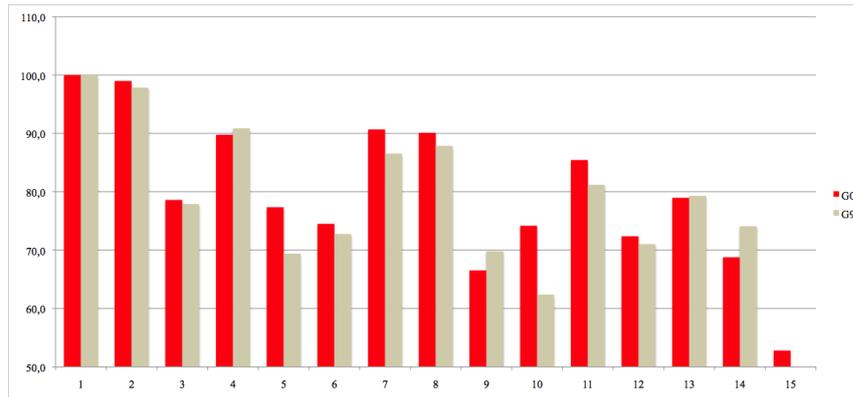
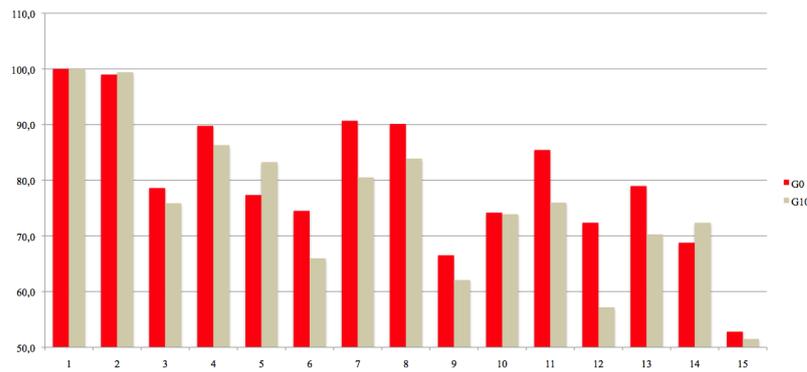


Gráfico 25: Energía porcentual en los armónicos de G0(2) y G8

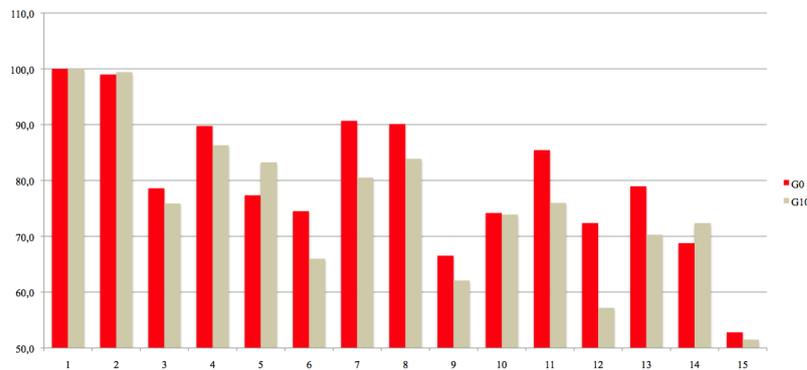
El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.



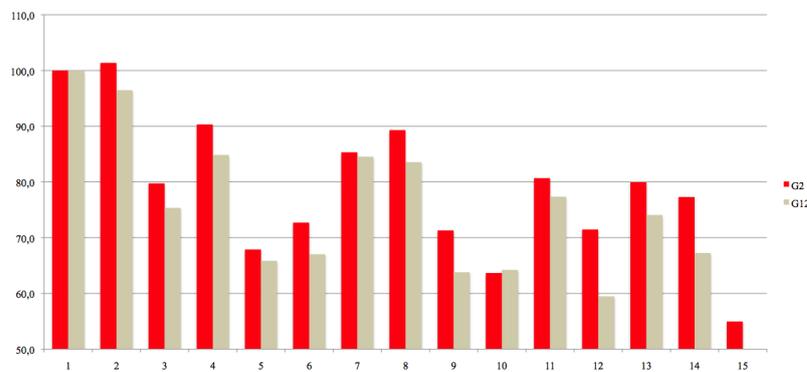
**Gráfico 26: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G9**



**Gráfico 27: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G10**



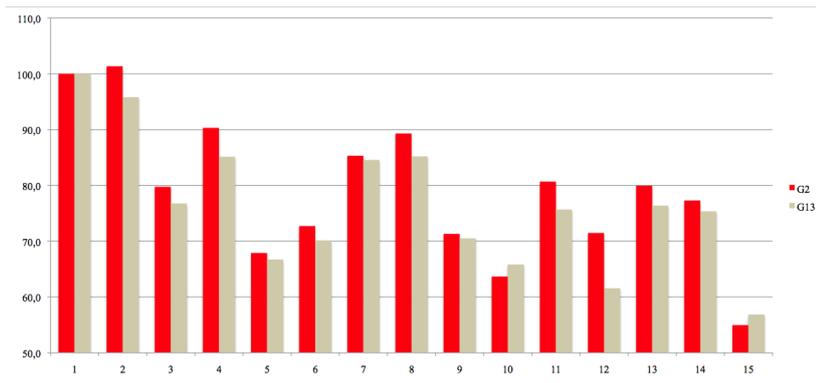
**Gráfico 28: Energía porcentual en los armónicos de G0 y G11**



**Gráfico 29: Energía porcentual en los armónicos de G2 y G12**

El timbre en la guitarra eléctrica sólida:  
Determinación de la influencia relativa de cada componente en el timbre del instrumento.

---



**Gráfico 30: Energía porcentual en los armónicos de G2 y G13**