



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE MÚSICA

“ESTUDIO DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN  
EN LA AFINACIÓN DE LA GUITARRA CLÁSICA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO INSTRUMENTISTA - GUITARRA -

P R E S E N T A

FRANCISCO FERNÁNDEZ DEL CASTILLO GÓMEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. FELIPE ORDUÑA BUSTAMANTE

ESCUELA  
NACIONAL  
DE MÚSICA

UNAM

231558

2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# A G R A D E C I M I E N T O S

Quiero dedicar esta tesis a mis hermanos pero especialmente  
a mi madre.

Agradezco a quienes colaboraron activamente en los  
experimentos de afinación realizados en esta tesis:

Gerardo Díaz de León Díaz de León  
Juan Carlos Aguilar Arroyo  
Júlio Edgar López Valencia  
Pablo Garibay  
Francisco Gómez Pérez  
Pável Francisco Meza Peraza  
Raúl Zambrano González

También a Marilupe Garmilla por la elaboración de los dibujos  
de esta tesis.

Y especialmente al Dr. Felipe Orduña Bustamante por su  
invaluable ayuda, porque gracias a él aprendí muchísimas  
cosas.

Me disculpo por no hacer mención de tanta gente que me ha  
apoyado y querido toda la vida, familiares, amigos y  
maestros, pero tendría que escribir otras 150 páginas.

# CONTENIDO

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Factores que afectan la percepción de la altura en tonos de guitarra.....</b>	<b>7</b>
2.1	Factores subjetivos y musicales, <i>11</i>	
2.1.1	Limites psicoacústicos en la percepción de la altura en tonos puros, <i>12</i>	
2.1.2	Percepción de la altura en tonos complejos: armónicos resolubles y efectos de parciales desafinadas, <i>20</i>	
2.1.3	El temperamento musical, <i>27</i>	
2.1.4	Los procedimientos de afinación, <i>31</i>	
2.1.5	Criterio auditivo: Afinación aural y melódica, <i>38</i>	
2.2	Factores Físicos, <i>43</i>	
2.2.1	Inarmonicidad debida a la rigidez de las cuerdas, <i>43</i>	
2.2.2	Inarmonicidad inducida por acoplamiento, <i>46</i>	
2.2.3	Cambios en afinación producidos por pisar las cuerdas, posición de los trastes y compensación, <i>52</i>	
2.2.4	Influencia de los factores en la estimación del patrón de afinación, <i>58</i>	
<b>3</b>	<b>Estimación de la altura virtual en tonos de guitarra.....</b>	<b>61</b>
3.1	Grabación y análisis espectral de tonos de guitarra, <i>63</i>	
3.2	Estimación de las parciales de un tono de guitarra, <i>70</i>	
3.2.1	Frecuencias del punto máximo del espectro, <i>72</i>	
3.2.2	Frecuencia del centroide usando una ventana con un ancho de banda de 20 Hz, <i>77</i>	
3.2.3	Frecuencia del centroide usando una ancho de banda ERB, <i>79</i>	
3.3	Estimación de la altura virtual, <i>81</i>	

**4 Experimentos de afinación.....85**

- 4.1 Experimentos con procedimientos de afinación prescritos, *89*
  - 4.1.1 Procedimiento de afinación usando parciales, *90*
  - 4.1.2 Procedimiento de afinación pisando trastes, *93*
  - 4.1.3 Procedimiento de afinación usando intervalos musicales entre las cuerdas al aire, *97*
  - 4.1.4 Afinación aural vs melódica, *100*
- 4.2 Experimentos con procedimientos de afinación propios de cada sujeto, *102*
  - 4.2.1 Resultados generales, *103*
  - 4.2.2 Afinación de la cuerda de referencia, *109*
  - 4.2.3 Influencia de la cuerda de referencia en el patrón de afinación y variabilidad, *112*
  - 4.2.4 Algunos casos particulares, *116*
  - 4.2.5 Tiempo de afinación, *120*

**5 Conclusiones .....123**

- 5.1 Propagación del patrón de afinación, *125*
- 5.2 Posibles explicaciones en los patrones de afinación observados, *125*
  - 5.2.1 Resultados que pueden ser atribuidos a la rigidez de las cuerdas, *126*
  - 5.2.2 Resultados que pueden ser atribuidos a la deformación de las cuerdas al ser pisadas, *126*
  - 5.2.3 Resultados que pueden ser atribuidos al acoplamiento de las cuerdas con la guitarra, *127*
- 5.5 Relevancia musical de los errores de afinación observados, *128*

**Referencias .....133**

# INTRODUCCIÓN

# CAPÍTULO UNO

## 1 Introducción.

¿Qué tanto se puede decir acerca de la afinación de una guitarra?. Para algunos parece ser un tema que no tiene mucha tela de donde cortar. Un día venía en un transporte público regresando del laboratorio después de pelearme toda la mañana con pequeños micro intervalos mientras desarrollábamos el método de cálculo que serviría para analizar los experimentos de afinación. De repente un señor de alrededor de 40 años empezó a cantar acompañado de una guitarra de la más baja calidad. Sin percatarme al principio de la calidad de su guitarra, quedé sorprendido de la manera como cantaba y ejecutaba la guitarra, disfruté tanto su concierto ambulante que sólo hasta que hubo terminado y empezado a afinar su guitarra para interpretar la siguiente canción, me di cuenta de la mala calidad de su guitarra y su afinación. Por un momento pensé abandonar el proyecto. ¿Realmente vale la pena preocuparse tanto por obtener una afinación perfecta?, ¿Qué tanto se puede decir de la afinación si las desafinaciones son tanto más imperceptibles cuando se tiene una buena interpretación?. La afinación es un elemento más que debe estar al servicio de la música y no un factor de estrés, obsesión y preocupación para el ejecutante. Esta tesis no pretende ser un recetario de afinación en el que se proponga el método de afinación perfecto, ni un método para desarrollar la audición enfocada a la afinación de la guitarra. Simplemente se propone dar ciertas explicaciones del porqué la guitarra es un instrumento tan difícil de afinar lo que dará mucha tranquilidad a las personas obsesionadas con la afinación perfecta. Este trabajo tiene como objetivo dar a entender el comportamiento acústico de la guitarra enfocado a la afinación, así como los mecanismos de percepción que posee una persona para evaluar la afinación de su guitarra.

Cuando decidí realizar este trabajo, pensé abarcar únicamente los procedimientos de afinación como el factor más importante que interviene en la afinación de la guitarra. Un procedimiento de afinación es la serie de pasos que sigue un guitarrista para afinar su instrumento. Cuando hice el planteamiento de la tesis, mi asesor el Dr. Felipe Orduña me planteó la idea de que la problemática en la afinación iba más allá de los procedimientos, que había otros factores que no se podían dejar de lado en un trabajo de esta naturaleza. Ya que él había desarrollado algunos trabajos a cerca de la influencia de las resonancias de la guitarra en la afinación, sabía perfectamente de lo que eso se trataba.

Así que reestructuramos la tesis e incluimos otros factores involucrados en el proceso de afinación.

La tesis está dividida básicamente en dos partes, la teoría y la práctica por así decirlo. Los dos primeros capítulos hablan de la teoría de los factores que intervienen en la afinación de la guitarra clásica, y la elaboración del método de investigación. En los siguientes dos capítulos se exponen los experimentos de afinación y resultados. Se compara la teoría con la práctica para encontrar cuales de los factores son determinantes en la afinación de la guitarra, así como la relevancia musical de estos.

Los factores que intervienen en la afinación se dividen a su vez en dos grandes grupos: factores subjetivos y factores físicos. Los factores subjetivos son los que dependen del ejecutante, como son la percepción, la educación musical, y los procedimientos de afinación. Los factores físicos son los que dependen de la guitarra, es decir del cuerpo sonoro. Entre estos podemos mencionar la inarmonicidad tanto por rigidez de las cuerdas como por acoplamiento de las cuerdas con la guitarra, el entrastado de la guitarra, la compensación y la desafinación producida al pisar las cuerdas.

Dentro de la tesis se utilizan palabras derivadas del inglés que aunque no son palabras del idioma español las utilizamos para conservar el significado original que tienen en inglés, en estos casos aparecerán pies de página indicando el empleo de estas palabras.

Es importante mencionar otras palabras que serán continuamente utilizadas a lo largo de la tesis así como cierta nomenclatura:

*Sujeto* se refiere a una persona que participa en un experimento.

Llamaremos *punte* al hueso que se encuentra en un extremo de la cuerda pegado a la tapa armónica, y *cejuela* llamaremos al hueso que se encuentra en el otro extremo de la cuerda cerca del *clavijero*.

*Afinar* la cuerda A con la cuerda B significa que la cuerda B está previamente afinada y sólo moveremos la clavija correspondiente a la cuerda A que queremos afinar.

## 1 Introducción

Un Cent es la centésima parte de un semitono.

La palabra *traste* tiene dos acepciones, una para nombrar a la barra metálica incrustada en el diapasón y otra para referirnos al espacio donde se debe poner el dedo al pisar una cuerda. El traste I se refiere al primer espacio o a la primera barra metálica según sea el contexto.

Para nombrar cuerdas usaremos números arábigos junto con una pequeña letra "a" (5ª).

Para referirnos a los trastes de la guitarra usaremos números romanos (traste IV).

Para referirnos a la ejecución de armónicos naturales utilizaremos la palabra *arm* seguido del número de traste donde tiene que ponerse el dedo de la mano izquierda. ArmV se refiere al armónico producido al poner el dedo en el traste V de una cuerda.

Para referirnos a los armónicos con respecto de su sonido fundamental utilizaremos la palabra completa (El *segundo* armónico de la 5ª cuerda es el armXII de la 5ª cuerda). En algunas ocasiones serán representados por números arábigos (1,2,3,4,etc.), como en el caso de las tablas.

*Diapasón* tiene dos acepciones, una para nombrar la parte de la guitarra en donde van incrustados los trastes, y otra es el artefacto que produce la nota de referencia, en nuestro caso emplearemos solamente el diapasón en A(440 Hz). Entiéndase esta palabra según el contexto en que se utilice.

La palabra *tono* o *sonido* puede usarse indistintamente aunque estrictamente hablando la palabra *tono* se refiere a un sonido con una altura definida, mientras que un sonido puede no tener una altura definida. *Tono* puede referirse también a un intervalo musical. Entiéndase esta palabra según el contexto en que se utilice.

El término *Temperamento Igual* será en todo momento referido con la siglas TI.

Un *patrón de afinación* es la representación gráfica de una afinación obtenida a partir de las diferencias con respecto al TI de la altura virtual de cada cuerda al aire. Se llamará patrón medido al patrón resultante de la afinación real de un sujeto. Y patrón estimado al patrón obtenido mediante modelos matemáticos.

## *1 Introducción*

Refiérase a esta introducción siempre que tenga duda de algún término o nomenclatura.

Este trabajo contiene algunas fórmulas como referencia para quien tenga interés en saber de donde salen los resultados, sin que esto signifique que sea indispensable entenderlas para comprender la idea central de cada sección.

Al final de esta tesis se encuentra un agradecimiento especial a las personas que participaron activamente en los experimentos, pero aprovecho este espacio además para agradecer a todos los lectores que se tomen la molestia de leer este trabajo, que estoy seguro, será de gran interés.

FACTORES QUE AFECTAN LA PERCEPCIÓN  
DE LA ALTURA EN TONOS DE GUITARRA

CAPÍTULO  
DOS

## **2 Factores que afectan la percepción de la altura en tonos de guitarra.**

Imaginemos que estamos en una sala de conciertos escuchando un recital de guitarra sola. Podemos identificar los elementos que intervienen en este proceso. Primero, tenemos al guitarrista y su *instrumento* que producen la música. Segundo, el *aire* dentro de la sala que propaga el sonido en todas direcciones. Y tercero, nosotros, es decir el *oyente*. Así se forma la siguiente cadena: instrumento - aire - oyente. ¿Que es lo que une a estos tres elementos mientras la música es interpretada? Un cierto tipo de vibración llamado *sonido*, que se propaga por el aire desde un punto a otro y al cual nuestro oído es sensible.

Estos tres elementos son llamados generalmente por los físicos: fuente - medio - receptor. En otras palabras la fuente emite, el medio transmite, y el receptor detecta.

Echemos un vistazo a cada uno de ellos por separado.

Para la fuente, en este caso la guitarra, podemos distinguir distintos componentes: (1) El *mecanismo de excitación*, o sea la acción de pulsar la cuerda. (2) El *elemento vibrador*, es decir la cuerda. Este elemento vibrador de hecho proporciona los armónicos necesarios para lograr ciertas características en el timbre y calidad del sonido. (3) El *resonador*, en el caso de la guitarra es la caja y en especial la tapa armónica cuya función es transformar más eficientemente las oscilaciones de la cuerda en vibraciones sonoras para ser propagadas por el aire y dar al sonido su timbre final.

En el medio podemos hacer dos distinciones, la primera es un *medio propicio* (aire) que transmite el sonido. La segunda, el *entorno* es decir las paredes del recinto, el techo, el piso, la gente del auditorio, etc., que afectan fuertemente la propagación del sonido por medio de la *absorción* y *reflexión* de las ondas sonoras cuya configuración determina la calidad de un recinto acústico.

## *2 Factores que afectan la percepción de la altura en tonos de guitarra*

Finalmente en el oyente encontramos principalmente los siguientes componentes: (1) El *tímpano* que capta las variaciones de presión en el aire que el sonido a llevado hasta el oído y las convierte en vibraciones mecánicas que son transmitidas por medio de los huesillos al (2) *oído interno*, o *cóclea*, en donde las vibraciones son ordenadas de acuerdo con ciertos rangos de frecuencia; estas son tomadas por células receptoras y convertidas en impulsos nerviosos eléctricos. (3) Por ultimo, el *sistema nervioso auditivo* que transmite las señales neuronales al cerebro donde la información es procesada, desplegada en imágenes auditivas en una cierta área de la corteza cerebral, identificada, grabada en la memoria, y eventualmente transmitida a otros centros del cerebro. Estos últimos procesos son los que desembocan en la percepción consciente del sonido musical.

En el proceso de afinación de una guitarra intervienen los mismos elementos que en el complicado proceso auditivo anteriormente descrito. En este capítulo explicaremos los factores que influyen en la afinación de la guitarra agrupándolos en dos categorías derivadas de los elementos involucrados en este proceso de audición:

Aquellos factores que se derivan del oyente, los llamaremos *Factores subjetivos*, ya que la interpretación de un sonido sucede de manera subjetiva en el cerebro, entre ellos se encuentra la percepción de altura de tonos puros y complejos. Y los factores que se derivan de la *fuentes emisora*, es decir de la guitarra, serán referidos como *factores físicos*. Entre estos podemos mencionar la inarmonicidad causada por la rigidez de las cuerdas y el acoplamiento de las cuerdas con el cuerpo de la guitarra; así como el entrastado de la guitarra<sup>6</sup>.

## 2.1 Factores subjetivos y musicales.

Personas de muchas culturas coinciden en que hay principalmente tres sensaciones asociadas con un sonido musical: *altura*, sonoridad y *timbre*. La altura es normalmente definida como la sensación gracias a la cual podemos ordenar un grupo de sonidos en una escala de carácter melódico, desde los "muy graves" hasta los "muy agudos"<sup>1</sup>. La sonoridad es la sensación gracias a la cual podemos ordenar un grupo de sonidos en una escala dinámica que varía desde los "muy suaves" hasta los "muy fuertes". El timbre es la sensación que nos permite distinguir sonidos generados por diferentes instrumentos aun cuando su altura y sonoridad sean iguales.

El asignar una altura, intensidad o timbre a un sonido musical es el resultado de una serie de procesamientos que suceden en el oído y en el cerebro. Por ello resulta difícil realizar mediciones físicas de las sensaciones de manera directa, la medición de estas sensaciones se realiza por medio de experimentos "subjetivos". Cada una de estas *sensaciones* difíciles de medir puede ser asociada en principio a un determinado valor físico del estímulo original o de la onda sonora que sí puede ser medida y expresada numéricamente por métodos físicos. De hecho, la *sensación* de altura está principalmente asociada con la frecuencia fundamental del estímulo original, la sonoridad con la amplitud o energía de la forma de onda, y el timbre con el espectro.

Sin embargo la conexión que hay entre atributos físicos y psicoacústicos es todavía más complicada de cómo se expuso en el párrafo anterior. Cada uno de los atributos físicos del estímulo (frecuencia, amplitud, espectro, envolvente, duración), influye en mayor o menor medida en la percepción de cada uno los atributos psicoacústicos (*sensación* de altura, sonoridad y timbre). Es decir que la *sensación* de altura, por ejemplo, depende *no sólo* de la frecuencia fundamental del estímulo, sino también de la amplitud de la onda sonora, del espectro, de la duración, la envolvente, y demás atributos físicos. Por ejemplo, es posible percibir un cambio de altura en dos sonidos de la misma frecuencia cuando son presentados con diferente intensidad.

Los factores subjetivos que presentamos en esta sección están relacionados en su mayor parte con la percepción de la altura, tanto de tonos puros como complejos.

### 2.1.1 Límites psicoacústicos en la percepción de la altura en tonos puros.

Al igual que casi todos los sonidos de la naturaleza (si no es que todos), un tono de guitarra es un sonido complejo, lo que quiere decir que está compuesto de varios sonidos simples a los que llamamos tonos puros. A cada uno de los sonidos simples que componen un sonido complejo se les da el nombre de parciales o componentes. Comúnmente, a las parciales de un tono complejo se les da el nombre de armónicos, sin embargo es importante aclarar que este término es válido únicamente para parciales cuyas frecuencia guardan una relación armónica con la frecuencia fundamental, en otras palabras, cuando la frecuencia de una parcial es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Cuando un sonido causa un movimiento armónico simple en el tímpano, escuchamos un tono puro que da sensación parecida al sonido de un diapasón. Un tono puro tiene que ser generado por osciladores electrónicos ya que no existe ningún instrumento musical que lo produzca. Aunque la música no este hecha a partir de tonos puros es necesario comenzar a estudiar cómo los percibimos, para poder comprender mejor la percepción de tonos complejos y por ende la percepción musical.

Cualquier intervalo musical puede ser ejecutado de dos maneras distintas. Si se toca una nota después de la otra se dice que el intervalo es *melódico*. Si las dos notas se tocan al mismo tiempo se dice que el intervalo es *armónico*. La *selectividad* y *discriminación* de frecuencias son dos habilidades diferentes cuyos límites psicoacústicos pueden ser medidos y determinados por medio de la comparación armónica y melódica respectivamente de dos tonos puros. La comparación armónica de tonos puros es llamada también *superposición*.

## SELECTIVIDAD DE FRECUENCIAS

Definimos selectividad de frecuencias<sup>I</sup> como la habilidad de un sujeto para resolver<sup>II</sup> las frecuencias de dos o más tonos puros superpuestos. Dicho de otra manera, es la habilidad que nos permite escuchar separadamente cada uno de entre dos o más tonos puros que suenan al mismo tiempo. El concepto de resolución de frecuencias hace referencia a aquellos tonos puros que actúan independientemente en la percepción de un grupo mayor de tonos superpuestos dentro de un sonido complejo. Es importante manejar este concepto de resolución de frecuencias pues será constantemente mencionado a lo largo de este trabajo. La selectividad de frecuencias no implica necesariamente una distinción consciente de los componentes de un tono complejo.

## DISCRIMINACIÓN DE FRECUENCIAS

Definimos discriminación de frecuencias<sup>III</sup> como la habilidad para detectar variaciones de frecuencia a través del tiempo. Es decir, la habilidad para detectar variaciones melódicas en la altura de un tono puro debido a variaciones en la frecuencia del estímulo.

## LIMITES EN LA DISCRIMINACIÓN DE FRECUENCIAS DE TONOS PUROS

Consideremos la habilidad de un individuo para establecer un orden relativo con respecto a la altura entre dos tonos puros de la misma intensidad cuando son comparados melódicamente. Cuando la diferencia en frecuencia entre los dos tonos es muy pequeña, por debajo de cierto valor, ambos tonos son juzgados como si tuvieran la misma altura aunque su frecuencia sea ligeramente distinta, este valor es llamado umbral de diferenciación (*DL*)<sup>IV</sup> o diferencia apenas notable (*JND*)<sup>V</sup>.

---

<sup>I</sup> Del inglés "frequency selectivity".

<sup>II</sup> Del inglés "resolve", "resolvable harmonics", traducido al español como "resolver", "armónicos resolubles". Resolver se refiere a la capacidad que tiene una persona para distinguir separadamente las parciales de un tono complejo.

<sup>III</sup> Del inglés "frequency discrimination".

<sup>IV</sup> Del inglés "Difference Limen DL"

<sup>V</sup> Del inglés "Just Noticeable Difference JND"

### 2.1.1 Límites psicoacústicos en la percepción de la altura en tonos puros.

Siempre que una variación en el estímulo físico cae dentro de un cierto umbral de diferenciación ( $DL$ ), se juzga que la sensación asociada permanece igual; en cuanto esta variación excede la  $DL$ , entonces es posible detectar un cambio en la sensación.

El grado de sensibilidad del mecanismo de percepción de altura a los cambios de frecuencia, depende de la frecuencia, intensidad y duración del tono en cuestión. Varía demasiado de persona a persona en función del entrenamiento musical, y desafortunadamente, depende considerablemente del método de medición empleado.

El umbral de diferenciación para la frecuencia ( $DLF$ )<sup>1</sup> es la mínima diferencia en frecuencia que debe haber entre dos sonidos para poder detectar un cambio de altura, y puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\log(DLF) = a\sqrt{f} + k + \frac{m}{SL}$$

Donde  $f$  es la frecuencia en hertz,  $SL$  es la intensidad en decibeles,  $a$ ,  $k$ , y  $m$  son constantes obtenidas experimentalmente cuyos valores típicos son  $a=0.023$ ,  $k=-0.25$  y  $m=4.3$ .<sup>(2)</sup>

El  $DLF$  expresado en Hertz es menor a frecuencias bajas e incrementa a medida que incrementa la frecuencia central. Se ha encontrado también que el  $DLF$  decrece a medida que la intensidad de la señal aumenta. Es decir que para sonidos con poco volumen, la diferencia en frecuencia para detectar un cambio en la altura es mayor.

Veamos un ejemplo para ilustrar el significado de estos límites. Los músicos están muy familiarizados con el uso del diapasón de 440Hz, por lo que será más claro el ejemplo. Para una frecuencia de 440Hz a 80dB, la mínima diferencia en frecuencia para detectar un cambio de altura es  $DLF = 1.93\text{Hz}$ , esto quiere decir que si tuviéramos dos diapasones de 440 y 442Hz respectivamente y los comparáramos melódicamente detectaríamos una diferencia de altura entre ellos (suponiendo una intensidad de 80dB), sin embargo entre 440Hz y 441Hz no notaríamos la diferencia.

---

<sup>1</sup> Del inglés "Difference limen for frequency DLF"

2.1.1 Límites psicoacústicos en la percepción de la altura en tonos puros.

Para una frecuencia de 440Hz, 1.93Hz equivalen a 7.6 Cents. Esto nos hace suponer que al afinar el armV de la 5ª cuerda con el diapason por medio de eliminación de batimentos podríamos obtener una mayor precisión si logramos obtener batimentos de menos de 1.93 bps (batimentos por segundo), hecho que es perfectamente posible si consideramos que la duración promedio de un tono de guitarra es de 10 segundos aproximadamente para la 5ª cuerda, teóricamente podríamos escuchar un batimento en 10 segundos (0.1 bps = 0.39 Cents).

Frequency Discrimination (DLF Expresado en cents)

		CUERDAS AL AIRE					
		1a	2a	3a	4a	5a	6a
A R M O N I C O S	1	8.7	10.2	11.8	14.2	17.4	21.5
	2	6.5	7.2	8.0	9.3	11.0	13.1
	3	5.9	6.3	6.8	7.6	8.7	10.2
	4	5.7	5.9	6.2	6.8	7.6	8.7
	5	5.7	5.7	5.9	6.3	6.9	7.8
	6	5.9	5.7	5.8	6.0	6.5	7.2
	7	6.1	5.8	5.7	5.8	6.2	6.8
	8	6.3	5.9	5.7	5.8	6.0	6.5
	9	6.6	6.0	5.8	5.7	5.9	6.3
	10	7.0	6.2	5.9	5.7	5.8	6.1

TABLA 2.1. Discriminación de frecuencias

En la tabla 2.1 se presenta el *DLF* para cada armónico de cada una de las cuerdas de la guitarra expresado en Cents. Resulta muy útil para hacer comparaciones con ciertos datos que mostraremos más adelante, pues nos ilustra claramente que los valores menores a los presentados en la tabla no son melódicamente detectables por un oído promedio.

Es importante considerar que estamos hablando de la discriminación de frecuencias para tonos puros, sin embargo, aunque la discriminación de frecuencias para tonos complejos está menos estudiada, se sabe que la habilidad de detectar cambios en la altura de sonidos complejos es mucho mayor que en el caso de tonos puros. Pueden llegar a detectarse cambios de altura por variaciones del orden del 0.2% en la frecuencia fundamental del estímulo que equivale a 3.5 Cents.

### 2.1.1 Límites psicoacústicos en la percepción de la altura en tonos puros.

Tomemos el *DLF* del primer armónico (fundamental) de la 5ª cuerda. Para una sinusoidal de 110Hz, se pueden llegar a detectar variaciones de frecuencia mayores a 17.4 Cents que representan aproximadamente la quinta parte de un semitono. Pero consideremos que un tono de guitarra es un tono complejo, así que es probable que detectáramos variaciones más pequeñas de hasta 3.5 Cents como habíamos mencionado.

#### LIMITES EN LA SUPERPOSICIÓN DE TONOS PUROS

Dos son las teorías de percepción de la altura más importantes que se han desarrollado a lo largo de varios años, una es llamada teoría "espacial", y la segunda es la llamada teoría temporal.

Según la teoría espacial, el oído interno funciona como un analizador de espectro de resolución limitada, de tal forma que distintas frecuencias excitan diferentes lugares de la membrana basilar, resultando así un patrón espacial de actividad neuronal. Para un tono puro de una frecuencia determinada, las oscilaciones máximas de la membrana basilar ocurren sólo en una región limitada de la membrana, cuya posición depende de la frecuencia del tono. En otras palabras para cada frecuencia hay una región de máxima excitación o "región de resonancia" en la membrana basilar. Un cambio en la frecuencia del tono puro causará un cambio de posición de la región activada.

La teoría temporal sugiere que el estímulo evoca un patrón temporal de impulsos nerviosos a lo largo del nervio acústico. Este patrón contiene el código de la estructura temporal de la onda sonora<sup>2-3</sup>.

Los límites en la superposición de tonos puros están íntimamente relacionados con la teoría espacial.

El tímpano oscila ordenado por las variaciones de presión en el aire dentro del canal auditivo. Si estas oscilaciones corresponden a un movimiento armónico simple con una frecuencia y amplitud determinadas entonces escucharemos un tono puro de cierta altura e intensidad. Ahora, si dos tonos puros con diferentes características suenan al mismo tiempo, el tímpano reacciona como si estuviera ejecutando al mismo tiempo dos ordenes independientes dadas por cada uno de los dos tonos puros. El movimiento resultante es la suma de los movimientos individuales como sucedería si cada sonido puro estuviera solo, uno en ausencia del otro.

No sólo el tímpano actuaría de esta manera si no todo el medio y los demás elementos vibrantes. Este efecto es llamado *superposición lineal de dos vibraciones*.

Consideremos la superposición de dos tonos puros con la misma amplitud pero con frecuencias ligeramente distintas,  $f_1$  y  $f_2=f_1+\Delta f$ . La diferencia de frecuencia tiene un valor pequeño. supongamos que es positivo, entonces el tono correspondiente a  $f_2$  es ligeramente más agudo que  $f_1$ . El patrón de vibración del tímpano lo dará la suma de los patrones de cada tono. La superposición resultante es una oscilación con periodo y frecuencia intermedia entre  $f_1$  y  $f_2$  y lentamente modulada en amplitud.

¿Cuál es la sensación del tono resultante en este caso?. El tímpano no sabe y no le interesa si este patrón es realmente el resultado de la suma de otros dos. Él tiene simplemente un patrón de vibración de amplitud variable. Pero algo interesante sucede en el fluido basilar. El patrón de vibración en la ventana oval produce excitación en *dos* regiones de resonancia de la membrana basilar. Si la diferencia en frecuencia  $\Delta f$  entre los dos tonos es *suficientemente grande*, entonces las regiones de resonancia correspondientes estarán *suficientemente separadas* una de otra, y cada una oscilará con una frecuencia correspondiente a cada uno de sus tonos componentes.

De esta manera escucharemos dos tonos por separado de intensidad constante cuyas alturas corresponden a cada una de las alturas de los tonos originales. Esta propiedad de la cóclea de descomponer un patrón de vibración complejo causado por una superposición de tonos en sus componentes originales, es la que hemos designado anteriormente con el nombre de *selectividad de frecuencias*. Por otro lado, si la diferencia  $\Delta f$  es menor a cierto valor, las regiones de resonancia se traslapan y entonces escuchamos un *sólo* tono con una altura intermedia e intensidad modulada o *rítmicamente variable*. En este caso el traslape de regiones de resonancia en la membrana basilar produce un patrón de vibración esencialmente idéntico al movimiento del tímpano. La amplitud modulada del patrón de vibración causa a su vez una sensación de intensidad modulada. Este fenómeno es llamado "batimientos" y es bien conocido por los músicos.

### 2.1.1 Límites psicoacústicos en la percepción de la altura en tonos puros.

La frecuencia resultante del patrón de vibración de los dos tonos es un promedio de sus frecuencias:

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2}$$

Y la frecuencia de los batimientos esta dada por la diferencia de las frecuencias:  $f_B = f_2 - f_1 = \Delta f$

Supongamos ahora que  $f_1$  permanece establemente en la misma frecuencia, mientras lentamente incrementamos la frecuencia  $f_2$  partiendo del unísono donde  $\Delta f = 0$  y  $f_2 = f_1$ . En el unísono se escucha un sólo tono con la altura correspondiente a  $f_1$  pero con una intensidad correspondiente al doble de la amplitud (suponiendo que estén en fase). Cuando vamos poco a poco incrementando la frecuencia  $f_2$  seguimos escuchando un sólo tono pero levemente más agudo cuya altura corresponde al promedio de ambas frecuencias. La intensidad del tono producirá batimientos cada vez más rápidos a medida que se incrementa la frecuencia  $f_2$ . Mientras la frecuencia  $\Delta f$  de los batimientos sea menor a 10Hz aproximadamente los batimientos serán percibidos claramente. Cuando los batimientos excedan digamos los 15Hz, la sensación de batimientos desaparecerá, pasando a ser una especie de aspereza o de sensación desagradable. Cuando  $\Delta f$  sobrepase el llamado límite de selectividad de frecuencias, de repente empezaremos a distinguir dos tonos separados cuyas alturas corresponden a  $f_1$  y  $f_2$ . En ese momento ambas regiones de resonancia en la membrana basilar se habrán separado lo suficiente una de la otra para dar paso a dos alturas diferentes. Sin embargo, en este límite la sensación de aspereza continua, especialmente para sonidos bajos. Sólo cuando se ha sobrepasado una diferencia considerable de frecuencia llamada *banda crítica*  $\Delta f_{CB}$  ("critical band", **CB**), la sensación de aspereza desaparece y ambos tonos pueden distinguirse clara y agradablemente.

Para estudiar la selectividad de frecuencias se mide la mínima separación en frecuencia que debe haber entre dos tonos puros para que sean escuchados separadamente (resolubles). Esta, corresponde aproximadamente al ancho de banda crítica y puede ser calculada mediante la siguiente expresión<sup>1</sup>:

$$ERB = 24.7(4.37F_C + 1),$$

donde  $F_C$  es la frecuencia central en kilohertz.

La mínima separación en frecuencia para que dos tonos puros sean resolubles varía dependiendo de su frecuencia media o central.

Es generalmente un poco más difícil escuchar separadamente las componentes de un tono complejo con más de dos parciales que cuando se trata tan sólo de dos tonos puros. Particularmente para frecuencias debajo de 1000 Hz, la separación en frecuencia entre las componentes adyacentes de un sonido complejo tiene que ser más grande que el que se requiere para un tono con sólo dos componentes.

La separación entre los componentes adyacentes de un sonido complejo es 1.25 veces más grande que la que se necesita para resolver un tono con sólo dos componentes, es decir  $1.25 * ERB_2$ .

---

<sup>1</sup> ERB son las siglas de Equivalent Rectangular Bandwidth.

**2.1.2 Percepción de la altura en tonos complejos: armónicos resolubles y efectos de parciales desafinadas.**

ARMÓNICOS RESOLUBLES

La cantidad de armónicos que pueden ser escuchados separadamente dentro de un sonido complejo depende del ancho de banda crítica explicado en la sección anterior. Aquellos armónicos cuya separación en frecuencia es menor al ancho de banda **ERB** no son resolubles.

Tomemos un tono de guitarra, digamos la 5ª cuerda al aire cuya frecuencia fundamental es 110 Hz. Sus armónicos correspondientes se obtienen al multiplicar la frecuencia fundamental por el *n*-avo armónico.

		ARMÓNICOS DE LA 5ª CUERDA AL AIRE									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frecuencia en Hz		110	220	330	440	550	660	770	880	990	1100
1.25*ERB en Hz		46	61	75	90	105	120	135	150	164	179

**TABLA 2.2. Armónicos Resolubles de la 5ª cuerda.**

En la tabla 2.2 se presentan las frecuencias de los diez primeros armónicos de la 5ª cuerda. En la segunda línea se encuentran los valores en frecuencia de la mínima separación que debe haber entre las parciales adyacentes de un sonido para poder ser resueltas. En gris están marcados los armónicos que no son resolubles. Tomemos un ejemplo para comprender mejor la tabla 2.2. La diferencia en frecuencia que hay entre un armónico y el armónico siguiente es de 110 Hz. Para que el octavo armónico (880 Hz) pueda ser resuelto, necesita haber una separación de por lo menos 150 Hz entre los armónicos 7, 8 y 9. Por esta razón el armónico 8 no es resoluble, pues la separación en frecuencias entre ellos es de 110 Hz. A continuación presentamos una tabla(2.3) de selectividad de frecuencias para las seis cuerdas de la guitarra, que contiene la mínima diferencia en frecuencia que debe haber para que cada armónico sea resoluble.

Selectividad de Frecuencias

1.25\*ERB en Hz

CUERDAS

		1a	2a	3a	4a	5a	6a
A R M Ó N I C O S	Frec. Fund.	330	247	196	147	110	82
	1	75	64	57	51	46	42
	2	120	98	84	70	61	53
	3	164	131	110	90	75	64
	4	209	164	137	110	90	75
	5	253	197	163	130	105	86
	6	298	231	190	150	120	98
	7	342	264	216	170	135	109
	8	387	297	242	189	150	120
	7	431	331	269	209	164	131
10	476	364	295	229	179	142	

**TABLA 2.3. Selectividad de frecuencias y armónicos resolubles de cada cuerda.**

EL FENÓMENO DE LA FUNDAMENTAL OMITIDA:

Consideremos un ejemplo: imaginemos un tono complejo generado por pequeños pulsos (clics) que ocurren 200 veces por segundo. Este sonido produce una sensación de altura grave que es muy similar a la altura de un tono puro de 200 Hz pero con un timbre penetrante. Las frecuencias de los armónicos que componen este tono son 200, 400, 600, 800...HZ. Sin embargo si se filtra el sonido de tal manera que el armónico de 200 Hz quede omitido, la altura percibida no cambia; lo único que resulta distinto es un leve cambio en el timbre de la nota percibida. De hecho se pueden eliminar todos, a excepción de un pequeño grupo de armónicos de mediana frecuencia, y la altura grave se seguirá escuchando a pesar de que su timbre haya cambiado marcadamente.

Una de las propiedades más notables del sistema auditivo es la habilidad de extraer una sensación de altura de un tono complejo. Cuando las componentes de un tono complejo están relacionadas armónicamente entre si, la altura del tono complejo corresponde a la altura de "la fundamental omitida"<sup>3</sup>.

### 2.1.2 Percepción de la altura en tonos complejos

Varios son los nombres que se usan para referirse a la altura de un tono complejo (independientemente de que esté o no presente la componente fundamental): *altura de la fundamental omitida, altura residual o residuo, altura periódica, altura musical y altura virtual*. Nosotros usaremos el termino *altura virtual* para referirnos a la altura de un tono complejo.

Aun cuando la componente fundamental de un tono complejo esté presente la altura de dicho tono está determinada generalmente por otros armónicos distintos del fundamental. La altura virtual corresponde a lo que percibimos normalmente como la altura de un tono complejo.

Cuando escuchamos un tono de guitarra, la altura que percibimos no depende solamente de la frecuencia fundamental, sino de la combinación de todos sus armónicos; especialmente hablando de las notas más graves. Supongamos que un determinado afinador electrónico toma en cuenta solamente la frecuencia fundamental para determinar si una cuerda está afinada. Puede darse el caso en el que el afinador indique que una cuerda está afinada y sin embargo un sujeto la perciba desafinada debido a las frecuencias de sus demás armónicos.

#### DISCRIMINACIÓN DE LA ALTURA EN TONOS COMPLEJOS

Cuando el ritmo de repetición de la forma de onda de un sonido complejo cambia, todos sus componentes cambian de frecuencia en la misma proporción, escuchando así cambios en la altura virtual. La habilidad para detectar dichos cambios de altura en un tono complejo es mayor que la habilidad para detectar cambios en un tono puro e incluso que la habilidad de detectar cambios en cualquier componente sinusoidal del tono complejo. Esto indica que la información de los diferentes armónicos es combinada para la percepción de la altura virtual. Por esta razón, la discriminación de la altura en tonos complejos resulta ser mucho más fina, se pueden detectar cambios en el ritmo de repetición del orden de 0.2% para una frecuencia fundamental de 100-400 Hz.

## TEORIAS DE PERCEPCIÓN DE TONOS COMPLEJOS

Existen varias teorías que tratan de explicar la altura virtual. Las teorías espectrales proponen que la percepción de la altura de un tono complejo involucra dos etapas. La primera es un análisis que determina las frecuencias de los componentes sinusoidales del tono complejo. La segunda etapa consiste en un patrón reconocedor que determina la altura del tono complejo basado en sus componentes resolubles. En esencia, este patrón reconocedor trata de encontrar la serie armónica que mejor encaje con las frecuencias de los componentes resolubles, la frecuencia fundamental que corresponde a esta serie armónica determina la altura percibida del tono complejo. Para estas teorías, los armónicos resolubles más bajos determinan la altura percibida.

Las teorías temporales por otro lado, asumen que la determinación de la altura se basa en el patrón temporal de la forma de onda en un punto de la membrana basilar que responde a los armónicos más altos. Se asume que la altura esta relacionada con los intervalos de tiempo que hay entre cada uno de los puntos máximos que forman la envolvente de la forma de onda, ya que los impulsos nerviosos tienden a ocurrir en dichos puntos. Estos intervalos de tiempo estarán presentes en el patrón temporal de impulsos neurales que determinan la altura. Para estas teorías los armónicos irresolubles más altos contribuyen sustancialmente a la percepción de la altura escuchada.

Algunas teorías recientes, llamadas teorías espectro-temporales, asumen que tanto el análisis temporal como el análisis de frecuencias están involucrados en la percepción de la altura.

## ALTURA DE TONOS COMPLEJOS INARMONICOS

Recordemos que un armónico es la componente de un tono complejo cuya frecuencia es múltiplo exacto de la frecuencia fundamental. Consideremos que la frecuencia fundamental de la 5ª cuerda al aire es 110 Hz, si una de sus parciales tiene una frecuencia de 440 Hz entonces dicha parcial puede ser llamada *cuarto armónico* ya que  $110 * 4 = 440$ . Pero si dicha parcial tuviera una frecuencia de 444 Hz, no podría ser llamada armónico ya que  $110 * 4 \neq 444$ .

### 2.1.2 Percepción de la altura en tonos complejos

Sin embargo por razones prácticas, las parciales casi armónicas que produce un instrumento como la guitarra son llamadas armónicos, a pesar de que tengan casi siempre un cierto grado de inarmonicidad. Más adelante profundizaremos más en el tema de la inarmonicidad y algunas de sus causas.

Un tono cuyas parciales tienen frecuencias de 800, 1000, y 1200 Hz tendrá una altura virtual correspondiente a su fundamental omitida de 200 Hz (como si las parciales fueran los armónicos 4, 5 y 6). Si cada una de sus parciales se incrementa 20 Hz, entonces ya no tendremos ningún armónico exacto de ninguna frecuencia fundamental alrededor de 200 Hz. El sistema auditivo entonces, aceptara sus parciales como "casi armónicas" identificando así una altura virtual levemente por encima de 200 Hz que es aproximadamente:

$$\frac{1}{3} \left( \frac{820}{4} + \frac{1020}{5} + \frac{1220}{6} \right) = 204 \text{ Hz}$$

Tal parece que el sistema auditivo busca un "cercano factor común" en las frecuencias de sus componentes<sup>3</sup>. En la vida cotidiana podemos estar expuestos a dos o más tonos complejos simultáneamente y tenemos la capacidad de distinguir cada uno de ellos. Entonces el mecanismo de percepción de la altura debe tener alguna manera de agrupar todas las parciales y decidir cual de ellas corresponde a la serie armónica de un tono y cuales a la serie armónica de otro tono. Una manera de explicar este hecho es basándose en la teoría de Goldstein<sup>I</sup> y utilizando el concepto de "coladera armónica"<sup>II</sup>. Una parcial sólo será aceptada como parte de una serie armónica dada, si su frecuencia cae dentro de un determinado rango, alrededor de la frecuencia de dicho armónico<sup>5</sup>.

Si una de las parciales de un tono complejo se desafina por arriba o por debajo del valor de su armónico correspondiente, se logrará detectar un cambio en la percepción de la altura. Se ha encontrado que una variación en la frecuencia de una parcial produce una variación lineal en la percepción de la altura del tono complejo, siempre y cuando las variaciones en dicha parcial sean menores al 3%. Para armónicos desafinados más allá del 3%, las variaciones de altura en el tono complejo son más pequeñas, y las variaciones de más del 6% casi no afectan a la percepción de altura del tono complejo.

---

<sup>I</sup> Goldstein (1973)

<sup>II</sup> Duifhuis et al., 1982; Scheffers, 1983; Grandori, 1984

Esto sugiere que la hipotética "coladera armónica" acepta parciales cuya frecuencia caiga dentro de  $\pm 3\%$  de su valor armónico correcto.

#### PRINCIPIOS DE DOMINANCIA<sup>1</sup>

¿Cuáles componentes en un sonido complejo son más importantes en la determinación de la altura virtual? El grado en que un determinado armónico influye en la percepción de la altura virtual es llamado *dominancia*.

Cuando algún armónico de un tono complejo está ligeramente desafinado o alejado de su valor armónico, este puede provocar un cambio en la percepción de la altura virtual de del tono complejo. Esta variación en la altura virtual es aproximadamente una función lineal de la variación en frecuencia de dicha parcial siempre y cuando la variación en la parcial sea menor al 3%. Para variaciones mayores a  $\pm 3\%$ , la parcial desafinada tendrá progresivamente menos efecto en la percepción de la altura virtual.

La altura virtual puede ser calculada como un promedio ponderado de las alturas virtuales producidas por las parciales individuales, es decir:

$$H = \sum_{m=1}^n w_m f_m / m$$

Donde  $H$  es el valor de la altura virtual,  $n$  es el número de parciales,  $w_m$  es la dominancia asociada con el  $m$ -avo componente con frecuencia  $f_m$ , considerando:

$$\sum_{m=1}^n w_m = 1$$

---

<sup>1</sup> Del inglés "Dominance", traducido al español como "Dominancia", se ha decidido utilizar este término aunque no sea muy correcto en la lengua castellana para conservar el significado original de la palabra en inglés. La dominancia de un armónicos se refiere a la medida en que dicho armónico contribuye en la percepción de la altura de un tono complejo.

### 2.1.2 Percepción de la altura en tonos complejos

Cuando el  $i$ -avo componente es movido de su valor armónico en una cantidad  $\Delta f$ , la variación en la altura virtual es  $\Delta H = w_i \Delta f / i$ .

Para tonos complejos con armónicos de igual amplitud y con frecuencias fundamentales de 100, 200, 400 Hz, los armónicos dominantes caen siempre dentro los seis primeros armónicos. Recordemos que la 6ª y 5ª cuerdas al aire tienen frecuencias de 82 y 329 Hz respectivamente, lo que quiere decir que los armónicos dominantes para la determinación de la frecuencia de un tono de guitarra son únicamente los seis primeros. Sin embargo se reportan diferencias considerables de persona a persona con respecto a cual de los armónicos dominantes tiene más peso. Para algunas personas el primer armónico es el más dominante mientras que para otras es el segundo o algún otro.

La dominancia de un armónico decrece marcadamente cuando la intensidad de dicho armónico es reducida por debajo del nivel de sus armónicos adyacentes y aumenta cuando su intensidad esta por encima de la de sus armónicos adyacentes<sup>7</sup>. En algunos tonos de la guitarra, el segundo y tercer armónicos son los que tienen mayor nivel de intensidad, incluso mayor que la fundamental, por lo que contribuirán en mayor grado a la percepción de la altura. En estos casos, el segundo y tercer armónico de un tono de guitarra tendrán mayor dominancia en la determinación de la altura debido a su nivel de intensidad.

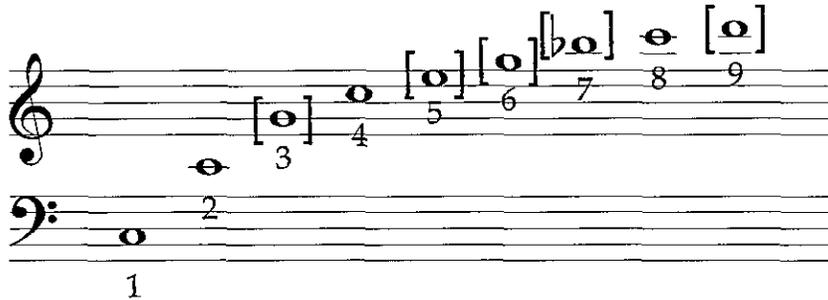
### 2.1.3 El temperamento musical.

Frecuentemente nos olvidamos de que existen otros sonidos además de los 12 que componen el sistema musical occidental, sobretodo aquellas personas que no se han acercado al estudio de la acústica musical. Aunque la naturaleza nos provea de una cantidad infinita de sonidos, las personas que cuentan únicamente con un piano para hacer música, sólo tienen 12 sonidos disponibles dentro de una octava para jugar con ellos. Es decir, en un piano nunca podremos sonar la cantidad de sonidos que se necesitarían para producir un glissando en un violín.

El teclado constituye un excelente recurso pedagógico gracias a las posibilidades gráficas que tiene. En el teclado es fácil construir acordes, comprender intervalos y encontrar enarmonías, pero desde cierto punto de vista consiste un obstáculo para comprender ciertos fenómenos sonoros. El teclado no nos permite darnos cuenta que puede existir más de un do, es decir que cualquiera de entre varias frecuencias distintas (523 Hz, 522 Hz, 521 Hz) podría ocupar la tecla que corresponde al do en el teclado. ¿Cómo decidir cual de ellas deberá ocupar dicho lugar? Esto nos impide comprender que un intervalo de siete octavas no es igual que un intervalo de doce quintas, porque en el teclado esto no es evidente. Si sobre el teclado encadenamos siete octavas, llegaremos siempre a la misma tecla a la que llegaríamos con un encadenamiento de doce quintas partiendo de la misma nota.

La naturaleza nos ha regalado intervalos musicales que resultan muy agradables a nuestros oídos, me estoy refiriendo a los intervalos que se derivan de la serie armónica natural (figura 2.1). La serie armónica esta presente en los sonidos producidos por una cuerda o por una columna de aire. Una cuerda tiene varios modos de vibración de los que se desprende cada uno de los armónicos que componen su sonido, estos guardan una relación armónica entre sus frecuencias.

*Serie armónica natural\*\*\**



RELACIÓN	INTERVALO MUSICAL
2/1	Octava
3/2	Quinta
4/3	Cuarta
5/4	Tercera mayor
6/5	Tercera menor
8/7	Tercera menor pequeña
9/8	Tono

**FIG. 2.1. Serie armónica natural.**

Cada intervalo puede ser representado por la relación matemática que hay entre dos frecuencias. Pero visto de una manera más sencilla, el numerador y el denominador contienen el número de armónico de los sonidos que componen dicho intervalo. Es decir que entre el tercer y segundo armónicos de cualquier sonido existe una relación de frecuencias de 3/2 cuyo intervalo musical corresponde a la quinta. En una guitarra, el segundo armónico corresponde al armXII, y el tercer armónico al armVII.

Matemáticamente encadenar dos intervalos equivale a multiplicarlos, de tal forma que siete octavas se puede expresar como  $2^7=128$ , y doce quintas se puede expresar como

---

\*\*\* Los sonidos de la serie armónica están representadas en el pentagrama para una mejor comprensión del lector. Sin embargo, es importante aclarar que no todos los sonidos que se desprenden de la serie armónica pertenecen al TI. Si tomamos la convención de que las frecuencias de las notas representadas en el pentagrama corresponden a las del TI, entonces la representación de cada nota de la serie armónica en el pentagrama constituye una aproximación. Por esta razón, las notas que no coinciden con el TI las hemos encerrado entre corchetes [ ].

$(3/2)^{12}=129.75$ . Como podemos ver, el intervalo de doce quintas es más grande que el intervalo de siete octavas. El excedente que resulta de dos encadenamientos de intervalos es llamado *coma*. El excedente que resulta de encadenar doce quintas y siete octavas se llama *coma pitagórica* ( $531441/524288$ ) que equivale aproximadamente a un octavo de tono.

El problema aparece al momento de afinar un instrumento de teclado donde únicamente hay doce teclas disponibles para cada nota al interior de una octava. Si queremos dejar las octavas justas, tendremos que sacrificar algunas notas para poder cerrar bien el círculo de quintas. A lo largo de la historia de la música se han encontrado distintas maneras de resolver este problema. Consiste en ajustar las quintas de tal manera que el intervalo de doce quintas sea igual a siete octavas. Dado que doce quintas exceden a siete octavas, tendremos que utilizar quintas levemente más pequeñas que la quinta de la serie armónica. La manera de repartir la coma pitagórica, dicho de otra manera, a la manera de reducir cada quinta para llegar bien a las siete octavas se llama Temperamento. Si reducimos solamente una de las doce quintas, esta quedara demasiado desafinada dando como resultado un intervalo al que le llaman *lobo*. Por esta razón hay que reducir varias quintas para que el efecto no sea notorio.

Podemos agrupar los intervalos musicales en dos grandes categorías: los intervalos *justos* (o *puros*) son aquellos que pertenecen a la serie armónica natural; los intervalos *temperados* son todos los restantes. Afinar, estrictamente hablando, significa dejar justos los intervalos de un sistema, mientras que temperar significa dejarlos, por así decirlo, un poco desafinados. Los intervalos temperados se dividen a su vez en: *anchos* son aquellos más grandes que los intervalos justos, y los *angostos* son más pequeños que los intervalos justos.

Se han desarrollado una gran cantidad de temperamentos a través de la historia que podemos agrupados en diversas categorías: mesotónicos, buenos temperamentos, temperamentos iguales, etc. Sin embargo nosotros sólo nos ocuparemos de uno de ellos conocido como "*Temperamento Igual*".

Existen varios temperamentos "iguales", pero generalmente el término "*Temperamento Igual*" se refiere a un temperamento de doce sonidos que tiene como finalidad dividir la octava en doce partes iguales, de esta manera la coma pitagórica queda repartida equitativamente entre las doce quintas.

### 2.1.3 El temperamento musical

En el temperamento igual, el intervalo de doce quintas sí es igual al de siete octavas<sup>8</sup>. En adelante usaremos la abreviatura TI para referirnos al Temperamento Igual.

El intervalo de semitono del temperamento igual se puede expresar como  $2^{1/12}$ :

$$\sqrt[12]{2} = 1.059463$$

De tal forma que para obtener la frecuencia de una nota, basta con multiplicar la frecuencia del semitono anterior por la raíz doceava de dos ( $2^{1/12}$ ).

Como sabemos, la guitarra moderna es un instrumento temperado. En la guitarra, el TI está presente en la disposición de los trastes, pero no necesariamente lo está en la relación entre cuerda y cuerda. Ya que su entrastado es fijo (figura 2.2), se ha tenido que decidir exactamente en donde poner cada traste, este hecho nos imposibilita para tocar en algún temperamento diferente cada vez. Sin embargo la relación interválica que existe entre cuerda y cuerda al aire si esta sujeta a la voluntad del guitarrista. La relación que existe entre las distancias de cada traste al puente, es inversamente proporcional a la relación que hay entre las frecuencias que producen. Es decir que para obtener la distancia que hay del puente al primer traste, basta con dividir la distancia que hay de puente a puente entre  $2^{1/12}$ . Si el tiro de una guitarra es de 650mm la distancia del puente al primer traste será  $650/1.05946=613\text{mm}$ .

Entrastado de la Guitarra.

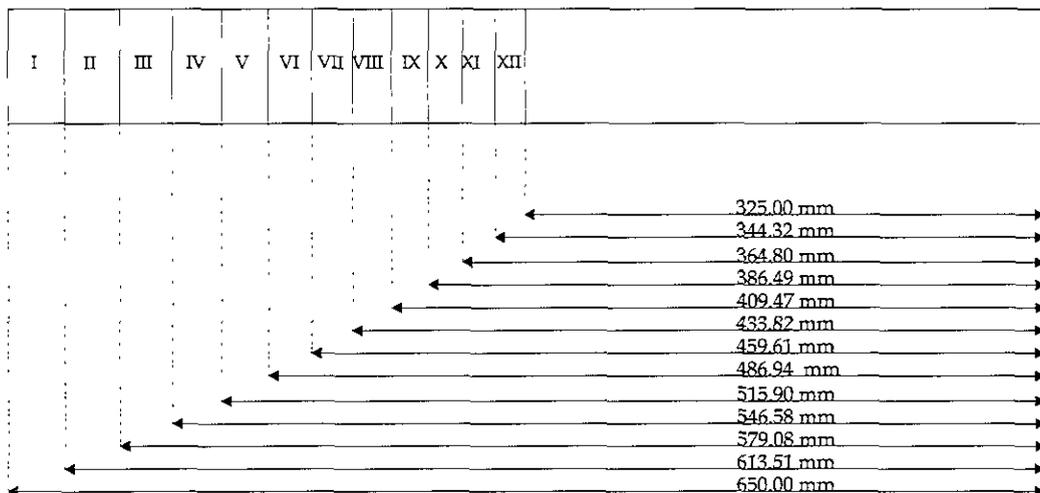


FIG. 2.2. Entrastado de la guitarra.

### 2.1.4 Los procedimientos de afinación.

Dado que los trastes de una guitarra están fijos, el temperamento de una guitarra sólo puede variar en función de la disposición interválica de las cuerdas al aire. Análogamente a un temperamento, a la manera como un guitarrista afina las cuerdas al aire le llamaremos "Procedimiento de afinación", este concepto será frecuentemente utilizado a lo largo de este trabajo por lo que será importante precisar su significado.

Para entender mejor este concepto describiremos dos procedimientos de afinación muy diferentes entre si, uno de ellos hace uso de la utilización de armónicos, y el otro de unísonos pisando las cuerdas en los trastes V y IV (método standard del quinto traste).

Procedimiento #1<sup>1</sup>:

1. Se *afina* el armV de la 5ª cuerda con el diapasón.
2. Se *afina* el armV de la 6ª cuerda con el armVII de la 5ª.
3. Se *afina* el armVII de la 4ª cuerda con el armV de la 5ª.
4. Se *afina* el armVII de la 3ª cuerda con el armV de la 4ª.
5. Se *afina* la 2ª cuerda al aire con el armVII de la 6ª.
6. Se *afina* la 1ª cuerda al aire con el armVII de la 5ª.

Procedimiento #2

1. Se *afina* el armV de la 5ª cuerda con el diapasón.
2. Se *afina* la nota "la" de la 6ª cuerda pisada en el traste V con la 5ª cuerda al aire.
3. Se *afina* la 4ª cuerda al aire con la nota "re" de la 5ª cuerda pisada en el traste V.
4. Se *afina* la 3ª cuerda al aire con la nota "g" de la 4ª cuerda pisada en el traste V.

---

<sup>1</sup> Véase la introducción para entender nomenclatura: armV es el armónico natural pulsando la 5ª cuerda en el traste V. El diapasón tiene una frecuencia de 440 Hz.. Afinar A con B significa que la cuerda B está previamente afinada.

### 2.1.4 Los procedimientos de afinación

5. Se *afina* la 2ª cuerda al aire con la nota "b" de la 3ª cuerda pisada en el traste IV.

6. Se *afina* la 1ª cuerda al aire con la nota "e" de la 2ª cuerda pisada en el traste V.

Ambos procedimientos pueden ser afinados por comparación melódica (afinación melódica), o por eliminación de batimentos (afinación aural). Creemos que la eliminación de batimentos constituye un método de afinación más preciso, como se mencionó en la sección de discriminación de frecuencias (2.1.1).

Con base en la descripción de un procedimiento se puede estimar la frecuencia de cada cuerda. Las frecuencias para cada procedimiento aparecen en la tabla 2.4.

Frecuencias de las cuerdas al aire en Hz  
CUERDAS

	1a	2a	3a	4a	5a	6a
Proc. #1	330.00	247.50	195.56	146.67	110.00	82.50
Proc. #2	329.63	246.94	196.00	146.83	110.00	82.41

**TABLA 2.4. Estimación de las frecuencias para los procedimientos 1 y 2.**

Como podemos ver, a excepción de la 5ª cuerda, las demás no coinciden en frecuencia. Un par de guitarristas que toquen a dúo, no pueden pretender que sus guitarras queden igualmente afinadas si utilizan procedimientos de afinación completamente diferentes. Hay que aclarar que por el momento estamos tratando los procedimientos de afinación desde un plano teórico, como veremos más adelante, las frecuencias obtenidas mediante estimaciones teóricas no siempre coinciden con las frecuencias obtenidas en una afinación real pero conservan un patrón similar. La razón de esto es que los procedimientos de afinación no son el único factor que interviene en la problemática de la afinación, es decir que hay una serie de factores que en mayor o menor medida determinan la afinación de una guitarra.

Para analizar de manera más clara cada procedimiento de afinación y sus relaciones interválicas, elaboramos unas gráficas que presentan las diferencias en Cents de cada cuerda con respecto al TI.

2.1.4 Los procedimientos de afinación

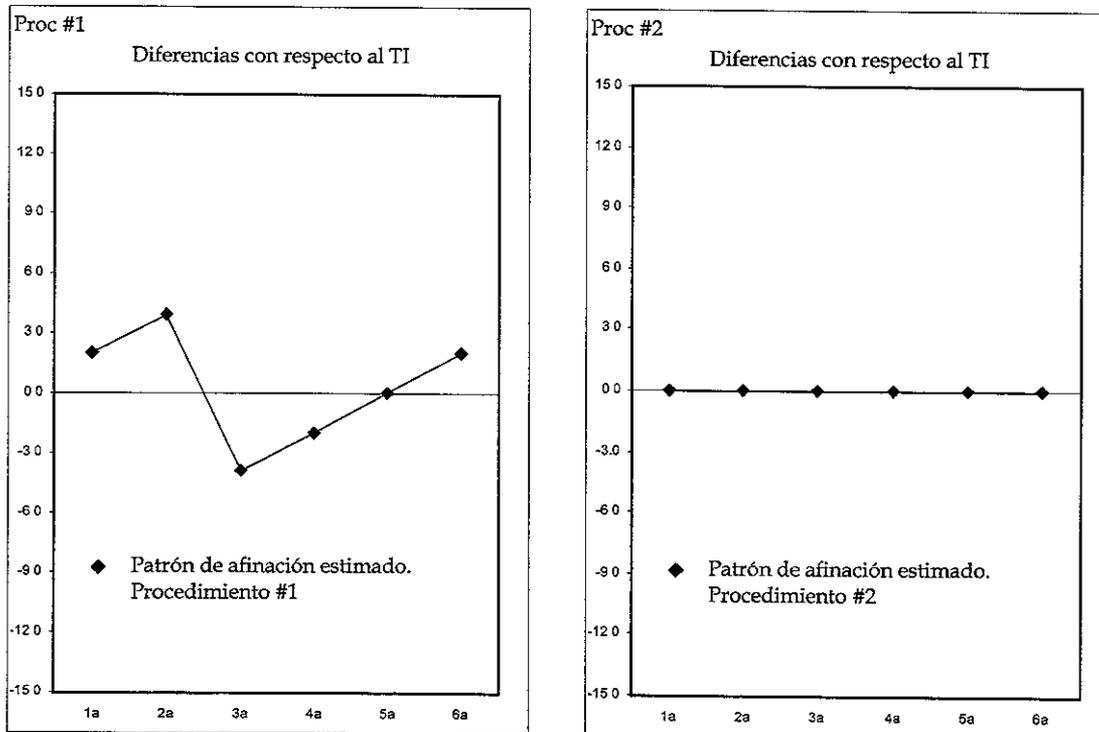
Cada procedimiento de afinación genera una figura diferente en la gráfica. A la figura de cada procedimiento que se genera de las diferencias con respecto al TI les llamaremos en adelante *patrón de afinación*.

Si nos fijamos, el procedimiento #1 hace uso de intervalos de la serie armónica natural, mientras que el procedimiento #2 hace uso de intervalos del TI, por el simple hecho de que para afinar cada cuerda hubo necesidad de emplear el entrastado de la guitarra. Por ende todas las frecuencias resultantes del procedimiento #2 tienen una diferencia de 0.0 Cents con respecto al TI. A continuación presentamos la misma tabla anterior pero expresada en diferencias con respecto al TI.

**Diferencias con respecto al TI en Cents**  
**CUERDAS**

	1a	2a	3a	4a	5a	6a
Proc. #1	2.0	3.9	-3.9	-2.0	0.0	2.0
Proc. #2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**TABLA 2.5. Diferencias con respecto al TI. Procedimientos 1 y 2.**



**FIG. 2.3. Patrones de afinación estimados de los procedimientos 1 y 2.**

#### 2.1.4 Los procedimientos de afinación

Si comparamos los dos patrones de afinación de cada procedimiento, podemos pensar en la conveniencia de utilizar el #2, pues teóricamente este procedimiento y sus intervalos se ajustan perfectamente al TI, quedando por lo tanto todas las octavas justas. Desafortunadamente, más adelante veremos que este procedimiento presenta otros problemas que lo hacen igual de conveniente o inconveniente que los demás. Cada procedimiento tiene sus características propias. De hecho evaluar la conveniencia de cada procedimiento no es el propósito de este trabajo.

A continuación presentamos algunas características del procedimiento #2 con la finalidad de ejemplificar el análisis interválico que se puede obtener a partir de las gráficas de la figura 2.3.

Consideremos para este propósito los siguientes intervalos en orden de importancia: unísono, octava, quinta, cuarta, tercera mayor. Cada intervalo puede ser desafinado hasta un punto en que se convierta en un intervalo lobo. Un lobo se define como un intervalo tan desafinado que se considera inútil en la ejecución musical. La cantidad que un intervalo puede ser desafinado sin llegar a convertirse en un intervalo lobo es diferente para cada intervalo. Existen ciertas reglas derivadas de la tradición histórica que definen el punto en que un intervalo desafinado es considerado como lobo:

Un intervalo de unísono u octava es considerado lobo si se altera aunque sea un poco de su afinación justa.

Un intervalo de quinta o cuarta es considerado lobo si se altera más de un medio de coma pitagórica de su afinación justa. (12 Cents)

Un intervalo de sexta mayor, sexta menor o tercera mayor es considerado lobo si se altera más de una coma sintónica de su afinación justa. (22 Cents)

Un intervalo de tercera menor ancha no se considera lobo porque se transforma en una tercera menor pequeña cuyos armónicos en conflicto son tan agudos que disturban la percepción armónica del intervalo.<sup>15</sup>

La tercera mayor es un intervalo de mucha importancia pues es el que da el color a la triada mayor. Por ejemplo, si comparamos una triada mayor del TI con uno de la serie armónica natural nos daremos cuenta que el acorde mayor del TI es mucho más agresivo debido a que la tercera mayor es más grande que la tercera mayor de la serie armónica por 13.6 Cents. El tamaño de las terceras mayores es lo que da la característica a un determinado temperamento, por ejemplo, los *buenos temperamentos* tienen la característica de ir haciendo las terceras mayores cada vez más anchas conforme uno se aleja en el círculo de quintas de la tonalidad en que está afinado el temperamento. Es decir que si un buen temperamento está afinado en Do mayor, el acorde de Do mayor será sumamente consonante ya que su tercera mayor tiende a ser justa mientras que un acorde de Fa# Mayor, que está muy lejos de Do en el círculo de quintas, sonará más disonante y agresivo debido a que su tercera mayor es demasiado ancha.

Análogamente a las características de los temperamentos, los procedimientos de afinación en la guitarra también presentan una característica propia debido a los intervalos que se desprenden del mismo. Un ejemplo de ello resulta cuando después de afinar una guitarra nos damos cuenta que algunos acordes suenan mejor que otros, esta es una característica propia de dicho procedimiento y no debemos pensar que quedó mal afinada pues resulta imposible lograr que todos los acordes sean consonantes. Esta es la razón de que muchos guitarristas tarden horas afinando sin darse cuenta de que han caído en un círculo interminable en el que al tratar de corregir un acorde otro se desajusta. Es mejor pensar en esos acordes desafinados como una característica de la afinación que nos proporciona un color diferente para cada acorde aunque para algunos esto no sea muy convincente.

### 2.1.4 Los procedimientos de afinación

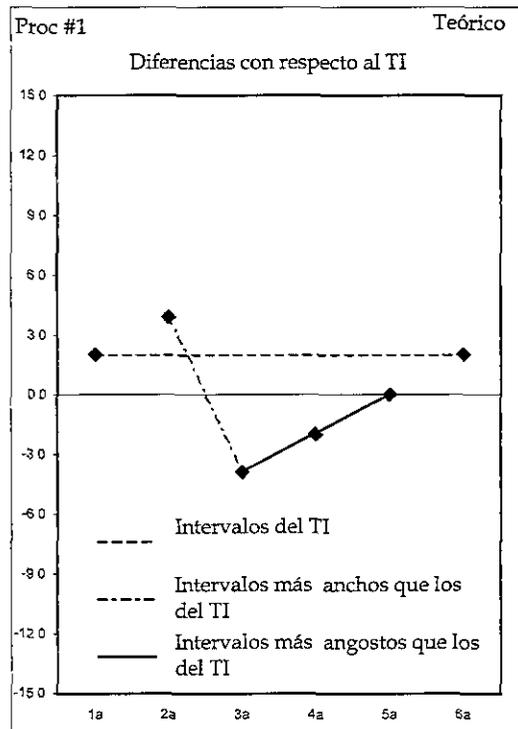


FIG. 2.4. Análisis interválico del proc. #1.

El tipo de gráficas presentadas en la figura 2.3 y 2.4 nos ayudaran a descubrir dichas características. La cualidad de los intervalos esta representada por la inclinación de la línea trazada entre dos puntos cualesquiera de la gráfica. Cuando la línea es horizontal -----(6<sup>a</sup>-1<sup>a</sup>) significa que los distintos intervalos que se forman entre esas dos cuerdas pertenecen al TI. Cuando la línea se inclina hacia arriba \_\_\_\_\_(5<sup>a</sup>-3<sup>a</sup>) los intervalos son más angostos que los del TI, mientras que cuando la línea se inclina hacia abajo .....(3<sup>a</sup>-2<sup>a</sup>) el intervalo es más ancho que el del TI.

Comenzaremos analizando las octavas y unísonos de la figura 2.4. Las octavas que se forman entre la 6<sup>a</sup> y 1<sup>a</sup> cuerdas son octavas justas pues el intervalo de octava en el TI es justa. Por el contrario las octavas que se forman entre la 5<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup> cuerdas son angostas. Los unísonos que se forman entre la tercera y segunda cuerdas no son justos. Si usted utiliza este procedimiento de afinación no puede pretender que al comparar la nota "si" de la 2<sup>a</sup> cuerda al aire este afinada con respecto del "si" de la 3<sup>a</sup> cuerda pisada en el traste IV. Los unísonos que se forman entre la 2<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup> cuerdas serían justos si la línea entre ellas fuera horizontal.

#### 2.1.4 Los procedimientos de afinación

Recordemos que las quintas del TI son angostas (2 Cents), las cuartas del TI son anchas (2 Cents) y las terceras mayores son anchas (14 Cents). Las quintas que se forman entre la 5ª y la 4ª cuerdas son más angostas que las del temperamento igual, mientras que las quintas que se forman entre 3ª y 2ª cuerdas son ligeramente anchas. Las cuartas entre 5ª y 4ª cuerdas son puras mientras que las cuartas que se forman entre 3ª y 2ª cuerdas son más anchas que en el TI. Las terceras mayores que se forman entre 3ª y 2ª cuerdas son más anchas que las del TI, mientras que las que se forman entre 4ª y 3ª cuerdas son menos anchas que las del TI. Es decir que el acorde de sol Mayor en primera posición sonará mucho más agresivo y disonante que un acorde de Mi mayor en primera posición debido a las terceras que contiene cada uno de ellos.

Hacer un análisis interválico completo de cada procedimiento resultaría exhaustivo, con este ejemplo sólo se pretende mostrar el funcionamiento de las gráficas ya que serán utilizadas más adelante y dejar claro que cada procedimiento tiene características propias y por ende ventajas y desventajas, que lo hacen más o menos viable.

### 2.1.5 Criterio auditivo: Afinación aural y melódica.

#### DEFINICIÓN

Hasta ahora hemos hablado de los procedimientos de afinación, que son la serie de pasos que sigue un guitarrista para afinar su instrumento. En esta sección se introduce un nuevo concepto, "Criterio auditivo".

El criterio auditivo es el mecanismo por medio del cual el guitarrista evalúa si un intervalo musical está afinado. SE puede evaluar la afinación de un intervalo musical de dos maneras distintas, por comparación melódica o comparación armónica; en otras palabras, tocando dos sonidos ya sea uno después del otro o ejecutándolos simultáneamente.

La afinación aural se basa en el fenómeno de amplitud modulada conocido como batimientos discutido en la sección 2.1.2. Recordemos que cuando dos sonidos puros tienen casi la misma frecuencia el oído no puede resolver cada uno de ellos, por el contrario se escucha un sólo sonido de intensidad variable (batimientos) cuya frecuencia es el promedio de las frecuencias de cada sonido puro. Este fenómeno es aprovechado por nuestro oído para evaluar si un intervalo armónicamente está o no afinado.

La afinación melódica se basa en la comparación de alturas, generalmente por medio de unísonos, pero puede ser por medio de cualquier otro intervalo musical.

Imaginemos un intervalo formado por dos tonos complejos, cada tono complejo genera su propia serie armónica. Llamamos armónicos coincidentes a aquellos de entre dos tonos complejos que coinciden en frecuencia. El oído humano es capaz de detectar la ausencia o presencia de batimientos generados por dos armónicos coincidentes o casi coincidentes cuando dos tonos complejos se ejecutan simultáneamente. Esta habilidad se puede aprender por entrenamiento y recibe el nombre de *enfoque* auditivo ya que el oído debe *enfocarse* hacia una cierta región del espectro armónico resultante, la cual suele tener un nivel de intensidad considerablemente bajo.

### 2.1.5 Criterio auditivo.

Los guitarristas están familiarizados con la ejecución de armónicos naturales. En el caso de la guitarra, para afinar auralmente dos cuerdas no es indispensable hacer uso del enfoque auditivo, pues al ejecutar armónicos naturales se está aislando el armónico deseado sin necesidad de escuchar el tono complejo. El cuarto armónico de la 5ª cuerda (armV) coincide con el tercer armónico de la 4ª cuerda (armVII), estos son los llamados armónicos coincidentes y pueden ser escuchados sin necesidad de aislar los armónicos, es decir, sin tocar la cuerda con la mano izquierda. Cuando los armónicos coincidentes no producen batimentos se dice que el intervalo de cuarta que se forma entre la 5ª y 4ª cuerdas al aire está afinado (intervalo puro). Esto mismo sucede con otros intervalos, por ejemplo, si sonamos armónicamente la tercera mayor que se forma entre la 3ª y 2ª cuerdas escucharemos seguramente batimentos en su respectivo armónico coincidente (armV), cuando no se escuchan batimentos se dice que la tercera mayor es pura.

El caso de las terceras mayores es muy interesante, los músicos del siglo XX están acostumbrados a escuchar los intervalos pertenecientes al TI. Por esta razón una tercera mayor *ancha* del TI será evaluada pro el criterio melódico como mejor afinada que cuando es evaluada por el criterio aural. Por el contrario, una tercera mayor *pura* será evaluada como mejor afinada por el criterio aural que por el melódico. En otras palabras, *melódicamente* estamos acostumbrados a que la tercera mayor *ancha* es más agradable que una tercera mayor *pura*, pero *armónicamente*, una tercera mayor *pura* es mucho más agradable que una tercera mayor *del TI*.

Se puede hacer el siguiente experimento para entender mediante la práctica lo explicado en el párrafo anterior:

Suene la 2ª y 3ª cuerdas al mismo tiempo y trate de afinar el intervalo de tal manera que no se escuchen batimentos. De esta manera se obtiene una tercera mayor *pura*. Note que agradable es escuchar armónicamente dicho intervalo. A continuación suene el intervalo melódicamente, es decir ejecutando una cuerda a la vez. Es muy probable que sienta la necesidad de subir la 2ª cuerda o bajar la 3ª para que el intervalo melódico quede a su gusto.

### 2.1.5 Criterio auditivo.

Puede realizar este experimento a la inversa. Afine el intervalo melódicamente, puede ayudarse cantando el intervalo. Una vez que esté satisfecho con la tercera mayor melódicamente afinada, suene ambas cuerdas simultáneamente. Muy probablemente percibirá batimentos en el armónico coincidente lo que hará que el intervalo no sea armónicamente agradable. Si no escucha los batimentos enfoque su audición al cuarto armónico de la 2ª cuerda (armV).

#### DIFERENCIAS EN LA UTILIZACIÓN DE CADA CRITERIO AUDITIVO

Partiendo de los límites de percepción de la altura estudiados en la sección 2.1.1 y 2.1.2 podemos hacer algunas diferencias entre ambos criterios.

Si el proceso de afinación consistiera tan sólo en empatar las frecuencias entre los armónicos de dos tonos complejos, la utilización del criterio aural sería más efectiva, pues por medio de eliminación de batimentos se puede lograr empatar frecuencias con suma precisión.

Cuando afinamos la 4ª cuerda con la 5ª lo podemos hacer por medio de eliminación de batimentos o por medio de comparación melódica.

La duración de la 4ª cuerda es de aproximadamente 10 segundos, esto quiere decir que podemos llegar a escuchar hasta un batimento en 10 segundos. Esto nos da una resolución de  $\pm 0.1$  Hz que equivale a  $\pm 0.4$  Cents. La resolución que tiene un afinador electrónico cromático comercial es de  $\pm 5$  Cents, lo que quiere decir que el oído puede llegar a empatar frecuencias con mayor precisión que un afinador electrónico si utilizamos el criterio aural.

Si usamos afinación melódica para comparar los armónicos coincidentes de la 4ª y 5ª cuerdas podemos llegar a obtener una resolución de  $\pm 7.6$  Cents para el cuarto armónico de la 5ª cuerda según la tabla 2.1 de discriminación de frecuencias presentada en la sección 2.1.1. Esto quiere decir que el oído puede llegar a empatar frecuencias con menor precisión que un afinador electrónico si utilizamos el criterio melódico comparando armónicos naturales.

### 2.1.5 Criterio auditivo.

Si comparamos melódicamente dos tonos complejos de guitarra, por ejemplo la 5ª cuerda al aire entre dos guitarras, podemos llegar a obtener una resolución de  $\pm 3.5$  Cents (Cambios en el ritmo de repetición del 0.2%) según lo explicado en la parte de discriminación de la altura en tonos complejos de la sección 2.1.2, que es menor que la resolución de un afinador electrónico.

Esto no quiere decir que un criterio sea mejor que otro en el proceso de afinación de una guitarra, simplemente presentan características diferentes y son complementarios entre si. De hecho el proceso de afinación no consiste *tan sólo* en empatar frecuencias. En ocasiones a pesar de empatar bien dos frecuencias, un intervalo puede ser percibido como desafinado, pues nuestra percepción toma muchas variables en cuenta para la determinación de la altura de un tono complejo. El criterio melódico depende de la percepción de cada persona, involucra muchos factores subjetivos como la educación musical, entrenamiento auditivo, teorías de percepción de la altura, buen gusto, y en ocasiones hasta el estado de ánimo. El criterio aural por su parte no toma en cuenta efectos de inarmonicidad que serán discutidos más adelante.

Cada criterio auditivo depende, además de los límites fisiológicos, del entrenamiento auditivo de cada persona. Algunas personas tendrán una mayor capacidad para utilizar el criterio aural y algunas el melódico, según estén acostumbradas a la utilización de cada uno de ellos.

Lo importante es saber como combinar conscientemente ambos criterios en el proceso de afinación de una guitarra. Por lo general se usa el criterio aural para afinar la guitarra y el criterio melódico para comprobar el resultado final.

## PATRÓN DE AFINACIÓN Y VARIABILIDAD

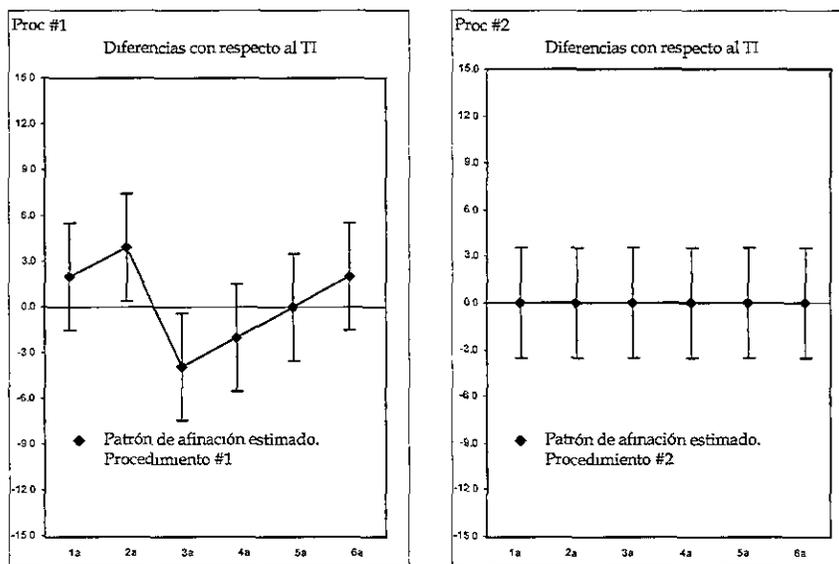


FIG. 2.5. Patrón de afinación y variabilidad. Proc. 1 y 2.

En la práctica, si afinamos una guitarra diez veces puede quedar igualmente afinada cada vez, con un cierto rango de variabilidad. Es decir que estrictamente hablando la guitarra no puede quedar exactamente igual las diez veces, debido, en parte, a los límites de la percepción explicados a lo largo de este capítulo.

La figura 2.5, muestra los patrones de afinación estudiados en la sección 2.1.4 incluyendo la variabilidad debida a los límites de la percepción de la altura. Las líneas verticales representan la variabilidad que está estimada con base en la discriminación de frecuencias para tonos complejos que es aproximadamente del 0.2% (3.5 Cents). Esto significa que la variabilidad presentada en la figura 2.5 es aplicable al criterio melódico. Es posible que se de una variabilidad menor si utilizamos el criterio aural en la afinación. La variabilidad puede aumentar o disminuir dependiendo del entrenamiento auditivo de cada persona, del criterio auditivo y de los factores físicos que serán discutidos más adelante.

## 2.2 Factores físicos

### 2.2.1 Inarmonicidad debida a la rigidez de las cuerdas

Cuando una cuerda es pulsada, esta comienza a vibrar de muchas formas. Así, diferentes segmentos de la cuerda vibran al mismo tiempo. Estos segmentos son el resultado de la división de la cuerda en partes iguales. Cada una de estas partes produce sonidos con determinada frecuencia. A estas formas de vibrar de una cuerda se les llama modos de vibración.

Cuando una cuerda vibra en toda su longitud se genera el sonido fundamental. Pero como se mencionó en el párrafo anterior, una cuerda vibrante además de vibrar en toda su longitud también vibra en mitades, tercios, cuartos, quintos, etc., es decir, en un gran número de partes pequeñas. Cada una de estas pequeñas partes de la cuerda vibra generando su propio sonido que es llamado armónico. Cuando una cuerda vibra en mitades, cada mitad de la cuerda genera un armónico cuya altura esta una octava arriba del sonido fundamental. La razón de esto es que cada mitad de la cuerda es doblemente más pequeña que la longitud total de la cuerda, por lo tanto la frecuencia es dos veces más grande que la frecuencia fundamental. Si la vibración del sonido agudo es dos veces más rápido que el sonido grave, quiere decir que una octava tiene una relación de frecuencias dos a uno.

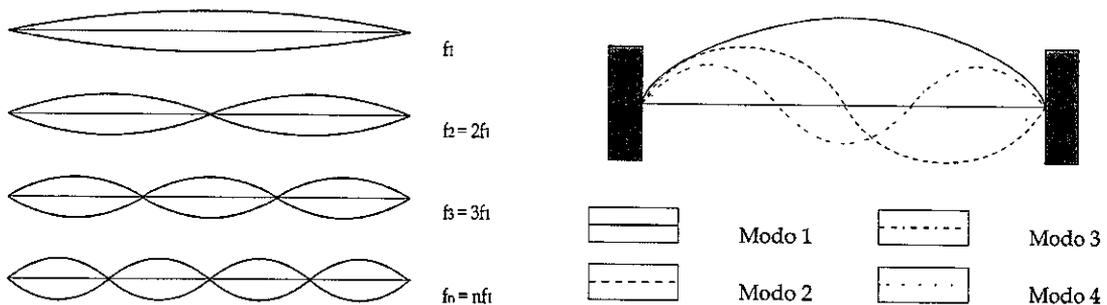


FIG. 2.6. Modos de vibración de una cuerda.

De la misma manera cuando la cuerda vibra en tercios es decir en tres partes iguales, el armónico generado estará a una quinta más una octava (docena) por encima del sonido fundamental, con una frecuencia tres veces mayor. Entonces, un intervalo de docena tiene una relación de frecuencias de tres a uno. Este proceso continúa indefinidamente para todos los sonidos de la serie armónica.

Esto quiere decir que el  $n$ -avo armónico tendrá una frecuencia  $n$  veces mayor que la frecuencia fundamental, es decir  $f_n = nf_1$ . Por ello, el término armónico se refiere a la componente de un sonido cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Pero esta teoría es válida únicamente para una cuerda *ideal*, una cuerda que no tiene dimensiones además de su longitud, es decir que no tiene grosor ni rigidez cuando no esta sujeta a alguna tensión.

La frecuencia real de los armónicos de una cuerda cuya rigidez no es despreciable, puede ser calculada usando los parámetros mecánicos de la cuerda. Las desviaciones de frecuencia producidas por la inarmonicidad no son constantes.

La inarmonicidad de una cuerda es proporcional a su sección y por lo tanto al cuadrado de su diámetro; inversamente proporcional a la cuarta potencia de su longitud; e inversamente proporcional al cuadrado de su frecuencia. Las frecuencia reales para cada armónico pueden ser calculadas mediante las siguientes expresiones:

$$f_n = nf_1 \left[ 1 + (B / 2)(n^2 - 1) \right]$$

Donde  $f_n$  es la frecuencia de la parcial de rango  $n$ , y  $B$  es el coeficiente de inarmonicidad definido de la siguiente manera:

$$B = \frac{\pi^2}{64} \times \frac{Q}{\sigma} \times \frac{d^2}{(f_1 l^2)^2}$$

Donde  $Q$  es el módulo de Young,  $\sigma$  es la densidad,  $d$  es el diámetro de la cuerda, y  $l$  es la longitud de la cuerda<sup>10-11</sup>.

A continuación presentamos la tabla 2.6 con una estimación de las desviaciones en Cents que sufre cada armónico debido a la inarmonicidad por rigidez para cada cuerda al aire, obtenidas a partir de las fórmulas anteriormente presentadas.

Los parámetros mecánicos de las cuerdas fueron tomadas de las especificaciones de las cuerdas de marca D'Addario de tensión alta.

**INARMONICIDAD**  
Desviación de cada armónico en Cents  
**CUERDAS**

	1a	2a	3a	4a	5a	6a
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001	0.0003
A 3	0.0001	0.0003	0.0007	0.0001	0.0003	0.0008
R 4	0.0002	0.0005	0.0012	0.0003	0.0006	0.0015
M 5	0.0004	0.0008	0.0020	0.0004	0.0010	0.0023
ó 6	0.0005	0.0012	0.0029	0.0007	0.0014	0.0034
N 7	0.0007	0.0017	0.0040	0.0009	0.0019	0.0047
I 8	0.0010	0.0022	0.0052	0.0012	0.0025	0.0061
C 9	0.0012	0.0028	0.0067	0.0015	0.0032	0.0078
O 10	0.0015	0.0034	0.0082	0.0018	0.0039	0.0096
S						

**TABLA 2.6. Inarmonicidad por rigidez de las cuerdas.**

Como podemos notar en esta tabla, mientras más gruesa es la cuerda mayor grado de inarmonicidad presenta. La sexta es la cuerda más gruesa de la guitarra, por ello presenta los valores más grandes de inarmonicidad. Obsérvese también que los armónicos más altos presentan un grado mayor de inarmonicidad.

Sin embargo, como podemos ver en esta tabla la inarmonicidad por rigidez de las cuerdas de nylon es despreciable. El valor más grande en esta tabla es 0.0096 Cents. Es inimaginable que una persona pueda detectar una variación tan pequeña si el oído no es capaz de distinguir melódicamente siquiera una variación de 1 Cent.

Como dato interesante, las cuerdas de nylon tienen un módulo de elasticidad muy bajo y una densidad mucho menor que las cuerdas de metal. Probablemente en una guitarra con cuerdas de metal la inarmonicidad por rigidez de las cuerdas no sea despreciable, como es el caso de los pianos, donde este problema es un factor importante en la afinación.

2.2.2 Inarmonicidad inducida por acoplamiento.

La guitarra constituye un sistema vibratorio complejo, el sonido que produce depende no sólo de la vibración de la cuerda sino de todo el cuerpo de la guitarra. La cuerda transmite sus vibraciones a la tapa armónica a través del puente. El puente es un punto de suma importancia pues es donde se da el acoplamiento entre ambos sistemas vibratorios, la cuerda y la tapa armónica. La tapa armónica tiene, al igual que una cuerda, sus modos naturales de vibración. Al momento de pulsar una cuerda, la vibración natural de la tapa armónica interactúa con las vibraciones de la cuerda produciendo así el sonido final. Esa interacción entre dos sistemas vibratorios es llamada acoplamiento.

El que las cuerdas estén acopladas a la tapa armónica en uno de sus extremos, significa que el extremo de la cuerda esta anclada a un punto que no es completamente rígido. De esta manera si la frecuencia natural de la cuerda llegara a coincidir con la frecuencia de alguno de los modos de vibración de la tapa armónica, el puente es inducido a oscilar con una amplitud considerable. Este movimiento resultante de la tapa armónica y el puente en el punto de acoplamiento, o de excitación\* será mucho menor si la excitación de la cuerda es aplicada cerca de un nodo, y mucho mayor si actúa cerca de un antinodo de la vibración de la tapa armónica. Lo que se intenta es explicar la influencia que tienen los movimientos de la tapa armónica en las frecuencias naturales de vibración que produce una cuerda por si sola.

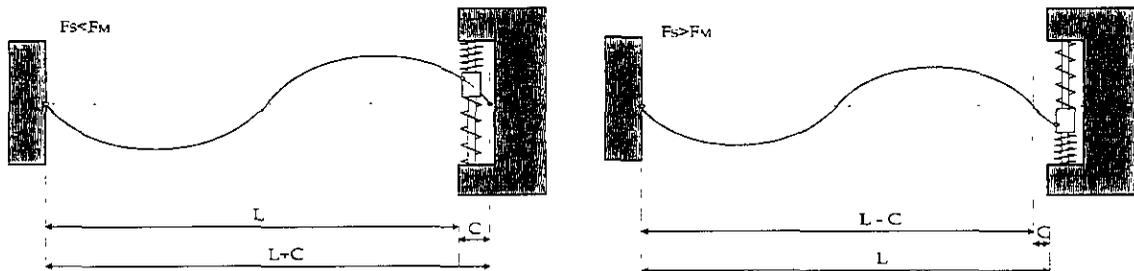


FIG. 2.7. Efecto de las resonancias en el modo de vibración de una cuerda.

\* En Inglés "Driving point"

Para este propósito imaginemos que la cuerda está anclada en uno de sus extremos a una masa que puede desplazarse libre y verticalmente por una varilla lisa, bajo la influencia de un par de resortes y las fuerzas ejercidas por la oscilación de la cuerda. La parte izquierda de la figura 2.7 muestra el sistema descrito con una cuerda de longitud  $L$  vibrando en su segundo modo. Este diagrama muestra la relación entre la posición de la masa móvil  $M$  y el desplazamiento de la cuerda en el caso en que la frecuencia excitadora\*  $F_S$  del segundo modo de vibración de la cuerda sea menor que la frecuencia  $F_M$  de la masa cuando esta oscila solamente bajo la influencia de los resortes. En estas condiciones, la masa se mueve hacia arriba en respuesta al movimiento de la cuerda que jala a la masa hacia arriba, y hacia abajo medio ciclo más tarde en la oscilación cuando la fuerza excitadora de la cuerda sobre la masa tiene una componente hacia abajo. El extremo derecho del diagrama muestra que la cuerda asume una forma similar a la de una cuerda simple anclada rígidamente a dos puntos separados a una distancia  $(L+C)$ . Podemos decir que si  $F_S < F_M$ , entonces la masa móvil hace que la cuerda actúe como si fuera alargada en una cantidad  $C$ , de tal forma que la frecuencia natural de la cuerda decrece oscilando a la misma frecuencia que una cuerda de longitud  $(L+C)$  cuyo extremo está fijo.

Si la cuerda vibrara con una frecuencia  $F_S$  mayor que la frecuencia  $F_M$ , entonces la masa oscilaría en dirección opuesta a la fuerza excitadora de la cuerda que actúa sobre ella. La masa de esta manera se encuentra debajo de su posición media cuando la cuerda jala hacia arriba, como lo muestra la parte derecha de la figura 2.7. Es notorio en este diagrama que cuando  $F_S > F_M$ , la cuerda actúa como si hubiera sido recortada quedando una longitud efectiva  $(L-C)$ , de esta manera la frecuencia natural del modo de vibración de la cuerda es incrementado.

---

\* En inglés "Driving frequency"

Sabemos que las relaciones de frecuencia entre las parciales de una cuerda de guitarra casi son iguales a las de la serie armónica, a veces dichas parciales presentan pequeñas variaciones en frecuencia con respecto de su valor armónico correcto. Dichas irregularidades se deben a la influencia de las resonancias del cuerpo de la guitarra cuando la frecuencia de estas están cerca de alguna de las frecuencias de los modos de vibración de la cuerda. Al afinar nuevamente una cuerda en un tono distinto se pueden producir cambios en la interacción de las resonancias del cuerpo de la guitarra con las de la cuerda<sup>14</sup>.

En ocasiones nos percatamos de que algunas notas de la guitarra suenan más fuerte que otras, algunas tienen una vida muy corta, unas suenan muy débilmente, y una que otra por más que la afinemos siempre nos suena desafinada a pesar de que la guitarra esté perfectamente entrastada. Todos estos efectos que sufre cada nota de la guitarra son debidos a las resonancias presentes en el cuerpo de la guitarra. Cada una de las notas de la guitarra puede ser fuertemente influenciada por las resonancias de la tapa armónica.

Conociendo la respuesta mecánica de la guitarra se puede estimar las variaciones de frecuencia que sufre cada nota cuando estas están cerca alguna resonancia de la tapa. La estimación de estas variaciones está dada por las siguientes expresiones:

$$f_n = nf_1 - \frac{T \operatorname{Im}\{Y\}}{2\pi L}$$

Donde  $f_n$  es la frecuencia del  $n$ -avo armónico influenciado por las resonancias de la tapa,  $nf_1$  es la frecuencia fundamental de la cuerda montada sobre extremos rígidos sin influencia de resonancias,  $T$  es la tensión de la cuerda,  $\operatorname{Im}\{Y\}$  es la parte imaginaria de la admitancia mecánica de la tapa armónica de la guitarra y  $L$  la longitud de la cuerda.

La admitancia mecánica es la relación entre velocidad y fuerza en el punto de excitación y está dada por la siguiente expresión:

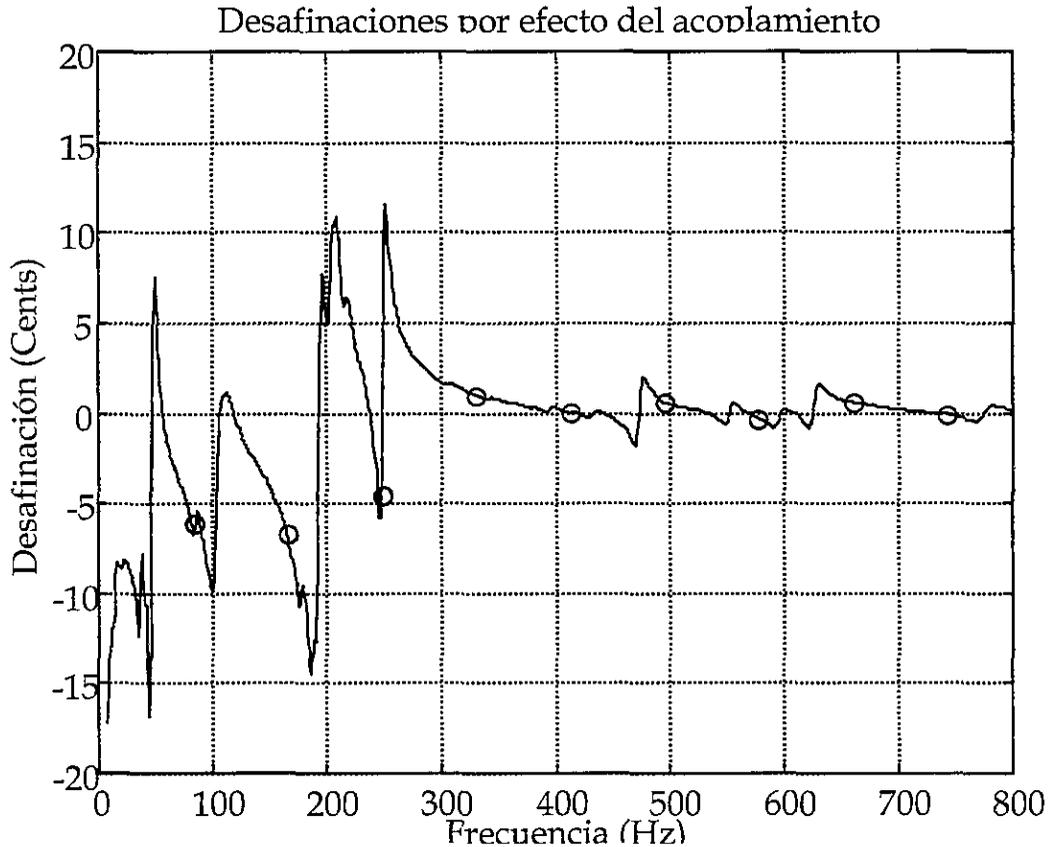
$$Y = \frac{v}{F}$$

Donde  $v$  es la velocidad y  $F$  la fuerza. La admitancia mecánica es un número complejo con magnitud y fase (parte real e imaginaria).

De tal manera que la variación en frecuencia por efectos del acoplamiento de las cuerdas de la guitarra esta dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta f = -\frac{T \operatorname{Im}\{Y(f)\}}{2\pi L}$$

Se midió la admitancia mecánica de la guitarra Manuel Rodríguez que se usó para los experimentos que se describen en el capítulo 4. A continuación presentamos una gráfica (figura 2.8) que contiene las desafinaciones en Cents para cada frecuencia en el punto de excitación correspondiente a la 6ª cuerda.



**FIG. 2.8. Desafinaciones por efecto del acoplamiento**

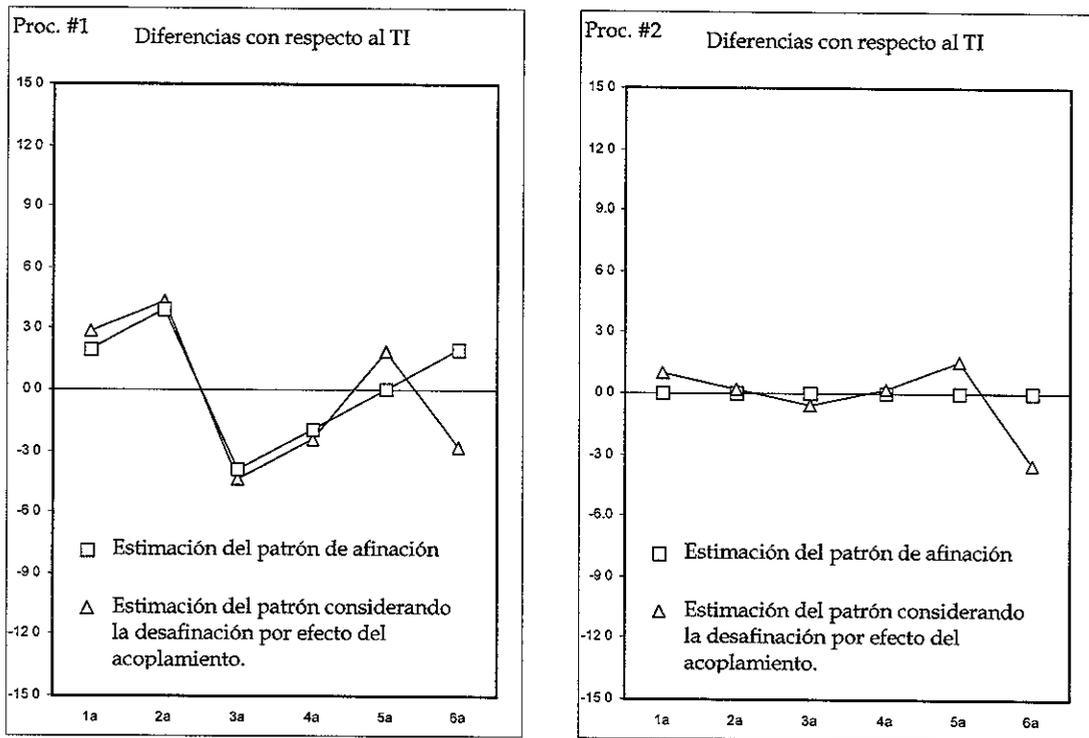
En esta gráfica los círculos representan cada uno de los nueve primeros armónicos de la 6ª cuerda. Como podemos ver los armónicos más afectados por las resonancias de la tapa armónica son los primeros tres, a partir del cuarto se acercan a la línea de 0.0 Cents, esto quiere decir que los armónicos más agudos no se ven influenciados por el acoplamiento de las cuerdas con el cuerpo de la guitarra. El primer armónico presenta una desafinación de -6.0 Cents, el segundo armónico de -6.6 y el tercer armónico de -4.5 cents.

El problema es que en un tono de guitarra, los armónicos que tienen mayor nivel de intensidad son justamente los primeros. Al obtener la altura virtual de la 6ª cuerda seguramente obtendremos valor más bajo que el esperado debido al efecto de las resonancias. Justamente en la guitarra Manuel Rodríguez las dos cuerdas más afectadas por el acoplamiento son la 3ª y 6ª cuerdas.

## 2.2.2 Inarmonicidad inducida por acoplamiento

Es importante mencionar que la respuesta mecánica no es igual en todas las guitarras, cada guitarra tiene una respuesta mecánica diferente, así, las desafinaciones provocadas por este fenómeno se darán en diferentes notas según la respuesta mecánica de cada guitarra.

Tomemos como ejemplo los procedimientos #1 y #2 descritos en la sección anterior 2.1.3. Veamos de que manera pueden ser influenciados estos procedimientos por las resonancias de la guitarra Manuel Rodríguez.



**FIG. 2.9. Influencia del acoplamiento en los procedimientos 1 y 2.**

Como podemos ver en la figura 2.9 la cuerda con mayor influencia de las resonancias de la tapa armónica es la 6ª cuerda cuyo patrón de afinación puede cambiar mucho por este efecto.

### 2.2.3 Cambios en afinación producidos por pisar las cuerdas, posición de los trastes y compensación.

La disposición de los trastes en el diapason presenta algunos problemas interesantes en su diseño. El intervalo de semitono, en el TI corresponde a la relación de frecuencia 1.05946. Esto es aproximadamente la relación 18/17, que condujo a la llamada "regla del dieciocho". Esta regla propone que cada traste debe ser colocado a 1/18 de la distancia remanente al puente. Evidentemente la distancia  $x$  entre cada traste decrece conforme se avanza en dirección al puente. Dado que 18/17 es igual a 1.05882 en lugar de 1.05946 (un error de cerca del 0.07%), cada intervalo de semitono será ligeramente más pequeño si se utiliza la regla del dieciocho. En el momento en que se hayan llegado al doceavo traste, la octava producida estará 12 Cents abajo, que es notable para el oído. Entonces para una mejor afinación será mejor utilizar el valor 17.817 en lugar de 18; en otras palabras, cada traste deberá ser colocado 0.05613 de la distancia remanente al puente.

Otro problema del diseño de la guitarra es el hecho de que al pisar una cuerda incrementa ligeramente la tensión de la misma. Este efecto es mucho mayor en cuerdas de acero que en cuerdas de nylon, ya que se requiere más fuerza para producir la misma elongación. Las notas pisadas tienden a ser más agudas comparadas con las cuerdas al aire. Mientras mayor sea la distancia de la cuerda a los trastes más agudo será el tono resultante.

Para compensar el cambio de altura producido por la tensión en notas pisadas, es necesario agrandar ligeramente la distancia de la cejuela al puente. Este pequeño incremento en la distancia de la cejuela al puente es llamado compensación, y generalmente va de 1 a 5 mm. Mientras mayor sea la distancia entre las cuerdas y los trastes mayor será la compensación requerida.

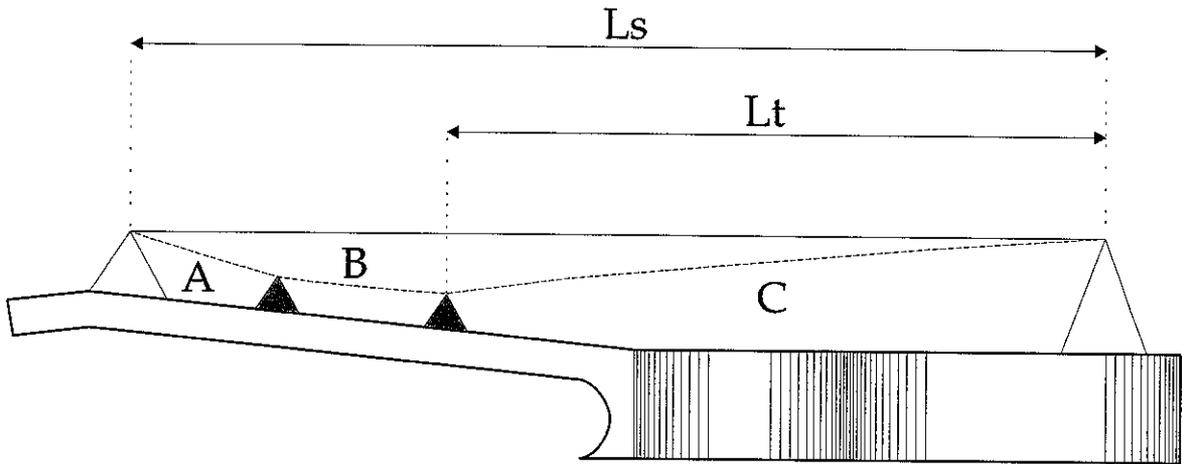


FIG. 2.10. Deformación de una cuerda pisada.

Es posible calcular la variación de tensión producida al pisar una cuerda, la figura 2.10 muestra un esquema. Cuando pisamos una cuerda, dos trastes hacen contacto con la cuerda formándose así tres segmentos (*A*, *B*, *C*). El segmento *A* se forma entre la cejuela y el traste anterior al que se está pisando, el segmento *B* es el que se forma entre ambos trastes y el segmento *C* es el que se forma entre el traste pisado y el puente. Cuando pisamos un traste, la cuerda sufre una deformación, es decir que aumenta ligeramente su longitud  $\Delta L_s$ . Nótese que la longitud  $L_s$  de la cuerda al aire es menor que la suma de los segmentos *A*, *B* y *C*. Si conocemos la deformación  $\Delta L_s / L_s$  sufrida por la cuerda, el módulo de elasticidad *E* (Módulo de Young), y el área  $A_s$  de la sección de la cuerda, podremos calcular la variación de tensión  $\Delta T$  en la cuerda por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta T = EA_s \left( \frac{\Delta L_s}{L_s} \right)$$

$$\Delta L_s = A + B + C - L_s$$

### 2.2.3 Cambios en afinación producidos por pisar las cuerdas

Conociendo la variación de tensión  $\Delta T$  en la cuerda, podemos calcular la frecuencia  $f'$  de la cuerda pisada por medio de la siguiente fórmula:

$$f' = f \sqrt{\frac{1 + \Delta T / T}{1 + \Delta L_t / L_t}}$$

Donde  $f$  es la frecuencia de la nota sin tomar en cuenta los efectos por variación de la tensión;  $L_t$  es la distancia del puente al traste pisado y  $\Delta L_t$  se define como  $\Delta L_t = C - L_t$ .

VARIACIONES EN CENTS PRODUCIDAS AL PISAR LOS TRASTES

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1a	0.9	1.0	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
2a	1.6	1.7	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5
3a	2.5	2.6	1.8	1.7	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2	2.3
4a	1.0	1.1	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9
5a	1.5	1.6	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4
6a	2.5	2.6	1.9	1.7	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.1	2.2	2.3

Características de las cuerdas D'Addario EJ46  
Hard Tension

Cuerda	Nota	Diámetro Pul	Tensión Lbs	Área pul <sup>2</sup>
1a	e	0.029	15.8	0.0052
2a	b	0.033	12.0	0.0068
3a	g	0.041	12.4	0.0107
4a	D	0.03	16.3	0.0057
5a	A	0.04	15.9	0.0083
6a	E	0.04	14.5	0.0123

Tiro: 25.5 pul

Módulo de Young\*\*:

Nylon puro: 218505 pul/lb<sup>2</sup>

Nylon entorchado: 224746 pul/lb<sup>2</sup>

\*\*Datos proporcionados por Stephen M. Moroney, D'Addario

TABLA 2.7. Desafinaciones producidas por pisar cuerdas

### 2.2.3 Cambios en afinación producidos por pisar las cuerdas

La tabla 2.7 muestra las desviaciones en Cents de cada nota de la guitarra debidas al incremento de tensión en cada cuerda pisada. Para el cálculo de los valores se utilizaron las especificaciones de las cuerdas D'Addario EJ46 de Tensión Alta.

Nótese que mientras más gruesa es una cuerda mayores son los valores. Igualmente mientras mayor sea la distancia de la cuerda al diapasón mayor será el grado de desafinación.

Las desafinaciones en cuerdas pisadas también se deben a la posición del dedo en el traste, a la cantidad de presión ejercida en la cuerda contra el diapasón o hacia cualquiera de los extremos de la cuerda. Es muy probable que en la realidad las desafinaciones que mostramos en la tabla 2.7 sean mayores. La razón es que la desafinación será mayor mientras más presión se aplique contra la cuerda. La tabla 2.7 supone que la fuerza aplicada contra la cuerda es la suficiente para lograr que la cuerda tenga contacto con el traste. La cantidad de presión aplicada a la cuerda es muy difícil de estimar pues cambia de persona a persona dependiendo de su modo de tocar. Por esta razón, la mejor muestra de la presencia de estos efectos, es la dirección con que se desafina cada cuerda, más que la altura exacta a la que queda afinada. Para explicar mejor estos efectos presentamos dos ejemplos.

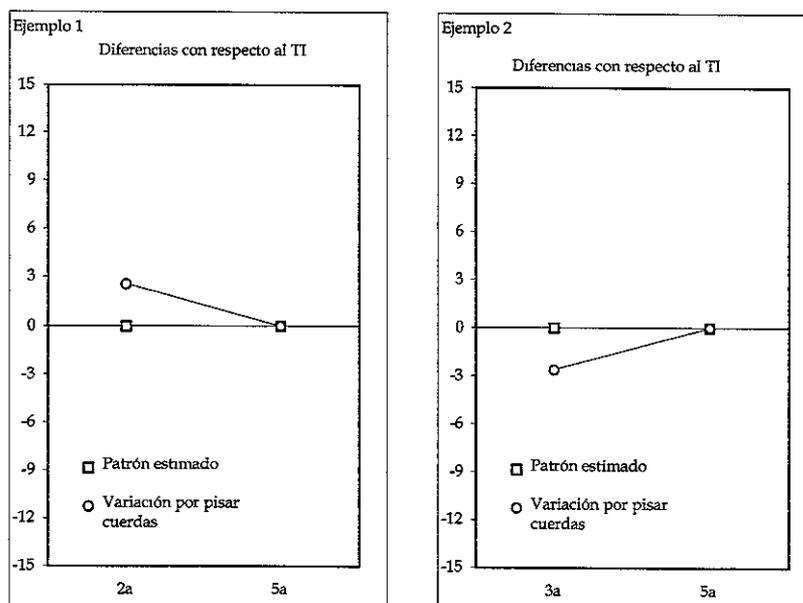


FIG. 2.11. Ejemplos de desafinaciones en cuerdas pisadas

### 2.2.3 Cambios en afinación producidos por pisar las cuerdas

Ejemplo 1:

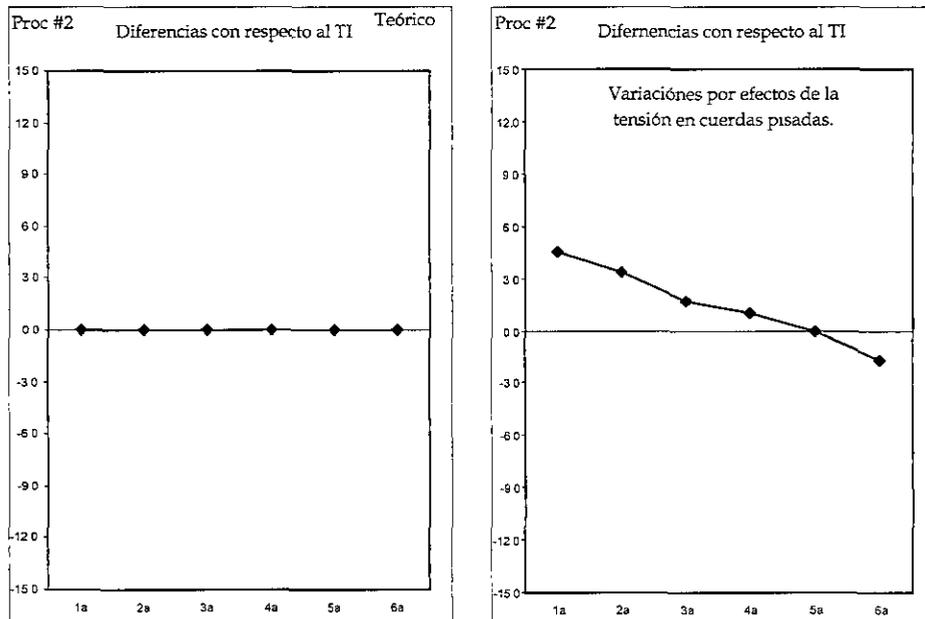
Es muy común *afinar* la 2ª cuerda al aire con la 5ª cuerda pisada en el traste II.

En la primera gráfica de la figura 2.11 podemos ver claramente que la 2ª cuerda al aire queda alta por efectos de la deformación de la cuerda.

Ejemplo 2:

También es muy común *afinar* la 3ª cuerda pisada en el traste II con el segundo armónico de la 5ª cuerda al aire.

En la segunda gráfica de la figura 2.11 podemos ver claramente que la 3ª cuerda al aire queda baja por efectos de la deformación de la cuerda.



**FIG. 2.12.** Influencia de las desafinaciones producidas por pisar las cuerdas en el patrón estimado del procedimiento #2.

### 2.2.3 Cambios en afinación producidos por pisar las cuerdas

Cuando afinamos una guitarra por medio de algún procedimiento de afinación que haga uso de trastes, estas variaciones se reflejan en las frecuencias de las cuerdas al aire. En la sección 2.1.4 se discutieron dos procedimientos de afinación diametralmente opuestos. El procedimiento #2 nos daba desviaciones de 0.0 Cents en todas las cuerdas al aire. La figura 2.12 muestra dos gráficas que ilustran las desafinaciones de cada cuerda por efectos de pisar los trastes, estas corresponden al procedimiento #2.

La compensación que se hace en el puente para corregir estos efectos no tiene mucha influencia en los primeros trastes, además como las cuerdas tienen espesores diferentes, se necesitaría una compensación distinta para cada una de ellas. Esto significa que a pesar de que una guitarra tenga una compensación en el puente no libra del todo las desafinaciones alrededor de la primera posición.

### 2.2.4 Influencia de los factores en la estimación del patrón de afinación.

Hasta ahora hemos estudiado cada factor y su influencia en la estimación del patrón de afinación de manera individual. En esta sección obtendremos un patrón estimado que involucre el procedimiento de afinación, la inarmonicidad inducida por el acoplamiento cuerda-guitarra y la desafinación causada por la tensión de las cuerdas pisadas. Incluyendo también la variabilidad dependiente de la discriminación de tonos complejos.

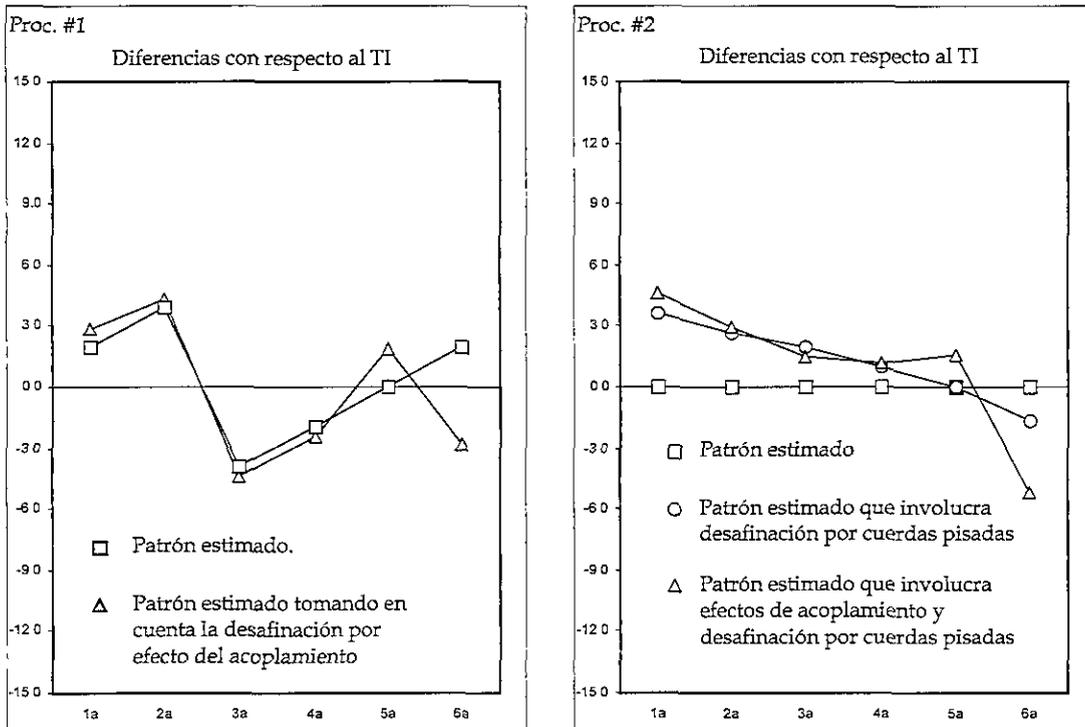
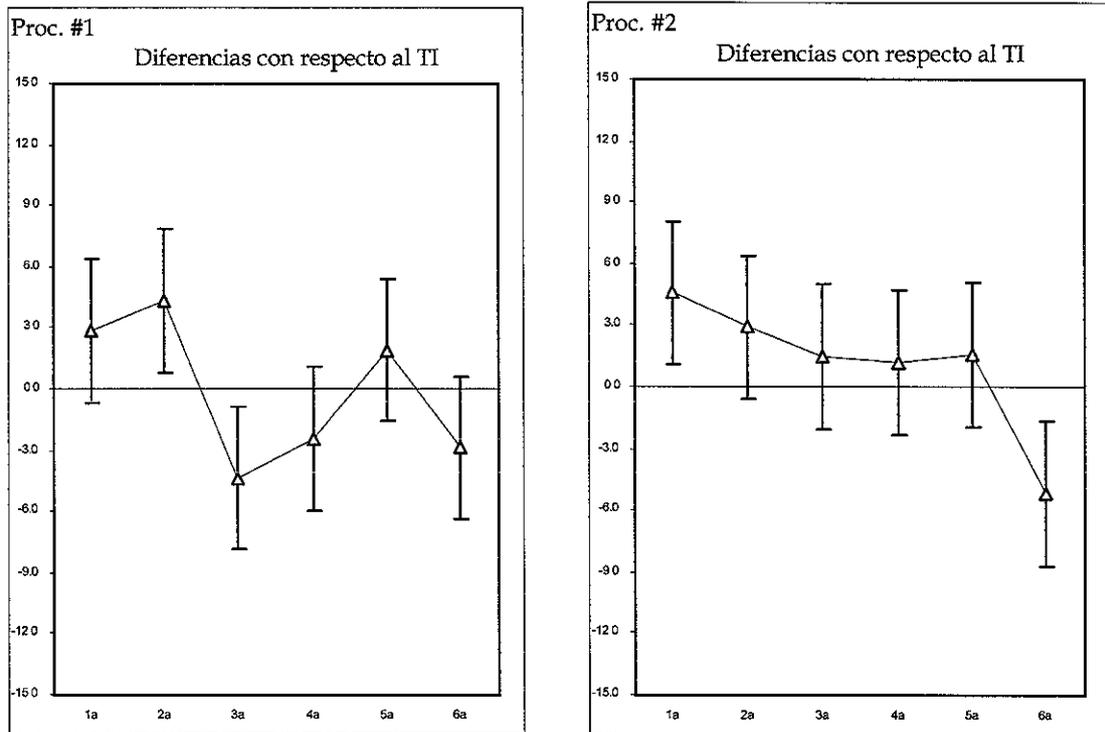


FIG. 2.13. Evolución del patrón de afinación. Procedimientos 1 y 2

En la 2.13 se presenta una evolución de la estimación del patrón de afinación para los procedimientos #1 y #2 que hemos discutido a lo largo de este capítulo.

Como podemos ver, los factores influyen fuertemente en la estimación del patrón de afinación. Estas gráficas nos serán de suma utilidad más adelante para compararlos con los resultados obtenidos de una afinación real.



**FIG. 2.14. Estimación del patrón final de afinación. Procedimientos 1 y 2**

La 2.14 muestra la estimación del patrón de afinación a partir del procedimiento de afinación, desafinación causada por la tensión de cuerdas pisadas, y efectos del acoplamiento cuerda-guitarra. Las líneas verticales representan la variabilidad dependiente de la discriminación de frecuencias en tonos complejos.

Se estima que los patrones de afinación que resulten de los experimentos que serán descritos en el capítulo 4, serán muy parecidos a los presentados en la 2.14.

ESTIMACIÓN DE LA ALTURA VIRTUAL  
EN TONOS DE GUITARRA

CAPÍTULO  
TRES

### 3. Estimación de la altura virtual en tonos de guitarra.

Hasta ahora hemos hablado de los factores que intervienen en la afinación de la guitarra clásica desde un plano teórico. Nuestra intención con este trabajo es ver de qué manera estos factores están presentes en una afinación real. Para ello hemos desarrollado un método para grabar y procesar tonos de guitarra. La investigación consiste en grabar una por una las cuerdas de una guitarra afinada previamente por distintas personas y diferentes procedimientos de afinación, para posteriormente analizar los datos obtenidos y sacar conclusiones. En este capítulo describiremos los procesos de grabación, procesamiento numérico de los tonos grabados y la estimación de la altura virtual de dichos tonos de guitarra.

#### 3.1 Grabación y análisis espectral de tonos de guitarra.

Cuando pulsamos la cuerda de una guitarra escuchamos un tono como una unidad aparentemente indivisible, de hecho podemos determinar cual es la nota producida, cantarla, escribirla o identificar el instrumento que la produce.

Nuestro oído percibe el tono de guitarra como una sola entidad cuando en realidad están sonando al mismo tiempo una gran cantidad de sonidos que al mezclarse forman uno sólo con una característica particular a la que llamamos timbre. En otras palabras, un sonido puede descomponerse obteniendo un espectro de sonidos puros, análogamente al arco iris en el caso de la luz. Cada uno de estos sonidos es llamado componente, parcial o armónico. Hacer un análisis espectral consiste en encontrar las frecuencias y amplitudes de cada componente de un sonido complejo, es decir, obtener su espectro. Una de las maneras de obtener el espectro de frecuencias de un sonido complejo es realizar una serie de cálculos numéricos a partir de cada uno de los valores proporcionados por la onda original. Este análisis espectral es conocido como "Análisis de Fourier". Para hacer este análisis por medio de una computadora se utiliza un algoritmo conocido como "Transformada Rápida de Fourier\*" (FFT). (Fast Fourier Transform, FFT).

Si queremos utilizar la FFT para hacer el análisis espectral de un tono de guitarra, es necesario almacenar digitalmente la señal original.

---

\* FFT son las siglas de "Fast Fourier Transform".

Digitalizar significa convertir una señal en valores numéricos, dicho de otra manera, asignarle a cada punto de la señal un valor numérico. Enseguida describimos brevemente este proceso.

Un sonido puede representarse gráficamente si dibujamos el va y ven de un cuerpo sonoro a través del tiempo. Por ejemplo, si dibujamos el desplazamiento vertical de una masa sujeta al movimiento de una cuerda, quedaría registrada una gráfica similar a esta:

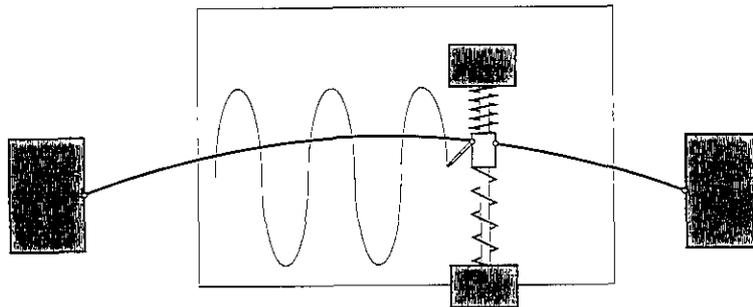


FIG. 3.1. Representación gráfica de una onda sonora.

La digitalización del sonido puede ser comparada con el proceso de filmación de cine. La cámara de cine toma un cierto número de cuadros en un determinado tiempo (digamos un segundo), si una cámara toma 20 fotografías en un segundo quiere decir que cada 0.05 segundos la cámara tomará una fotografía. Mientras mayor sea el número de tomas por segundo mayor será la calidad de la película, pero mayor también la cantidad de cinta necesaria para un segundo de filmación. En la grabación digital, la grabadora también toma un cierto número de muestras en un segundo, a esto se le llama Frecuencia de Muestreo, y en el caso de un disco compacto (CD) es de 44,100 muestras en un segundo. Mientras mayor sea la frecuencia de muestreo, mayor será la calidad de la grabación digital pero mayor también la cantidad de memoria necesaria para su almacenamiento. La diferencia es que la grabadora digital no retrata imágenes sino amplitudes, de tal manera que asignará un valor a la amplitud registrada en el instante de tomar una muestra (foto).

### 3.1 Grabación y análisis espectral de tonos de guitarra.

En un disco compacto el mayor valor asignable a la amplitud está dado por  $2^{16}$  (16 bits). Al rango de valores que se puede asignar a la amplitud es llamado resolución, un disco compacto tiene una resolución de 16 bits. Mientras mayor es la resolución mayor es el rango dinámico de la grabación, es decir que se escuchara más claramente la diferencia entre un pianístico y un fortísimo de una orquesta grabada. Pero igualmente, una buena resolución implica mayor espacio de memoria.

Para ilustrar el proceso de digitalización presentamos el dibujo (figura 3.2) una sinusoidal de un ciclo por segundo digitalizado a 10 muestras por segundo y con una resolución de 4 bits.

Digitalización de un ciclo de onda sinusoidal (1 Hz)

Frecuencia de muestreo = 10 Hz

Resolución = 4 bits

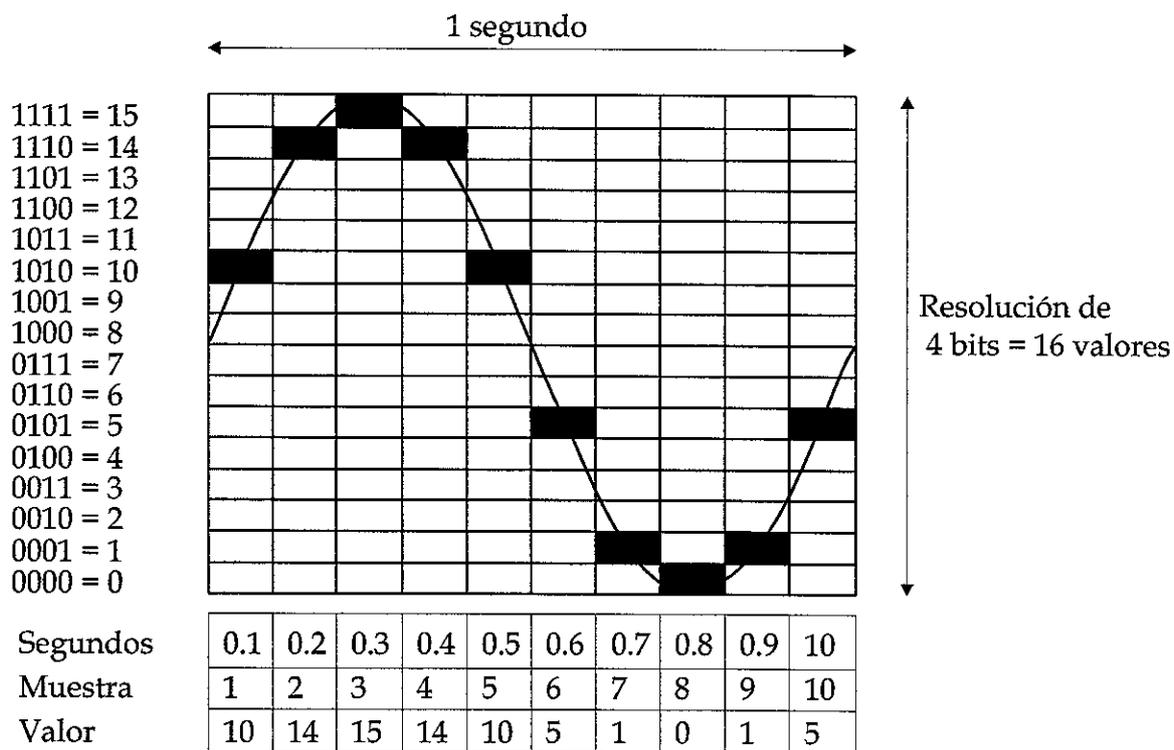


FIG. 3.2. Digitalización de un ciclo de onda sinusoidal de 1 Hz

### 3.1 Grabación y análisis espectral de tonos de guitarra.

Habiendo explicado brevemente algunos conceptos sobre grabación digital, podemos continuar con la generación y grabación de tonos de guitarra.

#### GENERACIÓN Y GRABACIÓN DE TONOS DE GUITARRA

Procedimiento General: Primero se le pide a un sujeto que afine cuidadosamente una guitarra proporcionándole un diapason. Una vez afinada se procede a grabar digitalmente cada una de las cuerdas al aire. Los tonos son grabados a través de una mezcladora digital sin ninguna modificación de la señal, es decir sin ecualización, ni filtros, con la finalidad de obtener la información de la manera más parecida a como lo percibe un guitarrista en la vida real. La ejecución consiste en tocar cada una de las seis cuerdas al aire, una tras otra con una duración de 15 segundos por cada cuerda, procurando apagar todas las cuerdas antes de pulsar la cuerda siguiente con el fin de evitar sonidos indeseables. Los seis tonos quedarán grabados en un sólo archivo por medio de un programa de edición y grabación de sonidos, para posteriormente editarlos dejando así seis archivos individuales correspondientes a cada tono de guitarra grabado. Una vez finalizada la grabación, un sujeto distinto procederá a desafinar la guitarra, continuando así hasta repetir el proceso diez veces.

#### Equipo de grabación:

Mezcladora digital Yamaha 03D  
Computadora Gateway, Pentium II  
Micrófono unidireccional Sun Voice DM 36  
Programa de edición Cool-Edit 96

Formato de almacenamiento: Los sonidos son almacenados en archivos con formato "WAV", a una frecuencia de muestreo de 44,100 Hz y con una resolución de 16 bits (Calidad de CD). Este formato hace la información transportable y más fácil de manejar.

Duración: La vida de un tono de guitarra fluctúa entre 7 y 15 segundos dependiendo de cada cuerda y de la manera en que esta es ejecutada. Como se utilizará la FFT para hacer el análisis espectral, es conveniente que el número de elementos en la señal sea una potencia de dos. Una señal con  $2^{18}$  elementos tiene una duración de 5.94 segundos que nos dan una resolución menor de frecuencias para la FFT,  $2^{19}$  elementos tienen una duración de 11.88 segundos.

Hemos decidido utilizar  $2^{19}$  ya que  $2^{20}$  elementos tienen una duración de 23.77 segundos que es mucho mayor a 15 segundos. Aunque sólo 11.88 segundos sean suficientes para hacer el análisis espectral de la señal, 15 segundos registrados en la grabación nos permiten tener un margen considerable de error.

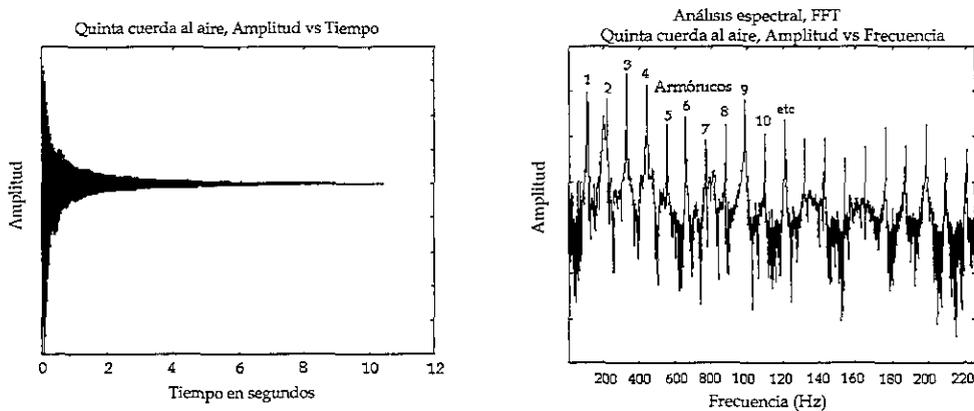
**Intensidad:** La cuerda debe pulsarse de la manera como normalmente es pulsada, es decir ni muy fuerte ni muy piano, con la finalidad de evitar distorsiones. Se realizaron grabaciones tocando "piano y forte" y las variaciones reportadas en la altura de los tonos son despreciables.

**Zona de ataque:** El guitarrista pulsará las cuerdas de la guitarra de la manera que lo hace normalmente, sin restricciones de zona de ataque, postura de la mano, utilización de uña o yema, toque tirando o apoyando. Se trata de mantener las condiciones normales en que un guitarrista afina y ejecuta su instrumento. La percepción de la altura virtual puede cambiar dependiendo de la zona de ataque y la utilización de uña o yema. De la forma de atacar una cuerda dependen las amplitudes iniciales de la cuerda pulsada. Los efectos del ataque en la percepción de la altura virtual merece un estudio aparte, que por el momento dejaremos de lado.

**Amortiguamiento de cuerdas no pulsadas:** Suponíamos que amortiguar las cuerdas que no han sido pulsadas permitiría que la señal quedara libre de resonancias de otras cuerdas distintas de la que se este estudiando. Sin embargo, hemos visto que los resultados no varían demasiado. En realidad no afecta tapar o no las cuerdas no pulsadas. Así, será mejor pulsar las cuerdas como el guitarrista acostumbra.

## ANÁLISIS ESPECTRAL DE TONOS DE GUITARRA

Una vez que se han grabado los tonos de guitarra se procede a hacer un análisis espectral de dichas señales. Este análisis espectral se realiza aplicando la FFT a la señal original por medio de un programa de aplicaciones matemáticas llamado "Mat-Lab", este software será utilizado para todos los procesamientos numéricos. A continuación presentamos dos gráficas que nos ayudaran a entender claramente el análisis espectral.



**FIG. 3.3. Representación gráfica de un tono de guitarra en función del tiempo y análisis espectral**

La primera gráfica de la figura 3.3 representa la señal original, en el eje horizontal esta graficado el tiempo (12 sec.), y en el eje vertical está la amplitud relativa. Esta es la forma de onda típica de un tono de guitarra, particularmente de la forma de onda generada por la 5a cuerda al aire. Puede notarse como al inicio, la intensidad de la onda es muy grande, a esta parte se le llama ataque, luego se nota un rápido decaimiento de la amplitud. En esta gráfica no es posible saber directamente cual es la frecuencia fundamental del tono, y mucho menos de sus armónicos.

Para conocer las frecuencias de todos sus armónicos es necesario obtener el espectro de frecuencias aplicando la FFT a la señal original. La segunda gráfica de la figura 3.3 contiene el espectro de frecuencias obtenido por medio de la FFT. En el eje horizontal se encuentran las frecuencias, mientras que en el eje vertical están las amplitudes en escala logarítmica.

### *3.1 Grabación y análisis espectral de tonos de guitarra.*

Los picos que aparecen en la gráfica representan cada uno de los componentes del tono complejo, es decir, los armónicos de la cuerda y algunas resonancias del cuerpo de la guitarra. La distancia que hay entre un pico y otro a simple vista es constante en la mayoría de los casos, esto es la evidencia de que la relación entre las parciales que componen un tono de guitarra es prácticamente armónica.

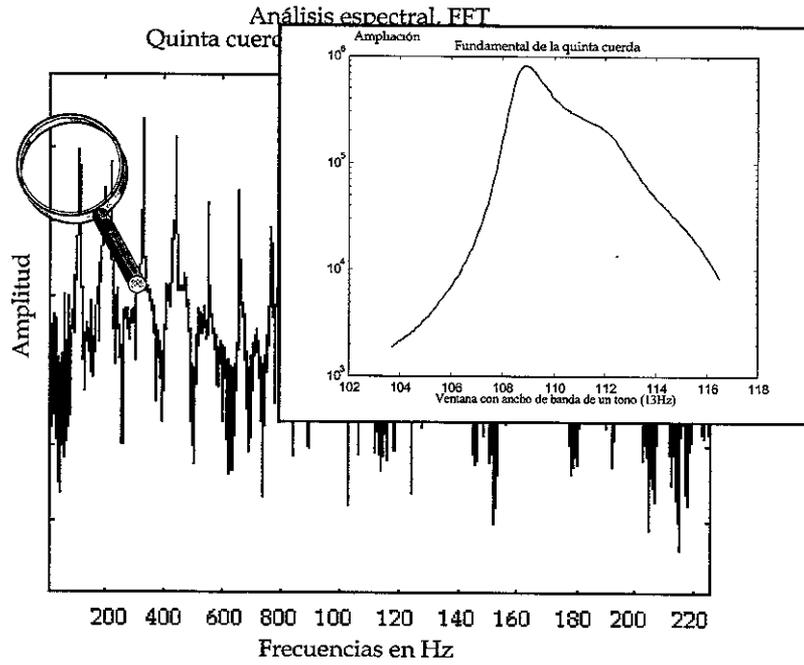
### 3.2 Estimación de las parciales de un tono de guitarra.

Obtener las frecuencias y amplitudes de los 10 primeros armónicos de cada tono de guitarra grabado parece ser una tarea sencilla, bastaría con encontrar los puntos máximos de la FFT. Sin embargo, existen muchos factores que dificultan este proceso y que a su vez determinan en cierta medida la dificultad de afinación de una guitarra.

Si aisláramos cada una de las cuerdas de la guitarra, sacándola de su sistema vibratorio complejo (guitarra), sería mucho más fácil encontrar dichas frecuencias y amplitudes con suma precisión. Pero como se pretende mantener dentro de lo posible las condiciones reales en que una persona afina su instrumento, no es posible eliminar dichas variables. En un sistema acoplado como la guitarra, cuando se graba una de sus notas, no sólo queda registrada la oscilación de la cuerda, sino además la vibración de la tapa y las resonancias de las demás cuerdas, dificultando posteriormente la estimación de las frecuencias de oscilación de la cuerda pulsada.

Por esta razón, utilizamos tres métodos de cálculo para la estimación de la frecuencia y amplitud de cada armónico: cálculo de máximos, cálculo de centroide con ventana fija de 20 Hz, cálculo de centroide con ventana variable ERB. En las siguientes secciones se describe cada uno de ellos.

El primer paso para la estimación de las parciales de un tono de guitarra es el mismo para los tres métodos de cálculo. Consiste en obtener primero la FFT de la señal original. Se estima teóricamente la frecuencia fundamental de la cuerda con base en el TI. Se sitúa una ventana con un ancho de banda un tono alrededor de la frecuencia fundamental estimada (figura 3.4). Dentro de la ventana se localiza el punto máximo. La frecuencia que corresponda a dicho punto será temporalmente la frecuencia del primer armónico o frecuencia fundamental. La frecuencia estimada para cada armónico se calcula multiplicando el número de armónico deseado por la frecuencia fundamental ( $f_n = n f_1$ )



**FIG. 3.4. Ventana con ancho de un tono para el cálculo de la frecuencia fundamental**

### 3.2.1 Frecuencias del punto máximo del espectro

#### 3.2.1 Frecuencias del punto máximo del espectro.

Consiste en situar el centro de una ventana con un ancho de banda de 30 Hz en la frecuencia calculada para cada armónico. Localizando el punto máximo de la FFT dentro de dicha ventana se obtiene la frecuencia y amplitud del armónico en cuestión. Teóricamente se espera que las frecuencias encontradas por este método correspondan a las frecuencias de oscilación de las cuerdas. Enseguida discutimos las dificultades para encontrar las oscilaciones de la cuerda (modos de vibración).

#### DIFICULTADES PARA ENCONTRAR LAS OSCILACIONES DE LA CUERDA

Si la guitarra está más o menos bien afinada, con un margen de error de más/menos un tono, podemos encontrar las parciales de cada sonido con sólo encontrar los valores máximos de la FFT. En ocasiones dentro de la ventana aparece más de un pico, en estos casos no es posible saber cuál de ellos corresponde a la oscilación de la cuerda y cuál a otras resonancias. Podemos distinguir tres clases de picos que se pueden encontrar dentro de la ventana:

1. Picos que corresponden a la oscilación de la cuerda.
2. Picos que corresponden a resonancias de la guitarra.
3. Picos que corresponden a resonancias de otras cuerdas.

De aquí se desprenden tres casos:

1. Un sólo pico dentro de la ventana. En este caso el pico presente en la ventana corresponde a la oscilación de la cuerda.

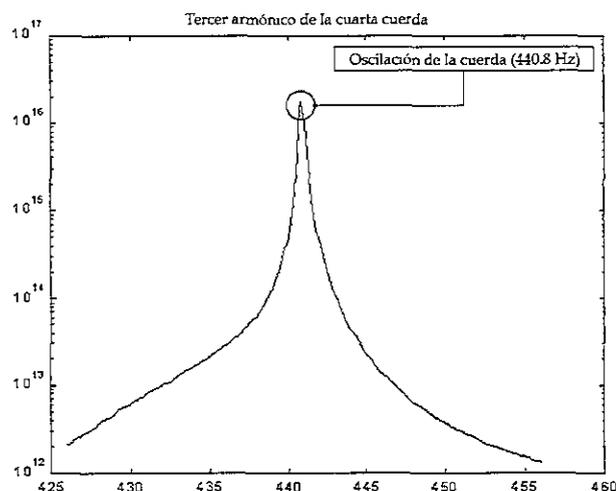


FIG. 3.5. Un sólo pico dentro de la ventana

### 3.2.1 Frecuencias del punto máximo del espectro

2. Resonancias del cuerpo de la guitarra. En ocasiones las resonancias de la tapa armónica sobrepasan el nivel de intensidad de la frecuencia de oscilación de la cuerda. Como la computadora toma el punto máximo dentro de la ventana, el resultado obtenido no siempre corresponderá a la frecuencia de oscilación de la cuerda sino algunas veces a la resonancia de la tapa dependiendo de cuál de las dos tenga mayor intensidad. Cuando las resonancias de la tapa armónica coinciden con la frecuencia de oscilación de la cuerda y sobrepasan su nivel de intensidad el resultado obtenido por medio de este método corresponde a la resonancia de mayor amplitud. Generalmente alguna resonancia de la tapa armónica coincide con la frecuencia fundamental de la tercera cuerda al aire, por ello la 3ª cuerda presenta muchos problemas de afinación. Además nótese en la figura 3.6 la presencia de 3 picos, la cuerda oscila en dos planos, uno transversal y otro paralelo a la tapa. El movimiento transversal está acoplado con el de la tapa y su frecuencia cambia. El movimiento paralelo no está acoplado y no hay cambio de frecuencia.

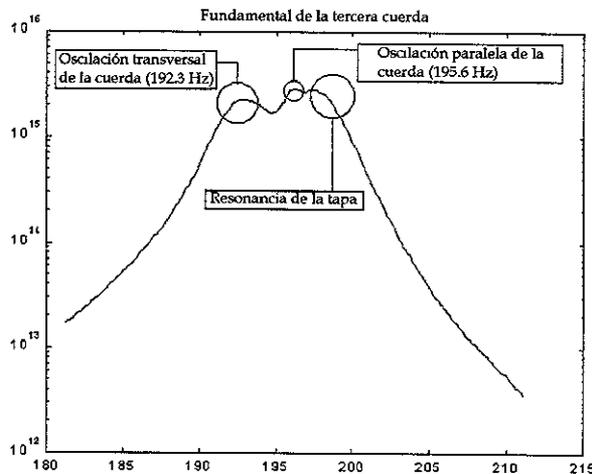


FIG. 3.6. Resonancias de la tapa armónica.

Otra resonancia presente en el cuerpo de la guitarra es la que se produce por el llamado resonador de Helmholtz. Esta generalmente coincide con la frecuencia fundamental de la 5ª cuerda. Cuando el nivel de intensidad de la resonancia de Helmholtz sobrepasa el de la oscilación de la cuerda la computadora tomará ese valor.

### 3.2.1 Frecuencias del punto máximo del espectro

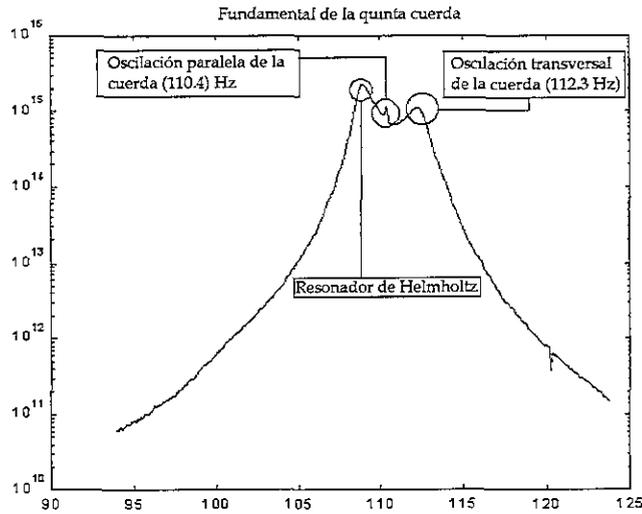


FIG. 3.7. Resonador de Helmholtz

3. Resonancias de las cuerdas no pulsadas. A veces encontramos más de un pico dentro de la ventana que corresponden a resonancias de otras cuerdas que coinciden en frecuencia con el armónico que se está calculando. Esto es fácil de comprender. Los guitarristas saben por experiencia que cuando tocan una cuerda y la apagan enseguida se quedan sonando otras cuerdas por empatía. Este es un caso de la resonancia de una cuerda que no es pulsada. Cuando esto sucede no se puede saber cuál de los picos corresponde a cada cuerda. La computadora tomará el pico más alto de ellos.

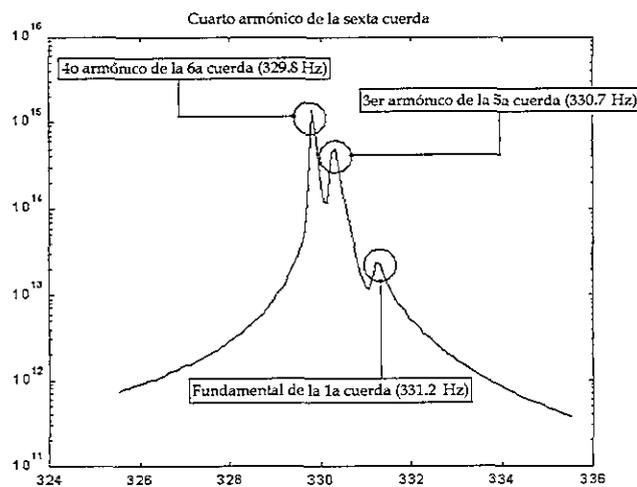


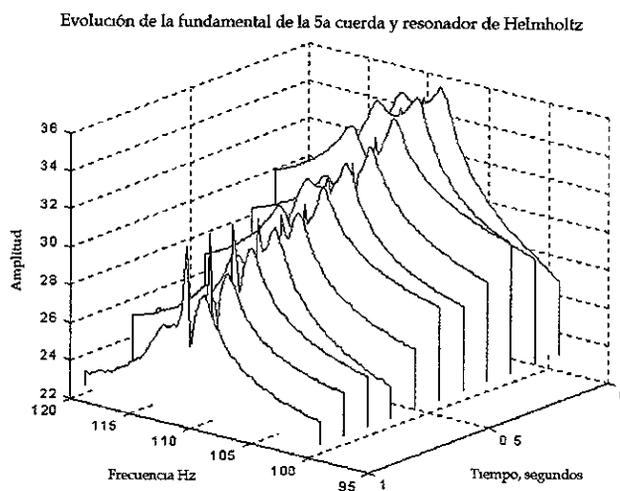
FIG. 3.8. Resonancias de las cuerdas no pulsadas

### 3.2.1 Frecuencias del punto máximo del espectro

Todos estos casos tiene un comportamiento distinto en cada instante de tiempo de la señal. Podemos aplicar la FFT en el puro ataque, o al final de la señal. Por lo general las resonancias de la tapa casi se han extinguido al final de la señal mientras que al principio tienen un gran nivel de intensidad (figura 3.9).

De manera práctica esto puede explicarse de la siguiente manera. Cuando pulsamos una cuerda, en el ataque se escuchan primero las resonancias del cuerpo de la guitarra, estas mueren rápidamente y luego escuchamos la oscilación de la cuerda. A veces sucede que tocamos una nota dentro de una escala y siempre nos suena desafinada por más que intentemos corregirla. Esto es porque en realidad no estamos escuchando la oscilación de la cuerda sino el sonido producido por la tapa que tiene una frecuencia muy cercana. Sin embargo, si tocamos el mismo sonido dentro de un acorde y lo dejamos sonar lo escucharemos bien afinado porque finalmente estamos escuchando la oscilación de la cuerda. Cuando sonamos un acorde, el oído tiende a escuchar batimentos, mientras menos batimentos se produzcan percibiremos el acorde mucho más agradable, aunque este proceso no se realice de manera consciente. Pero cuando tocamos pasajes rápidos, el oído no tiene tiempo de escuchar batimentos pues sólo hay tiempo de escuchar el ataque, entonces hace uso de las relaciones melódicas para determinar si un sonido está afinado.

Para ilustrar este fenómeno presentamos una gráfica (figura 3.9) que muestra la evolución del espectro de un tono en el transcurso del tiempo.



**FIG. 3.9. Evolución de la fundamental de la 5ª y el resonador de Helmholtz.**

### *3.2.1 Frecuencias del punto máximo del espectro*

En esta figura vemos que al inicio (0 segundos) la resonancia de Helmholtz sobrepasa el nivel de intensidad de las oscilaciones de la cuerda. Un segundo después, el nivel de intensidad de la oscilación paralela de la cuerda es mucho mayor que la resonancia de Helmholtz.

3.2.2 Frecuencia del centroide usando una ventana con un ancho de banda de 20 Hz.

Los métodos de cálculo de centroide tienen que ver con la percepción de la altura en tonos complejos pues toman en cuenta todas las frecuencias dentro de la ventana. El método de cálculo de centroide descrito en esta sección toma en cuenta todas las frecuencias contenidas dentro de una ventana de 20Hz cuyo centro se sitúa en la frecuencia estimada de cada armónico. Cuando dos frecuencias son muy cercanas entre si, el oído no es capaz de distinguirlos por separado, es decir que no son resolubles. En este caso los sonidos se mezclan formando uno sólo de intensidad variable (batimientos). Cuando los batimientos sobrepasan los 20Hz se comienza a escuchar un nuevo sonido. Por esta razón se ha escogido una ventana fija de 20 Hz para el cálculo del centroide. El centroide se calcula como el promedio ponderado por la amplitud de las frecuencias contenidas en la ventana de 20Hz. La fórmula para el cálculo del centroide es la siguiente:

$$f_c = \frac{\sum_{k=m}^n a_k f_k}{\sum_{k=m}^n a_k}$$

Donde  $f_c$  es la frecuencia del centroide;  $a_k$  y  $f_k$  son la frecuencia y la amplitud del elemento  $k$ ;  $[m,n]$  son los límites de la ventana.

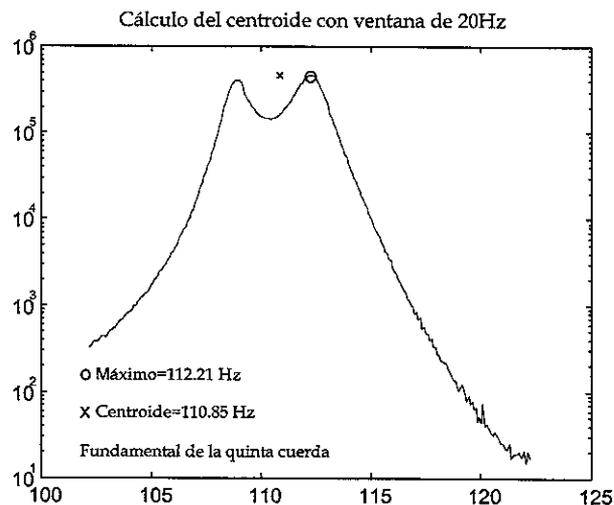


FIG. 3.9. Cálculo del centroide con ventana de 20 Hz

### 3.2.2 Frecuencia del centroide usando una ventana con un ancho de banda de 20 Hz

Por medio de este método se atenúan las diferencias de frecuencia derivadas de los niveles de intensidad de las resonancias y las oscilaciones de la cuerda dentro de la ventana. Pero hay que recordar que los valores obtenidos corresponden a una especie de altura subjetiva que varía un poco con respecto a las oscilaciones de la cuerda. Alrededor de la frecuencia de los armónicos más agudos (cuya amplitud es muy baja) siempre hay componentes espectrales que influyen fuertemente en el cálculo del centroide, aunque el pico esté bien definido, esto hace que el valor del centroide se cargue hacia donde el espectro tiene mayor intensidad alejándose así del punto más alto. También se presenta una desviación si dentro de la ventana hay una resonancia cuya amplitud es considerable con respecto del punto máximo.

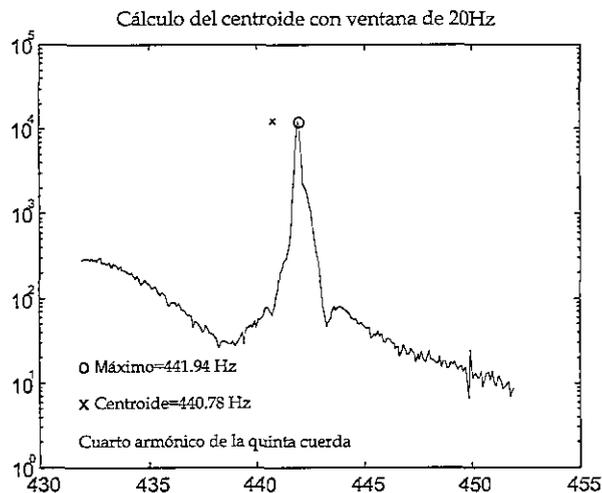


FIG. 3.4. Cálculo del centroide con ventana de 20 Hz

Los métodos de cálculo de centroide, tanto con ventana fija como con ventana variable, están relacionados con la percepción subjetiva de la altura de tonos complejos.

### 3.2.3 Frecuencia del centroide usando un ancho de banda *ERB*.

Este método está íntimamente relacionado con la percepción subjetiva de la altura de un sonido complejo, especialmente con la discriminación de frecuencias discutida en la sección 2.1.2. La única diferencia entre este método y el anterior estriba en el ancho de la ventana para calcular el centroide. Este se basa en el ancho de Banda Crítica, *ERB\**.

Como hemos visto la *ERB* representa la mínima diferencia en frecuencia que debe haber entre las parciales adyacentes de un sonido complejo para que las parciales sean resolubles\*\*. (Selectividad de frecuencias).

La *ERB* no es un valor fijo, sino que depende de la frecuencia de la parcial dada, en este caso del armónico dado. Por eso la ventana para el cálculo de este centroide esta dado por la siguiente función:

$$W=ERB*1.25,$$

Donde *W* es el ancho de nuestra ventana y la *ERB* está dada por la siguiente fórmula:

$$ERB=24.7(4.37Fc+1),$$

Donde *Fc* es la frecuencia central en Khz.

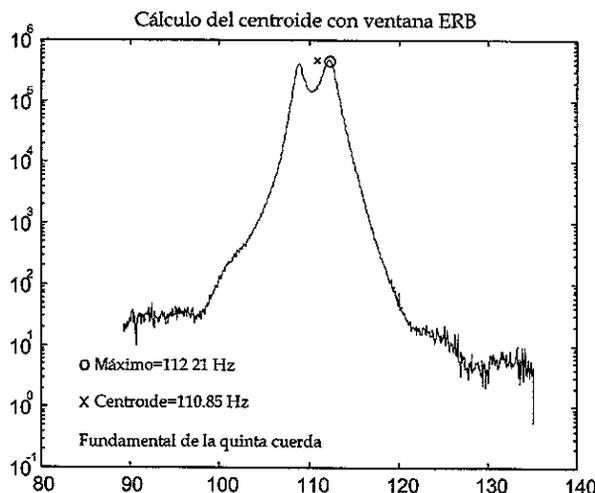


FIG. 3.5. Cálculo de centroide con ventana ERB

\* ERB son las siglas de "Equivalent Rectangular Bandwidth"

\*\* Selectividad de frecuencias

### 3.2.3 Frecuencia del centroide usando un ancho de banda ERB

Este método funciona bastante bien para los primeros 6 armónicos después de estos comienza a haber algunas variaciones importantes debido a que el ancho de banda es cada vez mayor a medida que aumenta la frecuencia central, de tal suerte que dentro de la ventana empiezan a presentarse otros armónicos y resonancias del espectro que por su gran amplitud tienen mucha influencia en el cálculo del centroide.

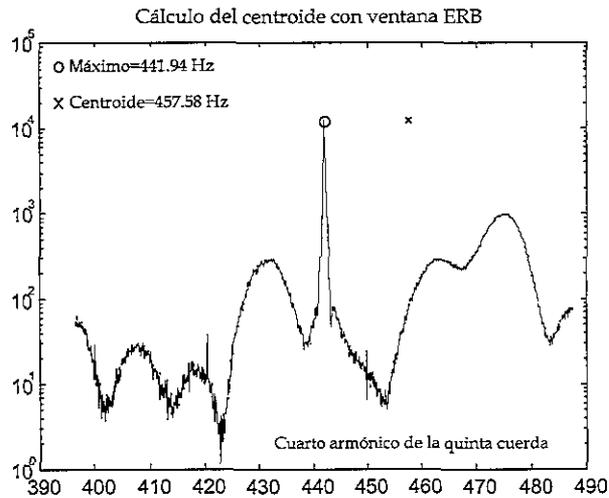


FIG. 3.6. Cálculo del centroide con ventana ERB

El centroide se calcula como el promedio ponderado por la amplitud de las frecuencias contenidas en la ventana de ancho  $W$ , y está determinado por la ecuación presentada en la sección anterior para el cálculo de centroide con ventana fija de 20 Hz.

### 3.3 Estimación de la altura virtual.

La estimación de la altura virtual en tonos de guitarra está íntimamente relacionada con el tema de la percepción de la altura en tonos complejos que se discutió la sección 2.1.2. No está de más decir nuevamente que las parciales que componen un tono de guitarra tienen un pequeño grado de inarmonicidad debido principalmente al acoplamiento de las cuerdas con el cuerpo de la guitarra. Para poder analizar las afinaciones grabadas, es necesario asignar un valor en frecuencia que corresponda al tono de cada cuerda al aire.

Una forma es asignar la frecuencia fundamental de cada cuerda a la altura de cada tono. La frecuencia fundamental de algunas cuerdas al aire presentan desviaciones muy grandes debido a la fuerte influencia de las resonancias de la tapa. Esto no nos permite observar ciertas tendencias presentes en la afinación y procedimiento de cada sujeto. Además, en la vida real nuestro oído toma en cuenta no sólo la fundamental sino varias componentes de un sonido complejo para la percepción de la altura virtual.

Hasta ahora, aunque se ha estudiado mucho la percepción de la altura virtual en tonos complejos, sigue siendo un terreno difícil de pisar. Es decir que todavía no existe una fórmula que nos proporcione un valor preciso de la altura virtual partiendo de los valores de cada componente de un sonido complejo. Aun así se puede lograr una buena aproximación a partir de las conclusiones que hasta ahora la psicoacústica ha sacado al respecto.

Basándonos en las ideas expuestas en la sección 2.1.2 elaboramos un método de aproximación de la altura virtual que se ajusta a nuestras necesidades y a las condiciones en que se realizaron las grabaciones y los procesamientos numéricos.

Cuando se discutió el tema de la altura de tonos complejos inarmónicos en la sección 2.1.2 mencionamos el concepto de "coladera armónica" que se refiere a que el sistema auditivo busca un factor común que equivale aproximadamente al promedio de las frecuencias fundamentales correspondientes a cada armónico, siempre y cuando cada parcial tenga un grado de inarmonicidad menor al 3% de su valor armónico correcto. Una variación del 3% equivale a 51 Cents, casi un cuarto de tono. La inarmonicidad de las parciales en un tono de guitarra son siempre menores a dicho valor, por lo que todas ellas pasaran a través de la coladera armónica contribuyendo

en cierta medida a la percepción de la altura del tono complejo. Por esta razón es posible estimar la altura virtual de un tono de guitarra como un promedio de las alturas virtuales  $f_m/m$  producidas individualmente por cada armónico  $m$ . De aquí se desprende un primer criterio para calcular la altura virtual, y está dado por la siguiente expresión:

$$H = \frac{\sum_{m=1}^n f_m/m}{n}$$

Donde  $H$  representa el valor en Hz de la altura virtual;  $f_m$  es la frecuencia del  $m$ -avo armónico;  $m$  es el número del armónico y  $n$  el número de armónicos tomados para el cálculo de la altura virtual.

Este primer criterio no toma en cuenta la dominancia\* de cada armónico. Dicho de otra manera, este criterio supone que todos los armónicos tienen la misma dominancia. De esta manera los armónicos más agudos influyen fuertemente en el cálculo de la altura virtual. Sin embargo en la realidad, los armónicos más agudos de un tono de guitarra tienen una amplitud muy pequeña, por lo que tienen menor dominancia que los primeros armónicos (armónicos graves). Esto nos lleva a buscar un segundo criterio que tome en cuenta la dominancia de cada armónico.

En la sección 2.1.2 vimos que la dominancia es el grado en que un determinado armónico influye en la percepción de la altura virtual. La dominancia de cada armónico varía de persona a persona, pero se observan ciertas tendencias, que podemos tomar en cuenta para obtener una buena aproximación de la altura virtual. La dominancia de un armónico depende principalmente de su grado de inarmonicidad, y de su nivel de intensidad con respecto de sus armónicos adyacentes. Sabemos que si el grado de inarmonicidad de una parcial es menor a 3%, la variación de la altura virtual será aproximadamente una función lineal de la inarmonicidad de dicha parcial. Dado que un tono de guitarra presenta en sus parciales variaciones menores al 3%, supondremos que los armónicos tienen la misma dominancia debida a su grado de inarmonicidad. Por ello en el segundo criterio para calcular la altura virtual, el grado

---

\* Véase sección 2.1.2

### 3.3 Estimación de la altura virtual.

de dominancia estará dado únicamente por el nivel de intensidad de cada armónico. Por lo tanto, segundo criterio consiste en calcular el valor de la altura virtual como un promedio ponderado por la amplitud de las frecuencias fundamentales  $f_m/m$  correspondientes a cada armónico:

$$H = \frac{\sum_{m=1}^n a_m f_m / m}{\sum_{m=1}^n a_m}$$

Nótese la similitud de esta expresión con la fórmula presentada en la sección 2.2.1:

$$H = \sum_{m=1}^n w_m f_m / m$$

Donde  $H$  es el valor de la altura virtual,  $n$  es el número de parciales,  $w_m$  es la dominancia asociada con el  $m$ -avo componente, considerando:

$$\sum_{m=1}^n w_m = 1$$

Esta es otra manera de representar la misma expresión si tomamos  $w_m$  como la amplitud relativa donde la suma de todas las amplitudes relativas es igual a uno.

### 3.3 Estimación de la altura virtual.

Por medio de los procesamientos numéricos descritos en la sección 3.2 podemos calcular por lo menos los diez primeros armónicos de cada tono de guitarra grabado. Como hemos visto en la sección 2.1.2, sólo los seis primeros armónicos de un tono de guitarra son resolubles, por esta razón deberíamos hacer el cálculo de la altura virtual tomando tan sólo los seis primeros armónicos de cada tono, sin embargo, si tomamos los diez primeros armónicos da casi el mismo resultado. Por otra parte, tomar los 4 armónicos restantes ayuda a compensar ciertos errores que pudieran presentarse por efecto del método de medición. Observemos la siguiente tabla:

#### 5a CUERDA AL AIRE

Frecuencia de los diez primeros armónicos en Hz, amplitud relativa y cálculo de la altura virtual tomando los  $n$  primeros armónicos.

Armónicos:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frecuencias	110.13	220.72	330.33	440.11	550.93	660.32	770.25	880.77	990.95	1101.56
Amplitud relativa	0.0341	0.2441	0.4137	0.2444	0.0000	0.0012	0.0275	0.0045	0.0288	0.0017
Altura virtual #1	110.13	110.25	110.20	110.16	110.16	110.15	110.13	110.13	110.12	110.13
Altura virtual #2	110.13	110.33	110.20	110.16	110.16	110.16	110.15	110.15	110.15	110.15

**TABLA 3.1. Cálculo de la altura virtual, criterio 1 y 2**

En esta tabla podemos observar la diferencia entre los dos criterios de cálculo de la altura virtual. Los valores para cada criterio están presentados en la tercera y cuarta línea de la tabla. Estos valores representan la altura virtual calculada con los  $n$  primeros armónicos. Por ejemplo, la altura virtual obtenida por medio del segundo criterio, tomando en cuenta los ocho primeros armónicos es de 110.15 Hz. En la segunda línea se encuentra la amplitud relativa, si sumamos los diez valores en esa línea nos dará un total de uno. Como podemos ver, los armónicos de la 5ª cuerda que tienen mayor nivel de intensidad son el segundo y tercer armónicos, por lo mismo serán los que tengan mayor dominancia en el cálculo de la altura virtual. Por el contrario el quinto armónico tiene un nivel de intensidad casi nulo, por lo que no tendrá dominancia en la percepción de la altura. Como puede verse, utilizando el segundo criterio, casi es lo mismo utilizar de seis a diez armónicos para el cálculo de la altura virtual.

Para nuestro estudio, hemos decidido utilizar el segundo criterio para calcular la altura virtual de un tono de guitarra utilizando los valores de los diez primeros armónicos.

# EXPERIMENTOS DE AFINACIÓN

## CAPÍTULO CUATRO

#### 4 Experimentos de afinación

Después de haber hablado de los factores que intervienen en la afinación de la guitarra clásica desde un plano teórico y de haber descrito los métodos de estimación de la altura virtual en tonos de guitarra, es el momento de adentrarnos en la parte central de este trabajo que consiste en una serie de experimentos que tienen como finalidad detectar como se manifiestan estos factores en una afinación real, determinar cuál es su relación con los patrones estimados, así como obtener estadísticamente el patrón de afinación y la variabilidad que un guitarrista puede alcanzar en una afinación real.

##### PROCEDIMIENTO GENERAL

Se realizaron dos tipos de experimentos. El primero consiste en afinar siguiendo procedimientos de afinación prescritos. El segundo tipo consiste en afinar siguiendo el procedimiento de afinación propio de cada sujeto.

Cada experimento se divide en dos partes, la primera consiste en una sesión de diez afinaciones siguiendo un mismo procedimiento de afinación en la misma guitarra. La segunda parte es una pequeña entrevista donde el sujeto describe su procedimiento de afinación, la manera de utilizar el diapasón, algunos problemas a los que se enfrentó durante el experimento y problemas a los que comúnmente se enfrenta cuando afina su instrumento en la vida diaria. Esta entrevista se realiza al final de la sesión de afinaciones para que la plática no influya en la manera en que se afina el instrumento. Basándose en esas descripciones se obtiene un patrón estimado de afinación que se compara con los resultados reales obtenidos. A las diferencias encontradas se les busca una posible explicación basada en de los factores descritos en el capítulo 2.

El sujeto que afina la guitarra es introducido a un cuarto acondicionado acústicamente como un estudio de grabación, donde permanece sólo en el transcurso de su afinación. Se le proporciona un diapasón y la guitarra previamente desafinada por una persona distinta. El sujeto no tiene límite de tiempo para afinar la guitarra, con el fin de que lo haga lo mejor posible y sin presiones de tiempo. Una vez que ha terminado de afinar, se procede a grabar digitalmente cada una de las seis cuerdas al aire.

La ejecución de las notas es realizada por una persona distinta con la intención de que el sujeto que afina pueda descansar el tiempo que dure la grabación, ya que el cansancio y la motivación del sujeto pueden influir notablemente en los resultados. Después de grabar las seis cuerdas al aire, la guitarra es desafinada nuevamente por una persona distinta de la que afina.

Este proceso es realizado diez veces seguidas. Al final se calcula el promedio de las alturas virtuales de cada cuerda y la variabilidad estadística que servirán para representar gráficamente el patrón de afinación y su variabilidad. El patrón de afinación se obtiene a partir de las diferencias con respecto al TI de las alturas virtuales de cada cuerda. El experimento tiene una duración aproximada de hora y media, dependiendo de lo que se tarde cada sujeto en afinar la guitarra cada vez.

#### SUJETOS

Los nueve sujetos escogidos para realizar estos experimentos son guitarristas de nivel profesional y estudiantes de licenciatura. La mayoría de ellos de la Escuela Nacional de Música.

#### GUIARRA

Con el fin de mantener las mismas condiciones para cada sujeto a la hora de afinar, todos los experimentos se realizaron afinando una misma guitarra. Esta es una guitarra española de concierto marca Manuel Rodríguez. La guitarra fue encordada con cuerdas D'Addario EJ46, de tensión alta. Las cuerdas se cambiaron sólo una vez, y hasta que se concluyeron los experimentos la guitarra sólo fue utilizada para ese fin, evitando así el desgaste innecesario de las cuerdas. También se midió la admitancia mecánica de la guitarra para estimar los errores de afinación debidos al acoplamiento de las cuerdas con la guitarra.

#### **4.1 Experimentos con procedimientos de afinación prescritos.**

El primer tipo de experimento consiste en afinar siguiendo procedimientos de afinación prescritos. Es decir que a cada sujeto se le pide que afine siguiendo un determinado procedimiento de afinación. Estos experimentos fueron realizados por sólo dos sujetos, "A" y "B"\*. Cada uno de ellos afinó utilizando cuatro distintos procedimientos de afinación:

Procedimiento #1: Descrito en la sección 2.1.3, consiste en afinar la guitarra por medio de armónicos y eliminación de batimentos.

Procedimiento #2: Descrito en la sección 2.1.3, consiste en afinar la guitarra utilizando el procedimiento normal del quinto traste por comparación melódica.

Procedimiento #3: Consiste en afinar las cuerdas al aire sin hacer uso de armónicos o trastes, únicamente se pueden hacer comparaciones melódicas entre los intervalos que se forman entre cada una de las cuerdas al aire.

Procedimiento #4: Este procedimiento es libre. Consiste en afinar con el procedimiento propio de cada sujeto.

En los cuatro casos la cuerda de referencia es afinada con el diapasón por medio de eliminación de batimentos.

---

\* Se omiten los nombres para preservar la anonimidad de los sujetos.

4.1.1 Procedimiento de afinación usando parciales.

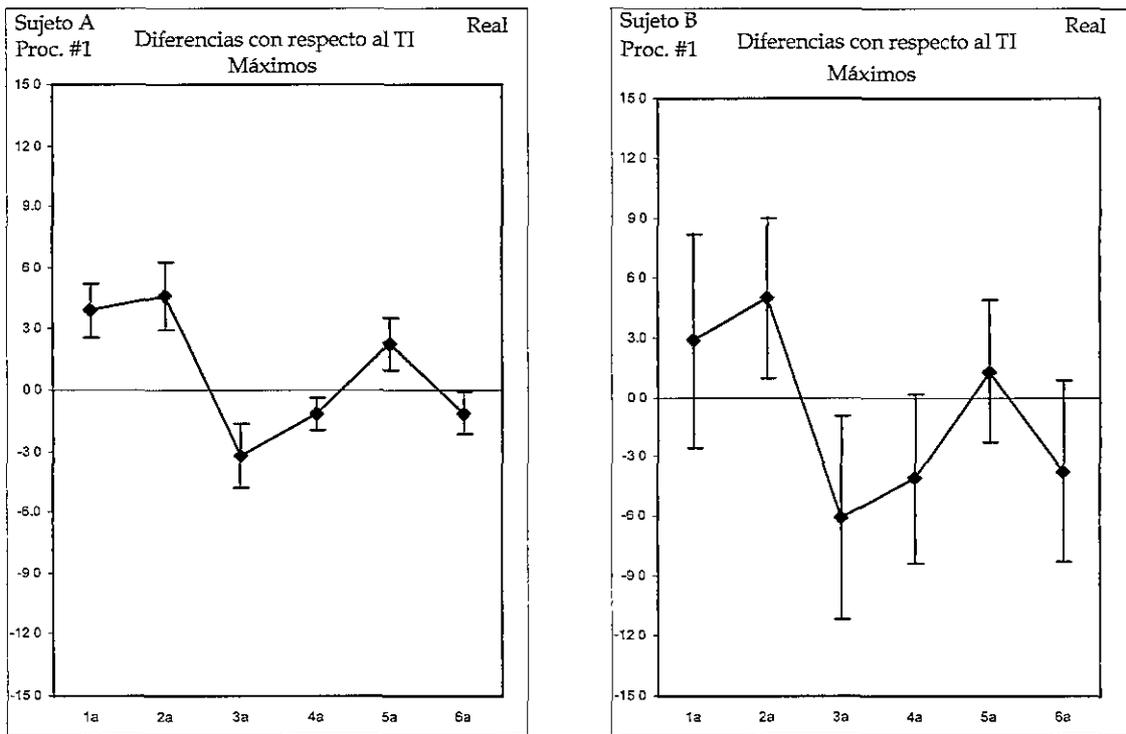


FIG. 4.1. Patrones de afinación medidos. Procedimiento #1, sujetos A y B.

Este procedimiento es el procedimiento #1 descrito en la sección 2.1.3. En este procedimiento se hace uso de los armónicos y por lo tanto se afina por medio del método aural, es decir que se afina por medio de eliminación de batimientos.

En esta sección presentaremos únicamente las gráficas más representativas por cuestiones prácticas y de espacio. En la sección 2.1.4 se presentaron unas gráficas similares a estas (figura 2.3). Estas dos gráficas presentan las diferencias con respecto al TI que se obtuvieron promediando los valores las diez afinaciones realizadas por cada sujeto. Observese que aunque no son iguales los patrones de afinación medidos son muy similares entre si, por ejemplo, la tercera cuerda al aire en ambos casos esta por debajo del TI, mientras que la segunda cuerda está por encima del TI. En otras palabras los trazos entre punto y punto siguen siempre la misma dirección. Específicamente en la guitarra Manuel Rodriguez que se utilizó en los experimentos, cuando se afina por medio de este procedimiento de afinación, se obtienen patrones similares a los presentados en la figura 4.1.

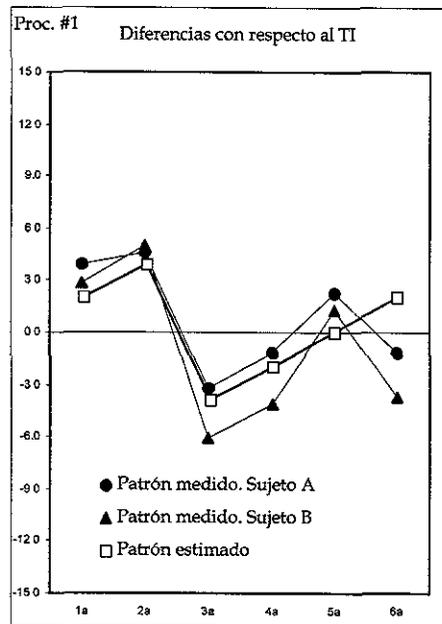
#### 4.1.1 Procedimiento de afinación usando parciales

Es probable que al afinar otra guitarra con el mismo procedimiento de afinación, se observen patrones distintos entre una guitarra y otra, pero los patrones serán parecidos entre sujeto y sujeto si utilizan la misma guitarra y el mismo procedimiento de afinación.

Las líneas verticales representan la variabilidad estadística de la afinación expresada en Cents. Debido a que los patrones medidos se obtienen haciendo un promedio de las diez afinaciones realizadas por cada sujeto, siempre hay un rango de error a la hora de tratar de reproducir el mismo procedimiento de afinación. Si las diez afinaciones hubieran sido idénticas la variabilidad sería de 0.0 Cents y no habría líneas verticales. Sin embargo tenemos ciertos límites físicos y subjetivos que impiden poder afinar una guitarra exactamente igual las diez veces.

En terminos prácticos, la línea vertical representa el rango de error con que el sujeto puede obtener los mismos resultados utilizando un determinado procedimiento de afinación. En otras palabras es el grado de reproducibilidad de un procedimiento de afinación por un determinado sujeto.

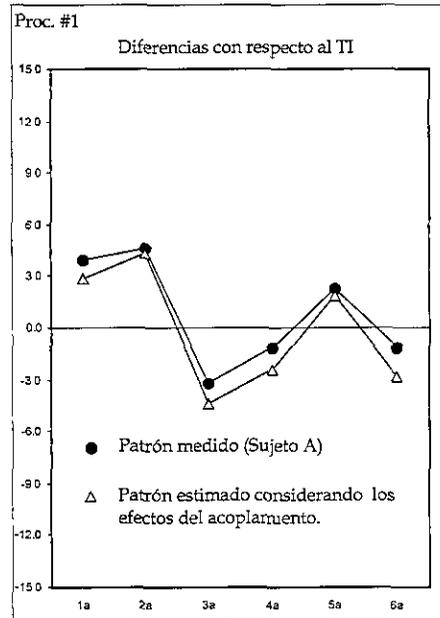
Resulta sumamente interesante comparar los patrones medidos (figura 4.1) con los patrones estimados de los procedimientos #1 y #2 presentados en la sección 2.1.4 (figura 2.3).



**FIG. 4.2. Comparación entre el patrón estimado y los patrones medidos. Proc #1**

#### 4.1.1 Procedimiento de afinación usando parciales

En la figura 4.2, podemos ver que los patrones medidos se ajustan bastante bien al patrón estimado, con excepción de la 6ª cuerda. La causa de la desviación que presenta la sexta cuerda es la inarmonicidad inducida por el acoplamiento de las cuerdas con la guitarra.



**FIG. 4.3. Proc. 1, patrón medido vs patrón estimado.**

La figura 4.3 es una comparación entre el patrón medido del sujeto A y el patrón estimado tomando en cuenta la inarmonicidad inducida por el acoplamiento de las cuerdas con la guitarra. Como podemos ver los patrones medidos se ajustan mucho mejor a los patrones estimados cuando tomamos en cuenta los efectos del acoplamiento. Podemos concluir que cuando usamos procedimientos de afinación por medio de armónicos, los patrones medidos se ajustan bastante bien a los patrones estimados cuando se toma en cuenta los efectos del acoplamiento.

## 4.1.2 Procedimiento de afinación pisando trastes.

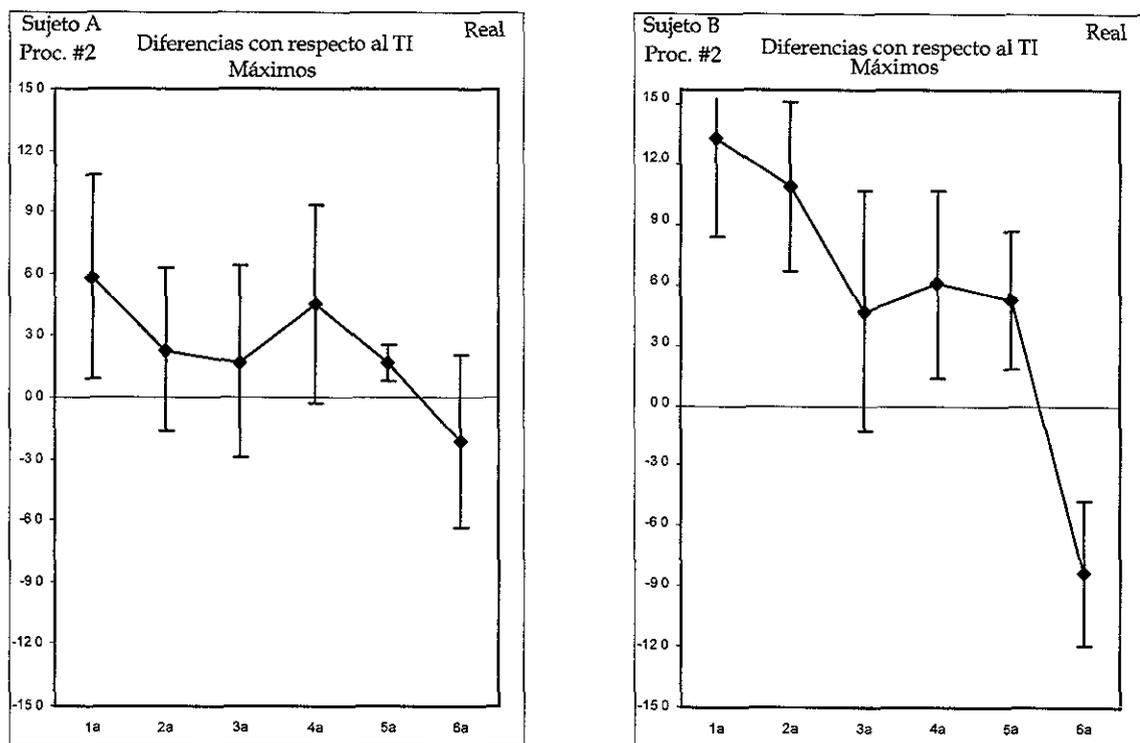


FIG. 4.4. Patrones de afinación medidos. Procedimiento #2, sujetos A y B.

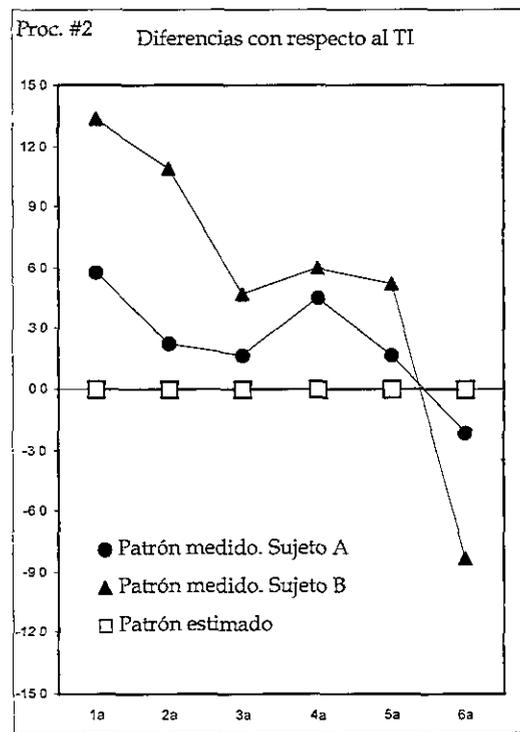
Este corresponde al procedimiento #2 descrito en la sección 2.1.4. Este procedimiento es el standard del quinto traste. Casi todos los procedimientos pueden ser afinados con criterio aural o comparación melódica. Pero en este experimento se afinó usando comparaciones melódicas.

En las gráficas arriba presentadas (figura 4.4) también se nota un cierto parecido entre los patrones de afinación medidos de los sujetos A y B, sin embargo el parecido es mucho menor que el observado en el procedimiento #1 de la sección anterior (4.1.1). Esto sucede comúnmente cuando se usan procedimientos que involucran cuerdas pisadas. También puede influir el hecho de afinar melódicamente, pues como se discutió en la sección 2.1.5, teóricamente la afinación aural puede llegar a ser más precisa que la afinación melódica. Sin embargo como veremos más adelante, esto depende también del entrenamiento auditivo.

#### 4.1.2 Procedimiento de afinación pisando trastes.

Es importante hacer notar que la variabilidad en el caso del sujeto A es mucho mayor en este procedimiento #2 (figura 4.4) que en el procedimiento #1 (figura 4.1), con excepción de la 5ª cuerda. La 5ª cuerda se afinó con diapasón en ambos casos, por eso la 5ª cuerda presentan una variabilidad pequeña en ambos procedimientos. Las razones del incremento en la variabilidad se discutirán más adelante, pero por el momento suponemos que dos posibles razones son la utilización del criterio melódico y el hecho de pisar las cuerdas.

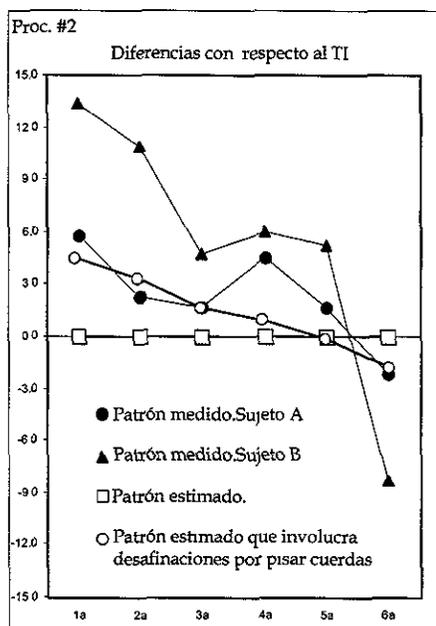
Comparemos ahora las gráficas con su respectivo modelo teórico presentado en la sección 2.1.4.



**FIG. 4.5. Comparación entre el patrón estimado y los patrones medidos. Proc #2**

Ciertamente se observa un parecido no tan claro entre ambos sujetos (figura 4.5), pero aparentemente el patrón medido de ambos sujetos no tienen nada que ver con su respectivo patrón estimado. El patrón estimado es sumamente distinto de los patrones medidos de los sujetos A y B.

Comparemos las gráficas de la figura 4.5 con las presentadas en la sección 2.2.3 que habla de las variaciones en la afinación debidas a la deformación de las cuerdas al ser pisadas (figura 2.12).

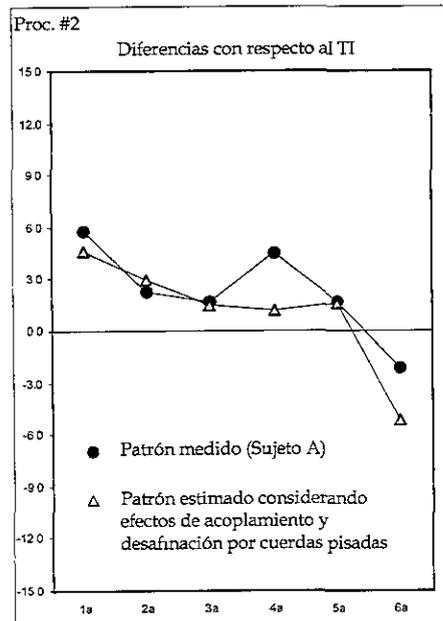


**FIG. 4.6. Comparación de los patrones medidos con el patrón estimado que involucra desafinaciones por pisar cuerdas. Proc #2. Sujetos A y B.**

Aunque la similitud entre el nuevo patrón estimado y los patrones medidos sigue sin ser muy clara, se nota una inclinación constante hacia abajo, es decir una pendiente negativa. Con excepción de la 4ª cuerda, el sujeto A se ajusta bastante bien al nuevo patrón estimado representado por círculos blancos. El sujeto B también se ajusta muy bien al nuevo patrón estimado con excepción de la 3ª y 4ª cuerdas, si tomamos en cuenta que la 5ª que es la cuerda de referencia fue afinada arriba del TI desde el principio.

Comparemos ahora el patrón medido del sujeto A con el patrón estimado, considerando tanto los efectos del acoplamiento como las desafinaciones producidas al pisar las cuerdas.

#### 4.1.2 Procedimiento de afinación pisando trastes.



**FIG. 4.7. Proc. 2. Patrón medido vs Patrón estimado (sujeto A).**

En figura 4.7 vemos claramente como el patrón medido se ajusta mucho mejor al patrón estimado cuando tomamos en cuenta los efectos del acoplamiento. Por el momento no tenemos una explicación posible con respecto a la variación presentada en la 4ª cuerda. Lo que sabemos es que es mucho más difícil estimar los patrones de afinación que involucran las desafinaciones producidas por el acoplamiento cuando se trata de cuerdas pisadas, ya que no es posible saber cual es la frecuencia de cada cuerda montada en extremos rígidos, en el proceso de afinación puede haber ciertos errores acumulativos que no están contemplados en la estimación del patrón de afinación. Por otro lado, la desafinación producida por cuerdas pisadas es también difícil de estimar, ya que no podemos saber la cantidad de presión ejercida por el dedo sobre las cuerdas. Cuando la presión ejercida sobre la cuerda es mayor que la necesaria para que la cuerda haga contacto con el traste, la desafinación por efecto de la deformación de la cuerda será mayor.

4.1.3 Procedimiento de afinación usando intervalos musicales entre las cuerdas al aire.

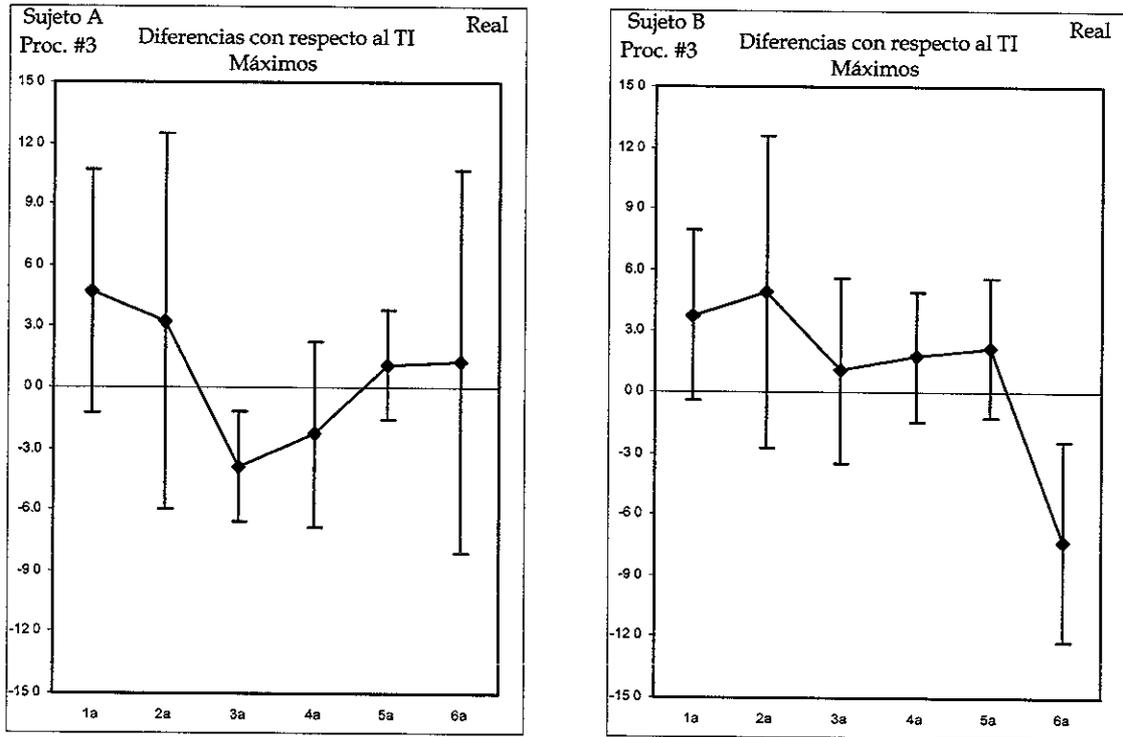


FIG. 4.8. Patrones de afinación medidos. Procedimiento #3, sujetos A y B.

Los resultados del procedimiento #3 dependen sin duda de la formación musical y el entrenamiento auditivo de cada sujeto ya que las únicas referencias validas son las comparaciones melódicas mediante los intervalos que resultan entre las cuerdas al aire. Aunque en el procedimiento #2 también se utilizó la comparación melódica, es más fácil precisar melódicamente un unísono que una tercera mayor, cuarta justa o incluso un intervalo de octava. Es por ello que los patrones medidos no tienen rasgos parecidos además de que la variabilidad es más grande en ambos sujetos que en los casos anteriores.

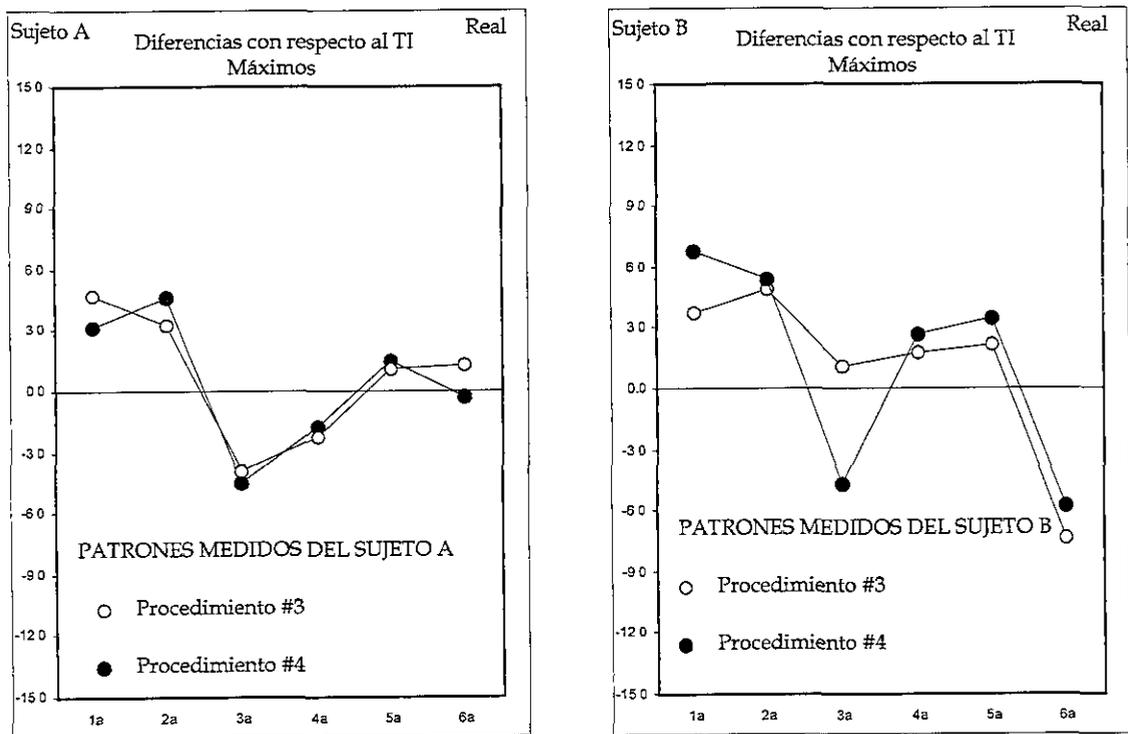
En la sección 2.1.4 discutimos el grado de desafinación que debe tener cada intervalo para ser considerado *lobo*. Mediante las definiciones de intervalo lobo presentadas en la sección 2.1.4 se puede ilustrar muy bien la razón por la que se presenta una mayor variabilidad y la ausencia de una similitud entre los patrones de afinación de cada sujeto.

#### 4.1.3 Procedimiento de afinación usando intervalos musicales entre las cuerdas al aire

Afinar por comparación de unísonos es mucho más preciso que hacer comparaciones de quintas cuartas y terceras mayores pues estas tienen una tolerancia de 12 y 22 Cents respectivamente (sección 2.1.4).

Por ejemplo si queremos afinar por comparación melódica la tercera mayor que se forma entre la 3ª y 2ª cuerdas existe un rango de 22 Cents en que escucharemos dicho intervalo afinado.

El procedimiento #4 es un procedimiento libre, consiste en afinar la guitarra con el procedimiento propio de cada sujeto, estos serán estudiados en la sección 4.2 junto con los demás sujetos que afinaron mediante su propio procedimiento de afinación. Por ello no dedicamos una sección especial para estos, pero enseguida serán presentados en comparación con las gráficas de esta sección (figura 4.9).



**FIG. 4.9. Comparación entre los patrones medidos de los procedimientos 1 y 2 para cada sujeto.**

Comparando el procedimiento #3 con el procedimiento #4 de cada sujeto, vemos que los patrones medidos entre ambos procedimientos son similares excepto en el caso de la 3ª cuerda del sujeto B, lo que nos hace suponer que un sujeto busca los intervalos que está acostumbrado a escuchar en su guitarra al afinar con el procedimiento de afinación al que está acostumbrado (Proc. #4). Es por ello que una persona puede escuchar desafiada su guitarra cuando es afinada por otra persona ya que está acostumbrado a escuchar los mismos intervalos en su guitarra afinada por él mismo.

#### 4.1.4 Afinación melódica vs Afinación aural.

La variabilidad en la afinación aural y melódica depende en gran parte de la educación auditiva de cada sujeto. Es decir, un sujeto cuya educación auditiva esta orientada hacia los criterios aurales, obtendrá una menor variabilidad al utilizar procedimientos de afinación que hagan uso de este criterio auditivo (ver sección 2.1.5). Esto se refleja en los resultados de los experimentos. Para tener conclusiones más precisas a este respecto será necesario elaborar un número mayor de experimentos y sujetos para hacer una mejor estadística. Por otro lado es importante entrenar auditivamente a los sujetos con el fin de manejar las mismas condiciones. Pero por el momento presentamos las conclusiones obtenidas hasta ahora.

En estos experimentos cada sujeto A y B tiene diferente orientación auditiva con respecto a los criterios auditivos.

El procedimiento #1 hace uso del enfoque auditivo y eliminación de batimentos, es decir afinación aural. Los resultados para cada sujeto fueron los siguientes: El sujeto A obtuvo una variabilidad promedio 1.3 Cents, mientras que el sujeto B obtuvo una variabilidad promedio de 4.5 Cents. El sujeto A utiliza comúnmente el métodos de afinación aural para afinar su guitarra, lo cual explica la pequeña variabilidad de su patrón de afinación.

El procedimiento #3 hace uso únicamente de la afinación melódica ya que consiste en afinar las cuerdas al aire utilizando tan sólo las relaciones melódicas entre cada cuerda al aire. Los resultados para cada sujeto fueron los siguientes: El sujeto A obtuvo una variabilidad promedio de 5.8 Cents, mientras que el sujeto B obtuvo una variabilidad promedio de 4.7 Cents. En este caso la variabilidad obtenida por los sujetos A y B es prácticamente igual y, en el caso del sujeto A, demuestra la diferencia debida al uso de un procedimiento de afinación que no está basado en criterios aurales en los que está bien entrenado y logra menor variabilidad.

Se presentan estos dos casos por ser los más representativos pero a continuación presentamos una tabla comparativa con los 4 procedimientos de afinación.

Tabla comparativa de variabilidad promedio en Cents

	Procedimiento			
	#1 Aural	#2 Melódica	#3 Melódica	#4 Libre
Sujeto A	1.3	3.9	5.8	1.5
Sujeto B	4.5	4.5	4.7	3.3

**TABLA 4.1. Comparación de variabilidad promedio entre sujetos A y B.**

Los sujetos logran una menor incertidumbre cuando utilizan un procedimiento al que están acostumbrados (Proc #4, Libre), a diferencia de aquellos procedimientos que se les ha forzado hacer, con los que no se sienten cómodos. Sin embargo se observa una tendencia a obtener una menor incertidumbre mediante métodos de afinación aural, lo cual aparentemente depende de un buen entrenamiento en este tipo de procedimientos. Por supuesto esta aseveración es prematura ya que la cantidad de datos presentados a sí como las condiciones de estas pruebas son insuficientes para obtener un resultado satisfactorio como mencionamos al inicio de esta sección.

#### **4.2 Experimentos con procedimientos de afinación propios de cada sujeto.**

El segundo tipo de experimentos que discutiremos en esta sección corresponde a los procedimientos de afinación propios de cada sujeto. Se contó con nueve guitarristas para realizar estos experimentos. A cada guitarrista, después de haber realizado su sesión de diez afinaciones, se le pidió que describiera el procedimiento de afinación que utiliza. Algunos procedimientos son sencillos y se pudo hacer una estimación de afinaciones resultantes con ese procedimiento. De aquí se obtienen las diferencias con respecto al TI. La representación gráfica de estas diferencias expresadas en Cents constituye el patrón de afinación estimado. Este patrón se compara con los valores reales obtenidos con los experimentos cuya representación gráfica constituye el patrón de afinación medido. Así es posible observar si presentan ciertas similitudes. Algunos procedimientos de afinación resultaron ser sumamente complicados, lo cual impide hacer una estimación del patrón de afinación. Algunos guitarristas después de afinar la guitarra siguen una serie de comparaciones de intervalos y acordes de comprobación, de manera que corrigen aquellas notas con las que no quedaron satisfechos.

En esta sección presentaremos los resultados más relevantes de algunos sujetos, y discutiremos los problemas presentados en el párrafo anterior así como la afinación de la cuerda de referencia. Todos los guitarristas siguen siempre un determinado procedimiento de afinación aunque en ocasiones no son muy conscientes de ello.

4.2.1 Resultados Generales

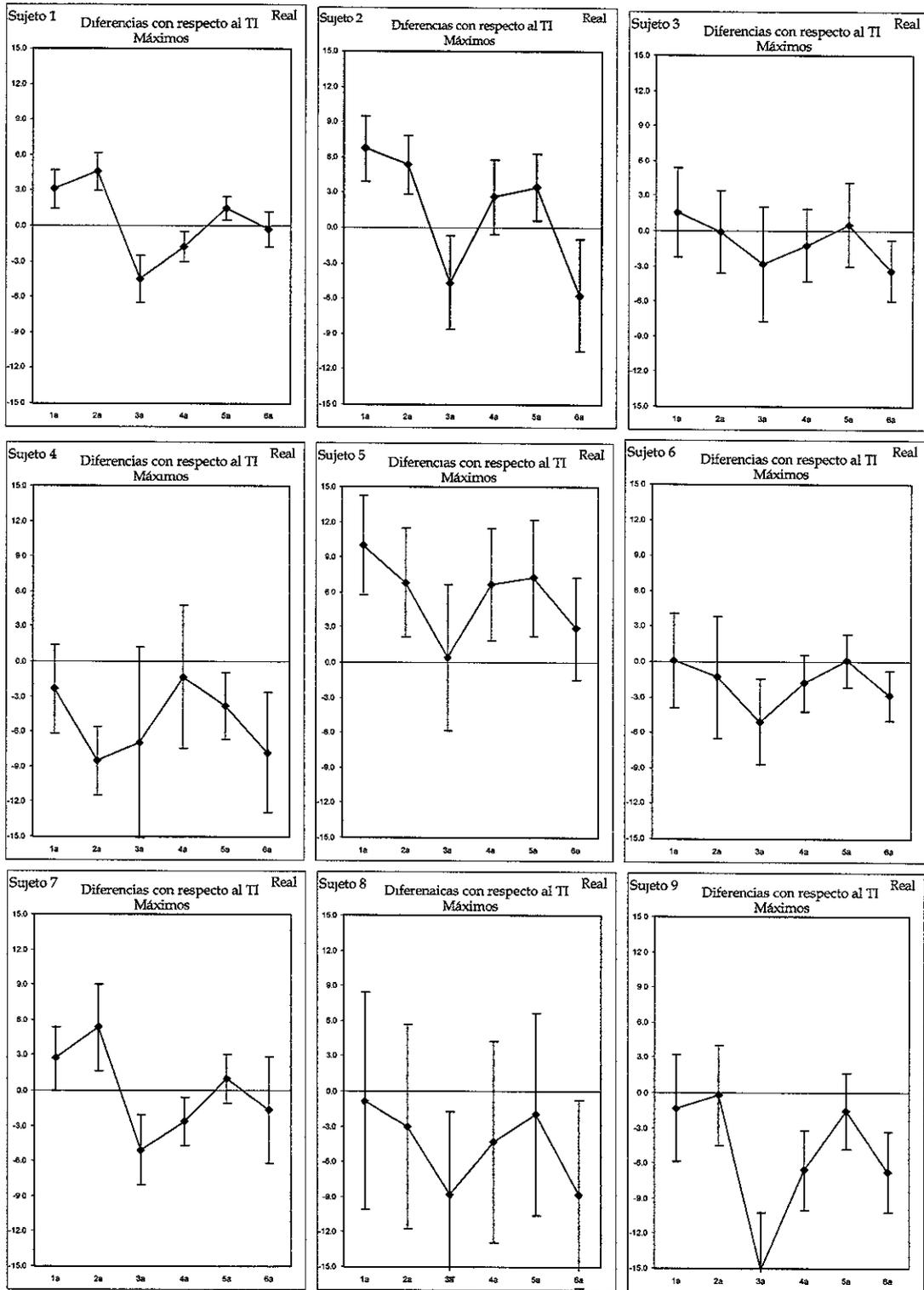


FIG. 4.10. Resultados generales. Método de máximos.

#### 4.2.1 Resultados generales

En esta sección presentamos brevemente los resultados obtenidos en los experimentos realizados con los procedimientos propios de cada sujeto. Por limitaciones de espacio se presentan únicamente los resultados obtenidos por medio del método de máximos.

Estas gráficas representan las diferencias con respecto al TI y la variabilidad de cada uno de los nueve sujetos que participaron en estos experimentos.

Obsérvese que en todos los casos la 3ª y 6ª cuerdas tienen la tendencia a quedar bajas en afinación con respecto a las demás. Estas variaciones se deben principalmente a los efectos de la inarmonicidad inducida por el acoplamiento de las cuerdas con el cuerpo de la guitarra (Ver 2.2.2).

Si promediamos los resultados de los nueve sujetos podemos obtener un patrón general de afinación medido. Así será más fácil observar las tendencias generales de afinación de cada cuerda de una manera más clara. Observemos la figura 4.11.

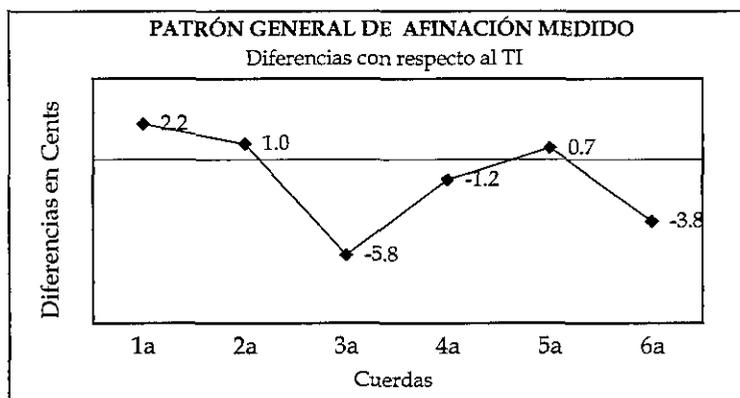
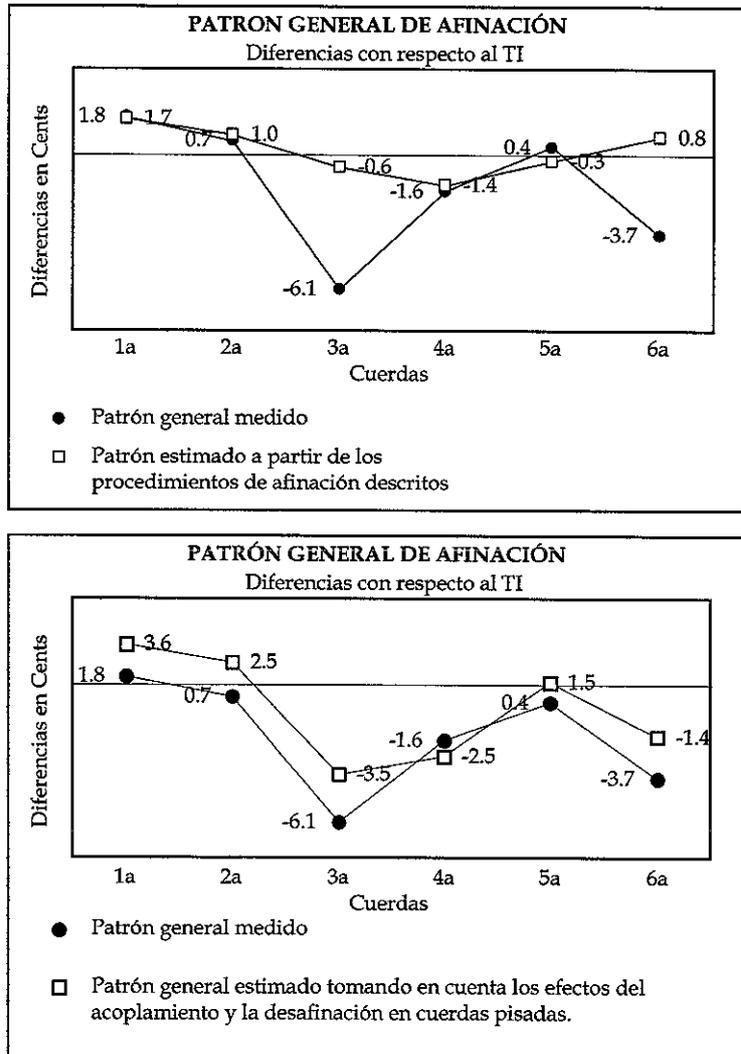


FIG. 4.11. Patrón general de afinación medido.

Esta gráfica muestra el patrón general de afinación. Es un patrón de afinación obtenido promediando las diferencias con respecto al TI de los nueve sujetos. En ella se puede observar que en general la 3ª y 6ª cuerdas están por debajo del TI, la 1ª cuerda está por encima del TI, la 2ª 4ª y 5ª cuerdas casi coinciden con la línea del TI.

#### 4.2.1 Resultados generales

Si promediamos los valores de los patrones estimados de cada sujeto obtendremos el patrón general estimado. Comparando ambas gráficas podemos deducir si la tendencia de cada cuerda es debida a los procedimientos de afinación de los sujetos o a los factores físicos descritos en la sección 2.2.



**FIG. 4.12. Comparación del patrón general medido y el patrón general estimado.**

Para obtener esta gráfica se excluyeron los datos de los sujetos 2 y 6 debido a que sus procedimientos de afinación son complicados y no es posible hacer una estimación de sus patrones de afinación. Como podemos ver en la parte superior de la figura 4.12 el patrón estimado es muy similar al patrón medido, con excepción de la 3ª y 6ª cuerdas cuyo comportamiento depende en gran medida de la inarmonicidad por acoplamiento de la cuerda

#### 4.2.1 Resultados generales

con el cuerpo de la guitarra. Además, la tercera cuerda es comúnmente afinada pisando el segundo traste para obtener la octava con la quinta cuerda al aire. Este es otro factor que influye notablemente en la afinación de esta cuerda. La mayoría de los sujetos afina el tercer armónico de la 4ª cuerda (armVII) con el cuarto armónico de la 5ª (armV), y la primera cuerda al aire con el tercer armónico de la 5ª cuerda (armVII). Como en estas cuerdas la influencia de las resonancias de la tapa no es muy grande y además no se utilizan trastes, se ajustan muy bien a los patrones estimados. La parte inferior de la figura 4.12 muestra una comparación entre el patrón general medido, y el patrón estimado que involucra la desafinación en cuerdas pisadas y los efectos del acoplamiento. Note que los patrones son muy similares. Esto es la evidencia de que el acoplamiento y la deformación de las cuerdas pisadas son factores determinantes en la afinación de la guitarra.

Los patrones de afinación dependen del procedimiento de afinación, de los efectos de tensión al pisar las cuerdas y de los efectos de acoplamiento cuerda-guitarra. Por esta razón cuando hacemos la estimación de un patrón tomando en cuenta estos tres factores, el patrón medido se ajusta muy bien al patrón estimado.

Es importante reiterar que no todas las guitarras tienen el mismo comportamiento acústico. Si realizamos los mismos experimentos en otras guitarras es probable que los patrones cambien. Podría darse el caso en que los efectos del acoplamiento produjeran un incremento en la percepción de la altura, resultando por ejemplo, que la 3ª cuerda al aire quede alta en vez de baja como es el caso de la guitarra Manuel Rodríguez utilizada para estos experimentos.

#### OTRAS ESTADÍSTICAS GENERALES

En esta sección presentamos estadísticamente los resultados obtenidos de las nueve sujetos que participaron en estos experimentos.

#### ESTADÍSTICAS GENERALES (Variabilidad expresada en Cents)

Variabilidad media:	4.1
Variabilidad máxima:	8.4
Variabilidad mínima:	1.5

TABLA 4.2. Estadísticas generales

#### 4.2.1 Resultados generales

La variabilidad promedio obtenida de todas las tomas fue de 4.1 Cents. Por supuesto este dato es muy general pues incluye todas las cuerdas y tomas realizadas, no contemplando casos particulares. Esto quiere decir que un guitarrista al afinar su guitarra varias veces, cada afinación puede experimentar variaciones de  $\pm 4.1$  Cents. Podemos darnos cuenta del significado de este valor si consideramos que un afinador electrónico cromático tiene una resolución de  $\pm 5$  Cents<sup>16</sup>. Además, si comparamos este dato con la tabla 2.1 de Discriminación de Frecuencias (DLF) presentado en el capítulo 2.1.1 nos podemos dar cuenta que es una cifra comparativamente pequeña ya que el menor de los valores presentados en la tabla es de 5.7 Cents. Una diferencia de 8.2 Cents (el doble de 4.1) es apenas detectable por un oído humano promedio (para frecuencias mayores a 500 Hz) según la tabla 2.1. Sin embargo estas diferencias pueden llegar a ser distinguibles por un oído musical entrenado. Esto nos sugiere la idea de que un factor importante en el proceso de afinación es el adiestramiento auditivo. Por otro lado la máxima variabilidad reportada fue de  $\pm 9.9$  Cents (19.8 Cents), que según la tabla 2.1, es perfectamente distinguible por un oído normal para casi cualquier nota de la guitarra exceptuando la fundamental de la 6a al aire cuyo valor DLF es de 22.4 Cents. La mínima variabilidad reportada fue de  $\pm 1.5$  Cents, que es una variación imperceptible.

A continuación presentamos los mismos resultados para cada una de las cuerdas al aire:

#### ESTADÍSTICAS GENERALES PARA CADA CUERDA

	Variabilidad en Cents					
	1a	2a	3a	4a	5a	6a
Variabilidad media	4.1	4.1	4.9	3.9	3.5	4.0
Variabilidad máxima	9.2	8.7	8.1	8.6	8.6	8.0
Variabilidad mínima	1.6	1.6	2.0	1.3	1.0	1.5

TABLA 4.3. Estadísticas generales para cada cuerda

#### 4.2.1 Resultados generales

La diferencia tan grande entre las variabilidad máximas y mínimas se deben principalmente a 4 factores: el procedimiento de afinación, el criterio auditivo, el adiestramiento auditivo enfocado a un determinado criterio y la afinación de la nota de referencia. Pero en estos resultados las diferencias entre máxima y mínima variabilidad resultaron muy grandes debido a la variabilidad de la nota de referencia. Para ilustrar la influencia de la nota de referencia en los resultados anteriores me permitiré comentar un caso particular.

Tomemos las variabilidad máxima y mínima de la primera cuerda (9.2 y 1.6 de la tabla 4.3). Ambos resultados fueron obtenidos de dos sujetos que usaron el criterio de afinación aural y su procedimiento de afinación es muy similar. El Sujeto 8 que obtuvo 9.2 Cents de variabilidad no está familiarizado con el uso del diapasón para afinar su nota de referencia. Este sujeto obtuvo tan sólo para la afinación de la nota de referencia una variabilidad de 8.6 Cents. Esta variabilidad es acumulada en las notas posteriormente afinadas. De esta manera, a pesar de que los intervalos entre las cuerdas tuvieran variabilidades mínimas, por el simple hecho de tener una nota de referencia tan variable, se reportan grandes variaciones para cada tono de la guitarra por errores acumulativos. Muy probablemente si elimináramos el factor "nota de referencia", este sujeto hubiera obtenido variabilidades más pequeñas.

## 4.2.2 Afinación de la cuerda de referencia.

Llamamos cuerda de referencia a aquella con la que empezamos a afinar la guitarra. Como veremos más adelante, la afinación de la cuerda de referencia es muy importante para la interpretación de los resultados obtenidos en los experimentos. No todos afinan la misma cuerda de referencia. En estos experimentos la cuerda de referencia se afinó siempre comparándola con el diapasón.

## AFINACIÓN DE LA CUERDA DE REFERENCIA

Cuerda	Traste	Armónico	Altura virtual de las cuerdas al aire						Armónico vs Diapason 440Hz						
			Diferencias TI			Variabilidad			Diferencias TI			Variabilidad			
			Max	20 Hz	ERB	Max	20 Hz	ERB	Max	20 Hz	ERB	Max	20 Hz	ERB	
Sujeto 1	5a	0	4	1.5	1.8	0.9	1.0	1.1	1.1	0.4	0.0	0.2	1.0	1.0	1.0
Sujeto 2	5a	0	4	3.4	3.5	1.4	2.8	2.7	2.8	0.7	-0.5	0.6	2.8	2.8	2.8
Sujeto 3	4a	0	3	-1.2	-1.1	-1.0	3.1	3.0	3.1	0.7	0.4	0.8	3.0	3.1	3.1
Sujeto 4	1a	5	1	-2.4	-2.0	-2.7	3.8	3.7	3.8	x	x	x	x	x	x
Sujeto 5	5a	0	4	7.2	7.6	6.9	4.9	4.9	4.8	6.3	5.6	6.2	5.0	4.9	4.9
Sujeto 6	4a	0	3	-1.8	-1.7	-1.6	2.4	2.3	2.4	0.1	-0.2	0.0	2.3	2.3	2.3
Sujeto 7	5a	0	4	1.0	1.7	1.2	2.1	2.1	2.2	-0.2	-0.4	0.4	2.1	2.0	2.1
Sujeto 8	5a	0	4	-2.0	-1.3	-2.5	8.6	8.0	9.0	-3.9	-4.6	4.5	8.0	7.2	23.7
Sujeto 9	5a	0	4	-1.5	-1.0	-1.8	3.2	3.2	3.2	-2.7	-3.3	-2.5	3.3	3.2	3.4

TABLA 4.4. Afinación de la cuerda de referencia

La tabla 4.4 muestra la cuerda de referencia utilizada por cada sujeto, las diferencias con respecto al TI y la variabilidad para cada método de cálculo. Por ejemplo, el sujeto 5 afinó el cuarto armónico de la 5ª cuerda (armV) al aire con el diapasón por medio de eliminación de batimentos. Este sujeto tiende a afinar la quinta cuerda 7.2 Cents (Método de máximos) por encima del TI, es decir un poco alto con respecto al diapasón. Además con una variabilidad de 4.9 Cents. Sin embargo el cuarto armónico de la quinta cuerda queda afinado tan sólo 0.9 Cents por abajo del diapasón (440 Hz) con una variabilidad de 0.2 Cents. Estos datos parecen contradictorios, pues teóricamente si afinamos el cuarto armónico de la 5ª cuerda al aire 0.9 Cents abajo del diapasón, la altura virtual de la quinta cuerda debería de quedar también 0.9 Cents debajo del TI. La razón de estas contradicciones es que la altura virtual toma en cuenta las frecuencias y amplitudes reales de cada armónico que dependen del comportamiento acústico del cuerpo de la guitarra, en otras palabras de la inarmonicidad producida por el acoplamiento de las cuerdas con la guitarra. Generalmente en la 5ª cuerda, el armónico con mayor intensidad es el segundo.

#### 4.2.2 Afinación de la cuerda de referencia

La fundamental y el cuarto armónico con que se afina el diapasón tienen una intensidad mucho menor. Es por ello que, aunque afinemos el cuarto armónico de la 5ª cuerda exactamente en 440 Hz, la altura virtual puede estar por debajo o por encima de los 110 Hz. Es interesante notar que la variabilidad y diferencias con respecto al TI (armónico vs diapasón A 440 Hz) son en la mayoría de los casos menores a 4 Cents. Esto es una cifra muy pequeña si consideramos que la resolución de un afinador electrónico cromático es de  $\pm 5$  Cents, lo que quiere decir que un oído bien entrenado puede ser mucho más preciso que un afinador electrónico comercial.

La variabilidad de cada sujeto observada en los experimentos depende en gran medida de la variabilidad que se observa en la cuerda de referencia, por lo general la variabilidad para cada cuerda será mayor que la de la nota de referencia debido a la acumulación de errores durante el proceso de afinación. En otras palabras, si la nota de referencia es afinada por debajo de A(440 Hz), muy probablemente las demás cuerdas queden igualmente bajas. De esta manera si la 5ª cuerda es afinada con el diapasón con una variabilidad de 0.5 Hz, y la 4ª cuerda es afinada con la 5ª anteriormente afinada, es lógico pensar que se observará en la cuarta una variabilidad de por lo menos 0.5 Hz por errores acumulativos.

La variabilidad en la afinación de la nota de referencia depende de muchos factores. La afinación de la nota de referencia puede llevarse a cabo por medio de afinación aural, melódica o ambas. Hay quien suena el diapasón usando la caja de resonancia de la guitarra, otros simplemente se lo acercan al oído. Otros afinan buscando el momento de máxima resonancia de la cuerda, sonando el diapasón en la tapa de la guitarra y alejándolo de la misma con el objeto de dejar vibrar las cuerdas por empatía. De esta manera la afinación de la nota de referencia se vuelve también una cuestión de habilidad manual, de comodidad, de destreza para sostener el diapasón al mismo tiempo de mover las clavijas.

La variabilidad para la afinación de la cuerda de referencia varía de persona a persona, dependiendo de su destreza para manejar el diapasón, su educación auditiva, criterio auditivo, si tiene o no la costumbre de afinar con diapasón, etc.

La variabilidad más alta reportada fue de 8.6 Cents (tabla 4.5); este resultado se obtuvo de un guitarrista que no tiene la costumbre de afinar con diapasón. Este sujeto afina con criterio aural y usa la 5ª como cuerda de referencia. La variabilidad más baja reportada fue de 1.0 Cent; este resultado se obtuvo de un guitarrista que afina su guitarra con diapasón con criterio aural y usa la 5ª como nota de referencia. La variabilidad media obtenida fue de 3.4 Cents.

#### VARIABILIDAD DE LA CUERDA DE REFERENCIA

	Cents	Hz
Variabilidad máxima:	8.6	0.51
Variabilidad mínima:	1.0	0.07
Variabilidad media:	3.6	0.22

**TABLA 4.5. Variabilidad de la cuerda de referencia.  
Método de máximos**

En la siguiente sección comentaremos como afecta la variabilidad de la nota de referencia en la variabilidad de las demás notas.

### 4.2.3 Influencia de la cuerda de referencia en el patrón de afinación y variabilidad.

El patrón y la variabilidad de una afinación dependen en gran medida de la diferencia con respecto al TI y variabilidad de la cuerda de referencia.

Para algunos no importa cómo esté afinada la cuerda de referencia, la guitarra se escuchará afinada si las relaciones interválicas entre las cuerdas están bien. Podemos entonces prescindir del diapasón si no lo tenemos a la mano, y tener una fructífera sesión de práctica. Es por esta razón que algunos guitarristas no están muy acostumbrados al uso del diapasón, sin embargo tienen una gran habilidad para afinar su instrumento a pesar de casi no usar el diapasón.

En los experimentos que realizamos se nota esta influencia en algunos sujetos.

Podemos evaluar la variabilidad y precisión de la afinación de cada sujeto de dos maneras distintas:

1. Comparación de Alturas. Es la que hemos presentado hasta ahora en todas las gráficas. Consiste en comparar estadísticamente las alturas de cada cuerda obtenidas en cada una de las diez afinaciones de cada sujeto. El patrón de afinación en este caso depende de las diferencias con respecto al TI obtenidas a partir de los valores en frecuencia de la altura virtual para cada cuerda. La variabilidad se refiere al error con el cual podemos obtener nuevamente las *mismas alturas* por medio del mismo procedimiento de afinación. Las gráficas que se presentan con este criterio tienen la leyenda "Real" en la esquina superior derecha.

2. Comparación de Intervalos. Este tipo de evaluación no había sido presentado. Lo que interesa es la relación interválica resultante entre las cuerdas de la guitarra, sin importar que tan bien afinada quedó la cuerda de referencia. Consiste en comparar los intervalos resultantes entre cada cuerda obtenidos en las diez afinaciones de cada sujeto. En este caso, el patrón de afinación quedará ajustado de tal manera que la 5ª cuerda siempre quede sobre la línea del TI. La variabilidad en este caso se refiere al error con el cual podemos obtener nuevamente los *mismos*

#### 4.2.3 Influencia de la cuerda de referencia en el patrón de afinación y variabilidad.

intervalos por medio del mismo procedimiento de afinación. Las gráficas que se presentan con este criterio tienen la leyenda "Norm" en la esquina superior derecha.

Para el segundo tipo de evaluación se normalizan todos los valores en frecuencia de cada afinación, de tal manera que la altura virtual para la 5ª cuerda sea siempre de 110 Hz. Para entender esto de manera más clara presentamos a continuación la siguientes gráficas.

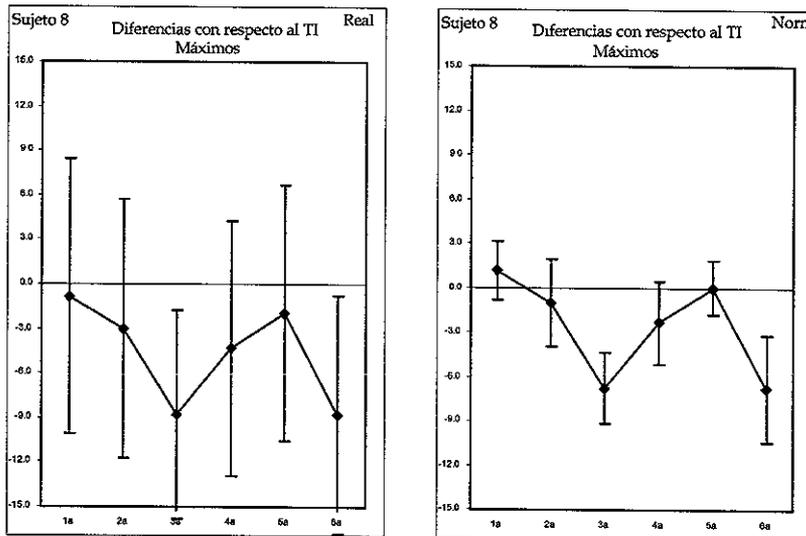


FIG. 4.13. Comparación de alturas vs comparación de intervalos

Nótese que las líneas verticales que representan la variabilidad son mucho más grandes en la gráfica real que en la normalizada. Por otro lado la 5ª cuerda en las gráficas normalizadas siempre estará sobre la línea del TI. Esto es muy útil pues nos permite comparar los patrones de afinación a un mismo nivel, lo que resulta mucho más claro a la vista.

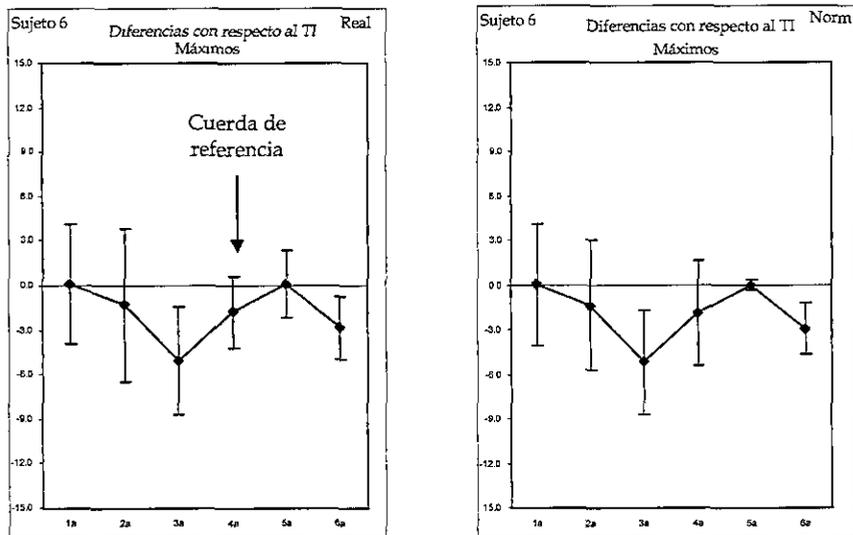
El caso presentado anteriormente es sumamente interesante. El sujeto 8 no tiene la costumbre de afinar su guitarra con diapason, para él lo importante es la relación interválica resultante entre las cuerdas, sin importar la altura a la que haya quedado la guitarra con respecto del diapason. El sujeto 8 afinó la cuerda de referencia (5ª cuerda, ver tabla 4.4 sección 4.2.2) -2.0 Cents abajo del TI con una variabilidad de 8.6 Cents, que es la variabilidad máxima reportada para la cuerda de referencia. Es por ello que su afinación en general queda por debajo del TI.

#### 4.2.3 Influencia de la cuerda de referencia en el patrón de afinación y variabilidad.

Es lógico pensar que teniendo una variabilidad tan grande en la nota de referencia, todas las demás cuerdas presenten una variabilidad igual o mayor por errores que llamamos acumulativos. Sin embargo, si eliminamos la variabilidad de la cuerda de referencia cómo se presenta en la gráfica normalizada, podremos observar la variabilidad en las relaciones interválticas. Esto quiere decir que el sujeto 8 logra obtener los mismos intervalos mediante su procedimiento de afinación con una variabilidad mucho menor a la reportada en la gráfica real.

Un sujeto puede tener una variabilidad muy grande en la nota de referencia que se propaga o transmite a todas las demás cuerdas, pero puede presentar una variabilidad muy pequeña en sus relaciones interválticas. Si estudiamos separadamente la variabilidad de la nota de referencia y las relaciones interválticas podemos distinguir dos casos:

1. La variabilidad de la cuerda de referencia es menor que la variabilidad interváltica. Esto sucede cuando un sujeto tiene mayor habilidad para afinar la cuerda con el diapasón que las demás cuerdas entre sí. En este caso las diferencias entre las líneas verticales de ambas gráficas no serán muy evidentes.



**FIG. 4.14. Variabilidad de la cuerda de referencia menor que la variabilidad interváltica.**

4.2.3 Influencia de la cuerda de referencia en el patrón de afinación y variabilidad.

2. La variabilidad de la cuerda de referencia es mayor que la variabilidad interválica. Esto sucede cuando un sujeto tiene mayor habilidad para afinar las cuerdas entre si que la cuerda de referencia con el diapasón. En este caso las diferencias entre las líneas verticales de ambas gráficas sí son notorias.

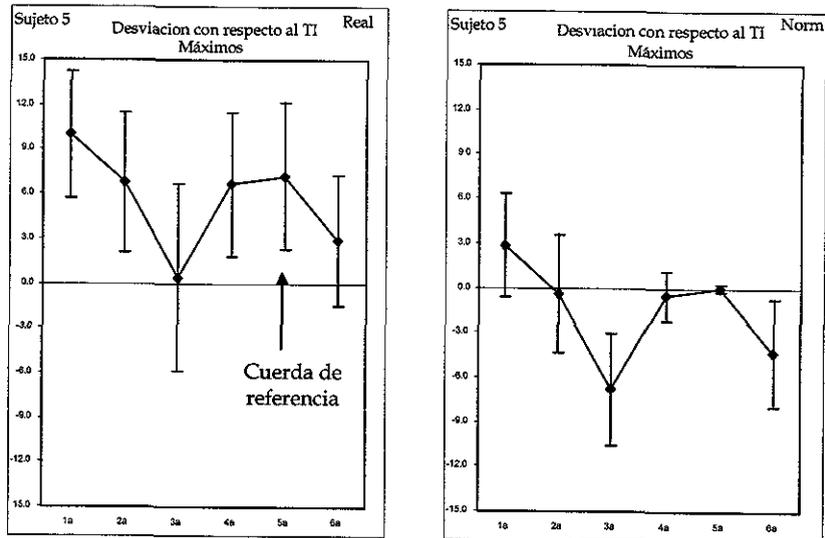


FIG. 4.15. Variabilidad de la cuerda de referencia mayor que la variabilidad interválica.

4.2.4 Algunos casos particulares

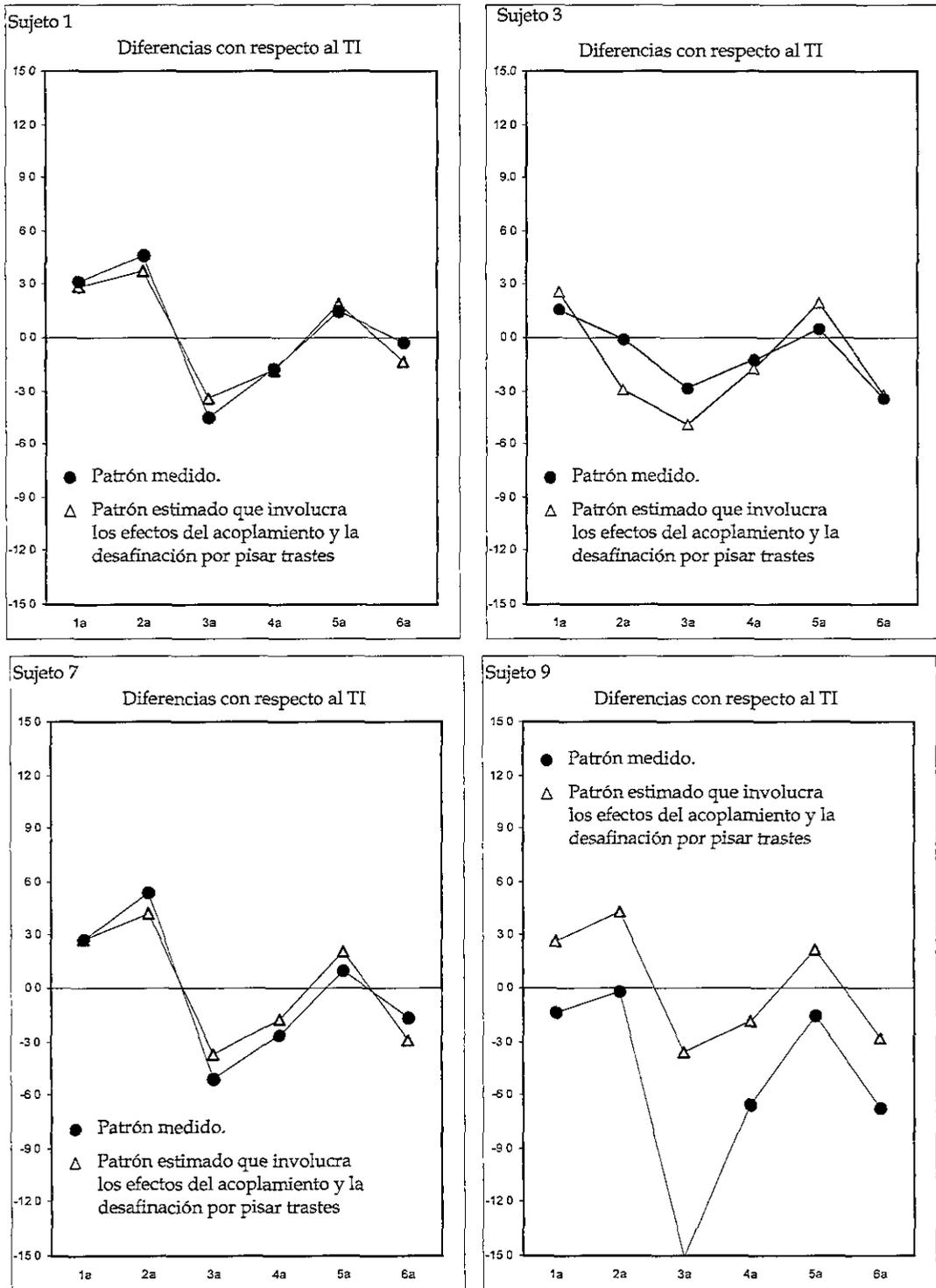


FIG. 4.16. Casos particulares. Patrón medido vs patrón estimado.

En la figura 4.16 se presentan los casos más representativos, en estas gráficas se compara el patrón de afinación medido con el patrón estimado tomando en cuenta el procedimiento de afinación, la desafinación por causa de la tensión en cuerdas pisadas, y los efectos del acoplamiento cuerda-guitarra.

Los cuatro sujetos presentados utilizan procedimientos de afinación muy similares, sólo cambian en uno o dos pasos. El patrón medido de los sujetos 1 y 7, es casi igual al patrón su correspondiente patrón estimado. El sujeto 1 y 7 no corrigen la guitarra con intervalos de comprobación. El patrón medido de los sujetos 3 y 9 es parecido a su correspondiente patrón estimado, ambos presentan variaciones en una cuerda. El sujeto 3 y 9 al final de su afinación utilizan acordes e intervalos de comprobación y al final hacen una corrección para quedar satisfechos con la afinación. Es por ello que su patrón medido difiere ligeramente de su patrón estimado.

En la entrevista, el sujeto 3 describe su procedimiento de afinación que coincide con el procedimiento #1 descrito en la sección 2.1.3. Sin embargo, al final de su afinación corrige siempre la 2ª cuerda para que el unísono que se forma entre la 2ª cuerda al aire y la 3ª cuerda pisada en el traste IV quede bien afinado. Esto explica que en el patrón medido del sujeto 3, la 2ª cuerda este ligeramente arriba con respecto del patrón estimado.

Para la estimación del patrón del sujeto 3 hemos tomado la 2ª cuerda como si hubiera sido afinada con la 3ª cuerda pisada en el traste IV, porque de hecho este sería su procedimiento final de afinación.

Esto nos hace pensar que el sujeto 3 busca que la 2ª cuerda quede afinada de tal manera que haya un equilibrio entre el unísono que se forma entre la 3ª cuerda pisada en el traste IV y la 2ª al aire; y la quinta más octava que se forma entre la 6ª y 2ª cuerdas.

Un caso similar es el del sujeto 9. Según la descripción de este sujeto, su procedimiento es igual que el del sujeto 7. Pero al igual que el sujeto 3, el sujeto 9 después de afinar mediante su procedimiento de afinación sigue una serie de intervalos y acordes de comprobación.

Los intervalos de comprobación son propios de cada persona. El sujeto 9 comprueba su afinación tocando un Mi mayor en primera posición al final del proceso de afinación.

#### 4.2.4 Algunos casos particulares

Recordemos que el oído tiende a evaluar la consonancia de un acorde por medio de los batimentos que se producen entre los armónicos coincidentes de cada sonido, especialmente en las terceras mayores (ver sección 2.1.4 y 2.1.3). Mientras menos batimentos se produzcan más consonante será dicho acorde.

Si hacemos un análisis interválico (como el descrito en la sección 2.1.4, figura 2.4), a partir del patrón estimado del sujeto 9, encontraremos que las terceras mayores que se forman entre la 4ª y 3ª cuerdas (E-g#), son casi tan anchas que las terceras mayores del TI. Las terceras mayores del TI son más disonantes que una tercera mayor pura debido a los batimentos que produce. Lo natural para una persona es eliminar esos batimentos bajando la 3ª cuerda para que dicha tercera mayor tienda a ser pura.

Esta puede ser una explicación del porqué el patrón medido del sujeto 3, presenta una desviación tan grande en la 3ª cuerda con respecto al patrón estimado. Es evidente que corrigiendo la 3ª cuerda para dejar el acorde de Mi mayor bien afinado provocará por ejemplo que el Sol mayor en la primera posición quede un poco desafinado.

Es importante aclarar, que en los experimentos sólo se midieron las cuerdas al aire. Sin embargo, una guitarra es ejecutada en todo el diapasón. Es muy probable que las comprobaciones y correcciones que cada guitarrista hace en su afinación tengan la finalidad de lograr un equilibrio en todo el diapasón, buscando así el mejor compromiso de afinación frente a los problemas que presenta una guitarra, que se desprenden de los factores que hasta ahora hemos estudiado.

#### 4.2.5 Tiempo de afinación

Por otro lado, como mencionamos en la sección anterior (4.2.3), es posible utilizar un procedimiento de afinación más sencillo que nos lleve a los mismos resultados que el complicado procedimiento al que estamos acostumbrados. Si conocemos bien un procedimiento de afinación sencillo y el comportamiento acústico de nuestra guitarra, podríamos fiarnos del resultado final sin necesidad de usar intervalos de comprobación. Como vimos en la sección 4.2.2 la variabilidad media fue de 4.1 Cents. Esto quiere decir que podemos reproducir un procedimiento de afinación con un error de  $\pm 4.1$  Cents que es menor a la resolución de un afinador electrónico comercial. Así que podemos tener plena confianza en el procedimiento de afinación que decidamos usar, siempre y cuando conozcamos los pros y contras del mismo.

Al final de la sección 4.2.3 presentamos una gráfica que compara las afinaciones del sujeto 6 y 3. Esta gráfica es muy interesante si además consideramos el tiempo que tardó cada sujeto en afinar su guitarra y el grado de complejidad de cada procedimiento. Por razones de espacio, no es posible describir el procedimiento de afinación de los nueve sujetos, pero es suficiente decir que el sujeto 6 utiliza un procedimiento muy complicado mientras que el sujeto 3 utiliza un procedimiento sumamente sencillo.

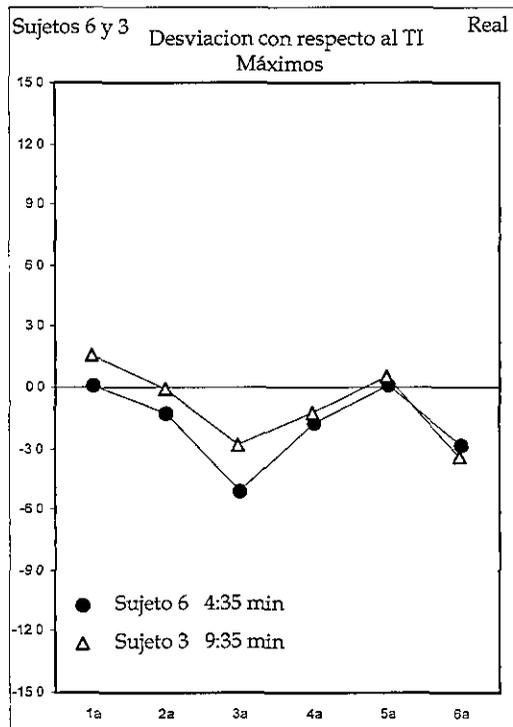


FIG. 4.18. Patrones iguales y tiempo de afinación.

## RESULTADOS SIMILARES CON PROCEDIMIENTOS DIFERENTES

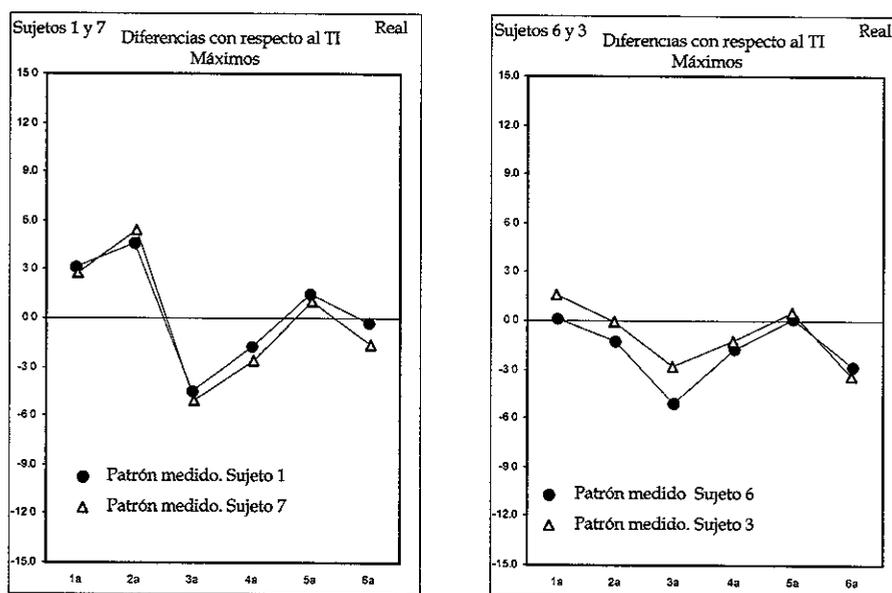


FIG. 4.17. Patrones medidos iguales por medio de procedimientos diferentes

Como podemos ver en estas dos gráficas, es posible llegar a resultados similares cuando afinamos por medio de procedimientos diferentes, esto nos da la posibilidad de utilizar un procedimiento más sencillo para llegar a un mismo resultado.

Los sujetos 1 y 7 siguen el mismo procedimiento de afinación, con excepción de la 2ª cuerda, el sujeto 7 *afina* la 2ª cuerda al aire con el tercer armónico de la 6ª cuerda (armVII), mientras que el sujeto 1 *afina* la 2ª cuerda al aire con la 5ª cuerda pisada en el traste II. En los patrones estimados, la 2ª cuerda del sujeto 1 queda más abajo que la 2ª cuerda del sujeto 7, pero si tomamos en cuenta el efecto de la deformación en cuerdas pisadas, ambas nos dan casi el mismo resultado.

Los sujetos 3 y 6 siguen un procedimiento de afinación diferentes. El sujeto 6 sigue un procedimiento tan complejo que no fue posible estimar su patrón de afinación, sin embargo ambos sujetos tienen resultados muy parecidos, esto es una gran *coincidencia*.

Esto nos sugiere la idea de buscar procedimientos de afinación alternos, es decir, procedimientos de afinación más sencillos que nos lleven a un resultado igualmente satisfactorio sin tanto esfuerzo.

#### 4.2.5 Tiempo de afinación

En esta sección hablaremos acerca del tiempo que emplea cada sujeto en afinar su instrumento. Parecería algo sin mucha importancia, sin embargo recordemos la conocida frase de que los guitarristas pasan la mitad de su vida afinando la guitarra y la otra mitad tocando desafinados. Aunque sea probable que sigamos pasando una gran parte de nuestra vida tocando desafinados debido a las limitaciones propias del instrumento, lo que sí podemos es reducir el tiempo que pasamos afinando la guitarra.

Si consideramos que un recital tiene una duración aproximada de hora y media, diez minutos de afinación podrían ocupar fácilmente el intermedio. Así que no podríamos darnos el lujo de afinar la guitarra entre pieza y pieza, pues alargariamos demasiado el concierto. Igualmente, en una sesión de ensayo, y sobretodo cuando se trata de tocar en ensambles de guitarra, la afinación se convierte en una devoradora de tiempo valioso desperdiciado.

#### TIEMPO DE AFINACIÓN DE CADA SUJETO

Sujeto 1	2:05 min.
Sujeto 2	4:30 min.
Sujeto 3	4:35 min.
Sujeto 4	5:20 min.
Sujeto 5	2:47 min.
Sujeto 6	9:35 min.
Sujeto 7	4:28 min.
Sujeto 8	4:01 min.
Sujeto 9	4:06 min.

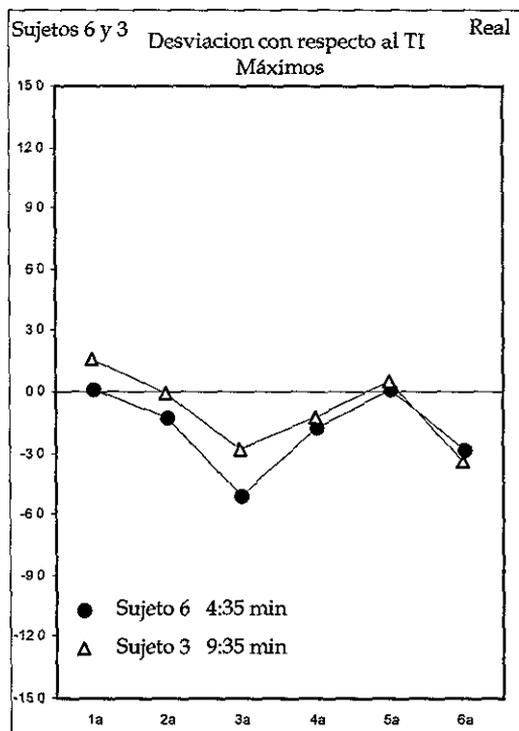
**TABLA 4.6. Tiempo de afinación.**

El tiempo que tarda un sujeto en afinar no depende definitivamente de la capacidad auditiva, sino del conocimiento del comportamiento acústico de la guitarra y de la obsesividad de cada persona. Algunos guitarristas llegan a dudar de sus capacidades auditivas cuando después de varios minutos no han podido llegar a un resultado satisfactorio. Se sentirían mucho más relajados si supieran que nunca van a cuadrar todos los intervalos y acordes de la guitarra.

#### 4.2.5 Tiempo de afinación

Por otro lado, como mencionamos en la sección anterior (4.2.3), es posible utilizar un procedimiento de afinación más sencillo que nos lleve a los mismos resultados que el complicado procedimiento al que estamos acostumbrados. Si conocemos bien un procedimiento de afinación sencillo y el comportamiento acústico de nuestra guitarra, podríamos fiarnos del resultado final sin necesidad de usar intervalos de comprobación. Como vimos en la sección 4.2.2 la variabilidad media fue de 4.1 Cents. Esto quiere decir que podemos reproducir un procedimiento de afinación con un error de  $\pm 4.1$  Cents que es menor a la resolución de un afinador electrónico comercial. Así que podemos tener plena confianza en el procedimiento de afinación que decidamos usar, siempre y cuando conozcamos los pros y contras del mismo.

Al final de la sección 4.2.3 presentamos una gráfica que compara las afinaciones del sujeto 6 y 3. Esta gráfica es muy interesante si además consideramos el tiempo que tardó cada sujeto en afinar su guitarra y el grado de complejidad de cada procedimiento. Por razones de espacio, no es posible describir el procedimiento de afinación de los nueve sujetos, pero es suficiente decir que el sujeto 6 utiliza un procedimiento muy complicado mientras que el sujeto 3 utiliza un procedimiento sumamente sencillo.



**FIG. 4.18. Patrones iguales y tiempo de afinación.**

# CONCLUSIONES

# CAPÍTULO CINCO

## **5 Conclusiones.**

En este trabajo hemos observado que los factores más importantes que influyen en la afinación de la guitarra clásica son: el procedimiento de afinación, las desafinaciones causadas por la deformación de las cuerdas al ser pisadas y la inarmonicidad por acoplamiento de las cuerdas con la guitarra. En este capítulo resumimos cada uno de ellos y al final presentamos la relevancia musical de los resultados obtenidos.

### **5.1 Propagación del patrón de afinación.**

Como hemos visto, afinar por medio de armónicos o pisando trastes da un resultado diferente en la propagación del patrón de la afinación. Recordemos que afinar por armónicos no involucra problemas de deformación de la cuerda al pisar los trastes. Los procedimientos de afinación basados en la utilización de armónicos producen un patrón medido muy similar al patrón estimado correspondiente a dicho procedimiento. Cuando utilizamos un procedimiento de afinación basado en su mayor parte en la utilización de cuerdas pisadas, la propagación de la afinación va sufriendo ciertas modificaciones resultando finalmente un patrón medido distinto del patrón estimado de su correspondiente procedimiento de afinación.

En conclusión, los patrones medidos se ajustan más a los patrones estimados en procedimientos de afinación basadas en armónicos que en procedimientos basados en la utilización de trastes.

### **5.2 Posibles explicaciones en los patrones de afinación observados.**

Como hemos visto a lo largo de este trabajo, al comparar los patrones estimados con los patrones medidos, algunas cuerdas se ajustan muy bien al patrón estimado y otras no. En esta sección tratamos de dar explicaciones de esto. Algunas de estas discrepancias se deben a la deformación de cuerdas pisadas, otros al acoplamiento de la cuerda con la guitarra, algunos a los procedimientos y criterios de afinación así como los intervalos y acordes de comprobación que hacen que el sujeto modifique su procedimiento de afinación no cuadrando de esta manera con el patrón estimado a partir del procedimiento descrito por dicho sujeto. Las posibles explicaciones tratadas en esta sección corresponden sobre

todo a cada uno los factores físicos descritos en la sección 2.2. Es posible que encontremos alguna discrepancia que no podamos explicar. En estos casos es muy probable que dependan del sujeto, por lo que no ahondaremos mucho en ellos.

### **5.2.1 Resultados que pueden ser atribuidos a la rigidez de las cuerdas.**

En la sección 2.2.2 explicamos teóricamente la inarmonicidad por rigidez de las cuerdas y concluimos que este era un factor cuya influencia en la afinación es despreciable. En la práctica tampoco encontramos muestras de la influencia de este factor en los patrones de afinación.

### **5.2.2 Resultados que pueden ser atribuidos a la deformación de las cuerdas al ser pisadas.**

Como hemos visto este efecto es muy evidente, aunque no puede ser estimado con mucha precisión. Como sabemos la deformación de las cuerdas se da cuando son pisadas, pues se forman tres puntos que hacen que la cuerda sufra una elongación cambiando así la longitud efectiva y la tensión de la cuerda. Como se discutió en la sección 2.2.4 aunque exista una compensación en el puente, siempre existirá desafinación en algunos trastes especialmente en la primera posición. Cuando no hay compensación, alrededor del traste XII la desafinación es muy marcada. La manera más fácil de detectar estos errores en los patrones de afinación es observando la dirección que siguen las desafinaciones.

Sabemos que las desafinaciones en cuerdas pisadas también se deben a la posición del dedo en el traste, a la cantidad de presión ejercida en la cuerda contra el diapasón o hacia cualquiera de los extremos de la cuerda. Por ello resulta muy difícil controlar una afinación pisando trastes. Generalmente estas variaciones son mayores que las calculadas. Ya que no es posible calcular estas variaciones con suma precisión por lo anteriormente expuesto, la mejor muestra de la presencia de estos efectos es la dirección con que se desafina cada cuerda más que la altura exacta a la que queda afinada cada cuerda.

Podemos concluir, que las variaciones debidas a la deformación de las cuerdas al ser pisadas es un factor determinante en la afinación de la guitarra clásica.

### 5.2.3 Resultados que pueden ser atribuidos al acoplamiento de las cuerdas con la guitarra.

En la sección 2.2.3 se explicaron los efectos del acoplamiento de las cuerdas con la guitarra en las afinación de los armónicos de una cuerda cuando sus frecuencias se acercan a la de las resonancias de la guitarra.

En el caso específico de la Guitarra Manuel Rodríguez cuya admitancia mecánica fue medida para poder estimar dichas desafinaciones, la 6ª y 3ª cuerdas son las que más están afectadas por las resonancias de la tapa.

Los primeros armónicos de un tono de guitarra son siempre los más afectados, por el contrario los armónicos más agudos casi no presentan desafinaciones.

Hemos visto que los patrones medidos se ajustan mucho mejor a los patrones estimados cuando tomamos en cuenta los efectos del acoplamiento. Esta es la evidencia de que el acoplamiento juega un papel fundamental en la afinación de la guitarra.

La inarmonicidad inducida por el acoplamiento de las cuerdas con la guitarra influye en la percepción de la altura virtual, ya que los armónicos con mayor dominancia son aquellos que son más influenciados por las resonancias de la guitarra. Aunque no se estudió a profundidad, un cambio en la zona o modo de ataque puede influir en la percepción de la altura virtual, pues el ataque es responsable de las amplitudes iniciales de los modos de vibración de la cuerda. Esto puede ser un elemento importante en los resultados de la variabilidad. Es decir que la variabilidad no sólo depende de los límites de la percepción de un sujeto si no también del comportamiento acústico del instrumento.

Las resonancias de la guitarra Manuel Rodríguez utilizada para estos experimentos tienen una gran influencia en la 6ª y 3ª cuerdas, por ello resulta difícil a los guitarristas afinar dichas cuerdas. La mayoría de los sujetos en la entrevista mencionó haber tenido dificultades en el proceso de afinación con estas dos cuerdas.

La 3ª cuerda es, en general, una cuerda que tiene muchos problemas para ser afinada debido a su grosor por un lado, pues es más susceptible de desafinarse al ser pisada, y por otro lado, su frecuencia se acerca generalmente a alguna resonancia de la guitarra. Esto sucede a veces con la 5ª cuerda. En el caso específico de la guitarra Manuel Rodríguez, la 5ª cuerda tiende a ser escuchada alta, esto se debe a la inarmonicidad del segundo armónico cuyo nivel de intensidad es considerable.

Podemos concluir, que la inarmonicidad inducida por el acoplamiento de las cuerdas con la guitarra es un factor determinante en la afinación de la guitarra clásica.

### **5.5 Relevancia musical de los resultados obtenidos.**

Por lo que hemos visto a lo largo de este trabajo, los factores determinantes en la afinación de la guitarra clásica son: el procedimiento de afinación, la desafinación producida por cuerdas pisadas, y la inarmonicidad inducida por el acoplamiento de las cuerdas con la guitarra.

Este es un extenso trabajo de investigación que nos ha llevado a conocer el comportamiento acústico de la guitarra y su relación con la afinación. Sin embargo, también nos interesa saber ¿Cuál es la importancia musical de los errores de afinación que hemos observado?

### **DE LA CAPACIDAD AUDITIVA**

Lo primero que podemos hacer notar es que a lo largo de este trabajo hicimos un recorrido por un mundo de microintervalos sonoros. Me refiero a que todos los cambios sufridos en un patrón de afinación se dieron dentro de una ventana de 30 Cents. Observar variaciones de hasta 2.0 Cents entre distintas afinaciones resulta sorprendente. Esto habla de la gran capacidad auditiva que tiene un músico y en este caso de un guitarrista gracias a sus criterios de afinación. El uso complementario de los criterios de afinación nos llevan a resolver satisfactoriamente los defectos que se desprenden del comportamiento acústico de la guitarra.

## DE LOS PROCEDIMIENTOS DE AFINACIÓN

Cada procedimiento de afinación genera un patrón determinado que puede variar de una guitarra a otra, pero siempre habrá rastros de ella. Las características que se desprenden de un procedimiento de afinación en combinación con el comportamiento de la guitarra hacen que dicha afinación tenga ciertas características. Estas no deben ser evaluadas como *buenas* o *malas*, simplemente son características propias que incluso pueden ser aprovechadas para obtener una mayor expresividad en la música. El hecho de que ciertos acordes resulten más disonantes que otros, nos puede ayudar a enriquecer nuestro quehacer musical.

En esto estriba la importancia de ser consciente del procedimiento de afinación que se utilice, junto con su comportamiento dentro de una guitarra específica. Esto nos ayudará a aprovechar sus posibilidades expresivas y a no dudar en determinado momento de nuestra capacidad auditiva, ni mucho menos caer en círculos viciosos, es decir, en una eterna sesión de afinación.

Basándose en los datos que hemos analizado, podemos decir que un guitarrista que usa conscientemente un mismo procedimiento de afinación en la misma guitarra, puede llegar a obtener los mismos resultados con un pequeño rango de variabilidad estadística. Si conocemos bien nuestro procedimiento de afinación, podemos confiar en que la guitarra se comportará de la misma manera a pesar de que nuestra percepción cambie (por nuestro estado de ánimo o por otras causas).

## DE LOS EFECTOS DE DESAFINACIÓN POR CUERDAS PISADAS

Estos efectos dependen del entrastado de la guitarra y la compensación hecha en el puente. Sin embargo si somos conscientes de estos efectos en nuestra guitarra, podemos corregirlos un poco controlando la presión de los dedos contra el diapasón. Recordemos que mientras más presionemos la cuerda mayor será el grado de desafinación. Si presionamos las cuerdas con sólo la cantidad de fuerza necesaria para que esta suene, además de mejorar nuestra ejecución por medio de la relajación, tendremos menos problemas de desafinación.

La compensación hecha en el puente no corrige del todo los problemas de desafinación por deformación de las cuerdas. Las regiones más afectadas son los primeros trastes, (especialmente el primero), y los que están alrededor del traste XII. Cuando hacemos una compensación de tal manera que el traste XII de la octava justa, dicha compensación casi no surte efecto en los primeros trastes. Además cada cuerda tiene un grado de desafinación distinto debido a su espesor. Conviene que la distancia entre la cuerda y el diapasón sea poca, pues mientras mayor sea la distancia mayor será la desafinación producida. Igualmente, mientras mayor sea la tensión de las cuerdas mayor será la desafinación.

Los trastes de una guitarra son redondos, por lo que tienen contacto con la cuerda en un sólo punto, cuando los trastes están muy gastados se vuelven planos variando así la longitud efectiva de la cuerda al hacer contacto con ella, esto puede ser también motivo de desafinaciones.

Desde el punto de vista de la construcción, se puede hacer un diseño del entrastado que involucre una pequeña compensación en cada traste, una compensación cada vez mayor a medida que nos acercamos al clavijero, y una compensación individual en el puente para cada cuerda. Esto mejoraría mucho la afinación, aunque no resuelve completamente las desafinaciones en cuerdas pisadas.

Pero lo más importante es no angustiarse ante una característica de la guitarra que no está en nuestras manos modificar más que en muy poca medida.

#### DE LA INARMONICIDAD INDUCIDA POR ACOPLAMIENTO DE LAS CUERDAS CON LA GUITARRA

Si las desafinaciones en cuerdas pisadas son difíciles de modificar, cuanto más lo será el comportamiento acústico de la guitarra. Las frecuencias naturales de la guitarra están allí y no se puede hacer nada con ellas, más que disfrutar el hermoso timbre que produce la guitarra gracias a ellas. La inarmonicidad no es del todo contraproducente, al contrario, la configuración del espectro de un tono de guitarra es la que le da su timbre y por ende es la responsable del bello sonido del instrumento.

Si cambiamos un poco la afinación de la cuerda de referencia la configuración armónica podría cambiar, de tal manera que se librarían un poco las resonancias reduciendo así los efectos de la inarmonicidad por acoplamiento. En este caso, otras notas podrían ser las influenciadas por las resonancias de la tapa.

#### LOS ERRORES DE AFINACIÓN EN LA MÚSICA DE CAMARA

Sabemos que cada guitarra tiene un comportamiento distinto, por lo que no podemos pretender que dos guitarras estén perfectamente afinadas entre si. Lo ideal sería poseer dos guitarras idénticas, pero sabemos que esto no es posible. El que un constructor haga dos guitarras iguales no significa necesariamente que el comportamiento acústico sea igual en cada una de ellas. Tampoco se puede pretender que dos guitarras con diferentes cuerdas, con distinto entrastado, o distinta compensación queden igualmente afinadas.

Pero si por casualidad encontráramos dos guitarras idénticas, no podemos pretender que queden igualmente afinadas si utilizamos distintos procedimientos de afinación.

Lo que se recomienda es primeramente no torturarse con la obsesión de que las guitarras queden afinadas exactamente igual, porque esto nunca será posible. No perder demasiado tiempo en una sesión de afinación, pues esto es muy común especialmente cuando se trata de agrupaciones grandes de guitarras. Lo segundo es afinar con el mismo procedimiento de afinación o en su defecto afinar una sola guitarra y transmitir la afinación a la otra por medio de cuerdas al aire mediante la eliminación de batimentos o afinación aural. Por supuesto que esto no garantiza una perfecta afinación entre ellas. Lo siguiente es buscar los pasajes críticos en una obra al ser tocada. Generalmente las desafinaciones más notorias se dan en los intervalos de unísono y octavas, las terceras mayores y menores son más tolerantes a ser desafinadas. Busque aquellos pasajes que tengan unísonos y ajuste más o menos esas notas con su compañero. Esto es todo lo que se puede hacer para cada pieza a ser ejecutada. Esas notas a ser corregidas deben estar bien localizadas en cada obra para no perder tiempo en la afinación.

### CORRECCIÓN DE LA AFINACIÓN DURANTE LA EJECUCIÓN.

Una manera de corregir los errores en la afinación es produciendo variaciones de tensión en la cuerda moviendo los dedos ya sea hacia el puente o hacia el clavijero. Esto no resulta tan difícil si conocemos la respuesta de nuestra guitarra frente a un determinado procedimiento de afinación. Localice los lugares críticos de una obra donde haya que corregir la afinación de esta manera y practíquelos como parte de su ejecución.

### COMENTARIO FINAL

La afinación es un elemento más que está al servicio de la música. Por ello hay que ser consciente del procedimiento de afinación que utilizamos y de sus características, así como del comportamiento de cada guitarra en particular. De esta manera podremos aprovechar la personalidad de cada guitarra para enriquecer nuestro que hacer musical, sin preocuparnos por la afinación en un grado excesivo y proveyendo a la audiencia con una mejor interpretación.

## REFERENCIAS

1. Alejandro ESBRI, "Acústica musical y afinación de Pianos", UNAM, 1997, pp.11-12.
2. Encyclopedia of Acoustics, edited by Malcolm J. Crocker ISBN 0-471-80465-7, 1997 John Wiley & Sons, Inc. Chap. 116.
3. Auditory Demonstrations, IPO NIU ASA, 1987, booklet.
4. Antonio Calvo MANZANO, "Acústica físico-musical", Real Musical, Madrid, 1991. Chap. 23.
5. Moore, B. C. J. "Thresholds for the detection of inharmonicity in complex tones", J. Acoust. Soc. Am 77(5), May 1985.
6. J. G. Roederer "The physics and Psychophysics of Music", third Edition, Springer-Verlag, 1929.
7. Moore, B. C. J. "relative dominance of individual partials in determining the pitch of complex tones", J. Acoust. Soc. Am. 77(5), May 1985
8. Université Laval, apuntes del curso "Musique et technologie".
9. Owen H. Jorgensen, "Tuning", Michigan State University Press, 1991, pp. 739-745
10. Jean LATTARD, "Influence of inharmonicity on the tuning of a piano-Measurements and mathematical simulation", J. Acoust. Soc. Am 94(1), July 1993.
11. Jean LATTARD, "Gammes et tempéraments musicaux", Masson, Paris, 1988. pp. 101-124
12. Ricardo R. Bullosa, Felipe Orduña Bustamante, A. Pérez López, "Tuning characteristics, radiation efficiency and subjective quality of a set of classical guitars", Applied Acoustics 56 (1999) 183-197.
13. C. E. Gough, "The theory of string Resonances on Musical Instruments", Acustica 1981;49;124-41.
14. Arthur H. Benade, "Fundamentals of musical acoustics", Dover, 1990.
15. Owen H. Jorgensen, "Tuning", Michigan State University Press, 1991, pp. 779
16. Alejandro ESBRI, "Acústica musical y afinación de pianos", UNAM, 1997, pp.213