

2ij, 4/5



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**RELACION ENTRE LA CALIDAD SUBJETIVA Y ALGUNOS
PARAMETROS ACUSTICOS DE LA GUITARRA CLASICA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C O**

P R E S E N T A :

FELIPE ORDUÑA BUSTAMANTE

MEXICO, D. F.

1987



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

I N D I C E.

INTRODUCCION. -----	iv.
AGRADECIMIENTOS. -----	vii.
CAPITULO I. ACUSTICA DE LA GUITARRA. -----	1.
1.1 - DESCRIPCION DE LA GUITARRA Y SU FUNCIONAMIENTO. -----	1.
1.2 - MECANISMOS DE LA EMISION SONORA. -----	5.
1.2.1 - Las fuentes. -----	5.
1.2.2 - La cavidad resonante. -----	9.
1.2.3 - Vibraciones de la tapa superior. -----	11.
1.2.4 - Espectro de emisión sonora de la guitarra. -----	14.
1.2.5 - Modelos propuestos para la acústica de la guitarra. -----	19.
1.3 - LOS TONOS DE LA GUITARRA ENCORDADA. -----	24.
1.4 - EVALUACION DE GUITARRAS. -----	26.
REFERENCIAS DEL CAPITULO I. -----	30.
CAPITULO II. ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA CALIDAD DE UN GRUPO DE GUITARRAS. -----	32.
2.1 - PANORAMA GENERAL. -----	32.
2.2 - LAS GUITARRAS. GRABACION Y MEDICION. -----	34.
2.2.1 - Grabación analógica. -----	35.
2.2.2 - Adquisición de las señales de presión de los tonos. -----	41.
2.2.3 - Medición de la curva de respuesta en frecuencia. -----	50.
2.3 - EVALUACION SUBJETIVA. -----	53.
2.3.1 - Evaluación comparativa de la calidad. -----	53.
2.3.2 - Descripción semántica del timbre. -----	56.
2.4 - EVALUACION ACUSTICA. -----	60.
2.4.1 - Resonancias de las guitarras. -----	60.
2.4.2 - Características de los tonos. -----	69.
REFERENCIAS DEL CAPITULO II. -----	78.
CAPITULO III. CORRELACION ENTRE LA CALIDAD SUBJETIVA Y OTROS PARAMETROS. -----	80.
3.1 - COMENTARIOS PREVIOS SOBRE EL ANALISIS DE LOS DATOS. -----	80.
3.2 - CORRELACION CON PARAMETROS ESPECIFICOS. -----	81.
3.3 - CORRELACION CON DESCRIPTORES ESTADISTICOS DE LOS PARAMETROS. -----	97.

3.4 - CORRELATOS OBTENIDOS POR EL METODO DE	103.
COMPONENTES PRINCIPALES.	112.
REFERENCIAS DEL CAPITULO III.	113.
CONCLUSIONES.	113.

INTRODUCCION.

El arte y la técnica de la construcción de instrumentos musicales han madurado, en repetidas ocasiones y en diferentes épocas, hasta niveles de excelencia muy altos. En no pocos casos, toda esta sapiencia empírica, duramente adquirida a fuerza de años y sudores en los talleres de multitud de maestros constructores, se ha perdido a la muerte de estos. Es conocido el caso de los constructores italianos de instrumentos de arco: Guarneri, Amati, Stradivari y otros, algunas de cuyas técnicas de construcción se desconocen actualmente. Seguramente otros sectores del gremio (constructores de pianos, flautas, arpas, trompetas, etc.) cuentan casos similares. Si bien desde el punto de vista de la pérdida de información estos casos son lamentables, desde el punto de vista artístico pueda ser que tengan alguna justificación. Como cualquier otro artista, el constructor de instrumentos tiene derecho a guardar celosamente los secretos de su técnica para así mantener la exclusividad de sus diseños.

Un caso muy distinto es el de la construcción de instrumentos de música a nivel industrial. En donde industrial no significa necesariamente que la construcción sea realizada por máquinas automáticas; sino que, en algunos casos, son muchos artesanos los que elaboran los instrumentos, especializándose cada uno de ellos en una etapa de la construcción. Es decir, construcción en serie a nivel artesanal. En este caso, la información sobre los diseños y técnicas de construcción debe reportarse de manera muy objetiva y clara; no hay un afán de exclusividad, sino uno de producir instrumentos de buena calidad simplemente. Para obtener información que permita construir buenos instrumentos en forma reproducible, se podría proponer un programa de trabajo dividido en tres partes:

1 - Estudiar la física que explique el funcionamiento de dicho instrumento musical, lo cual implica un ataque experimental y la posterior elaboración de modelos que permitan predecir la acústica del instrumento en función de cambios estructurales que se realicen en él.

2 - Investigar qué propiedades físicas del instrumento son deseadas por parte del ejecutante y del oyente. Aquí se requiere, indiscutiblemente, la participación de sujetos en experimentos destinados a seleccionar algunos criterios de calidad. Los sujetos probablemente sean capaces de describir, a su manera, el tipo de cosas que prefieren; sin embargo una descripción verbal de este tipo no es útil. Es necesario poder expresar sus preferencias en términos de propiedades físicas, los sujetos por sí mismos no pueden expresarse así. De ahí la necesidad de realizar experimentos que permitan interpretar lo que el sujeto desea en términos

más objetivos. Algunos aspectos a considerar serían: qué características se desea que tenga el sonido, como debe ser el instrumento para que se le pueda tocar con facilidad, etc.

3 - Conjuntar el conocimiento anterior para diseñar un instrumento que cumpla lo mejor posible con los criterios de calidad, expresados en términos de las propiedades físicas deseables. Construir un prototipo y evaluar su calidad de dos maneras: observando qué tan bien cumple con los criterios adoptados y realizando, de nuevo, pruebas con la participación de sujetos. En este punto puede evaluarse si los criterios de calidad adoptados realmente son consistentes con las preferencias de los sujetos. En caso de no serlo, se procedería a modificar dichos criterios y en otro caso, se daría por concluido el programa.

Este modo de enfrentarse al problema de la construcción de instrumentos musicales ha sido empleado en el caso del violín con resultados satisfactorios. En el caso de la guitarra clásica las investigaciones son más jóvenes y aunque algunos investigadores ya han dado el paso de construir prototipos, aún falta mucho por hacer en las dos primeras fases del programa antes descrito.

El presente trabajo quedaría comprendido completamente en el paso no. 2. La intención es conocer qué características del sonido de una guitarra clásica son relevantes para determinar su calidad. Se entiende que la calidad es un valor subjetivo y por tanto solo una persona puede evaluarla. Se reportan en la literatura solo dos trabajos en los que se realizan pruebas subjetivas para seleccionar las propiedades acústicas deseables en una guitarra (ver sección 1.4 del capítulo I). Nos parece interesante realizar un intento en esa dirección, y por ello proponemos aquí un método para atacar ese problema. Dadas las limitaciones de tiempo y de recursos a las que se sujeta normalmente la elaboración de una tesis de licenciatura, no pretendemos haber realizado un estudio completo ni haber obtenido resultados definitivos; solo hemos propuesto un camino y hemos evaluado la posibilidad de emprenderlo a mayor escala comparando los resultados obtenidos aquí con los resultados obtenidos por otros investigadores. El objetivo de este trabajo está más enfocado a la adquisición de experiencia que a la de datos confiables.

El texto está dividido en tres capítulos y una conclusión. El capítulo I contiene una exposición breve de los trabajos que han sido publicados con anterioridad sobre acústica de la guitarra, incluyendo algunos en los que se considera la opinión del sujeto para evaluar la calidad de los instrumentos. En el capítulo II se describen los experimentos realizados para esta tesis, enfocados a la obtención de criterios acústicos relacionados con la calidad subjetiva de una guitarra. Para ello se estudió un conjunto de 6 guitarras clásicas de diversa procedencia. Un grupo de

12 sujetos evaluaron la calidad de las guitarras y además describieron el sonido de éstas usando para ello un vocabulario restringido de 8 adjetivos. Luego se procedió a medir una serie de parámetros acústicos de las guitarras. En el capítulo III se analizan los datos obtenidos en los experimentos. Se estudia como correlaciona la calidad evaluada por los sujetos con la descripción, también subjetiva, del sonido de las guitarras y con los parámetros acústicos medidos. Se obtiene así una descripción verbal del sonido correspondiente a una buena guitarra, se da información sobre cuales parámetros acústicos determinan la calidad y se proponen métodos para estimar la calidad de una guitarra en función de esos parámetros. En las conclusiones se hace un sumario de los resultados obtenidos y se evalúa la investigación en su conjunto.

AGRADECIMIENTOS.

Menciono aquí a todos aquellos que me tendieron la mano durante la elaboración de este trabajo e hicieron posible su conclusión. En primer lugar al M. en C. Ricardo Ruiz Boulosa, asesor de esta tesis, a quien admiro más por su sensibilidad y calidad humana que por todo lo que sabe (y sabe bastante por cierto); a él le agradezco infinidad de enseñanzas, sugerencias, palabras de aliento, el acceso a su colección de artículos de acústica musical, el haberme iniciado en el estudio acústico de la guitarra y el haberme prestado su guitarra para los experimentos; en fin, casi todo. A mis sinodales: Fis. Andrés Porta, Dr. Roberto Ortega, M. en E. S. Fernando Flores y Fis. Eduardo Vega, por una revisión cuidadosa de la versión preliminar del texto y por todas sus sugerencias; les agradezco también el entusiasmo con el que acogieron el tema de la tesis. A mi sinodal 'honoris causa', el Dr. Fernando Prieto, otro estudioso de la acústica musical. Al M. en Q. José Luis Córdoba por todo el apoyo brindado durante la realización de la parte experimental y por haberme facilitado su guitarra para estudiarla. A las personas que también me proporcionaron sus guitarras: Dr. Luis Morín, Educ. Ma. Eugenia Olivera, Juan Carlos Zamora y Lic. Elizabeth López Arceo, gracias por correr el riesgo. A las personas que participaron en las evaluaciones subjetivas: en primer lugar, por el gran honor de que fui motivo con su visita, al Maestro Manuel López Ramos, un grande de la interpretación guitarrística; en seguida: Alejandro Mora, Ivonne Ochoa, Elsa Nuñez, Diego López, Guillermo González, Daniel Guzmán, Mariana Ferreiro, Marcos Zyman, Jorge Márquez, otra vez Juan Carlos Zamora y Francisco Rizo. Al personal y directivos del Centro de Instrumentos de la UNAM, en especial a mis compañeros del Laboratorio de Acústica, por el apoyo prestado durante toda la ejecución de este trabajo. Finalmente, en forma institucional, a la UNAM por todo lo recibido.

CAPITULO I.

ACUSTICA DE LA GUITARRA.

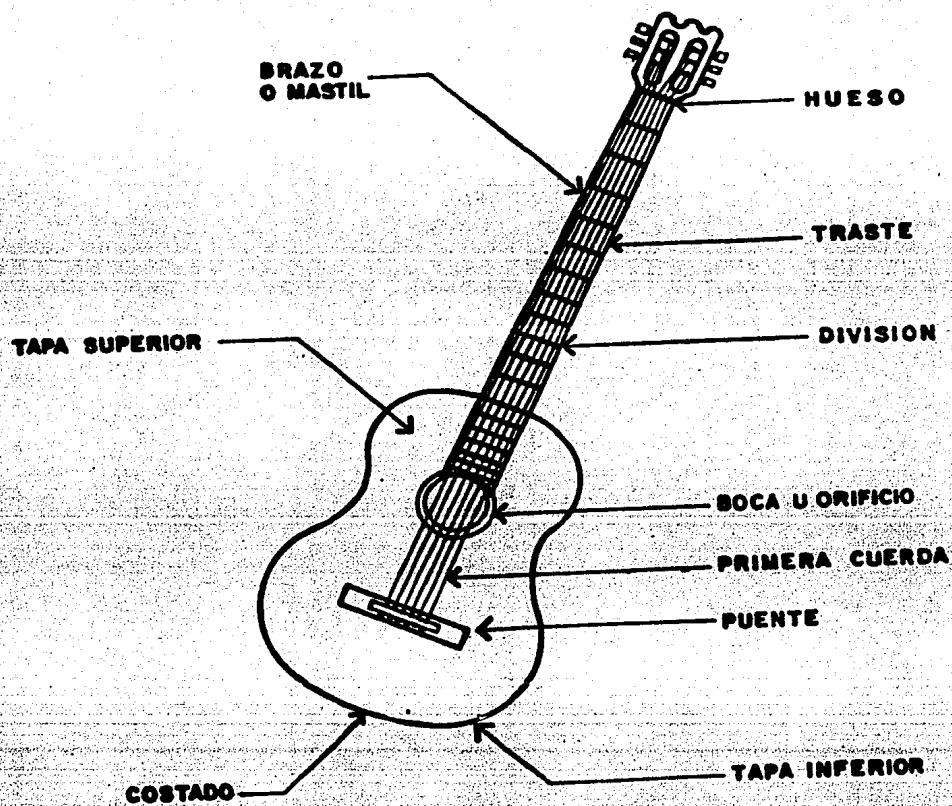
1.1 - DESCRIPCION DE LA GUITARRA Y SU FUNCIONAMIENTO.

La guitarra clásica es un instrumento de seis cuerdas, con mástil entrastado y caja de resonancia, que se ejecuta punteando las cuerdas con la mano derecha; la altura de los tonos se ajusta con la izquierda oprimiendo las cuerdas contra el mástil cambiando así su longitud efectiva. Sus antecesores más directos son, probablemente, la vihuela de la España renacentista y la guitarra barroca usada en Francia, España e Italia durante el siglo XVII y principios del XVIII. La guitarra clásica aparece en estos mismos países a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, aunque sus dimensiones eran un poco menores que las de la guitarra actual. Estas fueron fijadas por el laudero español Antonio de Torres alrededor de 1850. Las guitarras clásicas de la actualidad son construidas con dimensiones muy similares a las del modelo de Torres, aunque existen pequeñas diferencias de diseño aportadas por otros lauderos posteriores a él. La figura F1.1 muestra las partes importantes de una guitarra clásica.

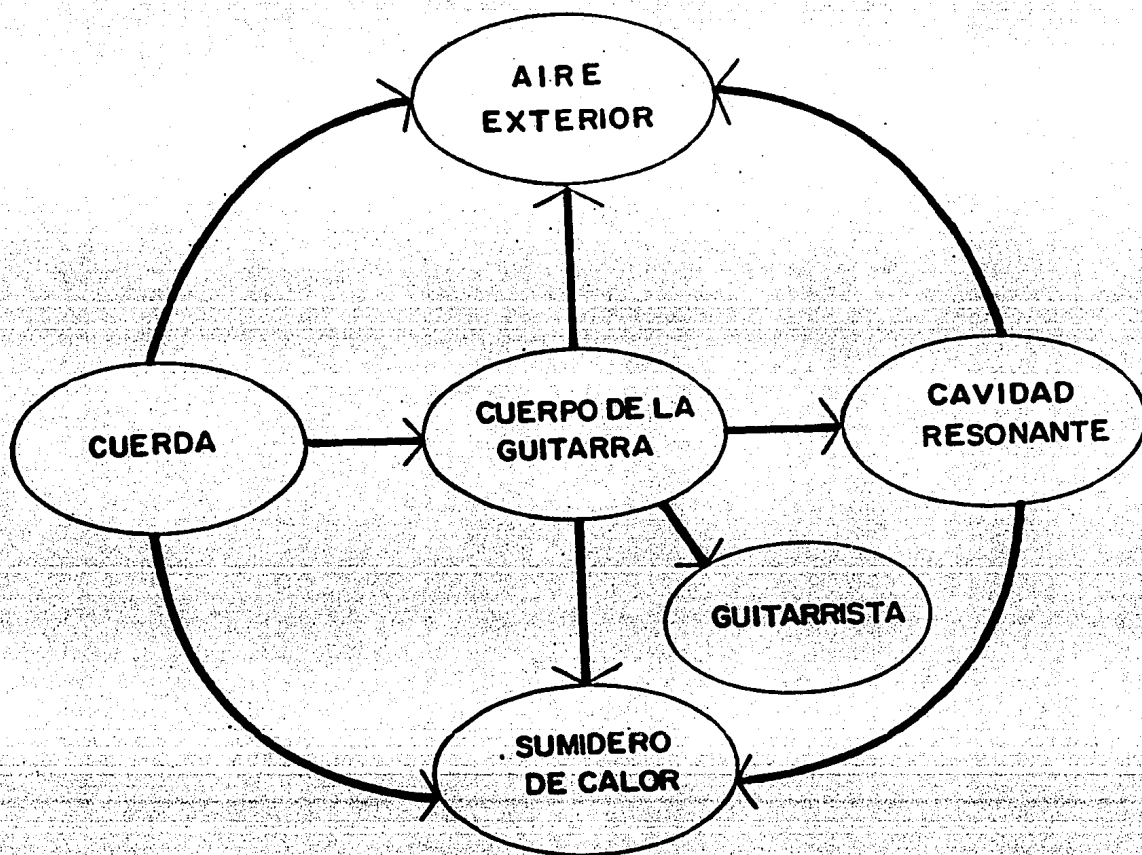
Expuesto de una manera elemental, la guitarra suena debido a la acción de tres sistemas vibrantes que la constituyen: las cuerdas, el aire de la cavidad resonante y el propio cuerpo de la guitarra. El ejecutante jala la cuerda con alguno de los dedos de su mano derecha obligandola a adoptar una forma triangular, los vértices de este triángulo son: los puntos de apoyo de la cuerda sobre la guitarra (i.e. el puente y el hueso, o bien la división más próxima al traste que se pise) y el dedo del guitarrista. Sin imprimirle ninguna velocidad inicial, o mejor dicho, con una velocidad inicial nula, el ejecutante suelta la cuerda y ésta empieza a realizar sus oscilaciones propias. La energía potencial de la deformación se convierte en la energía de las vibraciones, sin embargo esta energía no se queda en la cuerda. Los soportes de la cuerda no son completamente rígidos e inmóviles, así que el movimiento de la cuerda los induce a vibrar y ellos a su vez hacen vibrar todo el cuerpo del instrumento. Las vibraciones de las tapas de la caja de resonancia cambian el volumen de la cavidad, entonces el aire que hay en ella y en la región que rodea al orificio es forzado a vibrar también. El movimiento del instrumento y del aire en el orificio radian ondas sonoras hacia el aire exterior con el cual están en contacto. De este modo, la energía de la cuerda vibrante es transmitida en su mayor parte al cuerpo de la guitarra; es posible que una porción muy pequeña de la energía original sea radiada desde la cuerda en forma de sonido, mientras el resto se disipa en

forma no acústica debido a la resistencia del aire al movimiento de la cuerda, debido a la fricción de los soportes y a la fricción interna del propio material de la cuerda.

La energía transmitida al cuerpo en vibración se distribuye también en varias partes: una es radiada hacia el aire exterior en forma de sonido, otra induce las vibraciones del aire de la cavidad, otra más se pierde por fricciones internas en los ensambles y en la madera misma, y la última se transmite mecánicamente hacia el cuerpo del guitarrista. De la energía transferida al aire de la cavidad, una parte se radia como sonido y otra se disipa. Al cabo de un tiempo, la energía originalmente almacenada en la cuerda es radiada como sonido o disipada por otros procesos, entonces la guitarra vuelve al reposo. Las partes de la guitarra que emiten sonido son: el aire que rodea al orificio de la tapa superior, el cuerpo (principalmente la tapa superior pues ahí es transmitida la vibración de las cuerdas) y, en grado casi despreciable debido a su escasa área, las cuerdas. La fracción de la energía originalmente almacenada en la cuerda que no es convertida en sonido se disipa, bien a través del cuerpo del guitarrista, o bien a través de los diversos procesos de fricción. Esto último lo podemos simplificar conceptualmente si pensamos que la guitarra está conectada a un sumidero de calor al que va a parar toda la energía que se disipa por fricción. La figura F1.2 muestra esquemáticamente el funcionamiento de la guitarra tal como lo hemos expuesto aquí. Ver también [ref. R1.1].



F1.1 - La guitarra y sus partes.



F1.2 - Flujo energético durante el funcionamiento de la guitarra. Ver detalles en el texto.

1.2 - MECANISMOS DE LA EMISION SONORA.

1.2.1 Las fuentes.

Las partes de la guitarra que actúan como fuentes de radiación sonora son: las cuerdas, la cavidad resonante (con más propiedad: el aire que se encuentra en la región que rodea al orificio de la tapa superior) y el propio cuerpo del instrumento. De éste último destaca principalmente la tapa superior, debido a su gran área y a que a través de ella se transmite la vibración de las cuerdas, por tanto oscila más ampliamente que las otras partes del instrumento, a saber: el brazo, los costados y la tapa inferior. Más adelante se discute el efecto de la tapa inferior en la emisión sonora. Supongamos pues, que las posible fuentes sonoras son las cuerdas, la cavidad y la tapa superior. Comparemos el poder emisor de estas tres. El poder emisor (en inglés: source strenght) de una fuente sonora monopolar se define por:

$$Q = \int_S \vec{v} \cdot \hat{n} dS \quad E1.1$$

En esta ecuación: dS es un elemento diferencial de la superficie de la fuente, \hat{n} es un vector unitario normal a dS y \vec{v} la velocidad de dS , la integral se realiza sobre toda la superficie de la fuente [ref. R1.2].

No incurrimos en un error grande al suponer que nuestras fuentes son monopolos puntuales; de ellas la de mayor dimensión lineal es la cuerda ($L \sim 0.65m$), la cual es menor aún que la longitud de onda (del sonido en el aire) del modo fundamental de la cuerda más aguda de la guitarra, que es:

$$\lambda = \frac{330 \text{ m/s}}{330 \text{ Hz}} = 1 \text{ m} \quad E1.2$$

Por supuesto que los armónicos superiores tienen una longitud de onda menor que ésta, pero la amplitud de los armónicos es por lo regular menor que la fundamental. Un cálculo grueso de los poderes emisivos de nuestras tres fuentes, suponiendo que las velocidades se distribuyen uniformemente por toda la superficie de ellas, puede hacerse a través de la expresión:

$$Q = vS \quad E1.3$$

Donde v es la velocidad promedio de las vibraciones de la superficie S de la fuente. Para la cuerda, exactamente la mitad del área tiene una componente de la velocidad paralela a la normal a la superficie, mientras que en la otra mitad

dicha componente es antiparalela a la normal, esta simetría anula la integral que da el poder emisor de la fuente. De modo que:

$$Q_c = 0 \text{ m}^3/\text{s}$$

E1.4

Donde Q_c es el poder emisor de la cuerda. Para frecuencias más altas la cuerda tiene momentos multipolares no nulos, pero estos deben radiar con poca intensidad debido a la pequeñez del área de la cuerda.

En el caso de la tapa superior, suponemos que tiene forma circular con un radio de 0.15m y que se mueve con una velocidad media de 0.02m/s, este valor de la velocidad lo obtuvimos de los resultados presentados por Christensen y Vistisen en la referencia [ref.R1.3]. En este caso, denotando por Q_t al poder emisor de la tapa superior, obtenemos:

$$Q_t \sim 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

E1.5

Para la cavidad resonante usamos el siguiente resultado reportado por Caldersmith [ref. R1.4]:

$$Q_r = \frac{Q_t}{(f/f_r)^2 - 1}$$

E1.6

En esta expresión, Q_r y Q_t son los poderes emisivos de la cavidad resonante y de la tapa superior respectivamente, f es la frecuencia de excitación y f_r es la frecuencia de resonancia de la cavidad, la cual generalmente es de aproximadamente 100Hz (ver más adelante); para frecuencias cercanas a f_r $Q_r > Q_t$, para $f = 2 * f_r \sim 200\text{Hz}$ $Q_r = Q_t$ y para $f > 2 * f_r$ $Q_r < Q_t$; por ejemplo, a $f = 330\text{Hz}$, que es la frecuencia del modo fundamental de la primera cuerda, tenemos que:

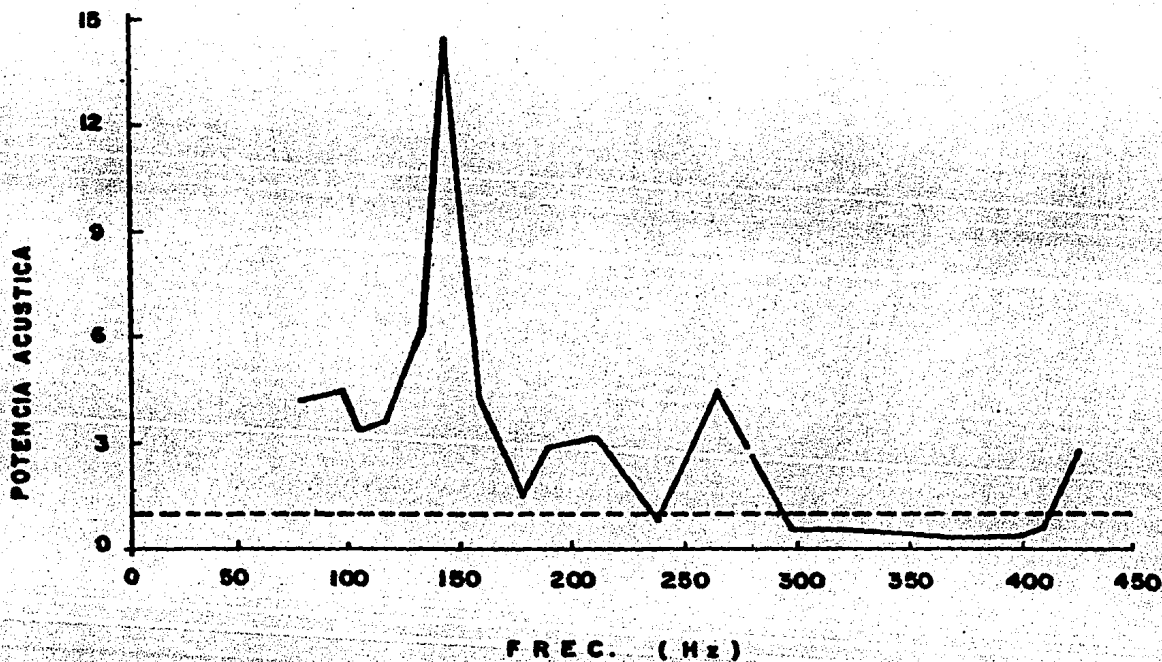
$$Q_r \doteq \frac{Q_t}{10} \sim 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

E1.7

Concluimos que las partes de la guitarra que son responsables de la emisión sonora son la tapa superior y la cavidad resonante, el poder emisor de estas fuentes es del mismo orden de magnitud por lo menos a bajas frecuencias ($f < 300\text{Hz}$). La influencia de las cuerdas es, a primera vista, despreciable.

Strong et.al. [ref. R1.5], estudiaron el campo sonoro radiado por una guitarra con cuerdas metálicas usando una técnica denominada holografía acústica de campo cercano. Con

esta es posible determinar la posición de las fuentes que producen el campo sonoro observado. Encontraron que a frecuencias cercanas a 100 Hz, la mayor parte de la potencia sonora es radiada desde el orificio de la caja de resonancia; mientras que arriba de 300Hz, la tapa pasa a jugar un papel predominante. La figura F1.3 muestra una gráfica de la relación entre la potencia sonora emitida por la cavidad y la emitida por la tapa superior en los experimentos de Strong et.al. La posible emisión proveniente de las cuerdas no es medible en la holografía acústica.



F1.3 - Relación de la potencia acústica emitida por la boca (línea continua) entre la emitida por la tapa superior en una guitarra [ref. R1.5]. La línea segmentada indica la región donde la relación de potencias es de 1:1.

1.2.2 La cavidad resonante.

La acústica de la cavidad resonante a bajas frecuencias puede entenderse en términos de la teoría del resonador de Helmholtz. Considérese una botella de paredes rígidas conteniendo un volumen V , y un cuello de longitud L y sección transversal de área A . Si sólo se consideran frecuencias lo suficientemente bajas como para considerar que la dimensión característica de la botella sea mucho menor que la longitud de onda, se puede estudiar este sistema como un análogo al oscilador mecánico masa-resorte. En el que la masa es la porción de aire que está en el cuello y el resorte es el aire encerrado en la botella. Si m es la masa del aire que se pone en movimiento, x es el desplazamiento de dicha masa y k es la constante de "rigidez" del aire encerrado en la botella, la ecuación que rige el movimiento de la masa de aire es:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad \text{E1.8}$$

En el cuello de la botella existe una masa efectiva dada por

$$m = \rho_0 A L' \quad \text{E1.9}$$

Donde ρ_0 es la densidad normal del aire y L' es la longitud efectiva del cuello; L' es siempre mayor que L debido a la aparición de una "masa de radiación" extra que se suma a la del cuello cuando se radia sonido hacia el exterior. En un resonador de este tipo con el orificio apantallado (es decir que el orificio sale a una pared rígida) la longitud efectiva del cuello es aproximadamente $L' = L + (1.7)r$ donde r es el radio del orificio, ver [ref. R1.6]. En la guitarra el orificio está apantallado por la tapa superior y L es muy pequeño, del orden de 3 o 4mm según constatamos midiendo en algunas guitarras. Tomando $L=4\text{mm}$ y $r=45\text{mm}$, que son valores típicos del grosor de la tapa y del radio del orificio de una guitarra, obtenemos $L' \sim 0.08\text{m}$ para la longitud efectiva del cuello del resonador. Tomando la densidad del aire como $\rho_0 = 1.21\text{kg/m}^3$ y el área como $A \sim \pi(0.045\text{m})^2 \sim 0.0064\text{m}^2$; entonces la masa efectiva del resonador resulta:

$$m \approx 6 \times 10^{-4} \text{ kg} \quad \text{E1.10}$$

Siguiendo con la analogía, el papel del resorte lo juega aquí el volumen de aire encerrado en la cavidad, la presión p en función del desplazamiento x del aire en el cuello del resonador, suponiendo una compresión adiabática y tomando la aproximación a términos lineales como se acostumbra en los

trabajos de acústica, es:

$$p = d_0 c^2 A x / V \quad \text{E1.11}$$

Donde c es la velocidad del sonido en el aire, ver [ref. R1.7]. Ahora bien, la fuerza $p \cdot A$ debe ser igual a la fuerza de restitución $k \cdot x$, donde k es la constante de "rigidez" del aire encerrado en la cavidad. De aquí:

$$k = d_0 c^2 A^2 / V \quad \text{E1.12}$$

Poniendo los valores dados antes y tomando además $c=330\text{m/s}$ y $V=0.014\text{m}^3$, este último dato medido en forma aproximada en una guitarra, obtenemos:

$$k \approx 386 \text{ N/m} \quad \text{E1.13}$$

La frecuencia de resonancia de un oscilador mecánico de masa m y constante de rigidez k es:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{E1.14}$$

Poniendo los valores obtenidos en los párrafos anteriores tenemos que la frecuencia de resonancia de la cavidad de una guitarra es:

$$f \approx 125 \text{ Hz} \quad \text{E1.15}$$

Lo cual cae todavía en la aproximación de grandes longitudes de onda para las que es válido el modelo del resonador de Helmholtz que hemos aplicado en el análisis anterior. En este caso la longitud de onda es aproximadamente:

$$\lambda = \frac{330 \text{ m/s}}{125 \text{ Hz}} \sim 3 \text{ m} \quad \text{E1.16}$$

Mientras que la mayor de las dimensiones de una caja de guitarra es del orden de 0.5m .

Para frecuencias mayores podemos considerar, para facilitar el análisis, que la caja de la guitarra es rectangular y de dimensiones $L_x=0.4\text{m}$, $L_y=0.5\text{m}$ y $L_z=0.1\text{m}$, que son las dimensiones aproximadas de la caja de una guitarra.

Las frecuencias de los modos normales de vibración del aire dentro de una cavidad rectangular están dadas por:

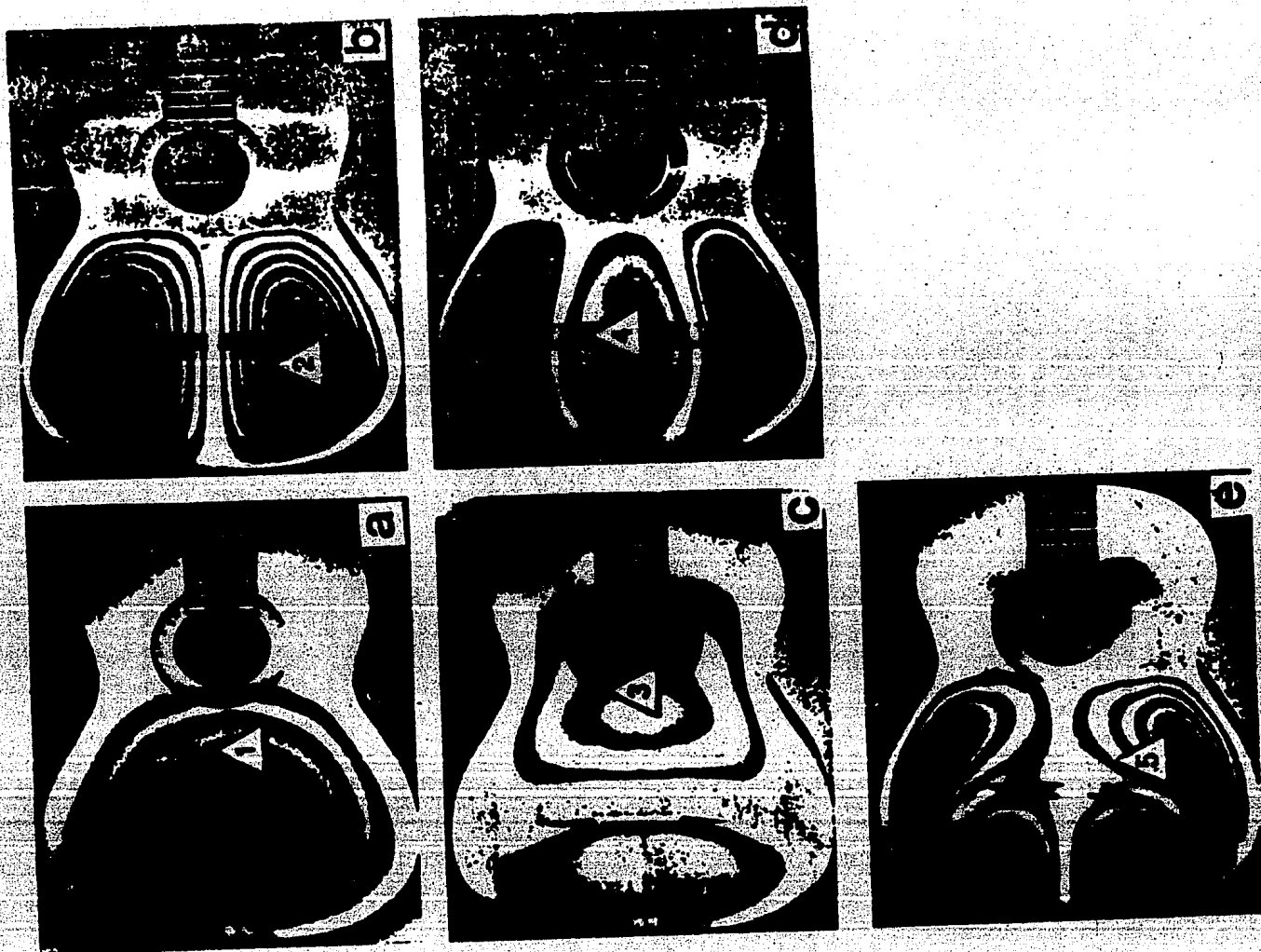
$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{l\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_z}\right)^2}$$

E1.17

Aquí, c es la velocidad del sonido y (l,m,n) son enteros no negativos, ver [ref. R1.8]. La menor de estas frecuencias se obtiene con $(l,m,n)=(0,1,0)$, $f \approx 330\text{Hz}$. Todas las demás son mayores que esta. Como vimos antes, el orificio juega un papel importante en la emisión sonora solo a frecuencias menores a 300Hz; por lo tanto, los modos normales de vibración de la cavidad parecen no ser importantes en la radiación de sonido desde el orificio.

1.2.3 Vibraciones de la tapa superior.

Vimos antes que la tapa superior de la guitarra es un emisor sonoro importante. Jansson [ref. R1.9] reporta al respecto un estudio llevado a cabo por Molin y Stetson que consiste en lo siguiente. Una tapa superior de guitarra fue soportada rigidamente por su borde y forzada a vibrar a diferentes frecuencias excitándola en distintos puntos mediante un vibrador electro-mecánico. Utilizando interferometría holográfica, un método óptico para detectar desplazamientos [ref. R1.10], se registraron los primeros modos normales de vibración de la tapa. En su artículo, Jansson hace una comparación de la información obtenida por el método óptico con información obtenida por métodos acústicos en la misma tapa. Al estudiar las resonancias de cada uno de los modos normales de vibración de la tapa, encuentra una correspondencia del 1% en los valores de las frecuencias de resonancia de cada modo de vibración y del 13% en los factores de calidad (el factor de calidad de una resonancia es la relación entre la frecuencia de resonancia y el ancho del pico, ver más adelante para una definición más precisa). Con esto se muestra la importancia de las vibraciones de la tapa superior en la emisión sonora de la misma. Los resultados del estudio holográfico se muestran en la figura F1.4.



F1.4 - Interferogramas holográficos de las resonancias de la tapa superior de una guitarra. El triángulo indica el punto de excitación. Las frecuencias de las resonancias son: a) 185 Hz, b) 287 Hz, c) 460 Hz, d) 508 Hz y e) 645 Hz. [ref. Ri.91].

En los hologramas, las líneas iluminadas indican regiones de igual desplazamiento, las líneas más brillantes indican regiones de poco desplazamiento y conforme se hacen más tenues indican desplazamientos mayores. Nótese que la región que vibra es la que está en la vecindad del puente, la parte cercana al mástil parece inmóvil. El primer modo de vibración ($f=185$ Hz) emite sonido con mayor eficiencia ya que todas los puntos vibran en fase, por otra parte este modo "bombea" aire de la cavidad y por lo tanto se acopla con la resonancia de Helmholtz de la cavidad. Los otros modos son menos eficientes en cuanto a poder emisor, ya que existen regiones que vibran con fases diferentes; estos modos son fuentes multipolares de radiación que contribuyen con menor importancia al campo emitido. Obsérvese también que el modo 3 ($f=460$ Hz) tiene una línea nodal justo a lo largo del puente, es de esperarse que este modo sea difícil de excitar en la guitarra funcionando normalmente, i.e. con la cuerda excitando a la tapa a través del puente.

1.2.4 Espectro de emisión sonora de la guitarra.

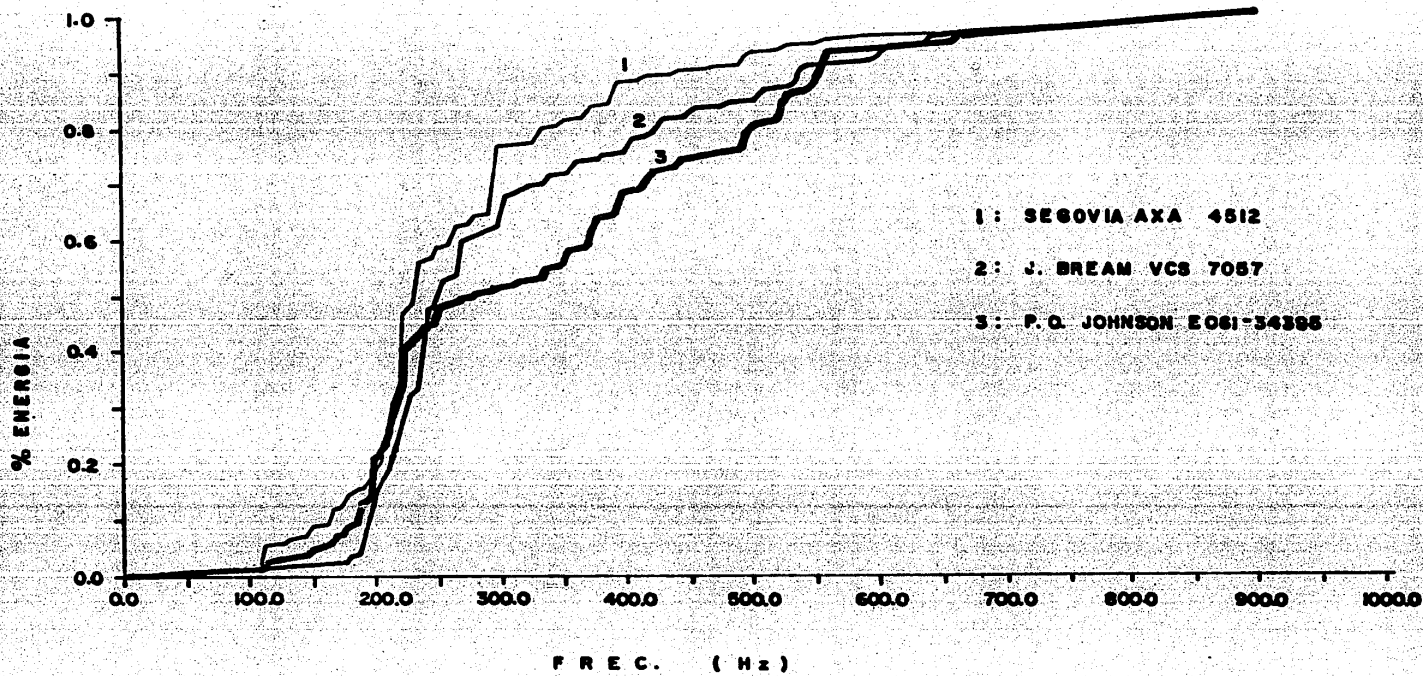
Describiremos aquí las experiencias realizadas por Christensen [ref. R1.11] y por Caldersmith [ref. R1.12], respecto a la respuesta en presión sonora de la guitarra excitada a varias frecuencias.

En el trabajo de Christensen el material de estudio son varias grabaciones comerciales y algunas ejecuciones suyas de música para guitarra sola. La señal eléctrica, producida por una tornamesa en el caso de las grabaciones comerciales o por un micrófono en el otro caso, fue digitalizada en registros de 1024 muestras y se obtuvo su espectro mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) usando una ventana de ponderación cuadrada. Considerando entre 60 y 200 de estos registros se obtuvo un espectro de promedio prolongado (en inglés: long-term-average spectrum). El voltaje de la señal eléctrica analizada es proporcional a la presión sonora, de modo que el espectro obtenido es un espectro del nivel de presión sonora $20 \cdot \log(P/P_0)$ donde P_0 es la presión de referencia (generalmente $P_0=20\mu\text{Pa}$). Ahora bien, en la mayoría de los casos es posible considerar que este espectro es proporcional al espectro de intensidad acústica I (densidad superficial de energía acústica), ya que para ondas planas, esféricas y cilíndricas (las más socorridas) I es proporcional a P . Dada la diversa procedencia de las fuentes, no es posible obtener resultados absolutos debido a la falta de calibración. La manera como Christensen obtiene información útil es calculando el espectro de distribución acumulada de intensidad acústica según la relación:

$$I(f) = \frac{\int_0^f S(f) df}{\int_0^{\infty} S(f) df}$$

E1.18

En donde $S(f)$ es el espectro de presión sonora. Nótese que el valor de $I(f)$ es independiente de la falta de calibración de las mediciones. La figura F1.5 muestra varios de estos espectro obtenidos de diferentes grabaciones.

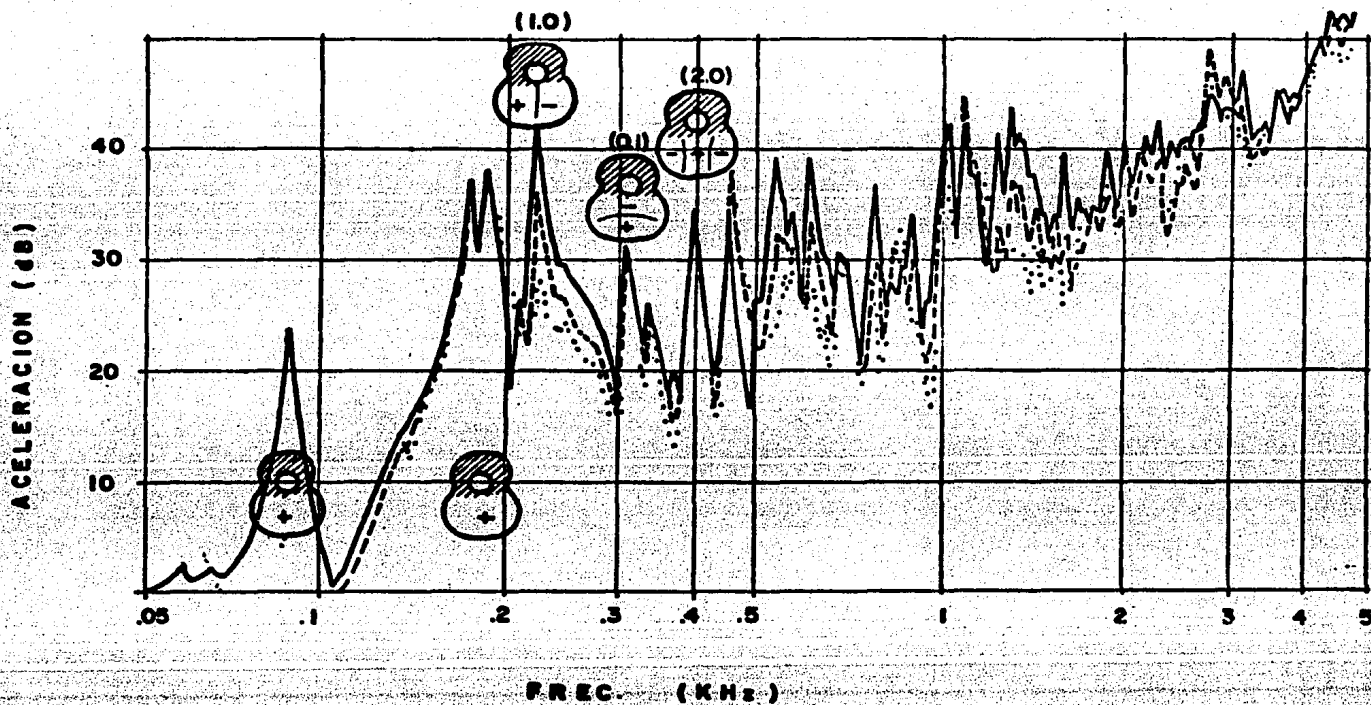


F1.5 - Distribución acumulativa de energía acústica emitida por diferentes guitarras tocadas por los artistas indicados en la figura (se indica también la clave de la grabación utilizada), [ref. R1.11].

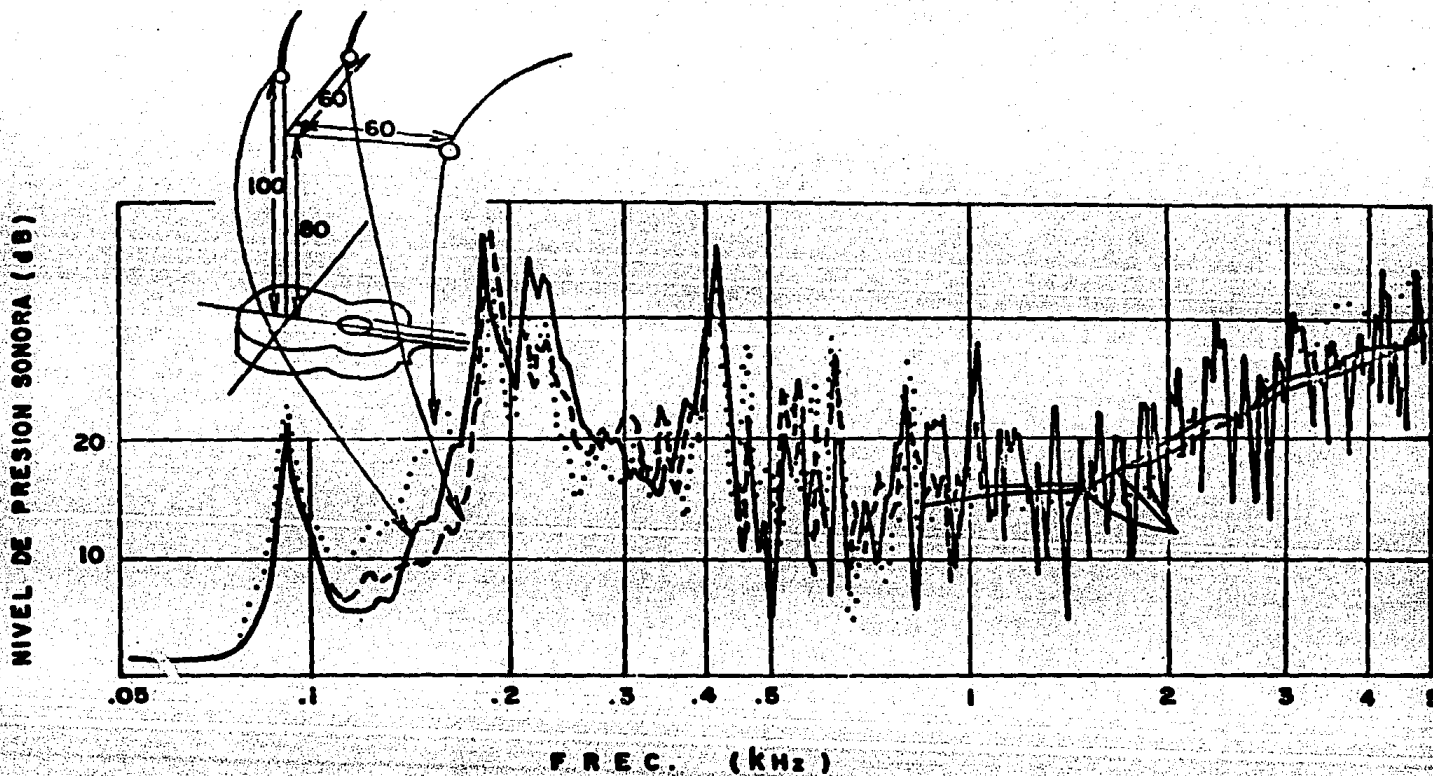
Se observa que cerca de los 800 Hz se ha emitido ya cerca del 100% de la energía acústica, además existen frecuencias en las que las curvas sufren saltos bruscos; por ejemplo, en la curva 1 hay saltos a 100, 200, 300 y 400 Hz. Estos saltos revelan la influencia de las diferentes resonancias de la guitarra en su emisión sonora; el salto a 100 Hz puede asociarse a la resonancia de Helmholtz de la cavidad, los saltos siguientes pueden asociarse con las resonancias de la tapa superior.

En el trabajo de Caldersmith se aplicó una vibración sobre el puente de la guitarra mediante un dispositivo electro-mecánico, las cuerdas se atenuaron para evitar su vibración. Con un acelerómetro se registró el movimiento del punto de excitación y el nivel de presión sonora emitido fue captado por un micrófono. La figura F1.6 muestra los espectros de aceleración para diferentes puntos de excitación sobre el puente y la figura F1.7 los espectros de nivel de presión sonora para distintas posiciones del micrófono.

Obsérvese que la elección de distintos puntos de excitación y de distintas posiciones del micrófono no afectan en forma determinante los resultados. Los espectros obtenidos muestran otra vez la influencia de las resonancias de la guitarra. El pico que aparece abajo de los 100 Hz es debido a la resonancia de Helmholtz, en seguida aparece un gran pico doble que Caldersmith asocia con las primeras resonancias de las tapas superior e inferior. Se siguen una serie de picos que se asocian con las otras resonancias de la tapa superior. A frecuencias superiores a los 1500 Hz aparecen multitud de picos que revelan una gran cantidad de resonancias de diversas partes de la guitarra (probablemente a estas frecuencias entran en acción los modos superiores de la cavidad, las vibraciones del brazo, de los costados, etc.). Esta región es denominada por Caldersmith la región del "continuo resonante". La región de bajas frecuencias que incluye las resonancias de Helmholtz, las primeras resonancias de la tapa superior y probablemente también de la inferior, es la región de régimen monopolar, llamada así debido a los mecanismos de radiación sonora que entran en acción y abarca las frecuencias de hasta 500 Hz. La región entre 500 y 1500 Hz es llamada por Caldersmith la región de régimen multipolar, pues incluye las resonancias de la tapa que radian como dipolos, cuadrupolos, etc.



F1.6 - Espectros del nivel de aceleración en 3 puntos de excitación sobre el puente de una guitarra. Entre las cuerdas 1 y 2 (línea continua), entre las cuerdas 2 y 3 (línea segmentada) y entre las cuerdas 3 y 4. (línea punteada). Se muestran también (esquemáticamente) las resonancias de la guitarra a las que se asocian algunos de los picos del espectro. [ref. 1.12].



F1.7 - Espectros del nivel de presión sonora emitido por una guitarra para 3 posiciones distintas del micrófono. En la región de frecuencias superiores a 1 kHz se muestran también los espectros suavizados. Obsérvese que estos no difieren apreciablemente para las 3 posiciones del micrófono usadas. [ref. R1.12].

1.2.5 Modelos propuestos para la acústica de la guitarra.

Describimos en la sección 1.2.2 la acústica del resonador de Helmholtz que, supusimos, es el mecanismo responsable de la aparición del primer pico en las curvas de respuesta sonora. Haciendo un cálculo grueso obtuvimos una frecuencia de resonancia de 125 Hz, mientras que el primer pico de los espectros de emisión sonora aparece siempre alrededor de los 100 Hz. La correspondencia entre ambos valores apoya la suposición de que el modo de Helmholtz de la cavidad constituye la primera resonancia de la guitarra.

Ahora bien, también se observa que la frecuencia de la primera resonancia de la tapa superior ($f=200$ Hz) no dista mucho de la resonancia de Helmholtz, esto y un poco de reflexión en cuanto a los mecanismos de estas resonancias hacen pensar que ambas oscilaciones están acopladas. Lleno un poco más al detalle: las oscilaciones del primer modo de la tapa cambian el volumen de la cavidad y por lo tanto la presión de aire en su interior; a su vez, estos cambios en la presión afectan el movimiento de la tapa.

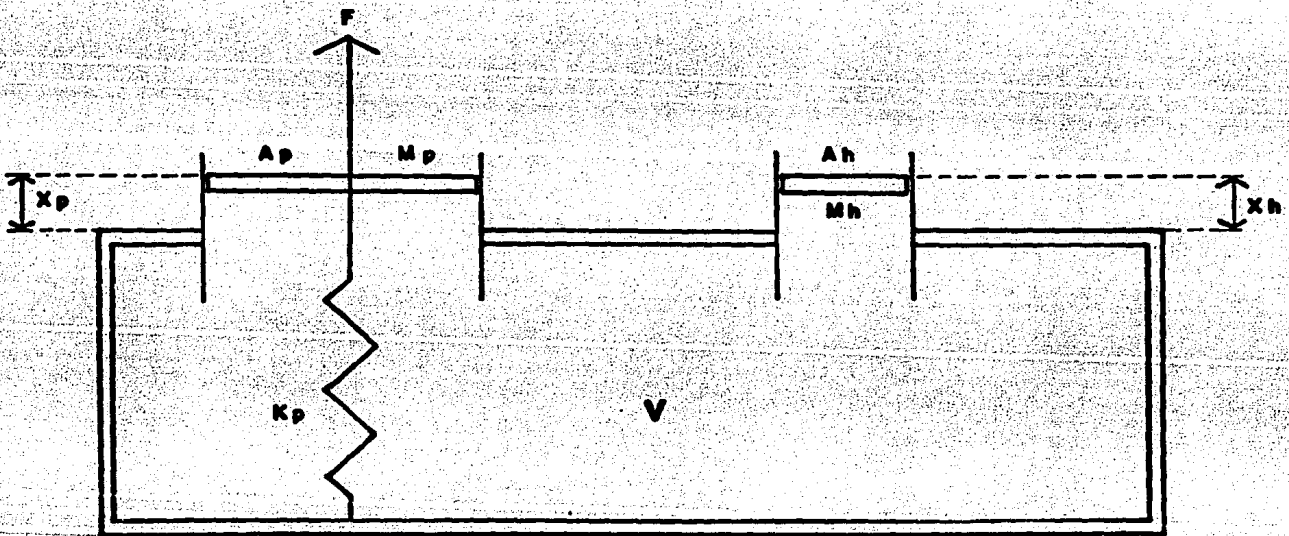
Varios investigadores han atacado este problema con más cuidado en forma experimental y teórica, entre ellos: Firth (1977), Caldersmith (1978), Christensen y Vistisen (1980) y Christensen (1982), ver [refs. R1.3-4 y R1.13-14]. Todos ellos llegan básicamente a las mismas conclusiones en base a experimentos y modelos también similares; en lo que sigue expondremos el trabajo de Christensen [ref. R1.14] por ser el más reciente.

El primer paso para analizar teóricamente las vibraciones acopladas de la resonancia de Helmholtz y la primera resonancia de la tapa superior, es idear un modelo simplificado de la guitarra. Supondremos que la caja de la guitarra es completamente rígida, excepto en una región de la tapa superior alrededor del puente que modelaremos como un pistón de área A_p , masa M_p , sujeto a una fuerza F debida a la cuerda y atado al fondo de la guitarra por un resorte con una constante de rigidez K_p , de este modo simulamos la elasticidad de la tapa. En la boca de la caja supondremos que se encuentra una porción de aire que actúa como un pistón de área A_h y masa M_h , este es el pistón del resonador de Helmholtz. Designaremos por X_p y X_h los desplazamientos hacia el exterior de la caja de ambos pistones. De este modo, el movimiento de ambos pistones provoca un cambio en el volumen V de la cavidad, dado por:

$$V - V_0 = A_p X_p + A_h X_h$$

E1.19

Donde V_0 es el volumen de la cavidad cuando ambos X_p y X_h son cero. Ver figura F1.8.



F1.8 - Modelo simple para describir las dos primeras resonancias de la guitarra. Ver detalles en el texto.

Los movimientos de los pistones son tan veloces comparados con la velocidad de flujo térmico en el aire, que las compresiones y rarefacciones del aire en la caja deben considerarse como adiabáticas. En tal caso, la presión sonora dentro de la cavidad está dada por:

$$p = -dc^2(V-V_0)/V \quad \text{E1.20}$$

La fuerza que ejerce el aire de la cavidad sobre los pistones es $p \cdot A_p$ para el de la tapa y $p \cdot A_h$ para el de Helmholtz. Las ecuaciones de movimiento de los pistones son:

$$M_p \ddot{X}_p = F - K_p X_p - R_p \dot{X}_p + p A_p \quad \text{E1.21a}$$

$$M_h \ddot{X}_h = -R_h \dot{X}_h + p A_h \quad \text{E1.21b}$$

R_p y R_h son las resistencias al movimiento de los pistones. Tomando en cuenta que:

$$p = -dc^2(A_p X_p + A_h X_h)/V \quad \text{E1.22}$$

Entonces las ecuaciones quedan:

$$M_p \ddot{X}_p + R_p \dot{X}_p + \left(K_p + \frac{dc^2 A_p^2}{V}\right) X_p + \frac{dc^2 A_h A_p}{V} X_h = F \quad \text{E1.23a}$$

$$M_h \ddot{X}_h + R_h \dot{X}_h + \frac{dc^2 A_h^2}{V} X_h + \frac{dc^2 A_h A_p}{V} X_p = 0 \quad \text{E1.23b}$$

Obsérvese que la ecuación para X_p contiene un término en X_h y viceversa, es así como queda contemplado el acoplamiento en el modelo.

Si $A_h=0$ en la ecuación E1.23a, obtenemos que la frecuencia angular de resonancia para el pistón de la tapa en ausencia del orificio es:

$$\omega_p = \left[\left(K_p + \frac{dc^2 A_p^2}{V} \right) / M_p \right]^{1/2} \quad \text{E1.24}$$

Si $A_p=0$ en la ecuación E1.23b, obtenemos que la frecuencia angular de resonancia de Helmholtz sin movimiento de la tapa (como en la sección 1.2.2) es:

$$W_h = c A_h \left[\frac{d}{V M_h} \right]^{1/2}$$

E1.25

Al resolver las ecuaciones de movimiento para una fuerza F periódica, las frecuencias angulares de resonancia del sistema quedan:

$$W_{\pm}^2 = \frac{1}{2} (W_p^2 + W_h^2) \pm \frac{1}{2} \left[(W_p^2 - W_h^2) + 4W_{ph}^4 \right]^{1/2}$$

E1.26

En donde:

$$W_{ph}^4 = (dc^2 A_h A_p)^2 / (V^2 M_h M_p)$$

E1.27

Se denomina frecuencia angular de acoplamiento. Las frecuencias angulares de resonancia del sistema pueden expresarse aproximadamente por:

$$W_-^2 = W_h^2 - \frac{W_{ph}^4}{(W_p^2 - W_h^2)}$$

E1.28a

$$W_+^2 = W_p^2 + \frac{W_{ph}^4}{(W_p^2 - W_h^2)}$$

E1.28b

Esto significa que, a raíz del acoplamiento, la resonancia de Helmholtz tiene una frecuencia menor que la calculada considerando la caja completamente rígida y la frecuencia de resonancia del primer modo de vibración de la tapa es mayor que la de la tapa con el orificio tapado. Esto es beneficioso para la función musical de la guitarra pues, al disminuir la frecuencia de la resonancia de Helmholtz, se extiende el rango de respuesta sonora tanto hacia bajas, como hacia altas frecuencias. Un análisis de las relaciones de fase indica que para frecuencias menores que W_- o mayores que W_+ , ambos pistones se mueven en antifase ocurriendo así un "corto circuito" acústico, el aire expulsado por un pistón es admitido por el otro y viceversa. A estas frecuencias la radiación sonora es poco eficiente, sin embargo a frecuencias comprendidas entre W_- y W_+ , los pistones se mueven aproximadamente en fase convirtiendo a la guitarra en un buen emisor de sonido (por cierto, este es el mismo principio de funcionamiento de los altavoces del tipo "bass-reflex" en los que se tiene una bocina y un agujero en la caja acústica).

Christensen continua con un modelo en el que incluye el efecto del primer modo de vibración de la tapa posterior. Esta oscilación se acopla a las otras dos produciendo efectos similares a los que ocurren en el modelo de dos osciladores. Supongamos que W_h , W_p y W_p' son las frecuencias angulares de oscilación del resonador de Helmholtz y de los modos fundamentales de vibración de las tapas superior e inferior

respectivamente, en el caso en que todos ellos están desacoplados. Es decir, W_h se obtiene suponiendo que la caja es completamente rígida, W_p suponiendo que el orificio está tapado y la tapa inferior está inmóvil, y W_p' suponiendo el orificio tapado y la tapa superior inmóvil. Sean W_- , W_+ y W_+' las frecuencias de los osciladores una vez acoplados. El efecto del acoplamiento es hacer que las frecuencias de las resonancias se "alejen" unas de otras igual que en el caso de dos osciladores. Por ejemplo, si $W_h < W_p < W_p'$ entonces $W_- < W_h < W_p$, $W_p < W_+ < W_p'$ y $W_p' < W_+'$. Otro efecto es que aparece una antirresonancia entre W_+ y W_+' cuyo efecto es reducir el nivel de presión sonora emitido en este rango de frecuencias. Por ello parece que es deseable que estas frecuencias sean muy parecidas para reducir ese rango de emisión pobre.

El modelo descrito hasta aquí, involucra solo las dos o tres primeras resonancias de la guitarra. El mismo Christensen [ref. R1.15] propuso recientemente (1984) un método para caracterizar las resonancias de la tapa con frecuencias de hasta 600-800 Hz, su estudio excluye la resonancia de Helmholtz y las vibraciones de la tapa posterior. La idea consiste en suponer que las resonancias observadas en el espectro de emisión sonora, son debidas a la radiación monopolar producida por unos pistones que se mueven como osciladores armónicos independientes. Los parámetros que caracterizan cada resonancia son: la frecuencia f_0 , el factor de calidad $Q = f_0 / (f_2 - f_1)$ (donde f_1 y f_2 son las frecuencias para las cuales la energía emitida es 1/2 de la emitida en f_0) y la relación A/M del área del pistón entre su masa. Se calculan los valores f_0 , Q y A/M para cada resonancia, de manera que la emisión sonora de un conjunto de pistones con esas características se ajuste lo más posible al espectro de emisión sonora medido experimentalmente. Se encuentra que este modelo ajusta satisfactoriamente para varias guitarras estudiadas.

1.3 - LOS TONOS DE LA GUITARRA ENCORDADA.

En la medición de los espectros de emisión sonora descritos anteriormente la guitarra fue excitada por dispositivos electro-mecánicos aplicados sobre el puente (excepto en el caso de las grabaciones con música descrito en la sección 1.2.4). En esta sección veremos con más detalle que propiedades tiene el sonido de la guitarra cuando la excitación proviene de la vibración de sus cuerdas. No entraremos a explicar en detalle la mecánica de las cuerdas. En lo que sigue nos referiremos a consideraciones expuestas por Firth [ref. R1.16].

La pulsación de una cuerda de guitarra, originalmente en reposo, produce en ella una vibración que inicia súbitamente y luego va decayendo poco a poco, generalmente siguiendo un ritmo exponencial, a medida que la energía de la cuerda se transmite al cuerpo de la guitarra o es gastada en vencer la resistencia del aire. Esta descripción en el dominio del tiempo se complementa con una descripción en el dominio de la frecuencia. Justo al momento de la pulsación, el espectro del desplazamiento de la cuerda contiene componentes en todas las frecuencias, esto es debido al comienzo brusco de la vibración; al mismo tiempo las componentes armónicas debidas a las oscilaciones propias de la cuerda se manifiestan en el espectro con una amplitud un poco mayor que el "ruido" del transitorio inicial. Un poco después, las componentes "ruidosas" de la excitación se atenúan y el espectro de la oscilación contiene líneas correspondientes a los armónicos de la cuerda. Conforme sigue pasando el tiempo, estas líneas se siguen atenuando hasta que la cuerda vuelve al reposo.

Cuando la cuerda vibra montada en una guitarra, las propiedades vibratorias de ésta se suman a las de la cuerda para dar las características del sonido emitido. Dado que en la vibración inicial de la cuerda hay componentes en todas las frecuencias, las resonancias de la guitarra se excitan contribuyendo al sonido emitido, de modo que en esta etapa inicial el sonido de las guitarras tiene un espectro con componentes en todas las frecuencias y algunas regiones reforzadas debido a los armónicos de la cuerda y otras debido a las resonancias de la guitarra. Esta etapa que llamaremos "ataque" dura menos de 100 ms. En seguida, solo los armónicos de la cuerda se manifiestan en el sonido, en esta etapa la guitarra actúa selectivamente produciendo sonidos intensos para los armónicos con frecuencias cercanas a las resonancias y atenuando aquellos que coinciden con regiones en las que la respuesta sonora de la guitarra es pobre.

Cuando la cuerda vibra a una frecuencia cercana a la de alguna resonancia o en una región donde la respuesta de la guitarra es alta, la energía de la cuerda se radia rápidamente en forma de sonido a través de la guitarra. Por el contrario, si la frecuencia de vibración de la cuerda corresponde con una región de respuesta baja, el ritmo de

transferencia de energía desde la cuerda será menor. Esto significa que en el primer caso el ritmo de atenuación del nivel de presión sonora emitido será rápido y en el otro será lento. Curiosamente, a pesar de que el decaimiento sea rápido (en el caso de que la frecuencia de vibración de la cuerda coincida con una resonancia), la duración del tono será grande debido a que el nivel sonoro será también considerable y tardará más tiempo en alcanzar el nivel de ruido de fondo del recinto en donde se realice la prueba. En el otro caso, a pesar de un ritmo de atenuación lento, la duración del tono será pequeña debida a un nivel sonoro inicialmente bajo. Todo lo mencionado hasta aquí ha sido observado experimentalmente por Firth y Jansson [refs. R1.16 y R1.17].

Finalizaremos esta sección tratando el problema del "envejecimiento" de las cuerdas. Allen [ref. R1.18] comparó cuerdas metálicas para guitarra nuevas y usadas, midiendo la aceleración en uno de sus extremos (las cuerdas se montaron en una guitarra eléctrica). Observó que en las cuerdas nuevas, la aceleración en la región de altas frecuencias es mayor que en las cuerdas usadas. Determinó también la inarmonicidad de los sobretonos de la cuerda y concluyó que esta no cambia al envejecer la cuerda. La inarmonicidad existe aún en una cuerda nueva, pues ninguna cuerda real (aún si es de plástico) es completamente flexible. Esta rigidez provoca que ondas de distinta frecuencia se propaguen a diferentes velocidades a lo largo de la cuerda y finalmente esto se traduce a que los modos normales de la cuerda tengan frecuencias que no se relacionan armónicamente (i.e. siguiendo una relación de múltiplos enteros). Sin embargo, el grado de inarmonicidad es pequeño; Allen concluye, pues, que este valor no cambia con el envejecimiento.

Por otra parte, Houtsma [ref. R1.19] reporta que la inarmonicidad de las cuerdas metálicas sí aumenta con el envejecimiento. Sin embargo debe tomarse en cuenta que el método de envejecimiento usado por Houtsma es diferente al usado por Allen. Aquel envejeció las cuerdas sometiéndolas repetidamente a una tensión muy superior a la normal, por lo regular una cuerda de guitarra no se somete a esta tortura. Por su parte, Allen probó con cuerdas que envejecieron por uso normal durante un período largo. Podemos concluir que, si se usan normalmente, el envejecimiento de las cuerdas sólo provoca una disminución en la amplitud de los sobretonos de frecuencias altas y no se afecta la inarmonicidad de la cuerda, esta permanece pequeña. Tómese en cuenta que los trabajos mencionados se refieren a cuerdas metálicas, mientras que en las guitarras clásicas se usan cuerdas de fibras sintéticas (generalmente Nylon).

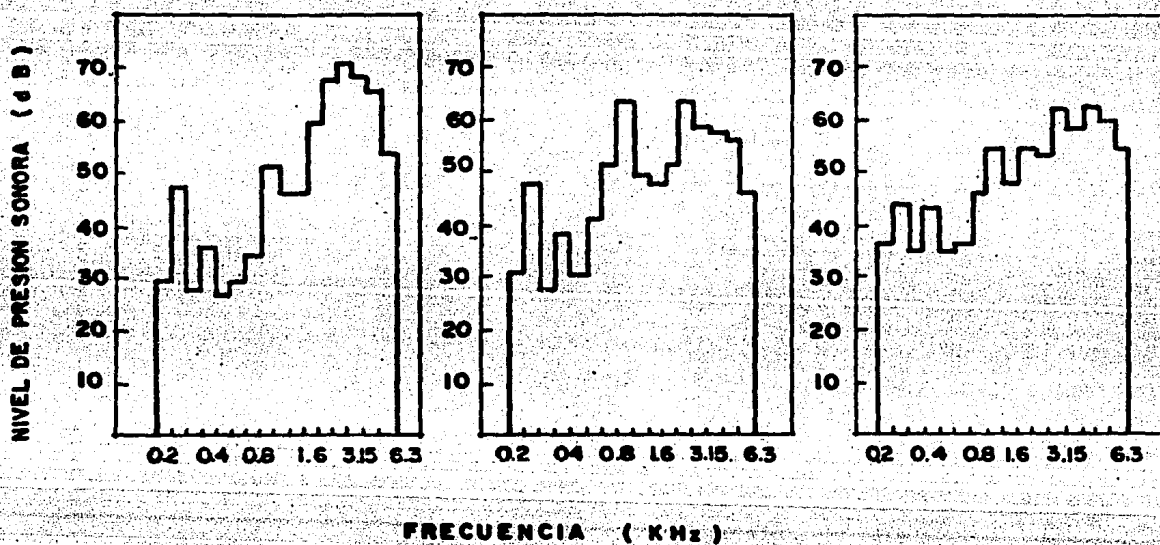
En un estudio realizado en cuerdas de Nylon, Ruiz Boullosa et.al. [ref. R1.20] reportan que para tiempos de envejecimiento normal menores a 1.5 horas, no se observan cambios significativos ni en la inarmonicidad ni en el

espectro sonoro de los tonos emitidos por una guitarra.

1.4 - EVALUACION DE GUITARRAS.

La determinación de las propiedades acústicas de las guitarras es una labor estéril si no se hace referencia a las cualidades subjetivas de las mismas, a final de cuentas lo que interesa es la opinión del oyente. Desde un punto de vista subjetivo, las características de una guitarra pueden ser expresadas verbalmente en forma muy diversa por distintas personas. Una manera de aminorar esa diversidad de formas expresivas es que el sujeto evalúe asociando a cada guitarra una "calidad". La calidad es buena para las guitarras preferidas por el sujeto y es mala para las que no lo son. La calidad juzgada de este modo es una especie de parametrización de todo lo que el sujeto aprecia y siente cuando escucha una guitarra. Una vez que se ha evaluado un conjunto de guitarras, es posible entonces estudiar sus propiedades acústicas y buscar si existe alguna relación entre estas y la calidad subjetiva.

Gridnev y Porvenkov [ref. R1.21] realizaron un trabajo en esta dirección. Sus pruebas subjetivas consistieron en la evaluación de 35 guitarras por parte de un grupo de 7 músicos expertos. Durante las pruebas los sujetos escucharon algunos pasajes musicales y escalas ejecutadas por un guitarrista experimentado. Luego de oír cada guitarra los sujetos juzgaban la calidad de la guitarra en una escala numérica. Conjuntamente, se determinó el espectro de respuesta sonora de las guitarras excitadas por pequeños golpes en la caja. A partir de los resultados de la evaluación subjetiva dividieron el grupo de guitarras en tres subgrupos de calidades diferentes: buena (I), regular (II) y mala (III). Promediando los espectros de las guitarras de cada subgrupo obtuvieron los espectros patrón de las tres categorías. Finalmente desarrollaron un método probabilístico para determinar, dado un espectro, a cual categoría es más probable que pertenezca la guitarra de la cual proviene dicho espectro. La calidad estimada de este modo coincidió con la evaluada subjetivamente en el 80% de los casos para las guitarras de clase I, 71% para las de clase II y 50% para las de III. Los espectros patrón se muestran en la figura F1.9. Se observa que los espectros son muy parecidos para frecuencias menores a los 500 Hz, pero a frecuencias mayores se ve que las guitarras de mejor calidad tienen niveles de respuesta más altos.



F1.9 - Espectros patrón para guitarras de tres calidades subjetivas diferentes: buena-I, regular-II y mala-III. [ref. R1.21].

Jaroszewski et. al. [ref. R1.22] estudiaron un conjunto de 13 guitarras evaluadas por un grupo de 3 guitarristas. La evaluación consistió en la comparación de las guitarras por pares en sesiones de 30 minutos para cada par; a los guitarristas se les daban las dos guitarras y se les permitía tocar en ellas notas separadas, acordes, pero no piezas de música. Al final de cada sesión el guitarrista decidía cual de las dos prefería. Procediendo de este modo con todos los posibles pares de guitarras y los tres guitarristas, fue posible colocar las guitarras en orden de calidades, desde la peor hasta la mejor. Paralelamente realizaron mediciones de los tiempos de ataque (i.e. el tiempo que toma para que el sonido alcance el máximo valor de presión sonora) para varios tonos de cada guitarra. Al comparar los resultados de ambas pruebas, hallaron que los valores promedio de los tiempos de ataque eran mayores en las buenas guitarras (del orden de 40 ms al promediar varios tonos de la mejor guitarra) que en las malas (del orden de 2 ms para la peor). Por otra parte, hallaron que las desviaciones relativas (promedio/desviación normal) de los tiempos de ataque eran menores para las buenas guitarras que para las malas.

A continuación resumimos cuales son las características acústicas propias de una guitarra de buena calidad, obtenidas en experimentos en los que se efectuaron pruebas subjetivas para evaluarlas. Los criterios se dan en forma relativa en comparación con otras guitarras, es decir si decimos por ejemplo que las buenas guitarras tienen tiempos de ataque largos, significa que si se comparan varias guitarras, la mejor será la que los tenga más largos. La razón de esto es que ninguna de las investigaciones reporta valores óptimos de los parámetros que afectan a la calidad.

1. Nivel alto del espectro de respuesta sonora para frecuencias mayores que 500 Hz [ref. R1.21].

2. Tonos con tiempos de ataque largos y poca variación de ellos para distintos tonos [ref. R1.22].

En seguida reportamos algunos criterios obtenidos en experimentos en los que no se realizaron pruebas subjetivas, pero en los que las guitarras usadas eran de constructores renombrados:

3. Nivel alto del espectro de respuesta sonora entre 1000 y 4000 Hz [refs. R1.12 y R1.23].

4. Tonos con un nivel de presión sonora alto [ref. R1.18].

5. Tonos con un ritmo de decaimiento rápido [ref. R1.18].

Finalmente mencionaremos los trabajos de Jovicic [refs. de la R1.24 a la R1.29] que hasta donde sabemos, fue el

primero que atacó el problema del diseño y construcción de guitarras con miras a mejorar sus propiedades acústicas. Desgraciadamente sus experiencias son anteriores a los trabajos mencionados aquí respecto a la obtención de criterios de calidad y por tanto sus criterios de evaluación son un tanto rudimentarios, aunque no tan errados a la luz de los trabajos posteriores. Su criterio de calidad consistía en maximizar el número de armónicos que se podían observar en el espectro de los tonos de las guitarras, lo cual indicaría un espectro con un nivel elevado en frecuencias altas y por tanto una buena calidad según lo establecido en el criterio no. 3 citado más arriba. De cualquier modo su trabajo y sus resultados son valiosos, pues sentaron un precedente para trabajos subsecuentes en la misma dirección, ver por ejemplo [ref. R1.1].

REFERENCIAS DEL CAPITULO I.

R1.1 - Kasha, M. y Kasha, N. "Applied mechanics and the modern string instrument - classical guitar". Journal of Guitar Acoustics. No. 6, Sept. 1982..

R1.2 - Kinsler, L.E. et.al. Fundamentals of Acoustics. 3a edición. John Wiley. 1982. p. 164.

R1.3 - Christensen, O. y Vistisen, B.B. "Simple model for low frequency guitar function". J. Acoust. Soc. Am. 68(3), Sept. 1978.

R1.4 - Caldersmith, G. "Guitar as a reflex enclosure". J. Acoust. Soc. Am. 63(5), Mayo 1978.

R1.5 - Strong, W.Y. et.al. "Studying a guitar's radiation properties with nearfield holography". Journal of Guitar Acoustics. No. 6, Sept. 1982.

R1.6 - Kinsler, L.E. et.al. op.cit. p. 226.

R1.7 - Kinsler, L.E. et.al. Idem.

R1.8 - Kinsler, L.E. et.al. op.cit. p. 216.

R1.9 - Jansson, E.V. "A study of acoustical and hologram interferometric measurements of the top plate vibrations of a guitar". Acustica. Vol. 25 (1971).

R1.10 - Longhurst, R.S. "Geometrical and physical optics". 3a edición. Longman. 1984.

R1.11 - Christensen, O. "The response of played guitars at middle frequencies".

R1.12 - Caldersmith, G. "The guitar frequency response". Journal of Guitar Acoustics. Sept. 1982.

R1.13 - Firth, I.M. "Physics of the guitar at the Helmholtz and first top-plate resonances". J. Acoust. Soc. Am. Vol. 61(2), Feb. 1977.

R1.14 - Christensen, O. "Quantitative models for low frequency guitar function". Journal of Guitar Acoustics. No. 6, Sept. 1982.

R1.15 - Christensen, O. "An oscillator model for analysis of guitar sound pressure response". Acústica, Vol. 54 (1984).

R1.16 - Firth, I. "Guitars: steady state and transient response". Journal of Guitar Acoustics. No. 6, Sept. 1982.

R1.17 - Jansson, E.V. "Fundamentals of the guitar tone". Journal of Guitar Acoustics. No. 6, Sept. 1982.

R1.18 - Allen, J.B. "On the aging of steel guitar strings". The Catgut Acoustical Society Newsletter. No. 26, Nov. 1976.

R1.19 - Houtsma, A.J.M. "Inharmonicity of wound guitar strings". Journal of Guitar Acoustics. No. 6, Sept. 1982.

R1.20 - Ruiz Boullosa, R. et.al. "Estudio experimental sobre el efecto del envejecimiento en el sonido de las cuerdas de una guitarra". Ponencia presentada en el XXVIII Congreso Nacional de Física. Hermosillo, Son. Noviembre de 1985.

R1.21 - Gridnev, M.V. y Porvenkov, V.G. "Appraisal of the quality of violins and guitars". Sov. Phys. Acoust. Vol. 22(5), Sept.-Oct. 1976.

R1.22 - Jaroszewski, A. et.al. "Opening transients and the quality of classical guitars". Archives of Acoustics. 3, 2, 79-84 (1978).

R1.23 - Leipp, E. "Acoustical research of the guitar". Bulletin du Group d'Acoustique Musicale. No. 93, Oct. 1977.

R1.24 - Jovicic, J. "Spectres sonores de la guitare de concert". Acustica, Vol. 18 (1967).

R1.25 - Jovicic, J. "Influence de différents modelages de la table de résonance supérieure sur la qualité du ton de l'instrument". Acustica, Vol. 18 (1967).

R1.26 - Jovicic, J. "Influence de différents matériaux de la table inférieure et du bord sur la qualité du ton de la guitare". Acustica. Vol. 26 (1972).

R1.27 - Jovicic, J. et.al. "Le changement du spectre et du timbre de la guitare dû à la qualité différent du bois de la table de résonance". Acustica. Vol 33. (1975).

R1.28 - Jovicic, J. y Jovicic, O. "Le rôle des barres de raidissement sur la table de résonance de la guitare: I. Leur effet sur les oscillations propres du corps de l'instrument". Acustica. Vol. 38 (1977).

R1.29 - Jovicic, J. y Jovicic, O. "Le rôle des barres de raidissement de la table de résonance de la guitare: II Leur effet sur les nodales de la table (étude holographique)". Acustica. Vol. 38 (1977).

C A P I T U L O II.

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA CALIDAD DE UN GRUPO DE GUITARRAS.

2.1 - PANORAMA GENERAL.

Los experimentos realizados están divididos en dos grupos: el primero es el de las pruebas subjetivas para determinar la calidad de seis guitarras a juicio de un grupo de expertos (guitarristas, lauderos y músicos en general); el segundo es el de las pruebas acústicas en las que se determinan los parámetros que se sospecha reflejan la opinión de los expertos. Antes de describir brevemente las pruebas, es necesario dedicar algunas palabras a explicar lo que entendemos por "calidad subjetiva de una guitarra".

La apreciación subjetiva de las cualidades de una guitarra puede darse desde la perspectiva del que la ve, del que la oye o del músico que la toca, incluyendo las posibles combinaciones de estos tres puntos de vista. Una apreciación puramente visual permite al sujeto juzgar la belleza plástica del instrumento como un objeto artesanal en sí mismo; sus criterios de evaluación podrían estar relacionados con los colores del barniz, de las maderas y de las partes metálicas, con la ausencia de nudos y la homogeneidad de la veta de la madera, con el diseño de los efectos decorativos, etc. Aquel que escucha puede opinar acerca de la sonoridad, duración y timbre de los sonidos que el instrumento emite; dicha opinión se vería afectada por el carácter de los sonidos según si pertenecen a una pieza de música o no, por la belleza de la música en dado caso, por las habilidades técnicas del ejecutante, por las propiedades acústicas del recinto donde se realiza la audición, etc. Finalmente, el ejecutante juzga la comodidad con la que puede obtener el sonido que desea, lo cual puede depender de la altura de las cuerdas sobre el brazo del instrumento, de su tensión, de su grosor, de la separación entre ellas, del grosor del brazo, etc. Por supuesto que estas circunstancias también afectan seriamente las cualidades sonoras del instrumento.

En resumen, una evaluación completa de la calidad subjetiva de una guitarra debería incluir los tres criterios. El propósito de este trabajo está restringido, sin embargo, a buscar las propiedades acústicas que reflejen la preferencia de una guitarra sobre otra por parte de un sujeto, de modo que el concepto de calidad queda reducido al uso del criterio auditivo únicamente. Esto es con el fin de que la relación entre las opiniones subjetivas y las propiedades acústicas se manifieste más nitidamente en nuestras pruebas. Es decir, en este trabajo, la calidad de una guitarra se define como el valor de preferencia que un sujeto asigna a un instrumento

basándose exclusivamente en los atributos sonoros de éste. Si un sujeto prefiere la guitarra A por sobre la B, entonces el valor de preferencia asignado a A es mayor que el de B, o en forma equivalente: A es de mejor calidad que B. De esta manera, la calidad es un parámetro "unidimensional" que depende del conjunto "multidimensional" de atributos subjetivos del sonido de cada guitarra: duración, sonoridad, altura y timbre. Estas a su vez, dependen de las propiedades acústicas del instrumento. Ahora bien, la determinación de la calidad en función de los atributos subjetivos del sonido (duración, sonoridad, altura y timbre), es un proceso psíquico complejo que, en última instancia, está relacionado con la educación musical del individuo. Cada sujeto "mide" la calidad de un sonido dado comparándolo con lo que él considera un buen sonido o bien considerando que tanto le place. Nuestra suposición fundamental es que la calidad subjetiva del sonido de una guitarra se puede expresar con un número.

Es justo hacer notar las deficiencias de esta definición de la calidad. Ya mencionamos que es incompleta por cuanto soslaya la belleza plástica y, hasta cierto punto, la comodidad de ejecución del instrumento. "Hasta cierto punto", puesto que la comodidad de ejecución influye definitivamente en la calidad sonora. La idea de que la calidad del sonido solo depende de la guitarra es también incierta; por ejemplo, puede pasar que la guitarra A sea mejor que la B en el recinto R1, pero que B sea mejor que A en el recinto R2, siendo las demás condiciones equivalentes: el ejecutante, la música y el oyente por ejemplo. Finalmente, los criterios para evaluar la calidad pueden variar de persona a persona, e incluso en una misma dichos criterios pueden cambiar con el tiempo o según las circunstancias. Por otra parte, la definición de calidad adoptada tiene la virtud de que toma en consideración el elemento esencial de un instrumento musical: su sonido. Así, la correlación entre la calidad subjetiva del sonido y las propiedades acústicas de las guitarras, puede exhibirse con más facilidad que si permitimos a los sujetos usar otros criterios distintos a los puramente auditivos.

Las pruebas realizadas consistieron básicamente en lo siguiente. Se obtuvieron seis guitarras de diversa procedencia y cuyas calidades, juzgadas "a priori" por el autor, eran diferentes. El número de guitarras se limitó para no extender demasiado la duración de las pruebas subjetivas. Usando seis guitarras, cada sujeto tardó del orden de una hora en realizar la evaluación de todas ellas, creemos que este tiempo es adecuado para que un sujeto sea capaz de escuchar críticamente sin fatigarse. Por otra parte, el número de guitarras es pequeño y limita la posibilidad de obtener resultados estadísticamente confiables. Para cada guitarra, se grabó en cinta magnética un pequeño fragmento musical y el sonido de las seis cuerdas "al aire" interpretados por un mismo guitarrista. El fragmento musical

también fue el mismo siempre. Los fragmentos interpretados en distintas guitarras, fueron usados para hacer una prueba en la que un grupo de expertos evaluó la calidad de las mismas comparando los fragmentos. Los evaluadores escucharon las grabaciones a través de unos audifonos estereofónicos. El empleo de una grabación en cinta impide que los sujetos juzguen visualmente las guitarras y, por supuesto, les priva de la oportunidad de juzgar la comodidad de ejecución de las mismas. Por otra parte, usando los sonidos de las cuerdas y el fragmento musical, se pidió a los expertos una descripción verbal del timbre del instrumento con un vocabulario restringido de ocho adjetivos dados y tres preguntas acerca de la igualdad de los tonos de las seis cuerdas. Esta descripción se usa en el capítulo III para compararla con la evaluación de la calidad subjetiva y hallar cual es la descripción verbal más adecuada (en términos del vocabulario propuesto) del sonido de una guitarra de buena calidad.

Dentro de las pruebas acústicas se determinó la curva de respuesta sonora de la guitarra en función de la frecuencia de una excitación aplicada sobre el puente de la misma. Para eso, se aplicó al puente un vibrador gobernado por un generador de ruido blanco y se analizó el sonido emitido por la guitarra (la cual estaba desprovista de sus cuerdas). La señal de ruido blanco con la que se excitó la guitarra tiene un espectro plano, es decir que contiene componentes de la misma magnitud en todas las frecuencias; por el contrario, el ruido emitido por la guitarra tiene un espectro irregular que, por consiguiente, exhibe la eficiencia de emisión sonora del instrumento a distintas frecuencias. Reinstalando las cuerdas en la guitarra, se midió y se almacenó digitalmente en un medio magnético, la señal de presión sonora en función del tiempo, de los primeros 400 ms de los tonos de las cuerdas "al aire". Todo esto se hizo con las mismas seis guitarras usadas en las pruebas subjetivas.

De la curva de respuesta en frecuencia, se determinaron las frecuencias, amplitudes y factores de calidad de las resonancias de la guitarra. De las señales de presión en función del tiempo, se calcularon los tiempos de ataque y decaimiento, intensidad y composición espectral de los tonos de las cuerdas "al aire". Las definiciones de estos parámetros aparecen más adelante. En el capítulo siguiente, analizamos los datos con el fin de hallar si existe alguna correlación entre estos parámetros y la calidad subjetiva.

2.2 - LAS GUITARRAS. GRABACION Y MEDICION.

Se pidieron prestadas seis guitarras procurando abarcar una diversidad de calidades: desde un instrumento de firma "Kohno" procedente de Japón, hasta uno producido en serie de Paracho, Mich. La información sobre las guitarras se da en la tabla T2.1.

TABLA T2.1 - Datos sobre las guitarras usadas en las pruebas.

GUITARRA	MARCA	CONSTRUCTOR	PROCEDENCIA
1	"Estrada"	Estrada (?)	México, D.F.
2	"Quintana"	Alberto Quintana	México, D.F.
3	"La Michoacana"	Gerónimo Villafán	México, D.F.
4	"Kohno"	Masaru Kohno	Japón
5	"Rubio"	Rubio (?)	México, D.F.
6	"Gilb"	Guitarras Tarascas	Paracho, Mich.

En todas ellas se usó una misma encordadura para guitarra clásica "La Bella" modelo 900 B. Este juego de cuerdas envejeció aproximadamente 8 horas a lo largo de todas las sesiones de trabajo, este lapso incluye tanto el tiempo neto de experimentación, como el tiempo en el que las cuerdas estuvieron tensadas, sin usarse, sobre alguno de los instrumentos. El tiempo neto de ejecución fue de unos 15 min. por guitarra, por tanto el tiempo neto de uso fue de 1 hr. y 30 min. Este tiempo es suficientemente corto como para asegurar que el envejecimiento de las cuerdas no alteró las propiedades acústicas de las guitarras [refs. R2.1 y R2.2]; según las investigaciones reportadas en estas referencias, las características espectrales de los tonos de guitarra no se alteran aún después de un tiempo neto de ejecución de 1 hora y media precisamente.

La afinación fue controlada auditivamente con la ayuda de un diapasón normal en la-440 Hz. La sesión de grabación y medición con cada instrumento, se dividió en tres partes: grabación analógica del sonido en cinta magnética, adquisición digital de la señal de presión de los tonos y medición de la curva de respuesta de presión sonora.

Todas las pruebas se realizaron dentro de un recinto amortiguado acústica y mecánicamente, las características de éste aparecen en [ref. R2.3]. Solo mencionaremos que el aislamiento sonoro del recinto es de alrededor de 40 dB en el nivel de presión sonora. No se realizaron mediciones de la temperatura del recinto durante las pruebas, cabe decir que éstas se llevaron a cabo en días consecutivos y en los que no se observó un cambio de clima brusco. Lo cual no dice gran cosa pero de cualquier modo, la apreciación subjetiva del sonido de una guitarra parece ser independiente de los cambios en la temperatura; así que si queremos observar las propiedades acústicas subjetivamente importantes, la temperatura no debe ser algo que nos preocupe demasiado.

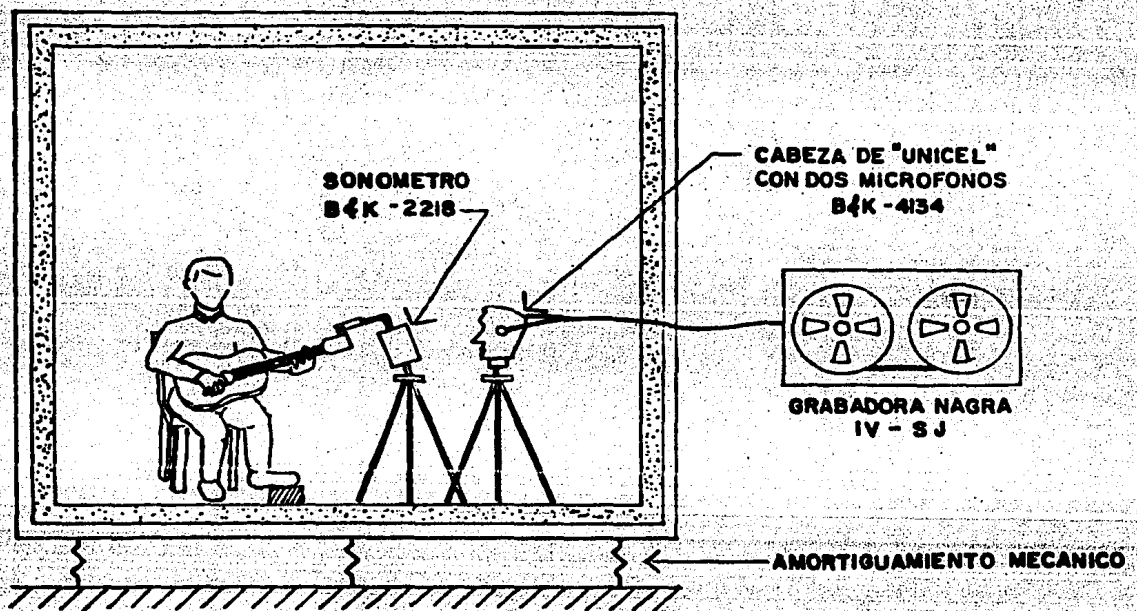
2.2.1 - Grabación analógica.

Se usaron dos micrófonos B&K-4134 colocados en las regiones auriculares de una cabeza de "unicel". El motivo de esto es que la grabación reproduzca, aproximadamente, el

campo sonoro difractado por la presencia de la cabeza de un oyente hipotético situado en el mismo sitio dentro del recinto. La simulación es solo aproximada ya que las características acústicas y mecánicas del "unicel" son diferentes de las de una cabeza humana real. Para que esto tenga efecto, es necesario que la cinta se reproduzca a través de un par de audifonos estereofónicos [ref. R2.4]. Se grabó en una cinta de audio marca Scotch número 177, con la grabadora NAGRA IV-SJ en ponderación lineal y con una velocidad de arrastre de cinta de 19.05 cm/s (7.5 pulg/s). A esta velocidad, la respuesta de la grabadora se mantiene plana, con variaciones de + o -3 dB, entre 5 y 20,000 Hz [ref. 2.5]. La disposición del equipo se muestra en la figura F2.1.

Con cada guitarra se grabaron los primeros compases de las Diferencias sobre 'Guárdame las vacas' del vihuelista renacentista español Luys de Narváez [ref. R2.6], ver figura F2.2, y los sonidos de las seis cuerdas pulsadas "al aire", es decir, sin pisar la cuerda sobre el brazo del instrumento. El fragmento musical fue interpretado siempre por el autor, ¡el de la tesis por supuesto!, sin apoyar ninguna nota y con la digitación que se muestra en la figura F2.2. El apoyo de las notas es un recurso de la interpretación guitarrística consistente en pulsar las cuerdas jalándolas hacia el cuerpo de la guitarra, procurando que el desplazamiento inicial tenga una componente perpendicular a la tapa lo más amplia posible. Al liberar la cuerda, el dedo del guitarrista va a detenerse en la cuerda siguiente, de aquí el nombre de esta técnica [ref. R2.7], ver figura F2.3.

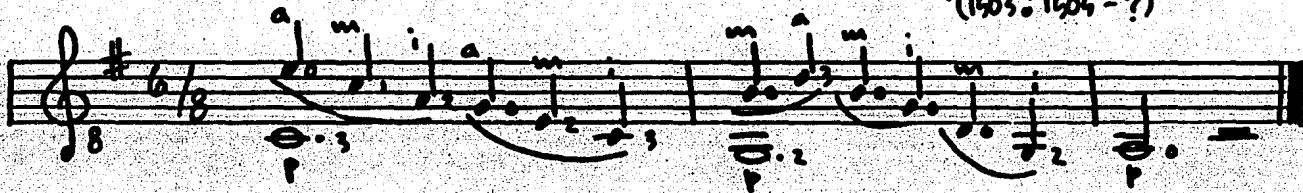
Los tonos de las cuerdas al aire fueron pulsados usando la técnica del apoyo, las tres cuerdas más agudas (primera, segunda y tercera) fueron tocadas con el dedo índice de la mano derecha y las tres más graves con el pulgar. Al tocar en un caso apoyando y en el otro no, quisimos incluir el efecto producido por las dos maneras de pulsar la guitarra dentro de la técnica clásica. La posición de la mano derecha del guitarrista relativa a la guitarra se muestra, en forma aproximada, en la figura F2.4. A fin de evitar variaciones demasiado grandes a lo largo de las grabaciones, se controló el nivel pico de presión sonora de la ejecución mediante un sonómetro B&K-2218. Antes de cada grabación, el ejecutante realizó una prueba para controlar su ejecución de manera que dicho nivel estuviera, en promedio y dentro de lo posible, entre 75 y 85 dB (pico) re 20 uPa.



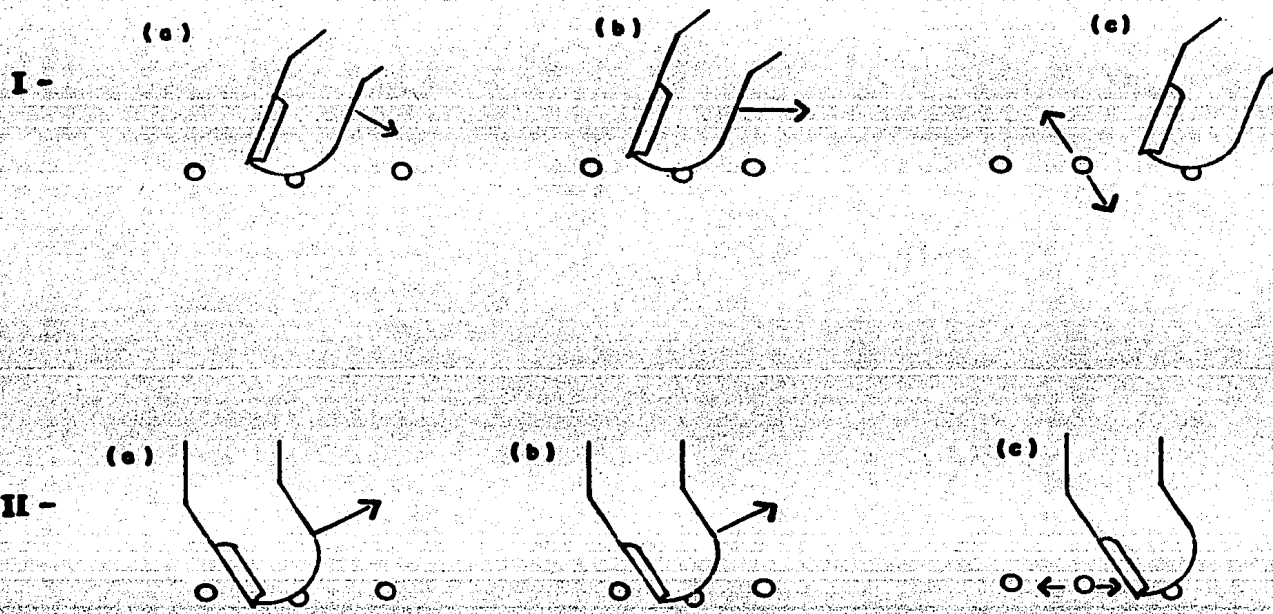
F2.1 - Disposición experimental durante las grabaciones destinadas a las pruebas subjetivas. El recinto sonoamortiguado está construido en madera, tiene un recubrimiento interior de "hule-espuma" y se halla flotando sobre 9 bloques de NEOPRENO.

Diferencias sobre 'Guárdame las vacas' (Fragmento)

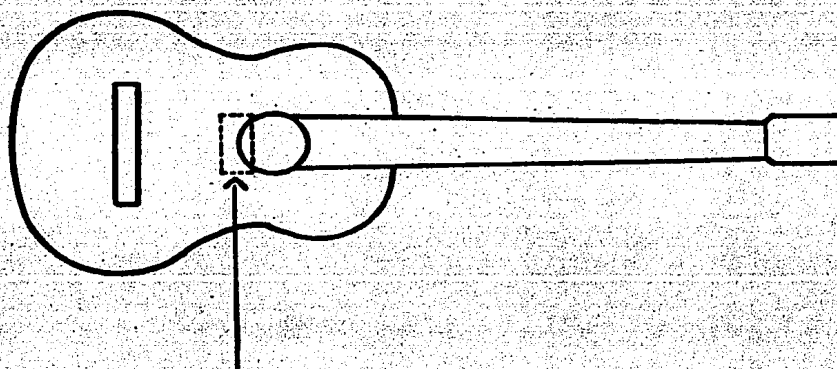
Luis de Narváez
(1503-1505-?)



F2.2 - Primeros compases de las Diferencias sobre 'Guárdame las vacas' de Luis de Narváez. Fragmento usado en las grabaciones. Se indica la digitación y el fraseo usados en la interpretación musical del mismo. [ref. R2.6].



F2.3 - Dos modos de pulsar las cuerdas de una guitarra: I-apoyando y II-tirando. En cada caso se indican tres posiciones sucesivas: a, b y c. Se muestra la sección transversal de las cuerdas y se supone que la tapa del instrumento se halla en la parte inferior de la figura.



F2.4 - Posición aproximada de la mano derecha del guitarrista durante la ejecución.

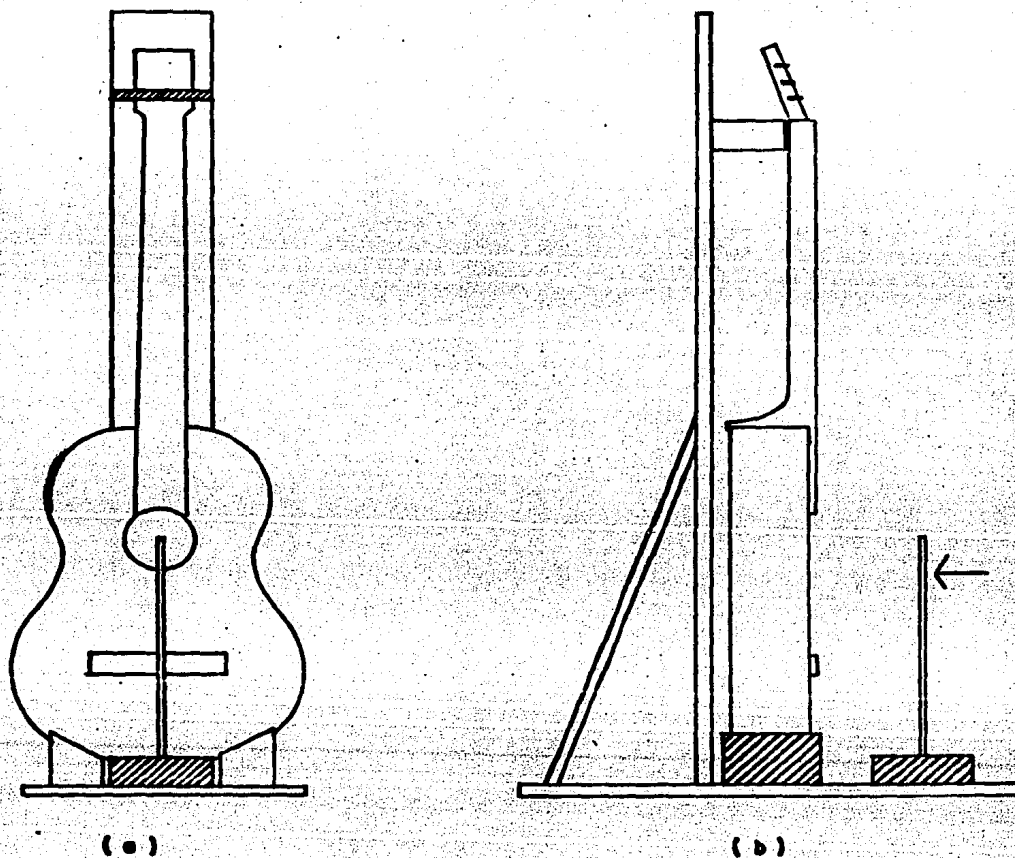
2.2.2 - Adquisición de las señales de presión de los tonos.

Estas señales corresponden a la presión sonora en función del tiempo de los tonos de las cuerdas al aire medida en un punto cercano a la guitarra; la posición del micrófono se precisa más adelante. Para mejorar la reproducibilidad de las condiciones de excitación de la cuerda, se sustituyó al ejecutante por un dispositivo electro-mecánico para excitar la cuerda a control remoto en forma reproducible. El excitador y la guitarra en estudio se colocaron en un soporte de madera construido especialmente para ese fin. En éste, la guitarra se coloca verticalmente, los tres puntos donde descansa están cubiertos con material amortiguante ("hule-espuma") y coinciden aproximadamente con los puntos que utiliza un guitarrista para sostener el instrumento durante su ejecución, a saber: la mano izquierda sobre el brazo de la guitarra, las piernas y el brazo derecho sobre el costado de la misma. En una forma análoga, el soporte sostiene a la guitarra por el brazo y por dos puntos sobre el costado, ver figura F2.5. El soporte, a su vez, está colocado sobre un banco que lo eleva aproximadamente a 0.6 m sobre el nivel del suelo del recinto.

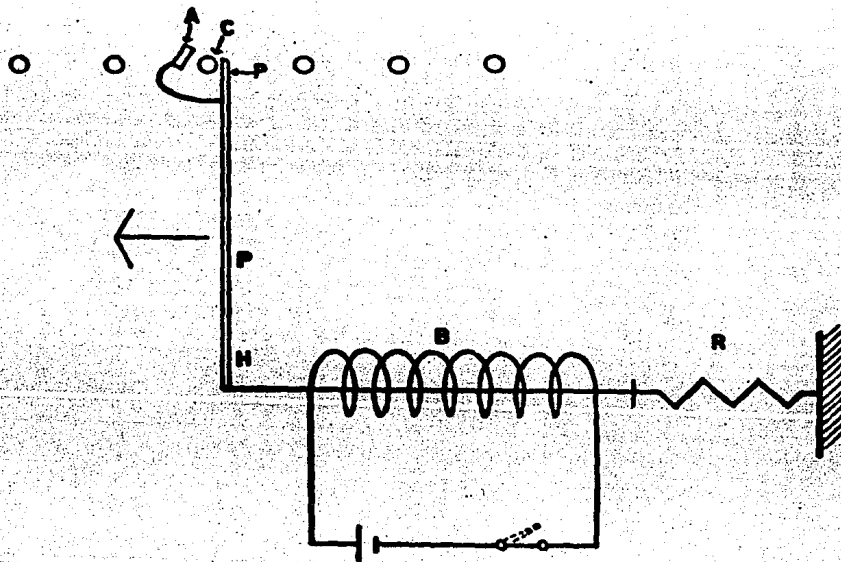
El excitador se muestra, en forma esquemática, en la figura F2.6.; en ella: C es la cuerda a excitar, P es una púa metálica, A es un amortiguador de hule (Neopreno), B es una bobina, H es una barra de hierro y R un resorte. En la posición mostrada, R está comprimido debido al paso de una corriente por B y la consecuente repulsión de la barra H; al interrumpir la corriente, cesa la fuerza magnética sobre H y R se relaja pulsando la cuerda mediante la púa P. Para volver a pulsar la cuerda, se pasa corriente por B y el dispositivo regresa a la posición mostrada, ahora sin hacer sonar la cuerda debido a la acción del amortiguador A. De esta manera, es posible pulsar la cuerda sin que haya necesidad de que alguien se encuentre dentro del recinto para hacerlo. Con esto se logra eliminar, en buena medida, la variabilidad de las condiciones de excitación en la que un ejecutante necesariamente incurre. Las condiciones de la excitación no se determinaron cuantitativamente, pero la reproducibilidad de los resultados puede juzgarse más adelante.

El soporte, la guitarra y el excitador, se colocaron en el centro del recinto amortiguado; como ya mencionamos, el soporte se puso a 0.6 m del nivel del suelo. A 1.0 m de la guitarra y a 1.1 m del suelo, se colocó un micrófono B&K-4165 montado en un tripié; de este modo el micrófono quedó apuntando a la altura del XV traste de cada guitarra. El micrófono se conectó al analizador de señales B&K-2033 a través de una fuente de alimentación para micrófonos B&K-2807 y del filtro ITHACO-4302. Se realizó un filtrado pasa-altas a partir de 50 Hz, con el fin de evitar el ruido de bajas frecuencias que se transmite fácilmente al interior del recinto a través del piso en forma mecánica y del aire en forma acústica. El analizador de señales fue calibrado para

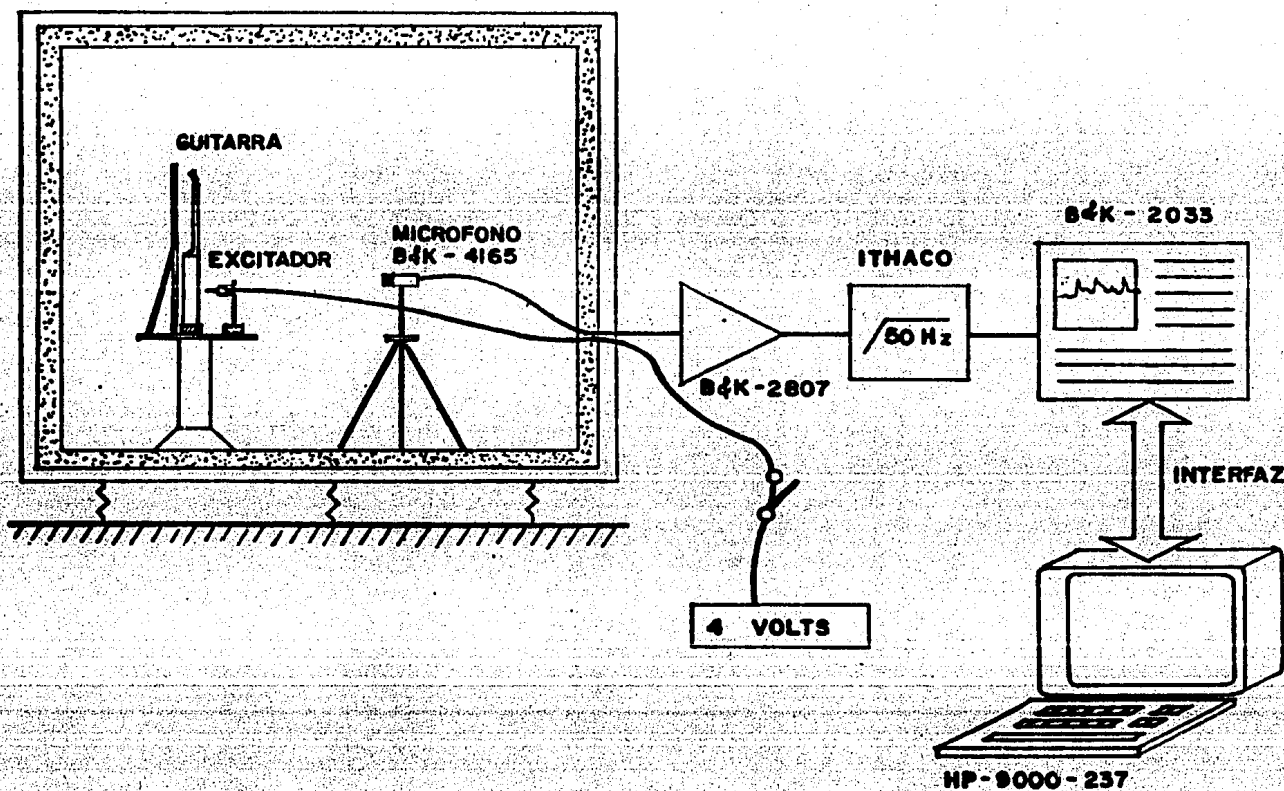
hacer lecturas directas de presión sonora con la ayuda del calibrador B&K-4230. Para la adquisición digital de los datos se utilizó un equipo de cómputo HP-9000-237 conectado al analizador de señales a través de una interfaz HP-IB. La disposición del equipo se muestra en la figura F2.7. En la figura F2.8 se muestra la proyección de la posición del micrófono sobre el frente de la guitarra.



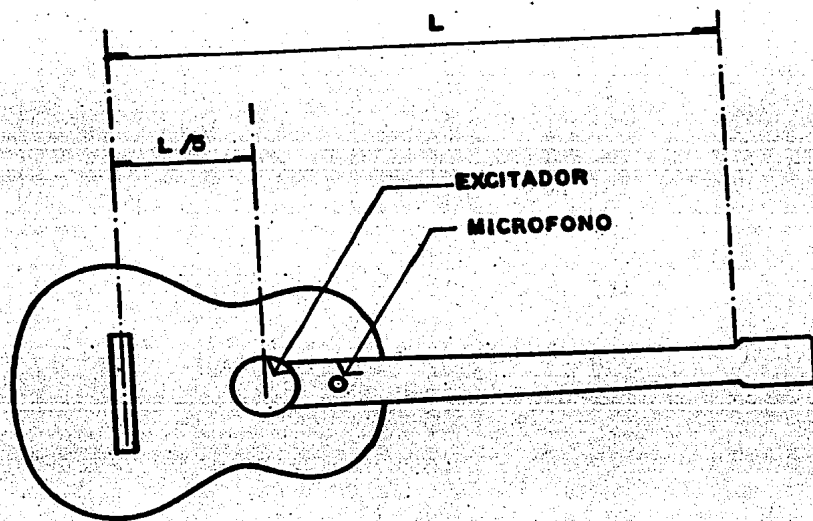
F2.5 - Soporte para la guitarra y para el excitador (indicado por la flecha). a) Vista frontal. b) Vista lateral.



F2.6 - Diagrama esquemático del pulsador automático de cuerdas. C es la cuerda (se muestra la sección transversal), A es un pequeño amortiguador de goma, P es la púa metálica que pulsa la cuerda, B es una bobina, H una barra de hierro y R un resorte. Se supone que la tapa de la guitarra se halla en la parte superior de la figura y que la guitarra, la bobina y el resorte están fijos al soporte (figura F2.5).



F2.7 - Disposición experimental para las mediciones acústicas. Se muestra el excitador que pulsa la cuerda y la fuente de 4 volts CD usada para alimentarlo.



F2.8 - Posición del excitador relativa a la cuerda y proyección del micrófono sobre la guitarra.

La adquisición de las señales de presión se realizó como sigue: se dispuso el analizador listo para capturar, mediante un convertidor analógico/digital interno, una señal de 400 ms de duración con una frecuencia de muestreo de 25.6 kHz, es decir un periodo de medición de 0.039 ms, lo que da 10240 muestras de la presión sonora para cada tono en el intervalo de tiempo arriba mencionado. El umbral de captura se escogió de modo que las primeras 1024 muestras correspondieran al silencio previo al inicio del tono y las 9216 muestras restantes al tono en si. Se excitó la cuerda y se capturó la señal de presión en el analizador, de ahí se transfirió a la computadora vía la interfaz. Para cada cuerda se repitió este proceso diez veces, obteniéndose otras tantas señales de presión. Estas señales fueron promediadas entre si, punto a punto, usando la expresión:

$$P(t) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} P_i(t) \quad \text{E2.1}$$

Donde $P_i(t)$ es el valor de la presión sonora de la i -ésima pulsación del tono al tiempo t y $P(t)$ es la presión promedio al tiempo t . Los valores que puede tomar t , dado que estamos trabajando señales muestreadas, son $t=n*T$, donde T es el período de muestreo (en este caso 0.039 ms) y $n=1,2,3,\dots,10240$. La señal de presión promedio fue almacenada digitalmente en un disco magnético para analizarla posteriormente. En la figura F2.9 se muestra una de estas señales. La expresión E2.1 es un estimador insesgado y consistente, en el sentido estadístico, de la señal estudiada [ref. 2.8].

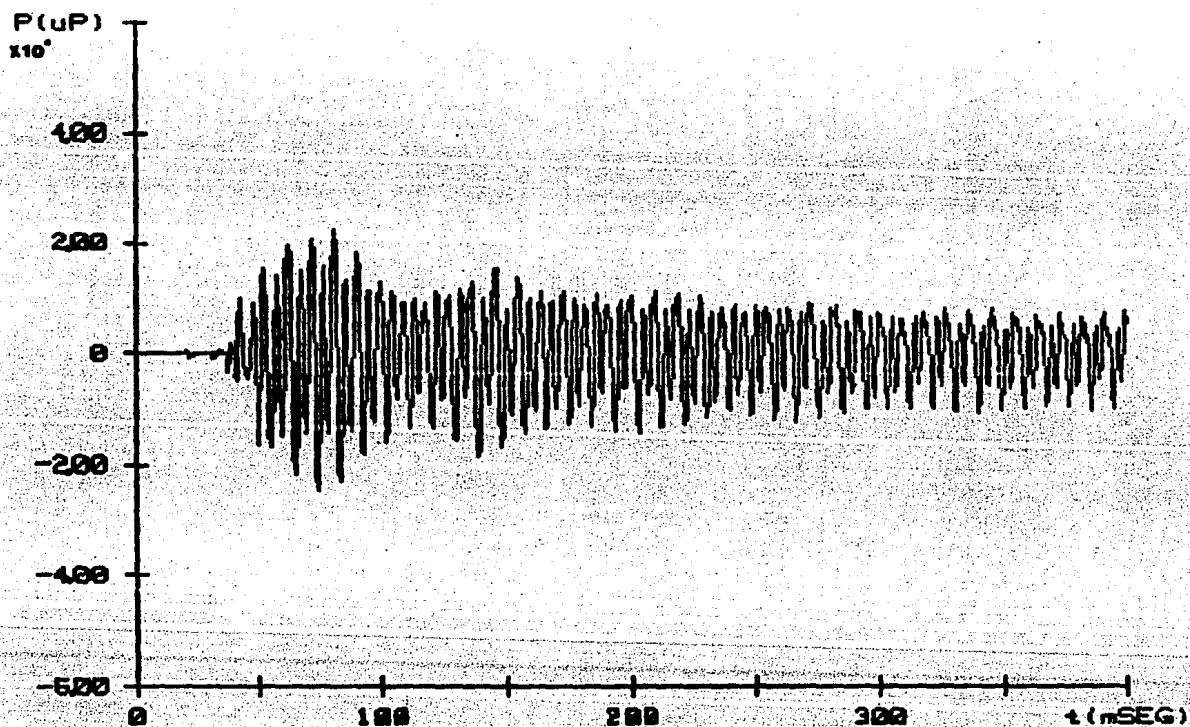
Para los tonos de la guitarra "Estrada" (#1), también se calculó la desviación normal de las señales de presión usando la expresión [ref. R2.9]:

$$S_p(t) = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} [P_i(t) - P(t)]^2} \quad \text{E2.2}$$

Donde $S_p(t)$ es la desviación normal de $P(t)$. En la figura F2.10 se muestra la desviación normal de la misma señal que aparece en la figura anterior. Obsérvese que la variación debida a las pulsaciones repetidas de la cuerda es muy pequeña.

SEÑAL DE PRESION EN FUNCION DEL TIEMPO.

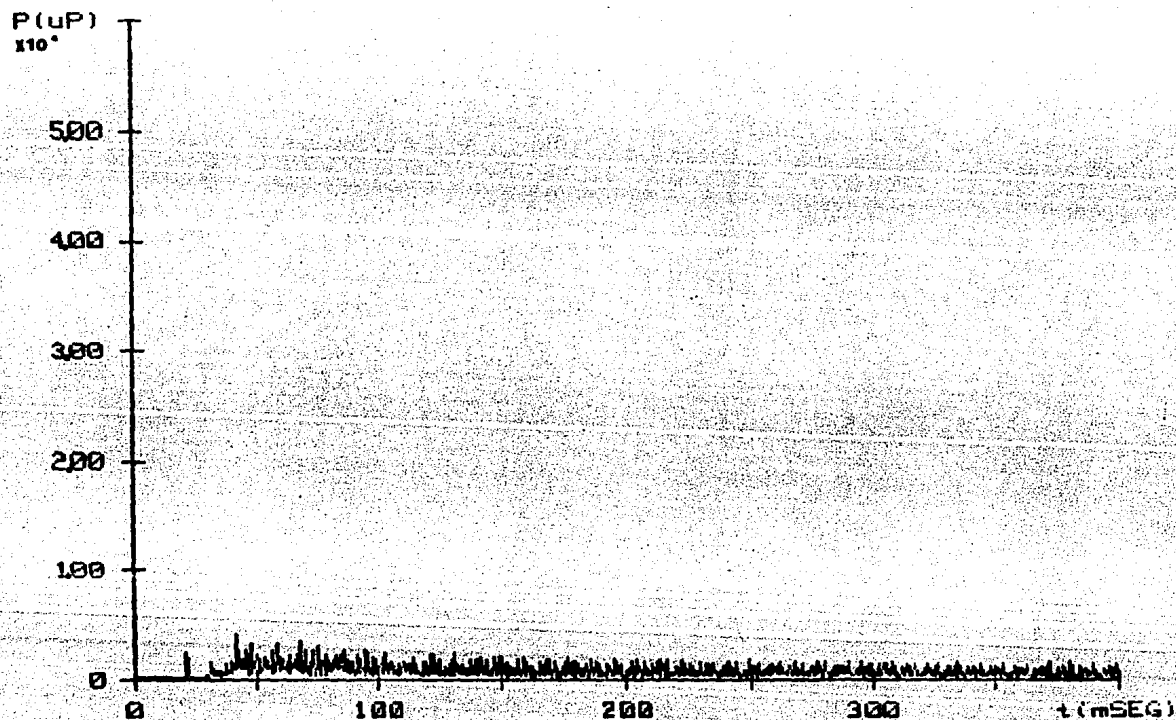
GUITARRA: ESTRADA. CUERDA: QUINTA. TONOS PROMEDIADOS: 10.



F2.9 - Ejemplo del promedio de la señal de tiempo de los tonos de una guitarra.

DESVIACION ESTANDAR DE LA SEÑAL DE PRESION.

GUITARRA: ESTRADA. CUERDA: QUINTA. DESVIACION MEDIA: 9.6 uP.



F2.10 - Ejemplo de la desviación normal (o estándar) de la señal de tiempo de los tonos de una guitarra.

2.2.3 - Medición de la curva de respuesta en frecuencia.

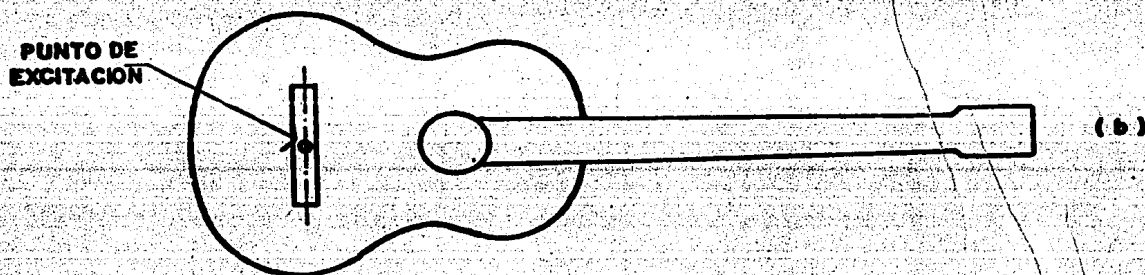
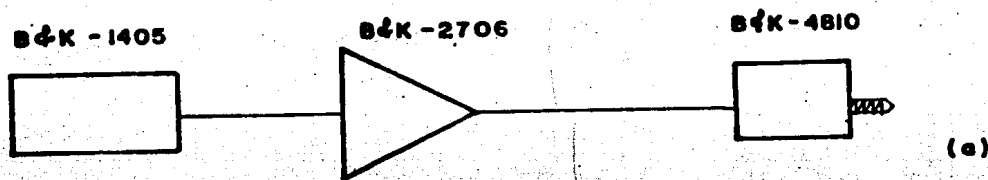
Para esta prueba se usó la misma disposición experimental que en la anterior (ver figura F2.7), salvo que en este caso la guitarra fue desprovista de sus cuerdas y en lugar del pulsador de cuerdas, se usó un excitador de vibraciones B&K-4810 gobernado por un generador de ruido B&K-1405 a través de un amplificador de potencia B&K-2706. Con este sistema se puede producir una vibración cuya fuerza sea de amplitud constante para las frecuencias de entre 50 y por lo menos 1000 Hz, que es la frecuencia máxima que queremos analizar [refs. de la R2.10 a la R2.12]. La vibración fue aplicada sobre el hueso del puente de la guitarra en el punto donde normalmente se apoya la cuarta cuerda. La figura F2.11 muestra la disposición del equipo y el punto de excitación sobre la guitarra.

Se accionó el excitador con una señal eléctrica de ruido blanco en la banda de 0 a 20 kHz, la cual, una vez amplificada convenientemente (el voltaje RMS aplicado al excitador fue siempre de 4.4 V), se mandaba al excitador que a su vez hacía vibrar la tapa superior de la guitarra. La emisión sonora de la guitarra fue registrada por el micrófono y la señal fue conducida al analizador para obtener el espectro de presión mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT). Se promediaron 256 espectros, cada uno de ellos obtenido a partir de una muestra de 400 ms de duración de la emisión sonora de la guitarra. El espectro promedio fue transferido a la computadora y almacenado digitalmente para análisis posterior. Cada espectro cubre la banda de frecuencias entre 0 y 1 kHz.

Esta técnica para la determinación experimental de la curva de respuesta en frecuencia está basada en las siguientes consideraciones [ref. R2.13, ver también el libro de Bendat y Piersol ref. R2.8]. Suponemos que el sistema excitador-guitarra-micrófono es lineal; la señal de entrada del sistema es el voltaje aplicado al excitador y la señal de salida es el voltaje del micrófono. Sean $e(t)$ y $s(t)$ las funciones de entrada y salida del sistema dependientes del tiempo (en general señales aleatorias), la relación entre ellas es:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t') \cdot e(t-t') dt' \quad \text{E2.3}$$

Donde $h(t')$ es la función de respuesta a impulso y es característica de cada sistema. La medición y la interpretación de $h(t')$ son un poco complicadas. La alternativa es estudiar el comportamiento espectral del sistema. Si obtenemos el espectro de potencia (operación que implica calcular la función de autocorrelación y su transformada de Fourier a ambos lados de la ecuación E2.3) la relación de entrada-salida se simplifica a:



F2.11 - a) Disposición del equipo (generador de ruido - amplificador de potencia - excitador de vibraciones) y b) punto de excitación, para la determinación de la curva de respuesta en frecuencia (o espectro de emisión sonora) de las guitarras.

$$S(f) = |H(f)|^2 \cdot E(f)$$

E2.4

Donde $S(f)$, $H(f)$ y $E(f)$ son funciones de la frecuencia. S y E son los espectros de potencia de las señales de salida y entrada respectivamente, H es la función de transferencia del sistema y es en general compleja, en la ecuación E2.4 se toma la magnitud al cuadrado de la función de transferencia. Puede demostrarse que $H(f)$ es la transformada de Fourier de $h(t')$, la función de respuesta a impulso. Siendo $H(f)$ compleja, contiene información acerca de la relación $S(f)/E(f)$ a partir de su amplitud y del defasamiento entre $S(f)$ y $E(f)$ a partir de su fase. Nosotros, en particular, estamos interesados solamente en la relación de amplitudes, así que nos interesa determinar:

$$|H(f)|^2 = S(f) / E(f)$$

E2.5

Si la distribución de potencia de la señal de entrada fuese plana, i.e. si $E(f)$ fuera constante para toda f , entonces el análisis espectral de la señal de salida nos daría información sobre la magnitud de $H(f)$. Esa condición se cumple si $e(t)$ es una señal aleatoria para la cual la correlación entre las variables aleatorias $e(t)$ y $e(t+t')$ es cero para toda t y para t' distinta de cero; se dice entonces que $e(t)$ es ruido blanco. La curva de respuesta en frecuencia medida por nosotros es $S(f)$, que se obtiene al aplicar el algoritmo FFT a la señal de salida $s(t)$, es decir al voltaje del micrófono. Ya que la señal de entrada $e(t)$ que estamos usando es precisamente una señal de ruido blanco, resulta que:

$$S(f) = k \cdot |H(f)|^2$$

E2.6

Es decir, el espectro de potencia de la señal de entrada $S(f)$ es un múltiplo de la magnitud al cuadrado de la función de transferencia del sistema. La constante de proporcionalidad k , es el nivel de potencia espectral de la señal de ruido blanco usada como señal de entrada. Por lo tanto, al determinar $S(f)$ estamos obteniendo información acerca de la magnitud de la función de transferencia del sistema.

En nuestro experimento, la magnitud de la fuerza ejercida sobre el puente por el vibrador es una señal de ruido blanco, es decir que excita a la guitarra con la misma fuerza en todas las frecuencias. Al obtener el espectro del sonido emitido por la guitarra en estas condiciones, estamos obteniendo la curva de respuesta sonora de la guitarra. En otras palabras, estamos determinando la eficiencia de emisión

sonora a distintas frecuencias. Las curvas de respuesta en frecuencia medidas para cada una de las seis guitarras se muestran más adelante en la sección 2.4.

2.3 - EVALUCION SUBJETIVA.

Para la realización de estas pruebas contamos con la participación de 12 personas, entre las que se encontraron 4 profesionales de la guitarra clásica, 6 estudiantes de guitarra, un laudero y una restauradora de instrumentos de música. Su experiencia en el terreno de la ejecución de la guitarra variaba entre 0 y 44 años, pero todas ellas tenían experiencia en cuestiones musicales. A partir de la grabación en cinta obtenida con anterioridad, se editó una cinta en "casette" marca AMPEX de tipo METAL. La edición se realizó directamente de la grabadora NAGRA IV-SJ, reproduciendo la cinta original, a una grabadora de "cassettes" marca AKAI modelo CS-F210, se utilizó el filtro DOLBY para reducir el ruido de la cinta. La grabadora AKAI tiene una respuesta plana, + o -3 dB, entre 30 y 18,000 Hz si se usa una cinta de tipo METAL [ref. R2.14]. La reproducción se efectuó con la misma grabadora, un amplificador TOYAMA modelo WA/70A y unos audifonos AIWA modelo HP-30. El amplificador tiene una respuesta plana, dentro de los límites de + o -3 dB, entre 50 y por lo menos 25,000 Hz, este hecho lo comprobamos midiendo directamente su curva de respuesta; por otro lado, el fabricante de los audifonos asegura que su respuesta es plana entre 20 y 20,000 kHz. Las pruebas subjetivas se realizaron en el mismo recinto sono-amortiguado usado durante las grabaciones. De este modo se redujo el nivel de ruido intrusivo que pudiera afectar los juicios de los sujetos al escuchar la grabación.

2.3.1 - Evaluación comparativa de la calidad.

En esta prueba se utilizó la grabación de los fragmentos musicales tocados en las seis guitarras. A fin de comparar el mismo fragmento tocado en dos guitarras distintas, se grabó el trozo tocado en la guitarra i-ésima y en seguida, con un silencio intermedio de aproximadamente 2 s, se grabó tocado en la j-ésima; en seguida se grabaron otros 5 s en silencio y se repitió la operación para otra pareja de guitarras. De esta manera se grabaron los fragmentos musicales tocados en los $6 \times 5 = 30$ pares de guitarras que es posible formar del lote de seis. El par (i, j) se considera diferente al (j, i) , se incluyen ambos para determinar la validez de las decisiones de los sujetos (más adelante se explica de que manera se hace esto). La prueba consiste en pedirle al sujeto que elija, en cada par, la guitarra que le parece de mejor calidad desde un punto de vista auditivo. Las instrucciones dadas a los sujetos para realizar la prueba y la hoja de respuestas aparecen a continuación.

INSTRUCCIONES PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LAS GUITARRAS.

"A continuación escuchará usted los primeros compases de las Diferencias sobre 'Guárdame las vacas' de Luys de Narváez ejecutados en diferentes guitarras. Los fragmentos están agrupados en parejas y queremos que nos indique cual de las guitarras de cada pareja es la de mejor calidad. Nos interesa su opinión sobre las guitarras, así que le rogamos trate de que su juicio sea independiente de las diferencias en la interpretación de los fragmentos. Las parejas están numeradas del 1 al 30 y junto hay dos columnas de cuadros; marque una 'palomita' en la columna I si prefiere la primera guitarra de la pareja o marque en la columna II si prefiere la segunda. No se permite abstenerse".

EVALUACION DE LA CALIDAD DE LAS GUITARRAS.

Pareja	Guitarra		Pareja	Guitarra	
	I	II		I	II
1	1	2	16	4	6
2	3	4	17	5	1
3	5	6	18	6	2
4	2	3	19	1	4
5	4	5	20	2	5
6	6	1	21	3	6
7	3	2	22	4	1
8	5	4	23	5	2
9	1	6	24	6	3
10	4	3	25	1	5
11	2	1	26	2	6
12	6	5	27	3	1
13	1	3	28	4	2
14	2	4	29	5	3
15	3	5	30	6	4

Los numeros dentro de los cuadros no aparecen en las hojas originales, se ponen aquí para designar las guitarras que conforman cada pareja. La numeración va de acuerdo con la de la tabla T2.1.

La información dada por esta prueba fue obtenida de la siguiente manera: en cada hoja de respuestas se localizan las parejas (i,j) y (j,i), si la i-ésima (o la j-ésima) guitarra fue preferida en ambos pares se cuenta un voto para dicha guitarra; pero si se el sujeto eligió en forma diferente, no contamos votos para ninguna de las guitarras y sumamos un 1 a los elementos ij y ji de una matriz de 6*6, que nosotros llamamos matriz de similitud. La entrada ij de la matriz de similitud (o la ji, esta matriz es simétrica por definición) indica cuantas veces fueron confundidas las guitarras i y j. Al hacer esto con las hojas de respuesta dadas por todos los sujetos, obtuvimos los resultados que se muestran en la tabla T2.2. También se reporta ahí qué proporción del total de evaluaciones hechas por todos los sujetos contribuyó a la votación y qué proporción contribuyó a la matriz de similitud.

TABLA T2.2 - Resultados de la prueba sobre la calidad de las guitarras.

GUITARRA VOTOS		MATRIZ DE SIMILITUD:							
1	13	1	0	3	5	4	2	7	1
2	16	1	3	0	5	5	5	7	1
3	8	1	5	5	0	3	4	6	1
4	29	1	4	5	3	0	6	5	1
5	36	1	2	5	4	6	0	2	1
6	9	1	7	7	6	5	2	0	1

Proporción de votos válidos: 0.617.

proporción de confusiones: 0.383.

2.3.2 - Descripción semántica del timbre.

Para esta prueba se grabaron en el "casette" los sonidos de las cuerdas al aire, desde la primera cuerda hasta la sexta, y en seguida el fragmento musical tocado en la misma guitarra. Esto se hizo con los seis instrumentos. Se escogieron ocho adjetivos de acuerdo a sus posibilidades descriptivas del timbre de un instrumento musical. Estos adjetivos forman cuatro parejas de antónimos: brillante-opaco, pobre-rico, nítido-difuso y brusco-suave; las tres primeras fueron traducidas de las parejas de adjetivos propuestas por Pratt y Doak como las mínimas y más útiles para describir el timbre musical [ref. R2.15]. La pareja brusco-suave la agregamos nosotros considerando el carácter pulsado del sonido de la guitarra. Las cuatro parejas forman cuatro ejes de coordenadas que definen un "espacio semántico" en donde es posible situar la descripción que un sujeto da del timbre de una guitarra. Este esquema de descripción verbal de conceptos fue propuesta por Osgood en

Según Osgood, un estímulo (en nuestro caso las palabras "el timbre musical de la guitarra X"), que no es el objeto en sí (en nuestro caso el sonido mismo de la guitarra), es una representación del objeto si evoca en el organismo una respuesta que representa una fracción del comportamiento total producido por el objeto. Esta respuesta puede incluir cambios glandulares, gestos, movimientos de la cabeza y de otras partes del cuerpo, etc. Sin embargo estas expresiones son difíciles de evaluar y conocer con ello lo que significa para el sujeto el estímulo dado. Por ello se propone la evaluación del significado en términos lingüísticos; finalmente - dice Osgood - casi siempre podemos explicar con palabras el significado de las cosas, sean objetos, sensaciones, ideas, conceptos, sentimientos, etc. En nuestro caso, la idea de "el timbre de la guitarra X" puede evocar parte de la respuesta producida por las cualidades del sonido real del instrumento, y ésta respuesta puede expresarse con palabras, específicamente en términos de los ocho adjetivos dados más arriba. En nuestras pruebas, los sujetos tienen por tarea dar una definición verbal del timbre de cada guitarra.

Para cada una de las cuatro "dimensiones" del espacio semántico que proponemos para evaluar el timbre musical tenemos lo siguiente. El eje de coordenadas está dividido en siete pasos que gradúan la cualidad que se evalúa; por ejemplo, de lo brillante a lo opaco hay siete pasos, los primeros tres gradúan la brillantez, los últimos tres la opacidad y el escalón intermedio da la posibilidad de que el sujeto establezca una posición de equilibrio entre los dos calificativos (i.e., ni brillante ni opaco o tan brillante como opaco). También se incluyeron preguntas respecto al equilibrio (o igualdad) temporal, sonoro y timbrico entre los sonidos de las seis cuerdas de cada guitarra. Es decir, se pidió al sujeto que juzgara si la duración, sonoridad y timbre de las notas de las distintas cuerdas eran similares entre sí. La evaluación semántica y el juicio sobre el equilibrio tonal fueron hechos por los sujetos para las seis guitarras. Las instrucciones dadas a los sujetos y las hojas de respuestas se muestran a continuación.

INSTRUCCIONES PARA EVALUAR EL TIMBRE DE LAS GUITARRAS.

"A continuación escuchará el sonido de las cuerdas al aire (de la primera a la sexta) y el fragmento musical usado en la prueba anterior, tocados en una misma guitarra. Escuche con atención y luego trate de evaluar el sonido de la guitarra según el esquema que le proponemos. En él hay cuatro parejas de calificativos con significados opuestos y entre cada par hay siete casillas. Marque una 'palomita' para cada pareja de adjetivos en la casilla que indique la cualidad del sonido escuchado. Por ejemplo: para la pareja BRILLANTE-OPACO marque la primera casilla si usted cree que el sonido es MUY brillante, la segunda si cree que es ALGO brillante, etc.; si

usted cree que el sonido es más bien opaco, marque alguna de las casillas de la derecha según el grado de opacidad del sonido; si usted cree que el sonido no es brillante ni opaco (o que es tanto brillante como opaco), marque entonces la casilla central, que significa NADA brillante y NADA opaco. Haga lo mismo con los otros adjetivos y conteste las preguntas finales. Evalúe de esta manera las seis guitarras que escuchará".

EVALUACION DEL TIMBRE DE LAS GUITARRAS.

GUITARRA No. ____ El sonido de esta guitarra es:

BRILLANTE : MUY ALGO POCO NADA POCO ALGO MUY : OPACO.

POBRE : MUY ALGO POCO NADA POCO ALGO MUY : RICO.

NÍTIDO : MUY ALGO POCO NADA POCO ALGO MUY : DIFUSO.

BRUSCO : MUY ALGO POCO NADA POCO ALGO MUY : SUAVE.

¿Existe equilibrio entre el sonido de las distintas cuerdas respecto a: la duración? ____, la sonoridad? ____, el timbre? ____. (Sí o no)

GUITARRA No. ____ El sonido de esta guitarra es:

BRILLANTE : MUY ALGO POCO NADA POCO ALGO MUY : OPACO.

POBRE : MUY ALGO POCO NADA POCO ALGO MUY : RICO.

NÍTIDO : MUY ALGO POCO NADA POCO ALGO MUY : DIFUSO.

BRUSCO : MUY ALGO POCO NADA POCO ALGO MUY : SUAVE.

¿Existe equilibrio entre el sonido de las distintas cuerdas respecto a: la duración? ____, la sonoridad? ____, el timbre? ____. (Sí o no)

A fin de cuantificar numéricamente estas descripciones del timbre de las guitarras, se tomó la siguiente asignación de valores. A los adjetivos situados a la izquierda en las hojas de respuesta se les asignó un signo negativo y a los de la derecha positivo, además cada cuantificador recibió un valor: MUY=3, ALGO=2, POCO=1 y NADA=0. Por ejemplo: si el sujeto definió el sonido como "algo brillante" se asigna un -2 a la escala BRILLANTE-OPACO, si es "muy rico" se asigna un +3 en la escala POBRE-RICO, si en la escala NITIDO-DIFUSO se eligió el cuantificador "nada" se asigna a esta escala un 0, etc. Las preguntas sobre la igualdad (o equilibrio) de duración, sonoridad y timbre de las cuerdas se respondieron con "sí" o "no", para cuantificar estas respuestas se tomó SI=1 y NO=0. Los resultados de estas pruebas al promediar la opinión de los 12 sujetos se muestran en la tabla T2.3. Los promedios están redondeados a números enteros para facilitar la interpretación.

TABLA T2.3 - Resultados de las pruebas sobre el timbre de las guitarras al promediar la opinión de los 12 sujetos.

GUITARRA	1	2	3	4	5	6
BRILLANTE-OPACO	-1	-1	0	-3	-2	+1
POBRE-RICO	0	+1	0	+2	0	-1
NITIDO-DIFUSO	-1	-1	0	-2	-1	0
BRUSCO-SUAVE	0	0	+1	-1	-1	+1
EQUILIBRIO TEMPORAL	0	1	0	1	1	0
EQUILIBRIO SONORO	0	1	1	1	1	1
EQUILIBRIO TIMBRICO	0	1	1	1	0	1

Los resultados de la descripción con adjetivos tienen una desviación normal (al considerar la opinión de los 12 sujetos) de aproximadamente 1.5, es decir que el intervalo de incertidumbre abarca unas 3 casillas de las hojas de respuesta. Así por ejemplo, si el promedio es "poco brusco", las opiniones individuales pueden haber variado desde "algo brusco" hasta "nada brusco y nada suave".

2.4 - EVALUACION ACUSTICA.

2.4.1 - Resonancias de las guitarras.

A partir de las curvas de respuesta en frecuencia obtenidas en la sección 2.2.3, se obtuvieron los niveles de presión sonora, frecuencias y factores de calidad de las resonancias de cada guitarra. Para calcular el factor de calidad se determinaron las frecuencias f_1 y f_2 , menor y mayor que la frecuencia de resonancia f_0 respectivamente, para los cuales el nivel de presión sonora cae 3 dB por debajo del nivel máximo de la resonancia. Esto es una disminución por un factor de 1/2 en el valor cuadrático de la

presión. El factor de calidad se calcula según [ref. R2.17]:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

E2.7

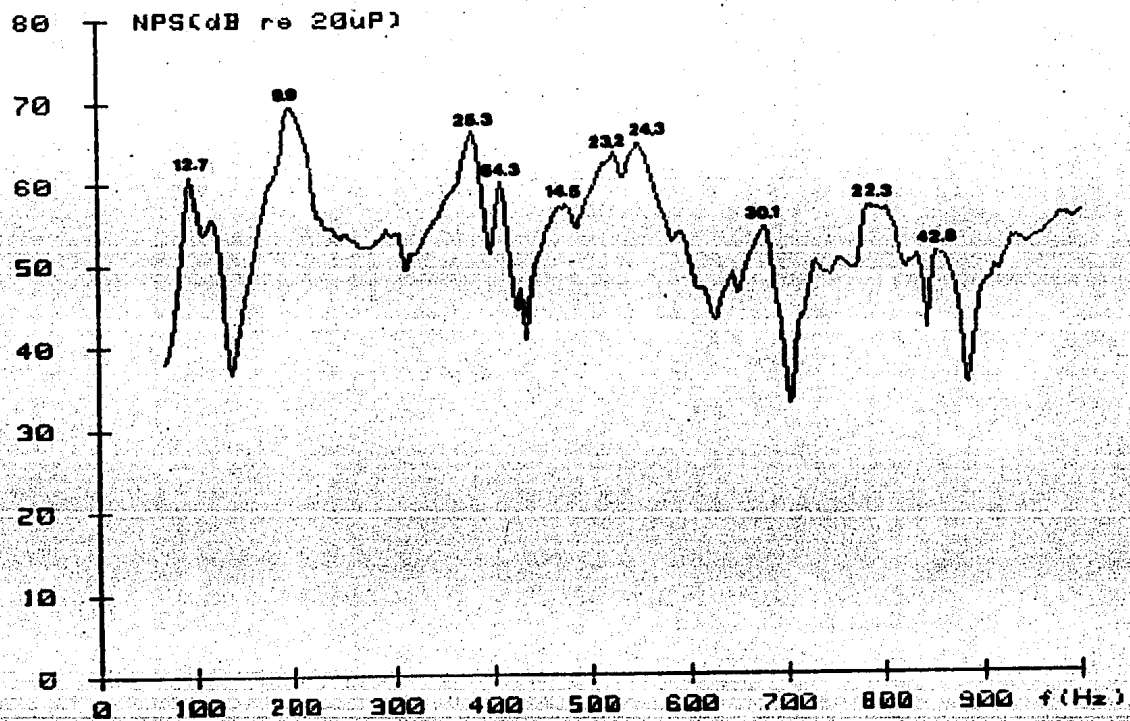
Las gráficas de las figuras de la F2.12 a la F2.17 muestran las curvas de respuesta en frecuencia de las seis guitarras, los números sobre los picos son los factores de calidad. El factor de calidad es una medida de la "agudeza" del pico de resonancia, nos parece importante determinarlo pues esperamos que en una buena guitarra la respuesta sonora en función de la frecuencia no debe presentar picos muy pronunciados (i.e. con un factor de calidad alto); esto significaría que la guitarra suena mucho más a unas frecuencias que a otras, lo cual desde un punto de vista musical es indeseable. Por lo tanto, esperamos que los factores de calidad sean bajos en una buena guitarra (no confundir con la calidad subjetiva), lo cual significaría que los picos de resonancia son anchos y favorecen un rango amplio de frecuencias, mientras que en las malas los factores de calidad esperamos que sean altos, es decir con picos más angostos y una respuesta en frecuencia más heterogénea. Por otra parte, esperamos que el nivel de presión máximo de las resonancias también influya en la calidad subjetiva.

Para determinar el grado de reproducibilidad de la medición de estos parámetros (niveles de presión sonora, frecuencias y factores de calidad de las resonancias), se realizaron cinco mediciones de la curva de respuesta en frecuencia de la guitarra "Gib" (#6) en cinco días diferentes espaciados en un intervalo de dos meses y medio. Las desviaciones relativas respecto a los valores promedio resultaron: 0.4% para las frecuencias de resonancia, 2.2% para los niveles de presión sonora y 13.1% para los factores de calidad. Estas cifras son los promedios de las desviaciones calculadas para cada una de las resonancias de la guitarra mencionada. La mayor dispersión en los factores de calidad se debe a que el ancho de banda de las resonancias ($f_2 - f_1$), se mide con una precisión de 2.5 Hz, mientras que el valor típico del ancho de la banda de resonancia oscila alrededor de los 25 Hz, lo cual da ya un error relativo del 10 % en el valor de ($f_2 - f_1$). La desviación de los valores de Q no puede ser menor. De cualquier modo, los resultados son reproducibles dentro de los márgenes, razonablemente buenos, citados anteriormente.

F2.12 -> F2.17 - Curvas de respuesta en frecuencia de las guitarras, encima de los picos de resonancia se indica el factor de calidad (relación de la frecuencia central entre el ancho de banda del pico).

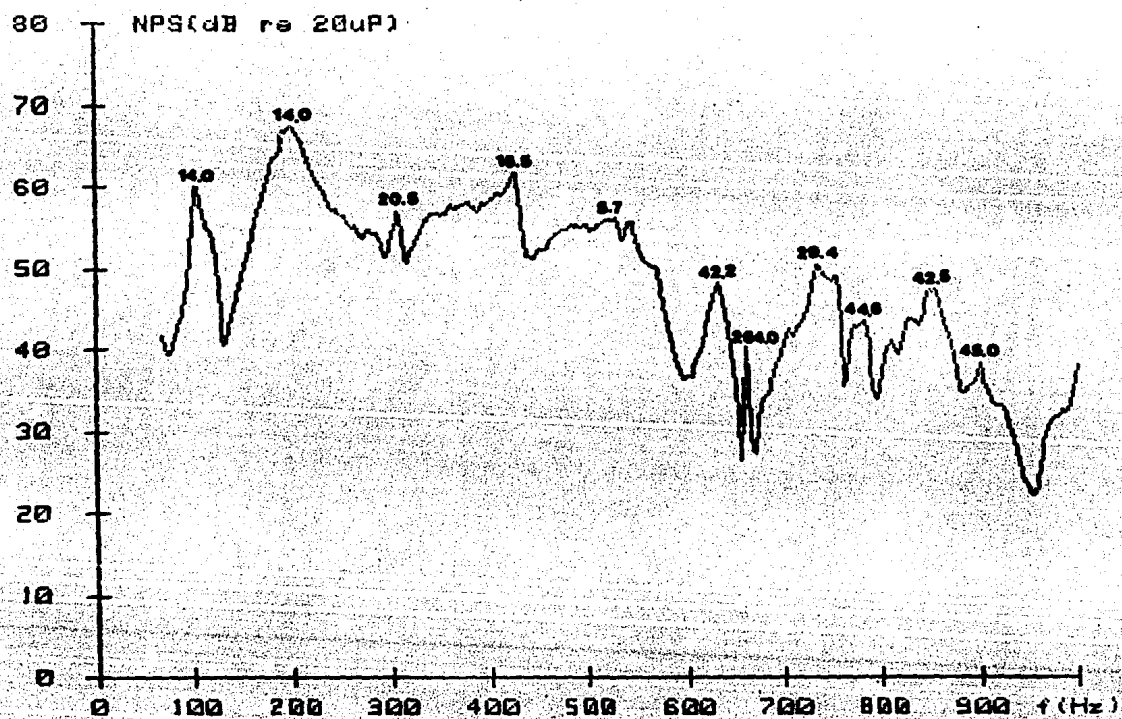
RESPUESTA DE NIVEL DE PRESION SONORA.

GUITARRA: ESTRADA. ESPECTROS PROMEDIADOS: 256.



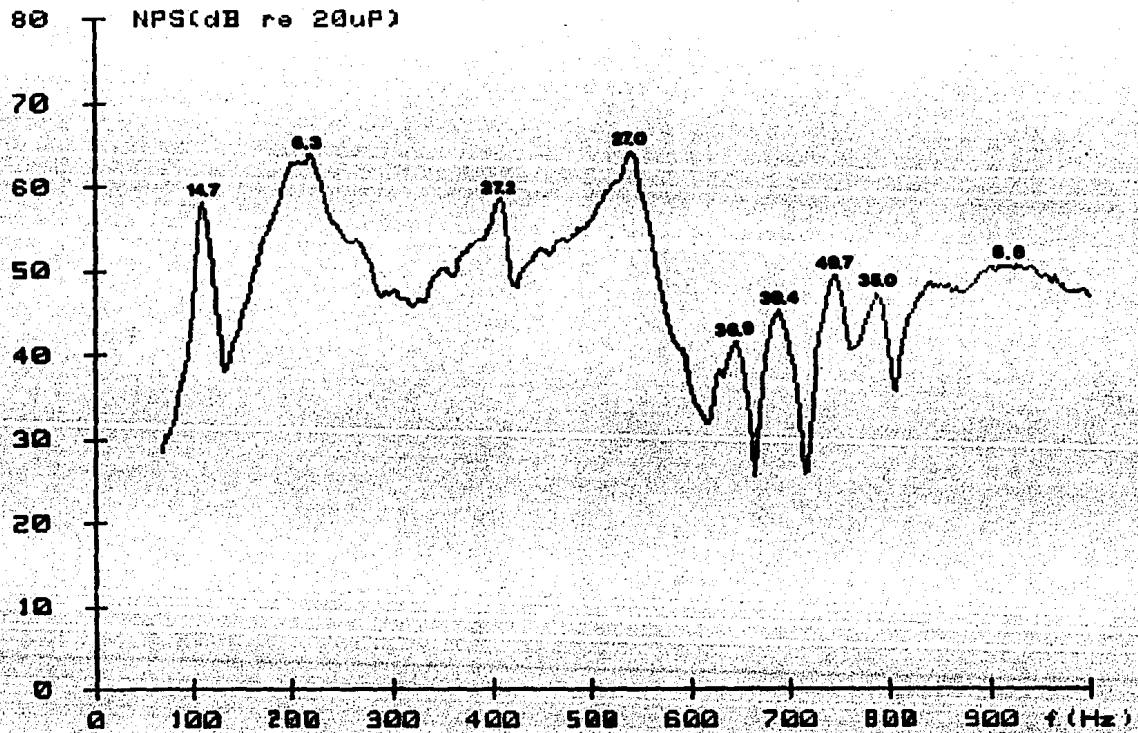
RESPUESTA DE NIVEL DE PRESION SONORA.

GUITARRA: QUINTANA. ESPECTROS PROMEDIADOS: 256.



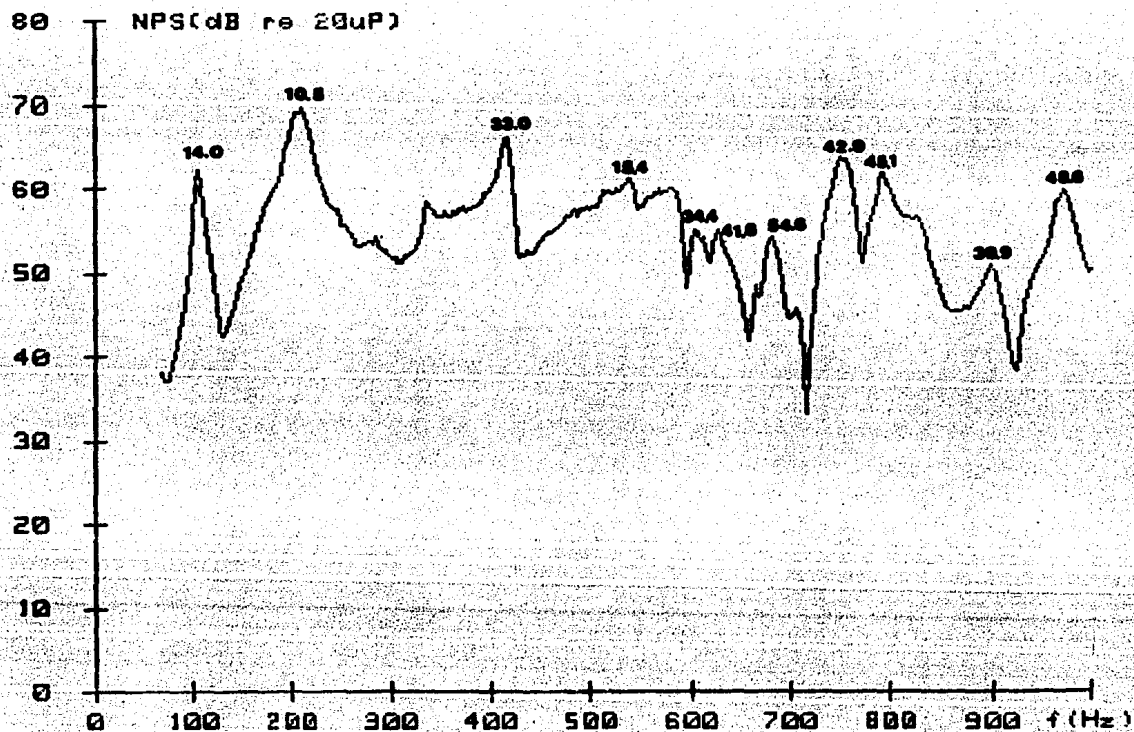
RESPUESTA DE NIVEL DE PRESION SONORA.

GUITARRA: VILLAFAN. ESPECTROS PROMEDIADOS: 256.



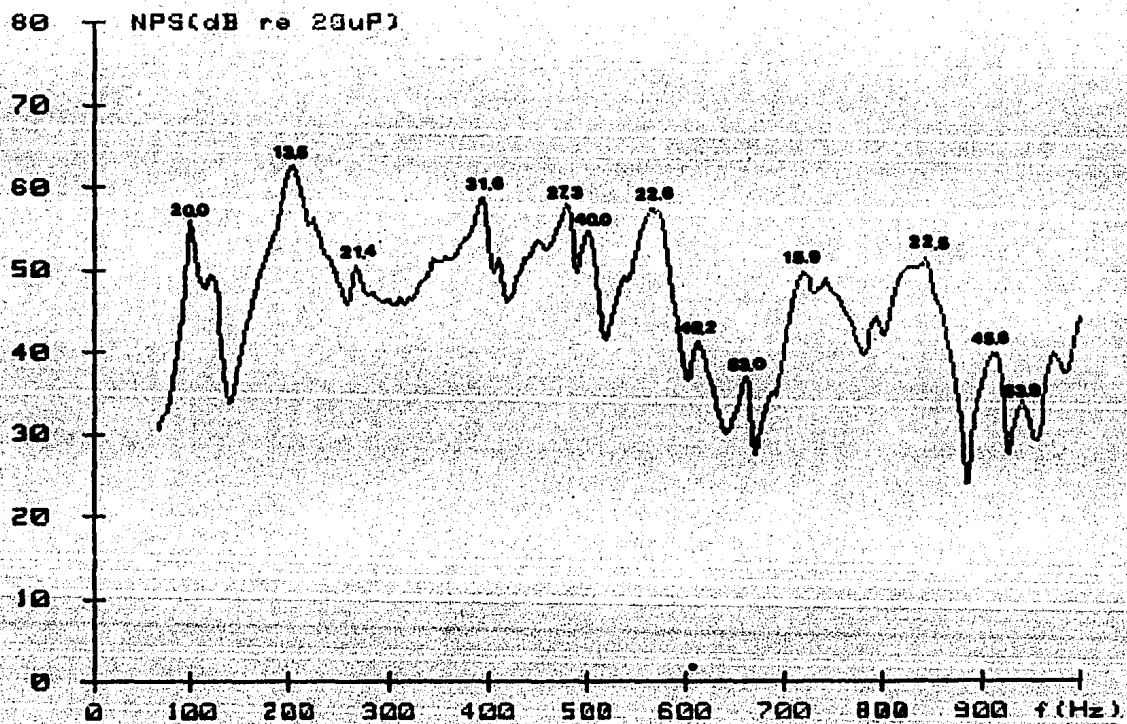
RESPUESTA DE NIVEL DE PRESION SONORA.

GUITARRA: KOHNO. ESPECTROS PROMEDIADOS: 256.



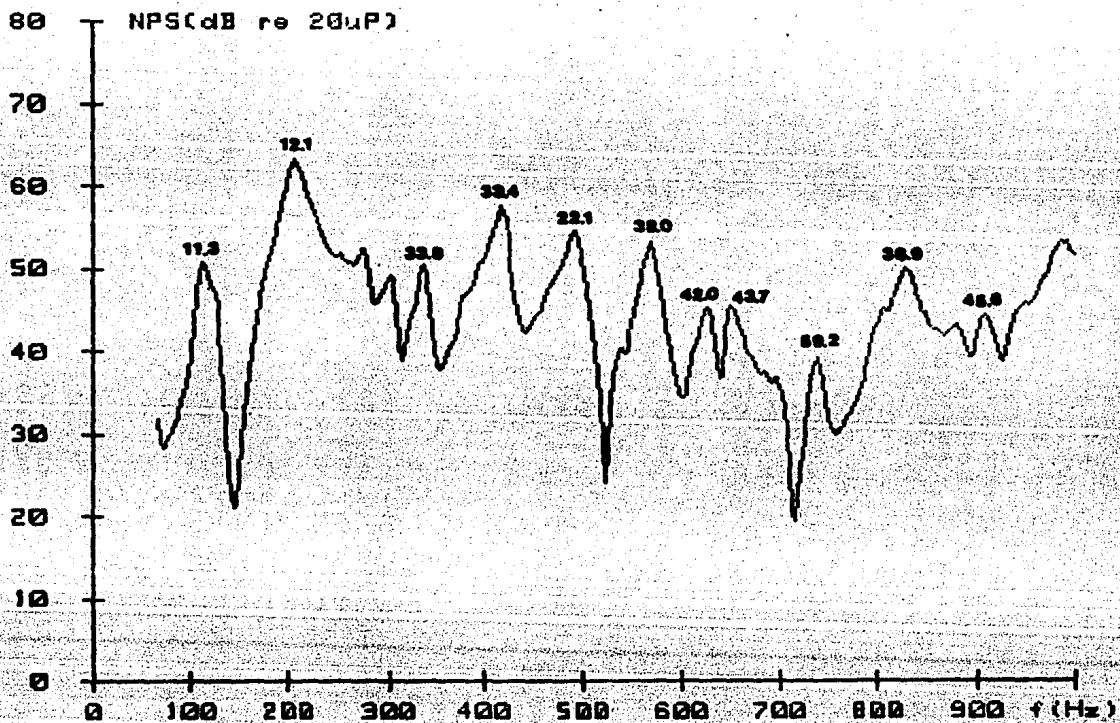
RESPUESTA DE NIVEL DE PRESION SONORA.

GUITARRA: RUBIO. ESPECTROS PROMEDIADOS: 256.



RESPUESTA DE NIVEL DE PRESION SONORA.

GUITARRA: GILB. ESPECTROS PROMEDIADOS: 256.



2.4.2 - Características de los tonos.

De las señales de tiempo de los tonos de las cuerdas al aire de cada guitarra, se determinaron el tiempo de ataque, el tiempo de atenuación y un espectro simplificado en tres bandas de frecuencia. Se espera, de lo discutido en la sección 1.4 del capítulo I, que estos parámetros estén relacionados con la calidad subjetiva de las guitarras.

Para determinar el tiempo de ataque se procedió como sigue. Ya que para una señal de tiempo dada es difícil decidir cuando principia el tono, definimos el tiempo inicial como aquel para el cual el valor de la presión sonora es la décima parte de la presión máxima que alcanza el tono. El tiempo que transcurre entre el tiempo inicial y el momento en el que el tono alcanza la presión máxima es el tiempo de ataque. En la tabla T2.4 aparecen los tiempos de ataque en milisegundos de los tonos de las cuerdas al aire de las seis guitarras. La presión se muestreó cada 0.039 ms, así que los valores son bastante precisos (hasta la diezmilésima de segundo inclusive).

TABLA T2.4 - Tiempos de ataque en milisegundos de los tonos de las cuerdas al aire.

GUITARRA	CUERDA					
	1	1	2	3	4	5
1	7.62	8.48	37.42	36.25	36.05	66.41
2	5.23	12.58	38.09	8.36	23.48	29.53
3	3.98	19.92	17.66	13.67	69.06	44.92
4	6.37	12.97	26.84	19.34	56.99	24.84
5	11.48	32.27	37.34	53.95	29.41	7.73
6	3.79	13.28	18.16	5.98	31.88	46.95

Para determinar el tiempo de atenuación, se calculó la evolución temporal de la raíz cuadrática medio de la señal de presión (valor RMS), usando un tiempo de promediación igual al periodo de la frecuencia fundamental de cada tono. La expresión usada es:

$$\langle p \rangle (nT_0) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=(n-0)N}^{nN} p^2(i \cdot T_m)} \quad \text{E2.8}$$

En donde $\langle p \rangle$ es la raíz cuadrática media de la presión sonora, $T_0=1/f_0$ es el periodo de la frecuencia fundamental f_0 del tono, $p(t)$ es la presión al tiempo t , $N=1/(f_0 \cdot T_m)$ es el número de muestras de $p(t)$ tomadas durante un periodo de la fundamental del tono, T_m es el periodo de muestreo y n es un entero que numera los periodos de la oscilación fundamental del tono que se considera. Las frecuencias y periodos usados para cada cuerda aparecen en la tabla T2.5.

TABLA T2.5 - Frecuencias y periodos fundamentales de los tonos de las seis cuerdas de la guitarra. Calculados según la escala temperada con $a=440\text{Hz}$.

CUERDA	FRECUENCIA (Hz)	PERIODO (ms)
1	329.6	3.034
2	246.9	4.050
3	196.0	5.102
4	146.8	6.810
5	110.0	9.091
6	82.4	12.135

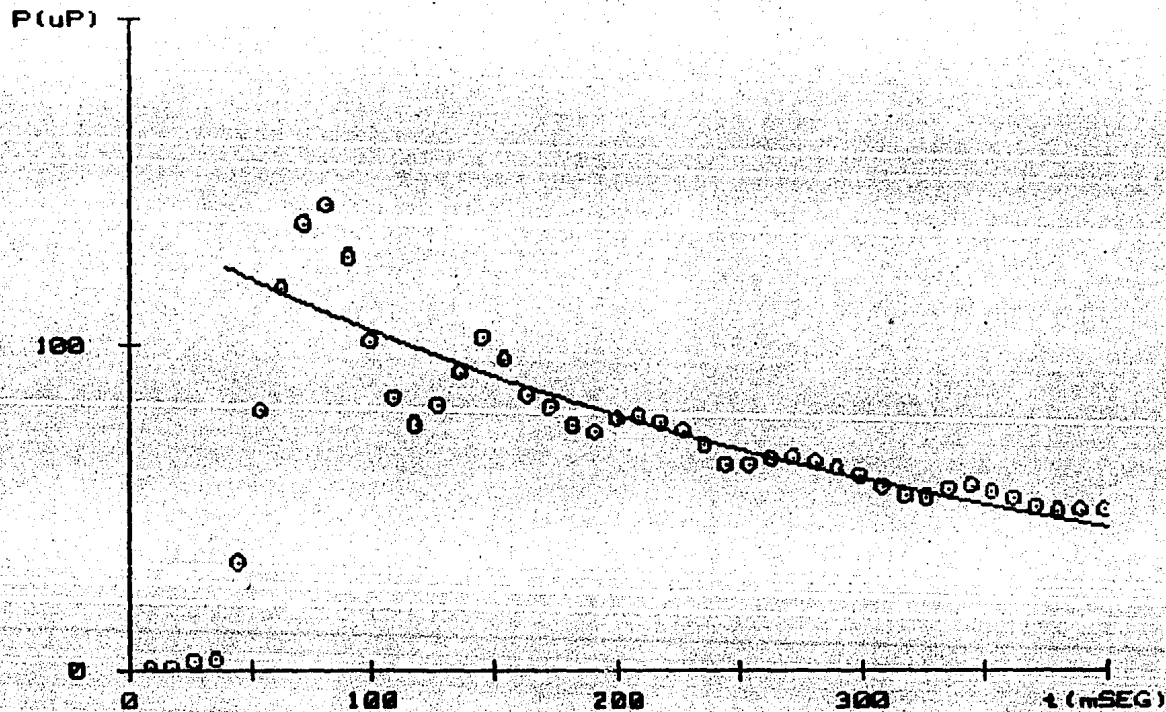
La porción de $\langle p \rangle(t)$ que sigue a su valor máximo fue aproximada por una exponencial decreciente del tipo $\langle p \rangle(t) = A \exp[-B \cdot t]$. La figura F2.18 muestra la evolución de la raíz cuadrática media de uno de los tonos, así como el decaimiento exponencial que más se aproxima a ella. Definimos el tiempo de atenuación como el requerido para que $\langle p \rangle$ se reduzca a la décima parte de su valor máximo, así que el tiempo de atenuación $T_{\langle - \rangle}$ está dado por:

$$T_{\langle - \rangle} = \frac{\ln 10}{B}$$

E2.9

En donde B es la constante de atenuación de la exponencial y estamos suponiendo que $\langle p \rangle$ alcanza su valor máximo cuando $t=0$. Los resultados se muestran en la tabla T2.6. También se efectuó una prueba "t" y se determinó, en cada caso, el intervalo en el que es posible hallar a $T_{\langle - \rangle}$ y asegurarlo con un nivel de confianza del 95% [ref. R2.18]. Se encontró que este intervalo es en promedio de + o - el 13% del valor de $T_{\langle - \rangle}$, en donde $T_{\langle - \rangle}$ es el valor del tiempo de atenuación dado en la tabla T2.6. Esta dispersión es debida a que el modelo propuesto no ajusta bien con los datos experimentales, sin embargo la diferencia no es muy drástica y permite hacer un estudio comparativo de los tonos sin necesidad de un ajuste mejor (ver figura F2.18).

EVOLUCION DE LA RAIZ CUADRATICA MEDIA.
GUITARRA: ESTRADA. CUERDA: QUINTA.



F2.1B - Decaimiento del valor RMS (raiz cuadrática media) de la presión sonora de un tono (marcado con círculos) y una aproximación mediante una exponencial decreciente (línea continua).

TABLA T2.6 - Tiempos de atenuación en segundos de los tonos de las cuerdas al aire.

GUITARRA	CUERDA						
	1	2	3	4	5	6	
1	1.031	1.107	0.649	1.335	0.802	1.506	
2	0.559	0.631	0.423	0.897	0.529	4.149	
3	0.863	1.069	1.414	1.697	0.336	1.288	
4	0.384	0.716	1.146	1.051	0.433	1.171	
5	0.980	0.657	0.930	2.089	0.621	0.961	
6	0.634	0.968	1.344	1.484	0.932	0.180	

Para cada señal de tiempo se obtuvo el espectro de presión mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) de los primeros 40 ms de cada tono. Esto corresponde a la parte de la señal de presión comprendida entre los 40 y los 80 ms (cada señal contiene un silencio de aproximadamente 40 ms antes del comienzo del tono). Esta operación se realizó con la ayuda del analizador de señales B&K-2033. El espectro obtenido consta de 400 bandas de 25 Hz de ancho y cubre el intervalo espectral de 0 a 10 kHz. Este espectro se simplificó a uno de tres bandas: de 0 a 1 kHz, de 1 a 4 kHz y de 4 a 10 kHz, mediante la expresión [ref. R2.19]:

$$N_b = 10 \log \left(\sum_i 10^{N_i/10} \right) - 10 \log(1.5) \quad \text{E2.10}$$

Donde N_b es el nivel de presión de la banda simplificada, N_i es el nivel de la i -ésima banda del espectro original y la suma se extiende sobre todas las bandas de 25 Hz que cubren la banda a simplificar N_b . El término $10 \log(1.5)$ es una corrección debida al uso de una ventana de ponderación temporal tipo Hanning en el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, la corrección se requiere debido a que el análisis espectral FFT se realiza en bandas de frecuencia con un ancho efectivo de $(1.5) \times 25 \text{ Hz} = 37.5 \text{ Hz}$, donde 25 Hz es el espaciamiento entre las bandas. La expresión E2.10 suma una serie de bandas y luego corrige el error debido a la superposición de éstas.

El objetivo de simplificar de este modo el espectro de los tonos, es manejar la menor cantidad de datos que aún contenga información acerca de la percepción subjetiva del sonido. En concreto, se afirma que en la percepción subjetiva del timbre de los sonidos musicales, el sistema auditivo maneja la información espectral en tres o cuatro entidades, correspondiendo cada una de ellas, a la distribución de la sonoridad en diferentes porciones de la escala de frecuencia. Pollard y Jansson [ref. R2.20] proponen la división del espectro de los tonos musicales en tres porciones: una conteniendo información sobre la sonoridad de la componente fundamental del tono, otra

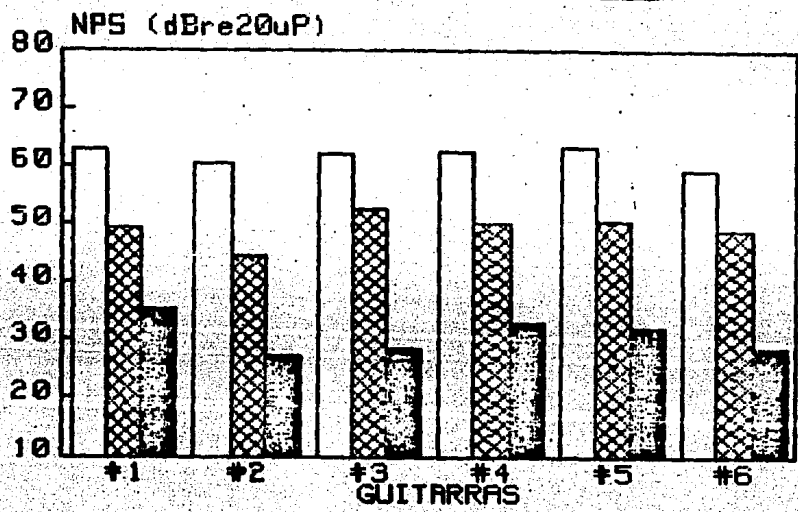
conteniendo el nivel promedio de los primeros 4 o 5 armónicos y la última el promedio de todos los armónicos superiores. Nosotros consideramos que esta división no es muy conveniente puesto que depende de la frecuencia fundamental de cada tono.

La alternativa que proponemos carece de ese defecto y puede justificarse desde el punto de vista de la percepción auditiva. Casi todas las frecuencias fundamentales de los tonos musicales se hallan entre 0 y 1000 Hz, por lo tanto el nivel de presión sonora promedio en esta banda contiene información sobre la componente fundamental del tono. El contenido armónico del tono abarca frecuencias de hasta 4 kHz o más, por tanto otra región espectral importante es la que se halla entre 1 y 4 kHz. Finalmente, la región entre 4 y 10 kHz contiene información sobre armónicos muy altos o ruidos de alta frecuencia que son importantes subjetivamente (por ejemplo el soplo del aire de una flauta, la fricción del arco sobre la cuerda del violín, etc.). Es oportuno probar en esta investigación, la utilidad de esta división del espectro para describir los atributos tímbricos de los sonidos musicales. Los resultados de este análisis espectral, realizado en los tonos de las cuerdas al aire, se muestran gráficamente en las figuras de la F2.19 a la F2.24.

F2.19 -> F2.24 - Espectros reducidos a tres bandas (de 0 a 1 kHz, de 1 a 4 kHz y de 4 a 10 kHz) de los tonos de las guitarras.

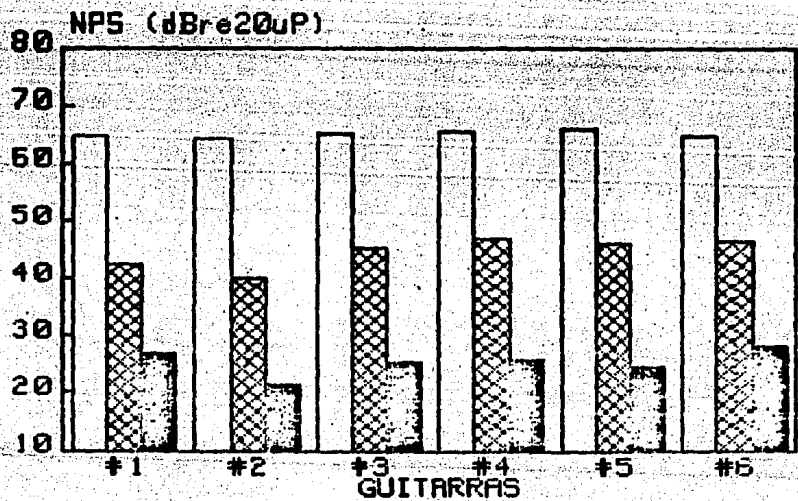
ESPECTRO REDUCIDO
DE LAS PRIMERAS CUERDAS

0-1 kHz 1-4 kHz 4-10 kHz



ESPECTRO REDUCIDO
DE LAS SEGUNDAS CUERDAS

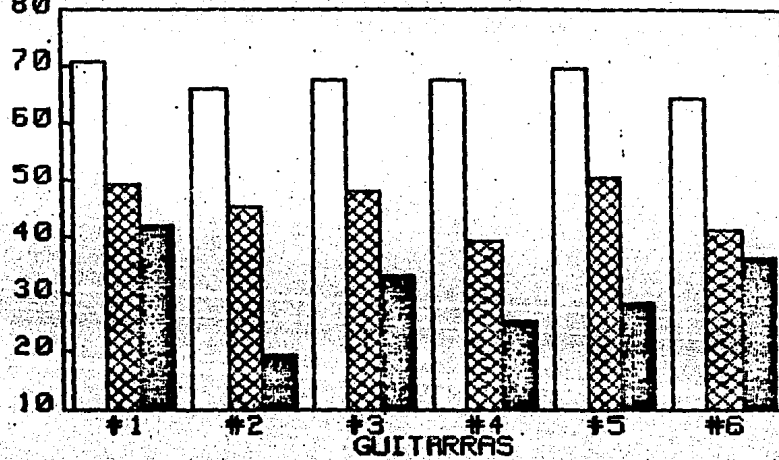
0-1 kHz 1-4 kHz 4-10 kHz



ESPECTRO REDUCIDO
DE LAS TERCERAS CUERDAS

0-1 kHz 1-4 kHz 4-10 kHz

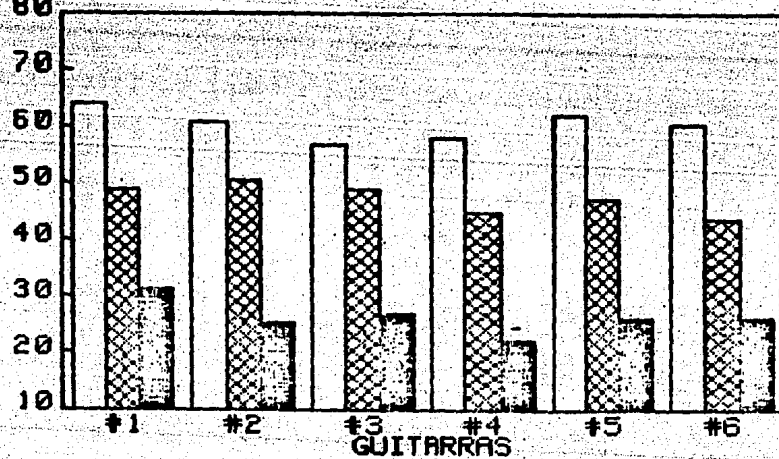
NPS (dBre20uP)



ESPECTRO REDUCIDO
DE LAS CUARTAS CUERDAS

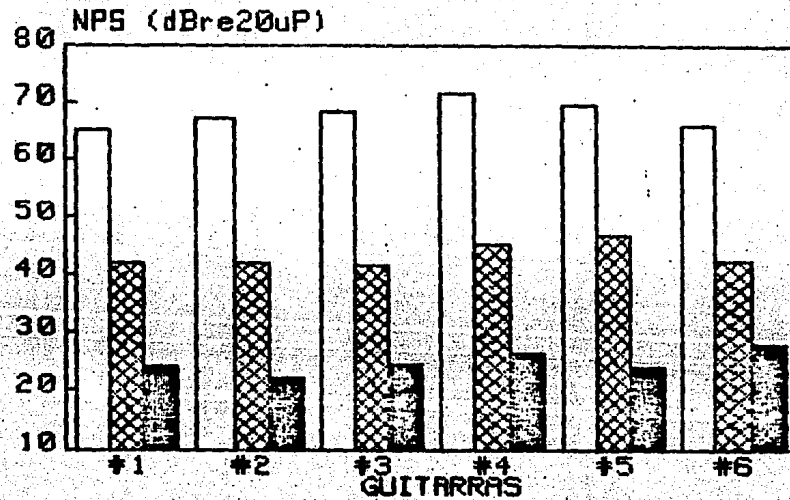
0-1 kHz 1-4 kHz 4-10 kHz

NPS (dBre20uP)



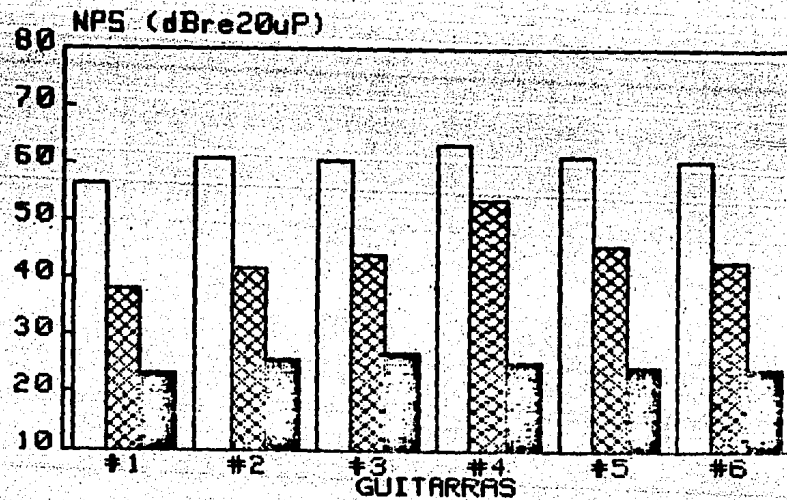
ESPECTRO REDUCIDO
DE LAS QUINTAS CUERDAS

0-1 kHz 1-4 kHz 4-10 kHz



ESPECTRO REDUCIDO
DE LAS SEXTAS CUERDAS

0-1 kHz 1-4 kHz 4-10 kHz



REFERENCIAS DEL CAPITULO II.

R2.1 - Ruiz Boullosa, R. et. al. "Estudio experimental sobre el efecto del envejecimiento en el sonido de las cuerdas de una guitarra". Ponencia presentada en el XXVIII Congreso Nacional de Investigación en Física. Hermosillo, Son. Noviembre de 1985.

R2.2 - Ruiz Boullosa, R. Comunicación personal de los resultados preliminares, concernientes al envejecimiento de las cuerdas, del proyecto 036-"Evaluación de guitarras clásicas". Departamento de Diseño y Desarrollo. Centro de Instrumentos. UNAM. Febrero de 1986.

R2.3 - Pérez López, A., Ruiz Boullosa, R. "Planeación y supervisión de la construcción de una cámara amortiguada para el Laboratorio de Acústica". Informe técnico del proyecto 113 del Departamento de Diseño y Desarrollo. Centro de Instrumentos. UNAM. Marzo de 1986.

R2.4 - Cremer, L. et. al. Principles and Applications of Room Acoustics. Applied Science. Essex, G.B. 1982. Vol. 1, pp. 550-560.

R2.5 - NAGRA IV-SJ. Instruction Manual. Kudelski S.A. Suiza, 1981.

R2.6 - Pujol, E. (Editor). Música española del siglo XVI. Schott & Main.

R2.7 - Taylor, J. Tone production on the classical guitar. Londres 1978.

R2.8 - Bendat, J.S. y Piersol, A.G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley-Interscience. 1971. pp. 351-352.

R2.9 - Idem. pp. 356-360.

R2.10 - PM Minishaker type 4810. Instruction Manual. Brüel & Kjer. Dinamarca.

R2.11 - Noise generator type 1405. Instruction Manual. Brüel & Kjer. Dinamarca.

R2.12 - Power amplifier type 2706. Instruction Manual. Brüel & Kjer. Dinamarca.

R2.13 - Newland, D.E. An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis. Longman. Londres, 1978.

R2.14 - CS-F210 Stereo cassette deck. Operator's Manual. Akai Electric Co., Ltd. Japón.

R2.15 - Pratt, R.L. y Doak, P.E. "A subjective rating scale for timbre". Journal of Sound and Vibration. 1976, 45(3), 317-328.

R2.16 - Osgood, C.E. et. al. The Measurement of Meaning. University of Illinois Press. 1957.

R2.17 - Pierce, D.A. Acoustics, An Introduction to its Physical Principles and Applications. McGraw-Hill. 1981. pp. 120-122.

R2.18 - Draper, N.R. y Smith, H. Applied Regression Analysis. John Wiley. 1981. pp. 24-27 y 472-473.

R2.19 - Pierce, D.A. op.cit. p. 69.

R2.20 - Pollard, H.F. y Jansson, E.V. "A tristimulus method for the specification of musical timbre". Acustica. Vol. 51 (1982).

C A P I T U L O III.

CORRELACION ENTRE LA CALIDAD SUBJETIVA Y OTROS PARAMETROS.

3.1 - COMENTARIOS PREVIOS SOBRE EL ANALISIS DE LOS DATOS

En este capítulo analizamos los resultados numéricos obtenidos en los experimentos descritos anteriormente. El objetivo es hallar correlaciones entre la calidad subjetiva de las guitarras (medida en número de votos) y los otros parámetros determinados en ellas. Por una parte los parámetros también subjetivos de la evaluación del timbre; por la otra los parámetros acústicos de los tonos (niveles espectrales, tiempos de ataque y de atenuación) y los de las resonancias de la curva de respuesta sonora (frecuencias, niveles y factores de calidad). Es de esperarse que la relación entre cada uno de estos parámetros y la calidad subjetiva no sea sencilla; es más, ni siquiera esperamos que exista una relación funcional determinada entre ellas. Ante eso, la mejor manera de abordar el problema es pensar que los parámetros que queremos relacionar son variables estadísticas. Un método para saber si dos variables estadísticas tienen algún grado de dependencia entre ellas, es calcular el coeficiente de correlación lineal (ver ecuación E3.1 más adelante) de una muestra de valores observados de estas variables. Una deficiencia grave de este método es que solo pueden detectarse correlaciones de tipo lineal, si las variables correlacionan de un modo más complejo no es posible saberlo. Un hecho que restringe la confiabilidad estadística de los resultados que obtenemos, es que la muestra de guitarras es pequeña. En todos los casos hacemos un análisis en base a únicamente seis observaciones, lo cual es poco concluyente.

Realizamos la búsqueda de correlaciones de tres formas distintas con fines también diferentes. En primer lugar buscamos cuales de los parámetros, considerados separadamente, correlacionan mejor con la calidad y determinamos la relación lineal que mejor describe la dependencia entre la calidad subjetiva y los parámetros correlacionados. Esto nos permite hacer un análisis detallado (parámetro por parámetro) de la optimización de la calidad de una guitarra. Es decir, como deben ser estos parámetros para obtener la calidad más alta posible. En el caso de los parámetros subjetivos de la evaluación del timbre, obtenemos una descripción semántica de la guitarra óptima.

En segundo lugar hacemos una estadística por guitarra, que describe el valor medio que toman los parámetros en cada instrumento, así como también su desviación normal y su desviación relativa (cociente entre la desviación normal y el

valor medio). Con estos descriptores estadísticos hacemos otro cálculo de correlación con la calidad. Así, es posible obtener información más global sobre las características de la guitarra óptima. Por ejemplo, en vez de saber como deben ser los tiempos de ataque de cada cuerda, obtenemos información de cual debe ser el promedio de los tiempos de ataque (al considerar las seis cuerdas).

Finalmente usamos una técnica estadística llamada búsqueda de componentes principales, con la cual logramos básicamente dos cosas: una es la obtención de expresiones numéricas para estimar la calidad en función de los otros parámetros y la segunda es la determinación de los parámetros que dan más información sobre la calidad de las guitarras.

Para terminar esta sección mencionaremos que los parámetros de las resonancias solo fueron analizados con el segundo método. La causa de esto es el hecho de que las curvas de respuesta sonora de las guitarras son muy complicadas (ver las figuras de la F2.12 a la F2.17 en el capítulo anterior) y es difícil comparar una a una las resonancias de las distintas guitarras. Es decir, no podemos encontrar resonancias "equivalentes" a todas las guitarras y compararlas entre sí (con excepción de las primeras 3 o 4 resonancias). El segundo método si es aplicable, pues solo es necesario considerar todos los factores de calidad o todos los niveles pico de las resonancias de la curva de respuesta de cada guitarra y calcular sus valores medios, desviaciones normales, etc.

3.2 - CORRELACION CON PARAMETROS ESPECIFICOS.

Los resultados obtenidos en los experimentos descritos en el capítulo anterior los agrupamos de la siguiente manera: primero dejamos aparte la calidad subjetiva de las guitarras que es considerada como la variable independiente en todo el análisis. Los otros parámetros subjetivos los incluimos en un grupo llamado TIMBRE, este conjunto contiene la descripción semántica de cada guitarra según las escalas brillante-opaco, pobre-rico, nitido-difuso, brusco-suave y los juicios sobre el equilibrio temporal, sonoro y tímbrico entre los tonos de las cuerdas de cada instrumento. Los parámetros acústicos medidos a partir de los tonos se agrupan en tres conjuntos: ATAQUE incluye los tiempos de ataque de las seis cuerdas, ATENUACION incluye los tiempos de atenuación y ESPECTRO incluye los niveles de presión sonora de las tres bandas del espectro reducido de las seis cuerdas. Todo esto para las seis guitarras estudiadas. Los parámetros obtenidos de las curvas de respuesta en frecuencia los incluimos en el conjunto RESONANCIAS, que contiene las frecuencias, niveles de presión sonora y los factores de calidad de las resonancias de las seis guitarras.

Obsérvese que la calidad subjetiva, los siete parámetros

del grupo TIMBRE, los seis tiempos de ataque, los seis tiempos de atenuación y los 18 niveles del grupo ESPECTRO, pueden interpretarse como variables estadísticas y que en los experimentos del capítulo anterior realizamos seis observaciones de cada una de ellas, una observación para cada guitarra. O de otra forma, es posible comparar las guitarras según los valores que tomen en ellas estos parámetros. En los parámetros del grupo RESONANCIAS no podemos hacer lo mismo, puesto que no podemos comparar una a una las resonancias; no es posible, por ejemplo, definir una variable "factor de calidad de la resonancia X" que pueda ser evaluada en forma "equivalente" en las seis guitarras. Dada esta dificultad, olvidémonos por el momento de los resultados experimentales contenidos en el conjunto RESONANCIAS. Dejaremos su análisis para la siguiente sección.

A las variables que incluye el grupo TIMBRE las designaremos: BRILL-OP, POB-RIC, NIT-DIF, BRU-SUA, EQ-TEMP, EQ-SON y EQ-TIM. En el grupo ATAQUE, designaremos con ATAQ-i al tiempo de ataque de la i-ésima cuerda. En el grupo ATENUACION, ATEN-i es el tiempo de atenuación de la i-ésima cuerda. En el grupo ESPECTRO, Ni-j es el nivel de presión sonora en la i-ésima banda del espectro reducido del tono de la j-ésima cuerda. La banda 1 es la que va de 0 a 1 kHz, la banda 2 va de 1 a 4 kHz y la banda 3 de 4 a 10 kHz.

Calculamos el coeficiente de correlación lineal entre la calidad subjetiva (que designaremos como CALIDAD) medida en número de votos y las variables mencionadas en el párrafo anterior mediante la expresión:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \langle X \rangle)(Y_i - \langle Y \rangle)}{\left[\sum_{i=1}^N (X_i - \langle X \rangle)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Y_i - \langle Y \rangle)^2 \right]^{1/2}}$$

E3.1

En donde X_i y Y_i son la i-ésima observación de las variables estadísticas X y Y , $\langle X \rangle$ y $\langle Y \rangle$ son sus valores medios y N es el número de observaciones de la muestra [ref. R3.1]. De todas ellas escogimos las que tenían un coeficiente de correlación $|r| > 0.7$, lo que da un coeficiente de determinación $r^2 > 0.49$. El coeficiente de determinación (el cuadrado del coeficiente de correlación: r^2) indica la proporción de la varianza en la variable independiente, en este caso la CALIDAD, que es debida a variaciones en la variable dependiente; el resto $(1-r^2)$ es la proporción de la varianza que es debida a otras causas [ref. R3.2]. El criterio de correlación adoptado se debe a que queremos incluir todos aquellos parámetros cuya variación determina cerca del 50% o más de la varianza total de la CALIDAD. El criterio es poco exigente, su elección está motivada un tanto por la pequeñez de la muestra y otro tanto por el carácter subjetivo de las variables involucradas; estas consideraciones nos hacen esperar coeficientes de correlación más o menos bajos. Las variables que cumplen la condición $|r| > 0.7$ son:

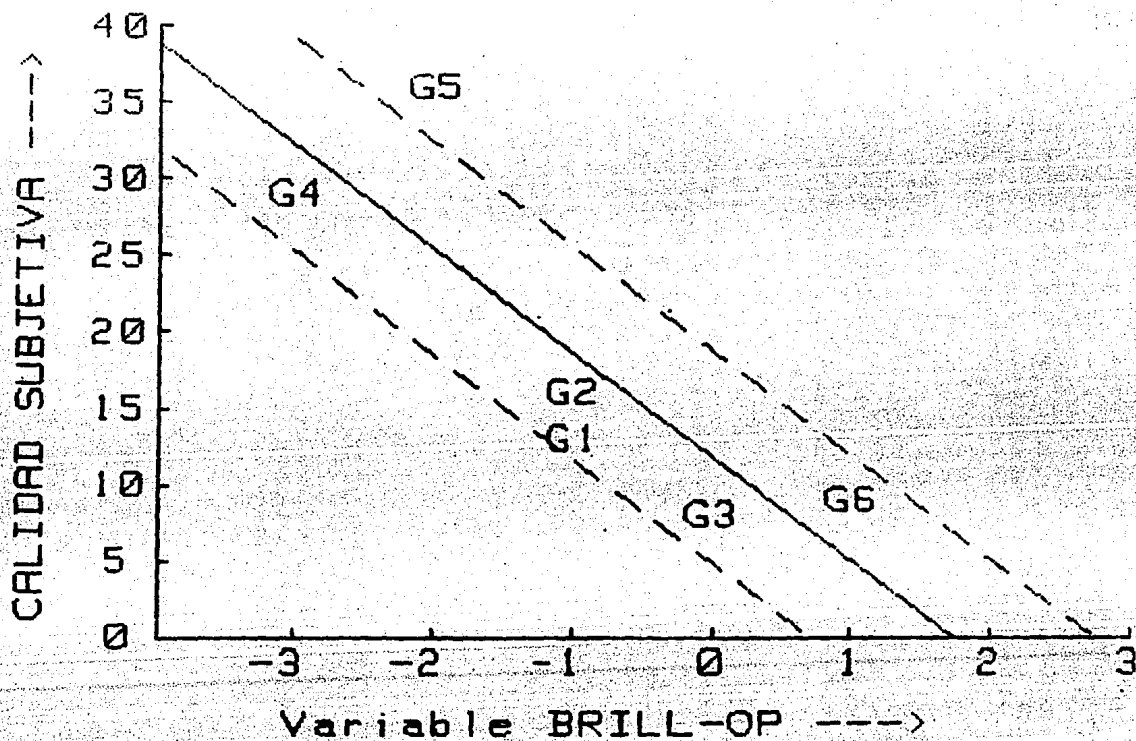
BRILL-OP	($r=-0.8412$)
NIT-DIF	($r=-0.7088$)
BRU-SUA	($r=-0.9388$)
EQ-TEMP	($r=0.8145$)
ATAQ-1	($r=0.8215$)
ATAQ-6	($r=-0.8227$)
ATEN-2	($r=-0.7387$)
N1-2	($r=0.7589$)
N1-5	($r=0.7069$)
N2-5	($r=0.9693$)

En las figuras de la F3.1 a la F3.10 se muestra la correlación entre la CALIDAD y cada una de estas variables. Se muestra una recta de regresión calculada por el método de mínimos cuadrados; con líneas discontinuas se representan las rectas que están desplazadas verticalmente en +/- el error normal vertical de los datos experimentales respecto a la recta de regresión; se muestra el coeficiente de determinación (r^2) y el error normal vertical, es decir, la desviación normal de los puntos experimentales respecto a la recta de regresión. Los datos experimentales se representan por el símbolo G_i , donde i es el número que designa a la guitarra en cuestión según la tabla T2.1 en el capítulo anterior.

F3.1 -> F3.10 - Correlación entre la calidad y algunos parámetros específicos. Se muestra el coeficiente de determinación (cuadrado del coeficiente de correlación), el error normal vertical de los puntos experimentales (G_i 's) respecto a la recta de regresión (línea continua) y las rectas que limitan la región donde los puntos se dispersan menos que el error normal vertical (líneas segmentadas).

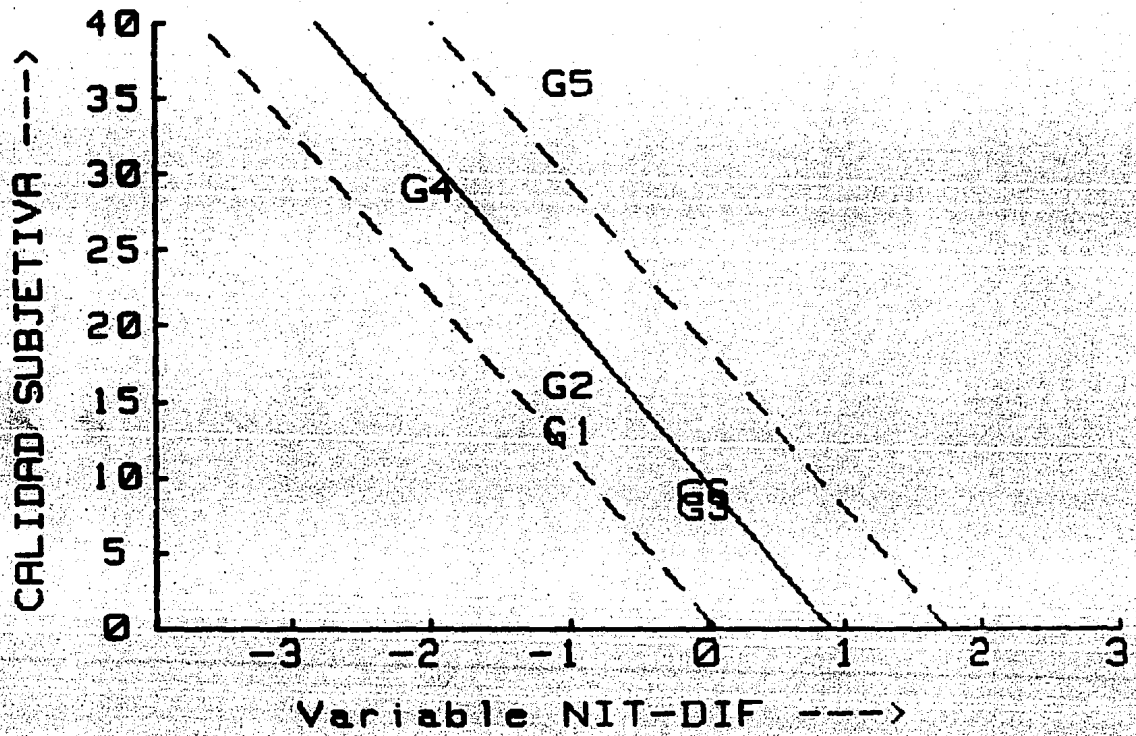
CALIDAD vs. Variable BRILL-OP.

CORRELACION² = .7076 . ERROR NORMAL = 6.9 .

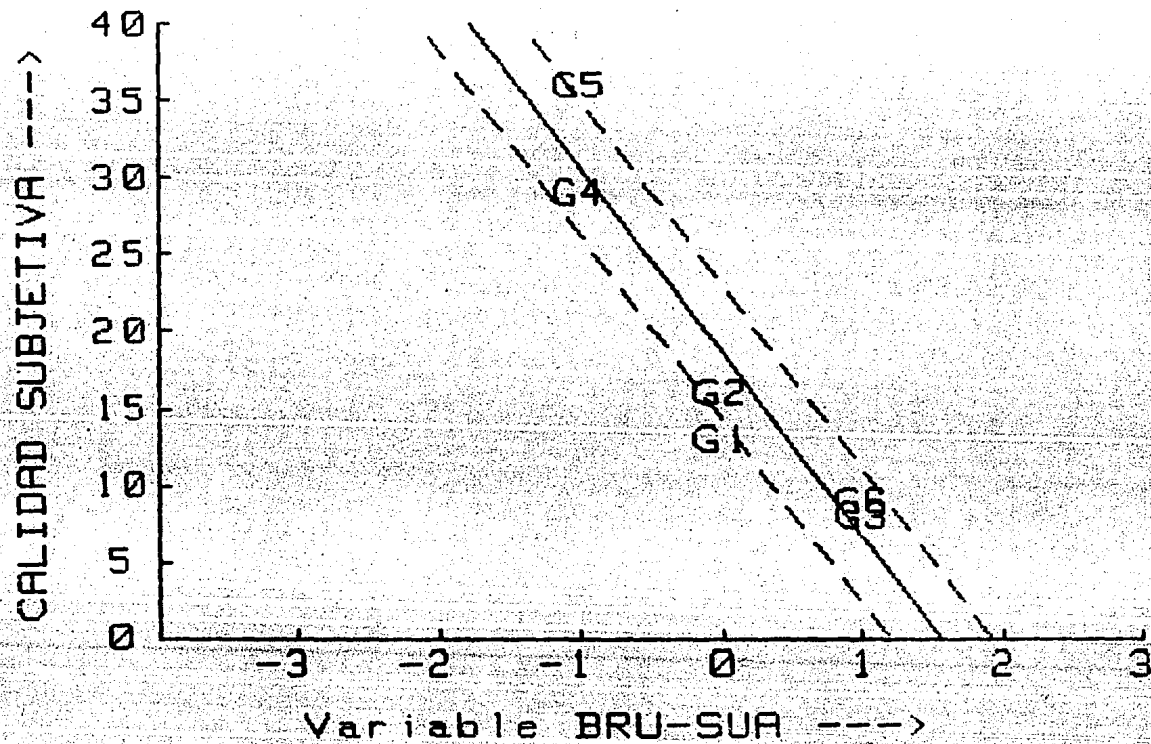


CALIDAD vs. Variable NIT-DIF.

CORRELACION² - .5024 . ERROR NORMAL - 9 .

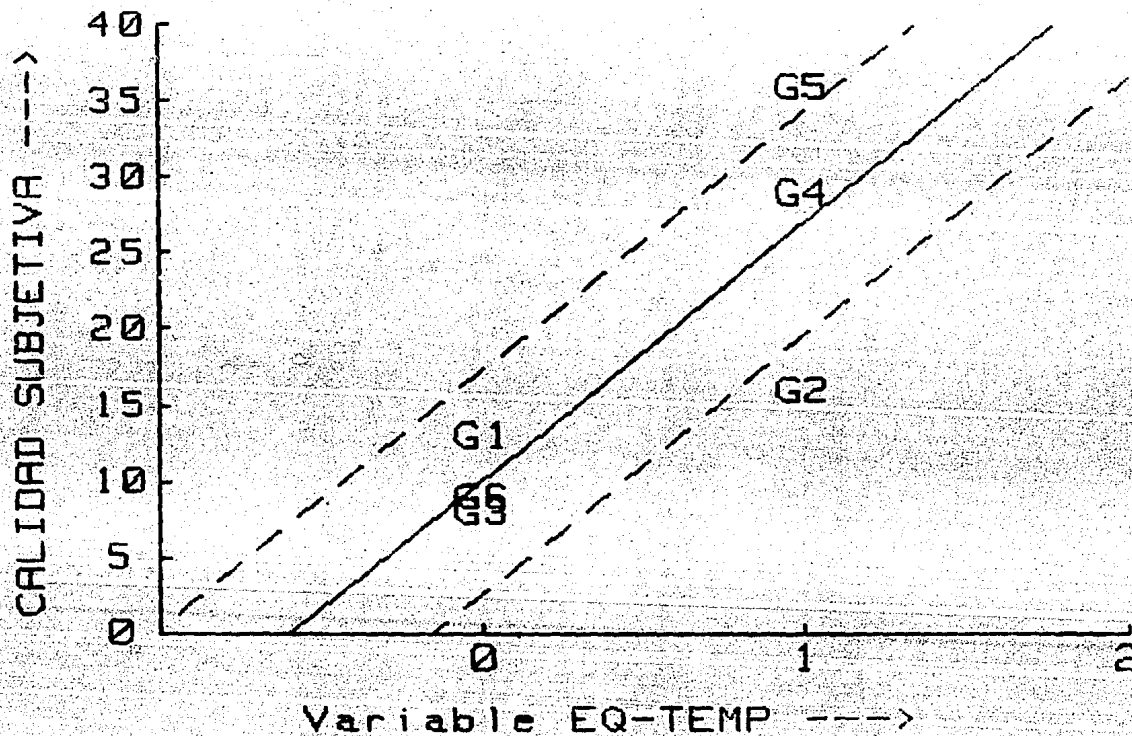


CALIDAD vs. Variable BRU-SUA.
CORRELACION² - .8814 . ERROR NORMAL - 4.4 .



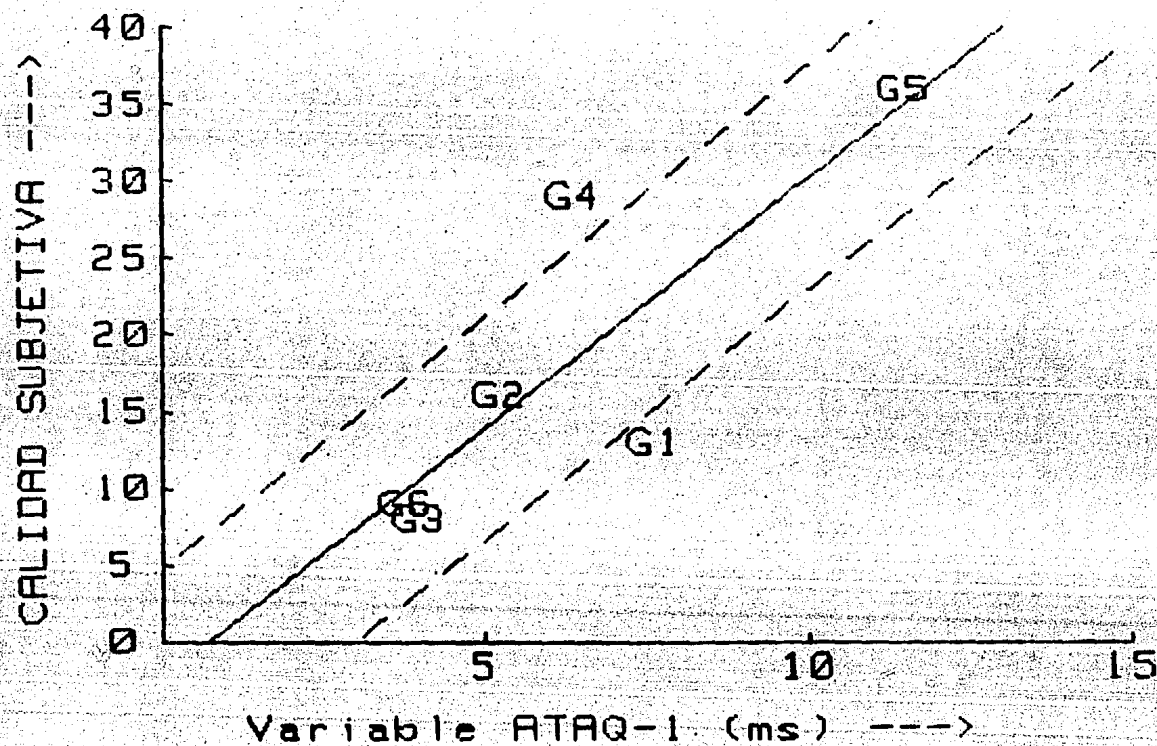
CALIDAD vs. Variable EQ-TEMP.

CORRELACION² - .6634 . ERROR NORMAL - 7.4 .



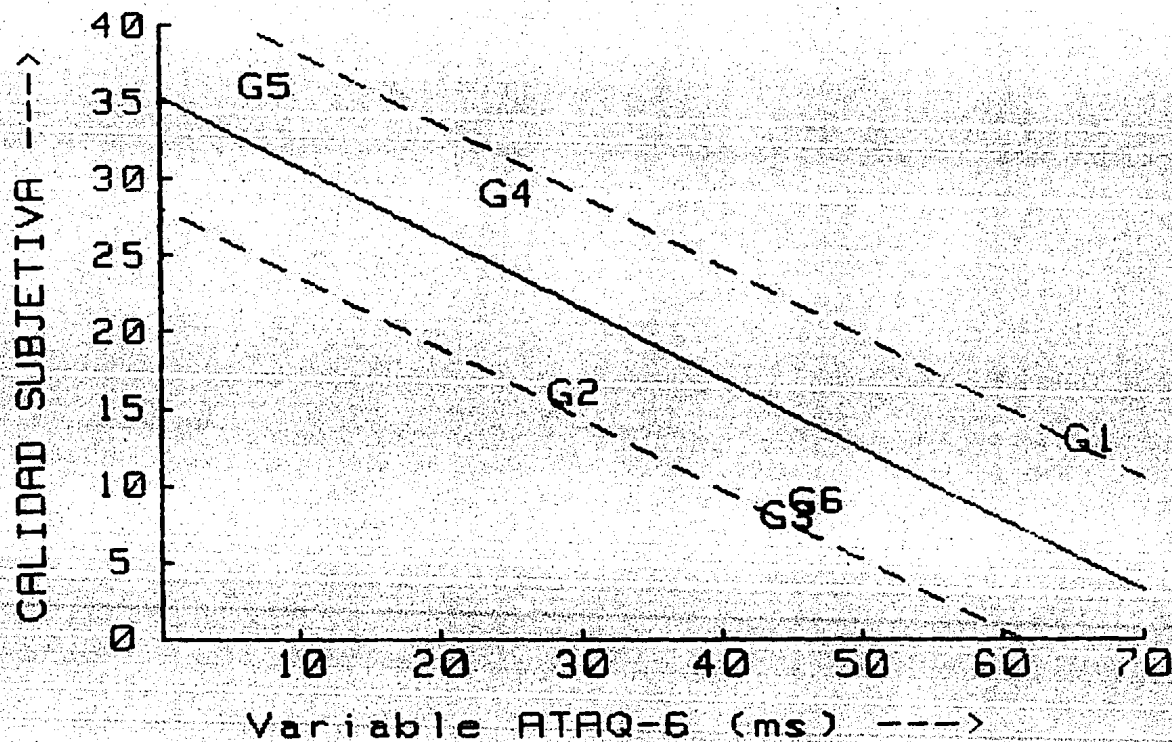
CALIDAD vs. Variable ATAQ-1 (ms).

CORRELACION² - .6748 . ERROR NORMAL - 7.3 .



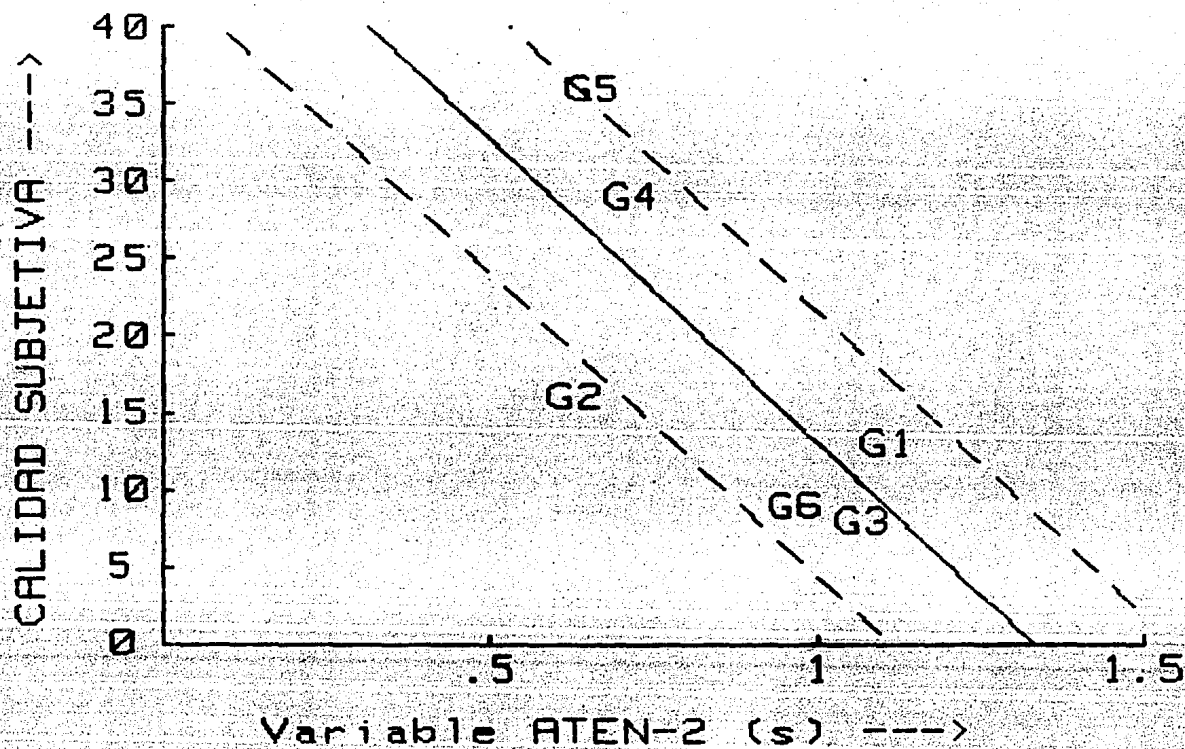
CALIDAD vs. Variable ATAQ-6 (ms).

CORRELACION² - .6768 . ERROR NORMAL - 7.3 .

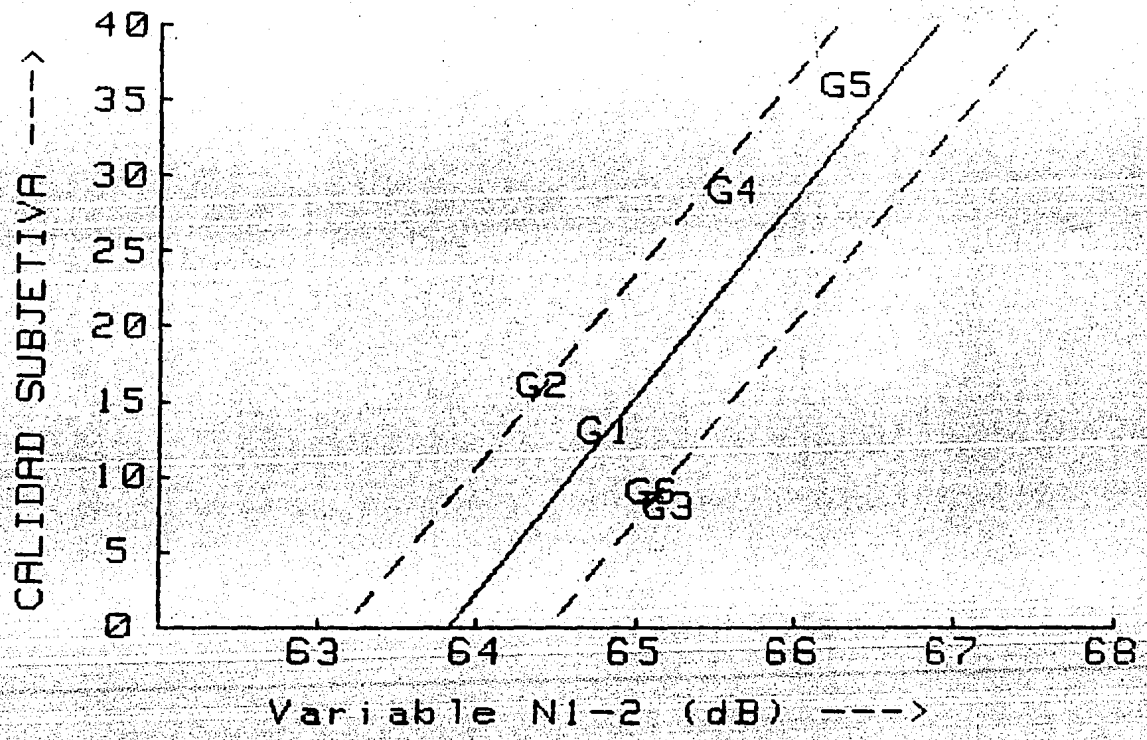


CALIDAD vs: Variable ATEN-2 (s).

CORRELACION² - .5457 . ERROR NORMAL - 0.6 .

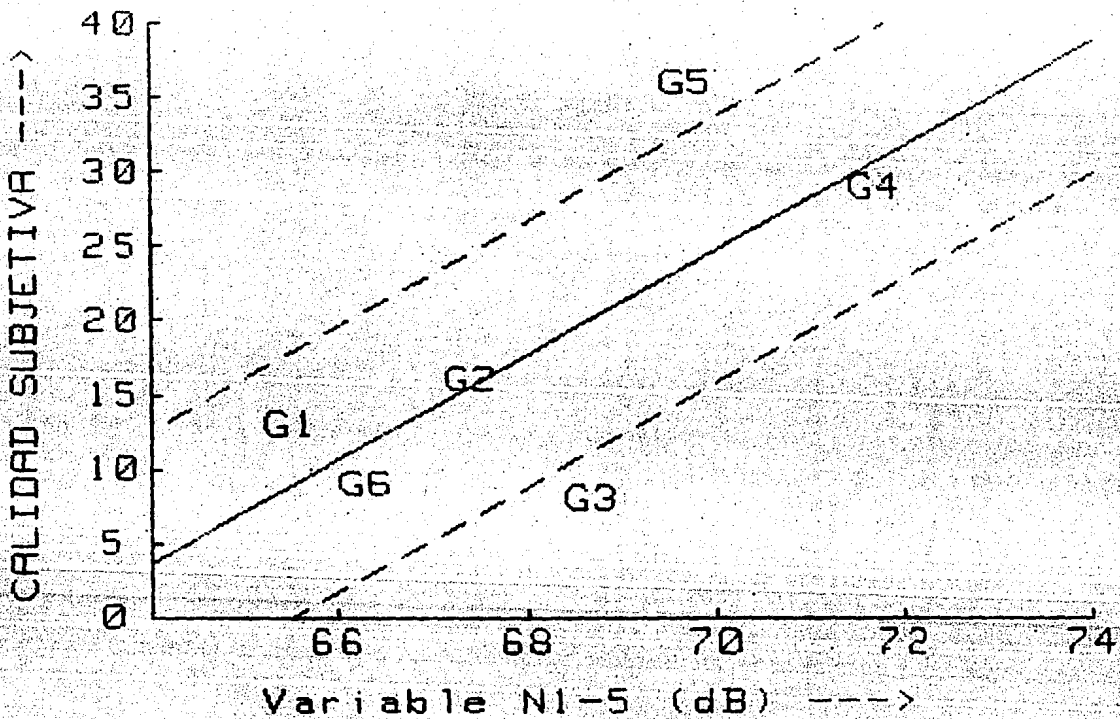


CALIDAD vs. Variable N1-2 (dB).
CORRELACION² - .5759 . ERROR NORMAL - 0.3 .



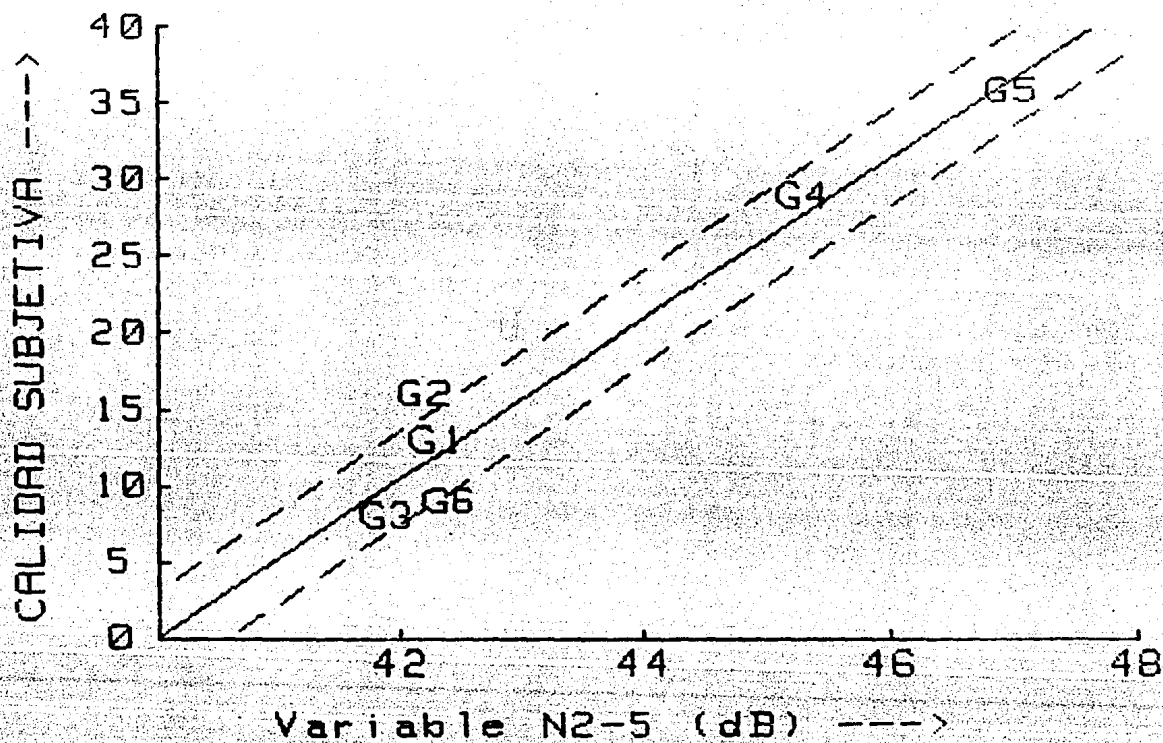
CALIDAD vs. Variable N1-5 (dB).

CORRELACION² - .4997 . ERROR NORMAL - 9 .



CALIDAD vs. Variable N2-5 (dB).

CORRELACION² - .9396 . ERROR NORMAL - 3.1 .



De entre los parámetros que correlacionan mejor con la CALIDAD, los del grupo TIMBRE, que son también parámetros subjetivos, sugieren que el sonido de una guitarra de "buena calidad" debe ser MUY BRILLANTE, MUY NITIDO, MUY BRUSCO (!) y que la duración de las distintas cuerdas debe ser parecida, i.e. debe existir equilibrio temporal. De estas variables se observa una buena correlación de la CALIDAD con la variable BRU-SUA ($r^2=0.8814$); una posible explicación de porqué la CALIDAD correlaciona con la "brusquedad" de las notas podría ser la siguiente: siendo la guitarra un instrumento de poca sonoridad, se requiere de algún efecto que haga fácilmente perceptible su sonido (piénsese por ejemplo en el caso en el que estuviera acompañada de otros instrumentos musicales muy sonoros); una manera de lograrlo es hacer que los tonos tengan un carácter percutido, brusco, que hagan distintivo el sonido de la guitarra. Otra posible explicación es que la "brusquedad" está relacionada con la percepción separada de notas sucesivas en pasajes muy rápidos. Sin embargo, las pruebas realizadas no permiten fundamentar ninguna de las dos conjeturas anteriores.

De los tiempos de ataque solo los de la primera y sexta cuerdas correlacionan bien con la CALIDAD. Un hecho curioso es que para el tiempo de ataque de la primera cuerda la correlación es directa (i.e. el coeficiente de correlación es positivo), a mayor tiempo de ataque corresponde una mayor calidad; mientras que para el de la sexta cuerda, la correlación es inversa. Se puede inferir de aquí que en una buena guitarra los tiempos de ataque son más largos para las primeras cuerdas (las más agudas) y más cortos para las últimas (las graves) comparados con los de una mala guitarra. Esta interpolación se corrobora viendo los valores de la correlación entre la CALIDAD y los tiempos de ataque de todas las cuerdas, de la primera a la sexta los coeficientes de correlación son aproximadamente: 0.8, 0.6, 0.5, 0.7, -0.2, y -0.8. Los tiempos de ataque de las primeras cuatro cuerdas tienen coeficientes de correlación positivos, mientras que en las dos más graves la correlación es negativa.

En la tabla T2.4 del capítulo anterior se observa que los tiempos de ataque de las cuerdas agudas generalmente son más cortos que los de las cuerdas graves; tomando en cuenta esto, las correlaciones obtenidas sugieren que en una buena guitarra los tiempos de ataque de las distintas cuerdas deben ser parecidos (los tiempos de ataque de las cuerdas agudas tienden a ser más largos para parecerse a los de las cuerdas graves y viceversa). En el trabajo de Jaroszewski et.al. [ref. R3.3] se reporta una correlación positiva de la calidad de las guitarras con el promedio de los tiempos de ataque y con la desviación relativa (cociente de la desviación normal entre el valor medio) de los mismos, al considerar los valores medidos en distintas cuerdas. Este resultado coincide con el obtenido por nosotros.

Del conjunto ATENUACION solo el tiempo de atenuación de la segunda cuerda cumple el criterio de correlación adoptado ($|r| > 0.7$), y aún así, la correlación es baja (el coeficiente de determinación es $r^2 = 0.5457$). Esta correlación podría interpretarse en el sentido de que los tiempos de atenuación de los tonos son menores en las buenas guitarras que en las malas, i.e. las buenas guitarras tienen tonos que decaen rápidamente. Este resultado coincide con lo reportado por Jansson [ref. R3.4], en este artículo se aclara que un tiempo de atenuación pequeño, no necesariamente implica una duración efectiva pequeña. Jansson reporta que un tiempo de atenuación pequeño está asociado a tonos con un alto nivel de presión sonora, por tanto la duración efectiva será larga a pesar de que el decaimiento sea rápido. Por el contrario, los tiempos de atenuación grandes se asocian a tonos con bajo nivel de presión sonora y por lo tanto a una duración efectiva más corta. Sin embargo, creemos que nuestro resultado no es muy confiable por lo siguiente: en la evaluación subjetiva de la calidad, los sujetos escucharon un trozo musical en el cual la duración de las notas ejecutadas era tal, que no permitía una adecuada apreciación de la atenuación de los tonos de la guitarra. En este sentido, podemos aceptar que la evaluación subjetiva de la calidad no puede ser comparada con la medición de los tiempos de atenuación de los tonos, lo cual constituye un error del diseño experimental.

Del conjunto ESPECTRO tenemos tres variables que correlacionan bien con la CALIDAD: N1-2, N1-5 y N2-5. Dos de ellas corresponden al nivel de presión sonora contenido en la primera banda del espectro reducido (la banda de 0 a 1 kHz). Casi toda la energía sonora del tono está contenida en esta banda, así que este nivel puede interpretarse como el nivel de presión sonora del tono en todo el rango de frecuencias (de hecho, la inclusión de las bandas 2 y 3 del espectro reducido solo incrementa en 0.1 o 0.2 dB el nivel de la banda 1). De este modo, la correlación directa observada entre la CALIDAD y los niveles de la banda 1 en las cuerdas 2 y 5 puede interpretarse así: en las guitarras buenas los tonos tienen un nivel de presión sonora mayor que en las malas. Esta correlación es algo que se antoja evidente. En las otras cuerdas el coeficiente de correlación siempre es positivo aunque no tan alto como en la 2 y en la 5; de la primera cuerda a la sexta los coeficientes de correlación entre la CALIDAD y los niveles de la banda 1 son: 0.6, 0.8, 0.4, 0.1, 0.7 y 0.5. Esto parece indicar, efectivamente, que el nivel de presión sonora de los tonos debe ser alto en una guitarra de buena calidad. Este resultado coincide con el reportado por Jansson [ref. R3.4].

La otra variable del grupo ESPECTRO que correlaciona con la CALIDAD es N2-5, el nivel de la banda 2 (de 1 a 4 kHz) en el tono de la cuerda 5, y la correlación es inusualmente buena ($r^2 = 0.9396$); de hecho contrasta con las correlaciones encontradas para el mismo parámetro medido en las otras cuerdas. Otra vez de la primera a la sexta los coeficientes

de correlación son: 0.1, 0.3, 0.1, -0.2, 1.0 y 0.6. Esto parece indicar que es importante que las cuerdas graves (la 5 y la 6) tengan un nivel alto en la región entre 1 y 4 kHz. En los trabajos de Caldersmith, de Gridnev y Porvenkov y de Leipp [refs. de la R3.5 a la R3.7], se reporta que en las guitarras de buena calidad la respuesta sonora en la región de 500 a 4000 Hz es más alta que en las malas.

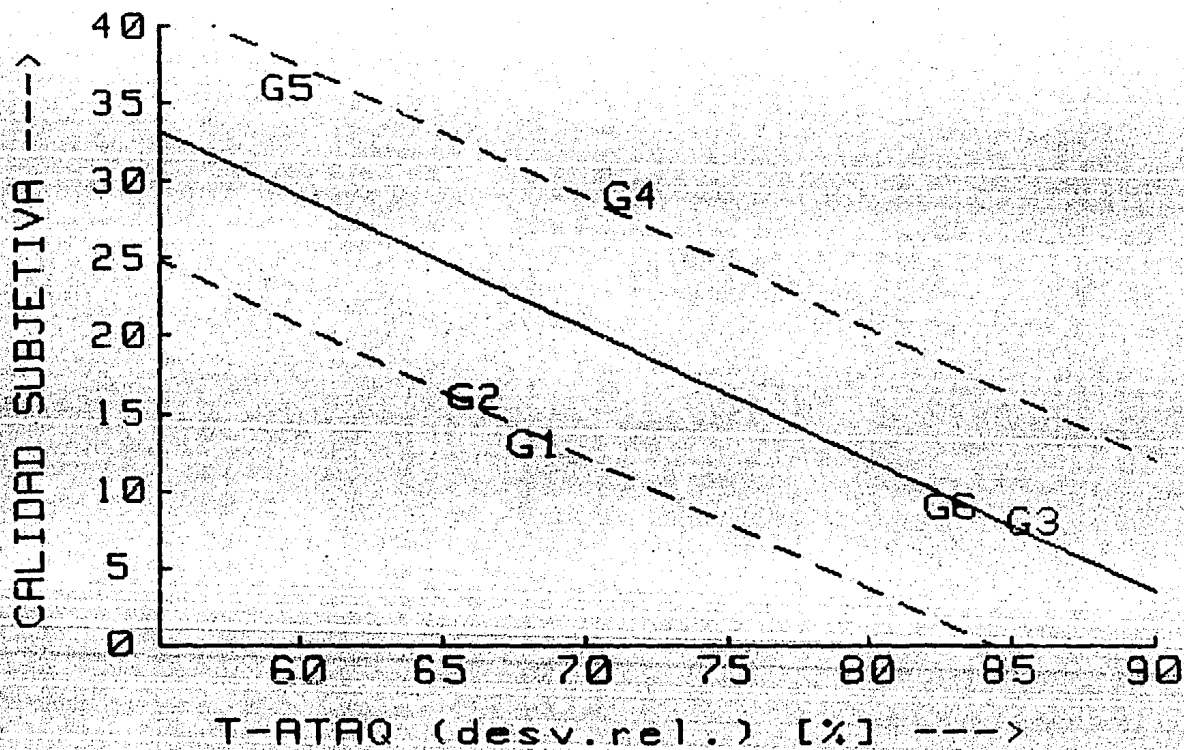
3.3 - CORRELACION CON DESCRIPTORES ESTADISTICOS DE LOS PARAMETROS.

Para cada guitarra calculamos el promedio, desviación normal y desviación relativa (cociente de la desviación normal entre el promedio), para los valores del tiempo de ataque, del tiempo de atenuación y de los niveles de las tres bandas del espectro reducido de los tonos de las cuerdas. También para los nivel de presión sonora y los factores de calidad de las resonancias observadas en la curva de respuesta en frecuencia. Calculamos el coeficiente de correlación de la CALIDAD con estas propiedades estadísticas de los parámetros y se aplicó el criterio $|r| > 0.7$, las variables que lo cumplen son: la desviación relativa de los tiempos de ataque $ATAQ-(desv.rel.)$ con $r = -0.7529$ y el nivel promedio de la banda 1 del espectro reducido $NFS-01-(prom.)$ con $r = 0.9001$. En las figuras F3.11 y F3.12 se muestran los valores de la CALIDAD contra los de estos parámetros para las seis guitarras (Gi muestra el punto correspondiente a la i-ésima guitarra), se muestran también las rectas de regresión correspondientes y las rectas que están desplazadas verticalmente en \pm el error normal vertical de los puntos experimentales en comparación de la recta de regresión. Se da el coeficiente de determinación (r^2) y el error normal vertical.

F3.11 -> F3.12 - Correlación entre la calidad y algunos descriptores estadísticos de los parámetros. Se muestra el coeficiente de determinación (cuadrado del coeficiente de correlación), el error normal vertical de los puntos experimentales (G_i 's) respecto a la recta de regresión (línea continua) y las rectas que limitan la región donde los puntos se dispersan menos que el error normal vertical (líneas segmentadas).

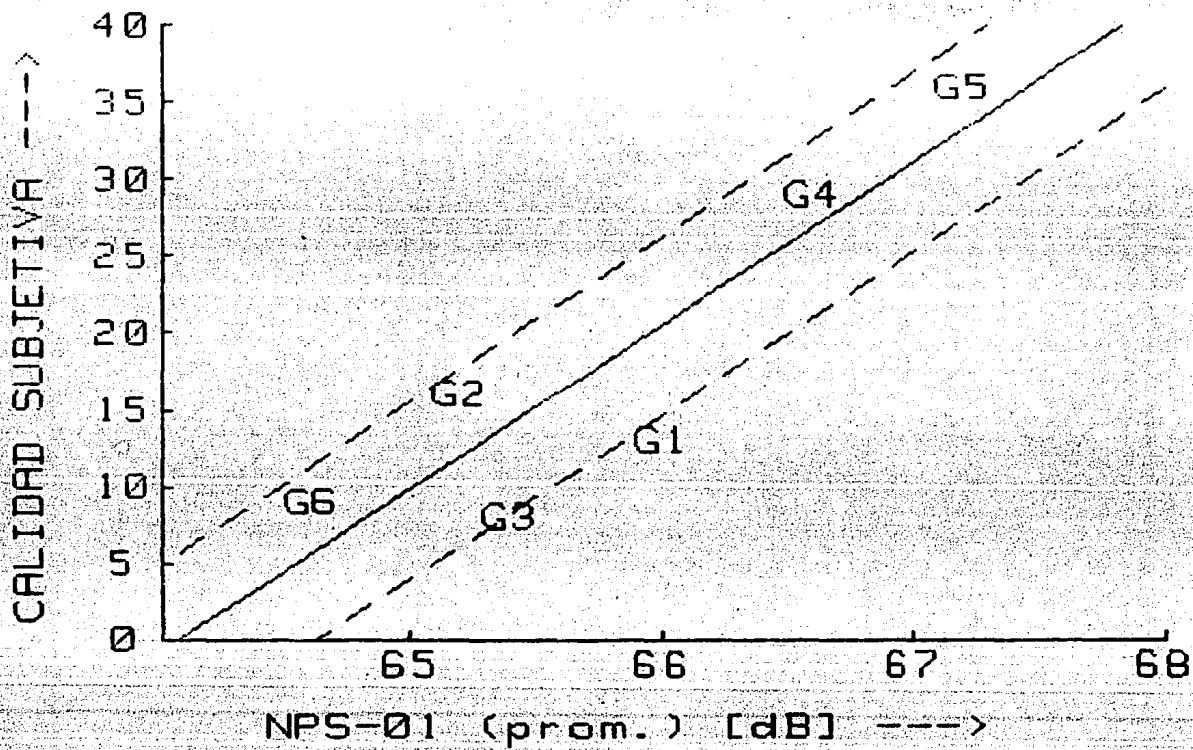
CALIDAD vs. T-ATAQ (desv.rel.) [%].

CORRELACION² - .5652 . ERROR NORMAL - 9.4 .



CALIDAD vs. NPS-01 (prom.) [dB].

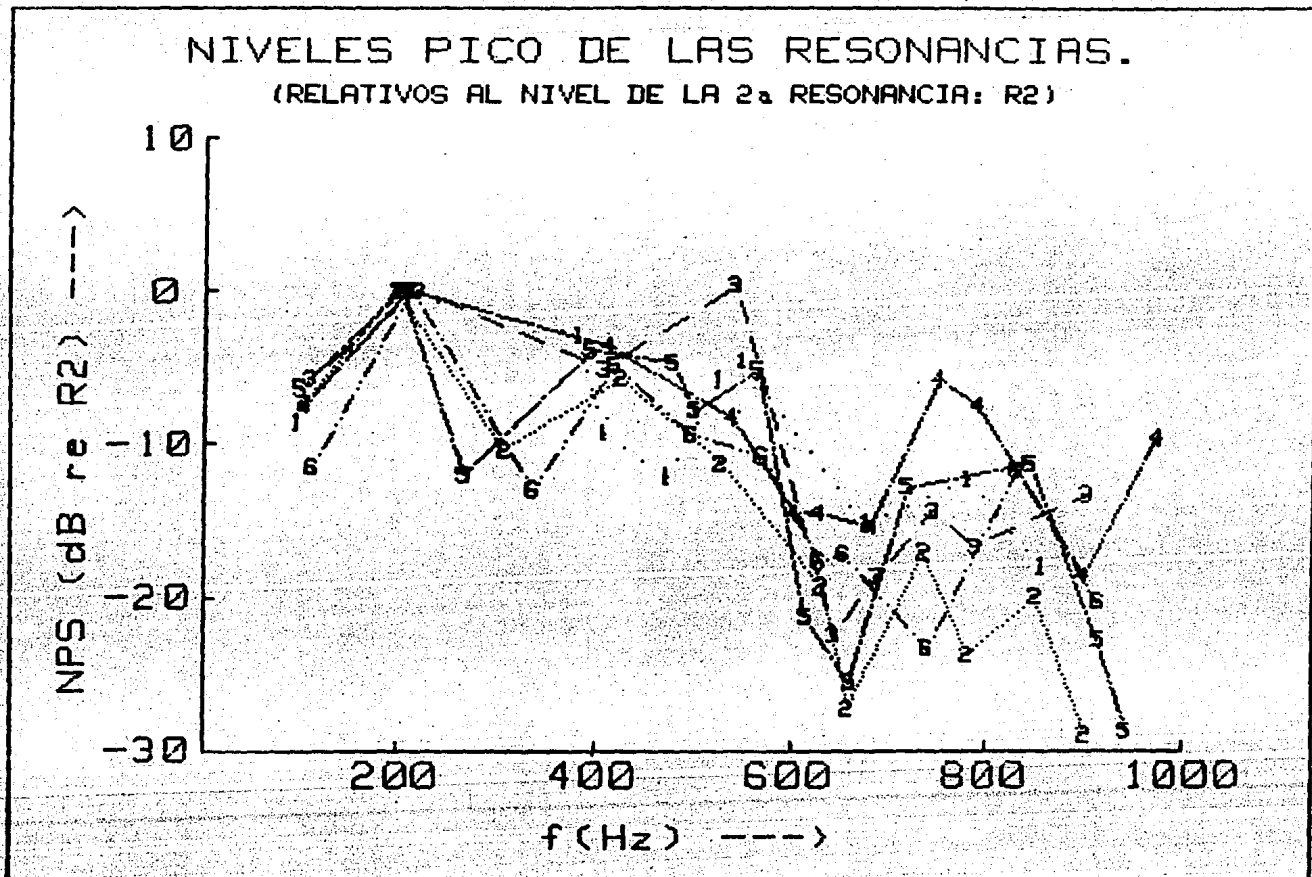
CORRELACION² = .7966 . ERROR NORMAL = 5.0 .



La correlación inversa observada entre la CALIDAD y la desviación relativa de los tiempos de ataque, indica que en una buena guitarra los tiempos de ataque de las seis cuerdas son parecidos entre sí y que el promedio de estos no debe ser muy pequeño (de otro modo la desviación relativa sería mayor y por consiguiente disminuiría la calidad). Esta leve correlación directa entre la CALIDAD y el promedio de los tiempos de ataque se corrobora observando que el coeficiente de correlación entre la CALIDAD y el promedio de los tiempos de ataque $ATAQ-(prom)$, aunque pequeño, es positivo: $r=0.1697$. Estos resultados, i.e. la correlación de la CALIDAD con la desviación relativa de los tiempos de ataque y con su valor medio, coinciden con los obtenidos por Jaroszewski et.al. [ref. R3.3], tal como lo mencionamos en la sección 3.2.

La correlación entre la CALIDAD y el nivel promedio de la banda 1 del espectro reducido (que es casi lo mismo que el nivel de presión sonora promedio de los tonos en todo el rango de frecuencias) es un resultado ya obtenido en el análisis de la sección anterior: las buenas guitarras suenan fuerte.

Es lamentable el hecho de que en el grupo RESONANCIAS no hayamos encontrado ningún parámetro correlacionado con la CALIDAD. Solo anotaremos la siguiente observación. En la figura F3.13 se graficaron los niveles de presión sonora de las resonancias en relación a la segunda resonancia de cada guitarra (esta resonancia es siempre la de mayor nivel sonoro en las seis guitarras) en función de la frecuencia; se observa que en la región entre 700 y 900 Hz los niveles en las guitarras 4 y 5 (las dos de mejor calidad) tienden a ser mayores que en las otras. Sin embargo, aunque intentamos varias cosas, no hallamos la forma de cuantificar esta propiedad de modo que se obtuviera una buena correlación con la variable CALIDAD.



F3.13 - Niveles de las resonancias de las guitarras en relación al nivel de la segunda resonancia de cada una de ellas. Los números designan las guitarras según la tabla T2.1 del capítulo II.

3.4 - CORRELATOS OBTENIDOS POR EL METODO DE COMPONENTES PRINCIPALES.

En este análisis incluimos los conjuntos de variables TIMBRE, ATAQUE, ATENUACION Y ESPECTRO. Excluimos otra vez al conjunto RESONANCIAS debido a la circunstancia de que no podemos comparar una a una las resonancias de las guitarras. Tal como mencionamos al principio de este capítulo, los objetivos de usar el método de componentes principales son dos: 1) obtener expresiones para estimar numéricamente la CALIDAD en función de otros parámetros, tanto subjetivos como acústicos, y 2) determinar qué parámetros dan más información sobre la calidad de las guitarras. Ejemplificaremos la descripción del método con el análisis del conjunto TIMBRE; es decir, los parámetros subjetivos correspondientes a la descripción semántica del timbre de los tonos. Se puede encontrar una descripción más detallada y formal del método de componentes principales en las referencias [R3.8 y R3.9].

El conjunto de resultados experimentales contenidos en el conjunto TIMBRE puede acomodarse en una matriz de 6*7 cuyos renglones son las seis observaciones, una para cada guitarra, de las siete variables del conjunto, las cuales se acomodan en las columnas de la matriz. En este caso las variables son: BRILL-OP, POB-RIC, NIT-DIF, BRU-SUA, EQ-TEMP, EQ-SON y EQ-TIM. Por simplicidad denotemos a estas variables por T_1, T_2, \dots, T_7 . El método de componentes principales consiste en hallar otras siete variables C_1, C_2, \dots, C_7 que sean combinaciones lineales de las T_i 's, es decir:

$$C_1 = P_{11} * T_1 + P_{12} * T_2 + \dots + P_{17} * T_7$$

$$C_2 = P_{21} * T_1 + P_{22} * T_2 + \dots$$

E3.2

$$C_7 = P_{71} * T_1 + P_{72} * T_2 + \dots + P_{77} * T_7$$

En donde los P_{ij} son ciertos coeficientes constantes. Se pide además que C_1 tenga una varianza que, en proporción a la varianza total de la muestra, sea la mayor posible; de la varianza restante C_2 debe tener la mayor proporción y así sucesivamente. De esta manera, de la información contenida en los datos originales, la mayor parte estará contenida en C_1 , una parte menor en C_2 , etc. Finalmente se pide que las variables C_i sean linealmente independientes, es decir, los vectores renglón de la matriz P_{ij} deben ser ortogonales. Con estas propiedades, las C_i 's son llamadas las componentes principales del conjunto original de variables. El problema radica en hallar los coeficientes P_{ij} . Se puede demostrar que para cumplir las condiciones arriba descritas, los vectores renglón P_{ij} deben ser los vectores propios de la matriz de correlación de las variables originales, acomodados de acuerdo a su respectivo valor propio; i.e. el valor propio mayor corresponde al vector de ponderación P_{1i} de la componente C_1 , el que le sigue en orden decreciente corresponde a C_2 , etc. La proporción de la varianza total que

está contenida en C_1 es el valor propio correspondiente dividido entre la suma de todos los valores propios. La proporción de la varianza total que está contenida en las otras componentes se calcula análogamente.

Uno de los objetivos del método de componentes principales es seleccionar la parte de los datos que contiene más información y desechar la que contiene menos. Siguiendo esta idea, nosotros encontramos las componentes principales y consideramos solo aquellas que juntas tienen una varianza total, mayor o igual que el 80% de la varianza total de los datos originales. Para el conjunto TIMBRE encontramos que la primera componente contiene el 61.4% de la varianza total, la segunda contiene el 26.5% y ambas suman el 87.9% de la varianza total. De manera que para este conjunto de variables solo consideramos dos componentes principales. Los coeficientes de ponderación son:

Tabla T3.1 - Vectores de ponderación para el cálculo de las componentes principales C_1 y C_2 del conjunto TIMBRE a partir de las variables T_i normalizadas (ver texto).

	C_1	C_2
T_1	0.47	-0.09
T_2	-0.41	-0.21
T_3	0.46	-0.08
T_4	0.46	-0.16
T_5	-0.42	-0.21
T_6	-0.05	-0.65
T_7	0.08	-0.67

Estos coeficientes operan para la matriz de datos normalizados: $T_i(\text{norm}) = (T_i - \text{prom}(T_i)) / \text{desv}(T_i)$, donde $T_i(\text{norm})$ es la variable T_i normalizada, $\text{prom}(T_i)$ es el promedio de T_i y $\text{desv}(T_i)$ es la desviación normal. Para los datos normalizados de este modo la media es 0 y la desviación normal es 1; la normalización solo es necesaria para facilitar los cálculos numéricos.

Con esta información es posible calcular C_1 y C_2 para cada una de las seis guitarras estudiadas. El siguiente paso fue obtener un estimador de la calidad mediante un modelo de regresión de la forma:

$$\langle \text{CALIDAD} \rangle = A_1 * C_1 + A_2 * C_2 + A_3 \quad \text{E3.3}$$

donde $\langle \rangle$ indica que se trata de un estimador y las A_i 's son constantes a determinar en el análisis de regresión. Recordando la manera en que se definen los C_i 's, este modelo se puede reescribir:

$$\langle \text{CALIDAD} \rangle = B_1 * T_1 + B_2 * T_2 + \dots + B_7 * T_7 + B_8 \quad \text{E3.4}$$

donde $B_i = A_1 \cdot P_{1i} + A_2 \cdot P_{2i}$ para $i=1,2,\dots,7$ y $B_8 = A_3$.

El análisis de regresión se realizó considerando los valores de la variable CALIDAD medida en número de votos y los valores estimados <CALIDAD> en términos de las variables del conjunto TIMBRE. Obtenemos los siguientes coeficientes:

Tabla T3.2 - Coeficientes para el cálculo del estimador de la CALIDAD a partir de las variables del conjunto TIMBRE.

Variable	Coefficiente
T1	-1.5847
T2	1.6962
T3	-2.9103
T4	-2.4899
T5	3.2484
T6	-0.6910
T7	-1.7168
CONSTANTE	13.7859

En la figura F3.14 se muestra la correlación entre los valores de la CALIDAD y los estimados a partir del estimador basado en las variables del grupo TIMBRE (denominado por ello estimador TIMBRE).

De la tabla de coeficientes se ve que el sonido de la guitarra óptima debe tener las siguientes cualidades subjetivas: muy BRILLANTE, muy RICO, muy NITIDO, muy BRUSCO, equilibrio temporal - sí, equilibrio sonoro - no y equilibrio tímbrico - no.

Se hizo un análisis similar para las variables de los conjuntos ATAQUE, ATENUACION y ESPECTRO. Considerando solo las variables para las que la correlación con la CALIDAD tiene un coeficiente $|r| > 0.7$, la variable ATENUACION queda excluida. Los coeficientes del estimador de la CALIDAD en función de las variables de los conjuntos ATAQUE y ESPECTRO y las gráficas de la correlación obtenida se muestran a continuación.

Tabla T3.3 - Coeficientes para el cálculo del estimador de la CALIDAD a partir de las variables del conjunto ATAQUE.

Variable	Coefficiente
ATAQ-1	0.9377
ATAQ-2	0.3702
ATAQ-3	0.0953
ATAQ-4	0.1367
ATAQ-5	-0.0012
ATAQ-6	-0.1316
CONSTANTE	-36.9675

Tabla T3.4 - Coeficientes para el cálculo del estimador de la CALIDAD a partir de las variables del conjunto ESPECTRO.

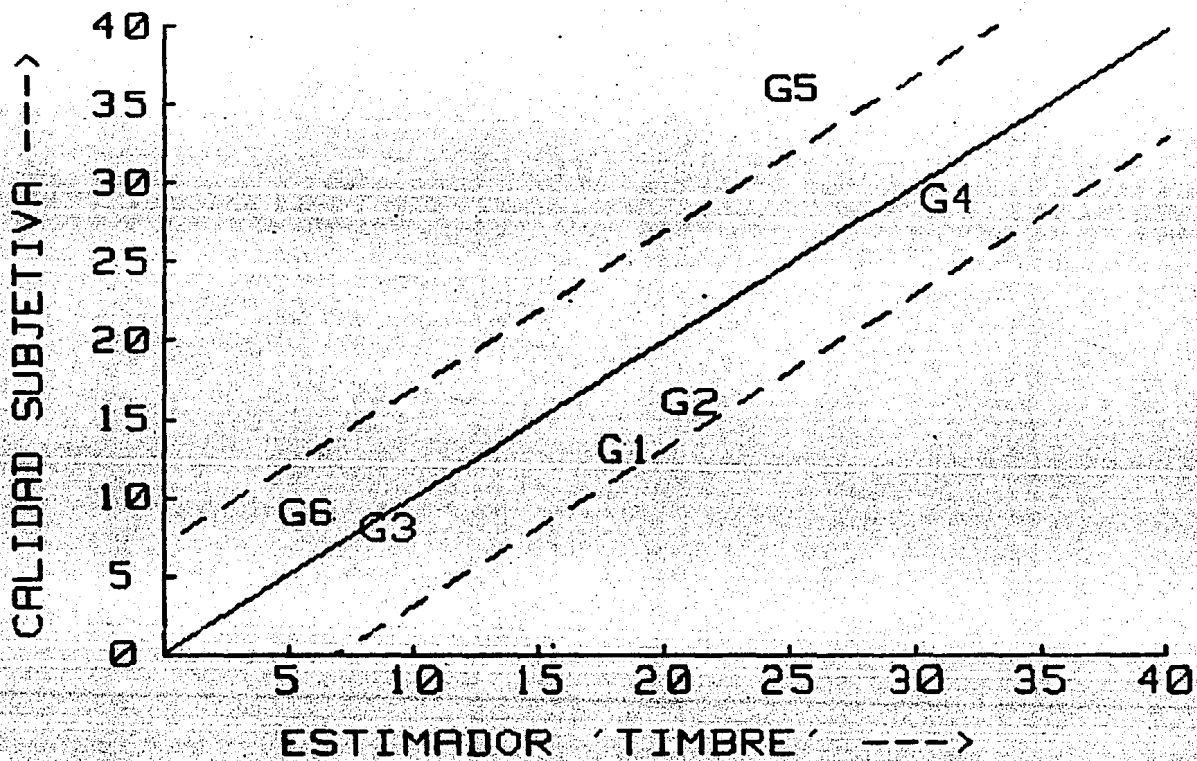
Variable	Coeficiente	Variable	Coeficiente
N1-1	1.1787	N2-1	0.3352
N1-2	2.3008	N2-2	0.2135
N1-3	0.5916	N2-3	0.1583
N1-4	-0.1272	N2-4	0.1505
N1-5	0.7212	N2-5	0.7823
N1-6	0.3500	N2-6	0.2195

Variable	Coeficiente
N3-1	0.2772
N3-2	-0.2851
N3-3	-0.0951
N3-4	-0.2141
N3-5	-0.3289
N3-6	0.4535
CONSTANTE	-629.4339

F3.14 -> F3.16 - Correlación entre la calidad y algunos estimadores numéricos de ésta. Se muestra el coeficiente de determinación (cuadrado del coeficiente de correlación), el error normal vertical de los datos experimentales (G_i 's) respecto a la recta de regresión (línea continua) y las rectas que limitan la región donde los puntos se dispersan menos que el error normal vertical (líneas segmentadas).

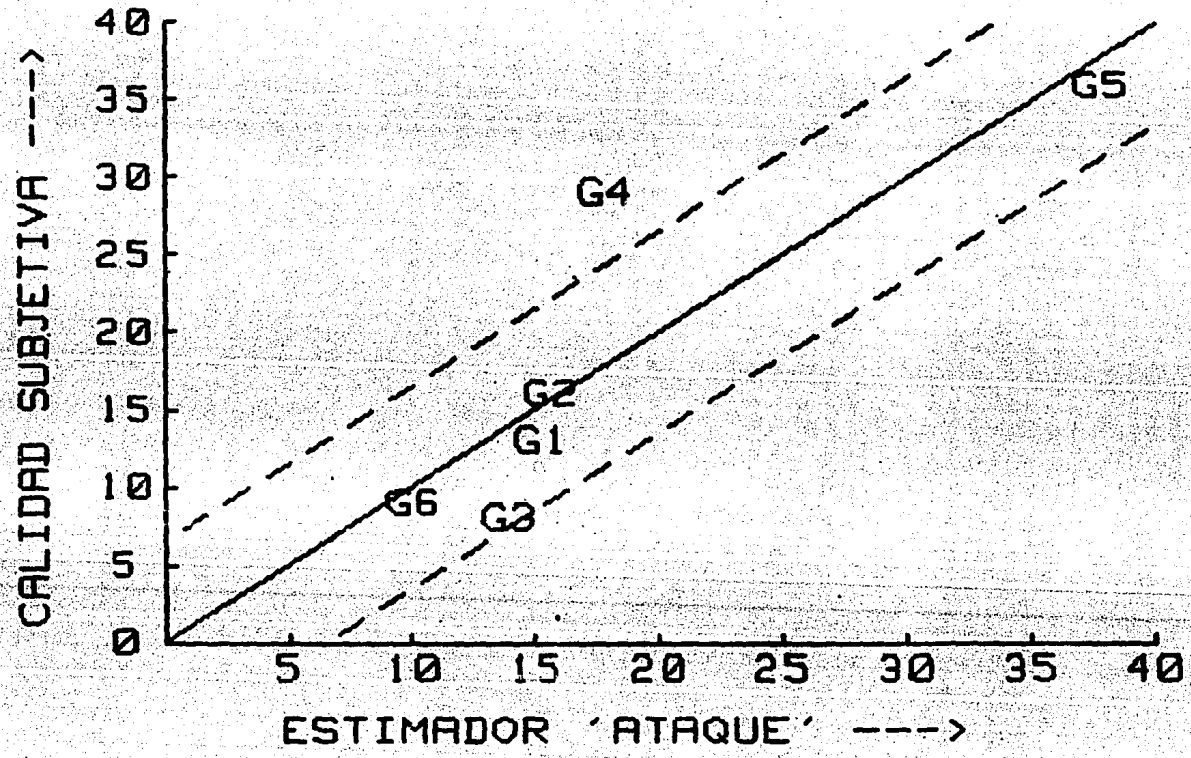
CALIDAD vs. ESTIMADOR 'TIMBRE'.

CORRELACION² - .7065 . ERROR NORMAL - 6.9 .



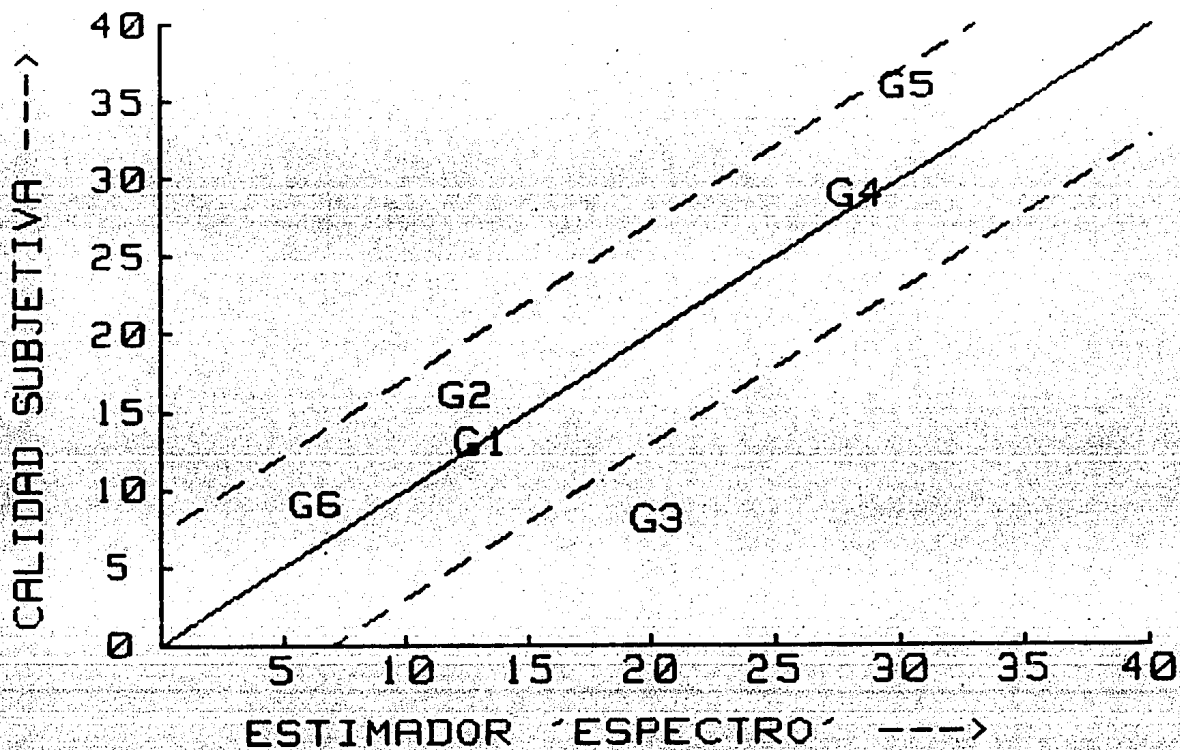
CALIDAD vs. ESTIMADOR 'ATAQUE'.

CORRELACION² - .7400 . ERROR NORMAL - 6.5 .



CALIDAD vs. ESTIMADOR 'ESPECTRO'.

CORRELACION² - .6009 . ERROR NORMAL - 7.1 .



La combinación lineal de los tiempos de ataque que correlaciona óptimamente con la CALIDAD (el estimador ATAQUE), muestra otra vez que en las primeras cuerdas se prefiere un tiempo de ataque largo y que en las últimas, en este caso solo en la sexta cuerda, se prefiere uno corto. Los valores absolutos de los coeficientes muestran que los tiempos de ataque de las cuerdas 1 y 2 son los que más influyen en la CALIDAD.

La combinación de los niveles espectrales (el estimador ESPECTRO) sugiere otra vez que las cuerdas más significativas son las primeras dos (las más agudas). Se observa también que la primera banda (entre 0 y 1 kHz) es sensiblemente más significativa que las otras dos; los coeficientes son en promedio mayores en la banda 1 que en las otras y, con excepción de la cuarta cuerda, positivos. Esto indica de nuevo que la CALIDAD está relacionada con un alto nivel de presión sonora en los tonos. Los coeficientes correspondientes a la banda 2 (de 1 a 4 kHz) sugieren que es deseable un alto nivel de presión sonora en esta banda; obsérvese que el mayor coeficiente lo tiene la quinta cuerda, lo cual comprueba la buena correlación hallada entre N2-5 y la CALIDAD en la sección 3.1 de este capítulo. Los coeficientes de la tercera banda (Ia de 4 a 10 kHz), sugieren que lo óptimo es un bajo nivel en este rango de frecuencias. Con excepción de los coeficientes correspondientes a las cuerdas extremas (primera y sexta) que sugieren que sus tonos deben tener niveles altos en dicha banda. No se nos ocurre como interpretar este último hecho.

REFERENCIAS DEL CAPITULO III.

R3.1 - Draper, N.R. y Smith, H. "Applied Regression Analysis". 2a. edición. John Wiley & Sons, Inc. 1981. p. 44.

R3.2 - Draper, N.R. y Smith, H. op.cit. p. 33.

R3.3 - Jaroszewski, A. et.al. "Opening transients and the quality of classical guitars". Archives of Acoustics. 3, 2, 79-84 (1978).

R3.4 - Jansson, E.V. "Fundamentals of the guitar tone". Journal of Guitar Acoustics. No. 6, Sept. 1982.

R3.5 - Caldersmith, G. "The guitar frequency response". Journal of Guitar Acoustics. No. 6, Sept. 1982.

R3.6 - Gridnev, M.V. y Porvenkov, V.G. "Appraisal of the quality of violins and guitars". Sov. Phys. Acoust. Vol. 22(5), Sept.-Oct. 1976.

R3.7 - Leipp, E. "Acoustical research of the guitar". Bulletin du Group d'Acoustic Musicale. No. 93, Oct. 1977.

R3.8 - Draper, N.R. y Smith, H. op.cit. p. 327.

R3.9 - Cramer, L. et.al. "Principles and Applications of Room Acoustics". Applied Science Publishers. 1982. p. 560.

CONCLUSIONES.

Resumimos a continuación los resultados que consideramos confiables, en el sentido de que cumplen los criterios adoptados en el capítulo III, obtenidos en esta investigación. En primer lugar, de la evaluación subjetiva del timbre se desprende que una buena guitarra puede definirse, en términos lingüísticos, como aquella que reúne las siguientes características:

- sonido brillante, nítido y brusco (como opuesto a opaco, difuso y suave respectivamente).

- equilibrio (igualdad) de la duración de los tonos en las seis cuerdas.

En segundo lugar, las características acústicas que determinan una guitarra de buena calidad, expresados en forma comparativa respecto a una guitarra de mala calidad, son:

- tonos con tiempos de ataque más largos en las cuerdas 1 a 4.

- tonos con tiempos de ataque más cortos en las cuerdas 5 y 6.

- menor desviación relativa de los tiempos de ataque de las seis cuerdas, o de otra forma: en las buenas guitarras el promedio de los tiempos de ataque debe ser mayor y la desviación normal más pequeña.

- tonos con tiempos de atenuación más cortos (lo cual no significa necesariamente que la duración de los tonos sea más corta, ver sección 1.3 del capítulo I).

- tonos con un nivel de presión sonora más alto, especialmente en las cuerdas 1, 2, 5, y 6.

- espectro de los tonos con un nivel de presión sonora más alto en la región de 1 a 4 kHz, especialmente en las cuerdas graves 5 y 6.

Todos los criterios de calidad se enuncian en forma comparativa y en ningún caso se dan valores óptimos de los parámetros, lo anterior tiene una justificación. Dar un valor óptimo del parámetro en cuestión significaría que cualquier desviación, ya sea positiva o negativa, implicaría una menor calidad. Sin embargo, esto no se observa en los parámetros que hemos considerado. Lo que tenemos es una relación de proporcionalidad más o menos definida entre la calidad medida en número de votos y el valor del parámetro que se mide (ver las gráficas del capítulo III). De este modo, basta con establecer los criterios en forma

comparativa, suponemos que todo incremento o decremento en el parámetro (según si la proporcionalidad es directa o inversa) mejora la calidad de la guitarra.

Las características acústicas que dan más información para distinguir las guitarras y son determinantes para definir la calidad son:

- los tiempos de ataque de los tonos de las cuerdas 1 y 2 (ambos deben ser más largos en las buenas guitarras).

- los niveles de presión sonora de los tonos de las cuerdas 1 y 2 (ambos deben ser más altos en las buenas guitarras).

Esto coincide con la opinión de varios guitarristas (entre ellos algunos de los evaluadores), que afirman que la calidad de una guitarra se juzga más claramente al escuchar las cuerdas agudas, digamos las cuerdas 1, 2 y 3, que al escuchar las graves.

Se obtuvieron también tres expresiones para estimar numéricamente la calidad (medida en número de votos) en términos de distintos conjuntos de parámetros medidos en una guitarra dada. Estos estimadores, en orden de mayor a menor correlación con la calidad, son:

- estimador ATAQUE.
- estimador TIMBRE.
- estimador ESPECTRO.

Las expresiones que definen a estos estimadores se dan en el capítulo III.

Damos a continuación algunos resultados que requerirían un estudio posterior debido a que no observamos una buena correlación entre los parámetros en cuestión y la calidad. Dentro de la definición lingüística de una guitarra de buena calidad se agregan las siguientes condiciones:

- sonido rico (opuesto a pobre).
- sonoridad desigual de los tonos de las 6 cuerdas (?).
- timbre desigual de los tonos de las 6 cuerdas (?).

Desde el punto de vista acústico, las propiedades características de una buena guitarra (otra vez comparadas con las de una mala) serían:

- espectro de los tonos con un nivel de presión sonora más bajo en la región de 4 a 10 kHz.

- espectro de respuesta sonora con resonancias cuyo nivel de presión sonora es más alto en la región de 600 a 1000 Hz.

En función de los resultados obtenidos y dado que algunos de ellos corroboran los de otros investigadores (ver referencias en el capítulo III), podemos afirmar que, en términos generales, la metodología seguida en este estudio es adecuada para los fines que persigue. Sin embargo aún podemos agregar algunos comentarios. Dentro de la evaluación acústica de las guitarras debió medirse el espectro de respuesta sonora en un intervalo de frecuencias más amplio, p. ej. de 0 a 10 kHz; ya que, según parece, las diferencias son más notorias arriba de los 1000 Hz (ver sección 1.4 en el capítulo I), frecuencia que fue precisamente nuestro límite máximo de estudio. El análisis del espectro de respuesta sonora entre 0 y 1000 Hz resultó problemático debido a que es difícil distinguir en ellos resonancias que sean "equivalentes" en todas las guitarras (con excepción de las primeras 3 o 4 resonancias). Este análisis pudo haberse facilitado si en lugar de caracterizar el espectro resonancia por resonancia, se hubiera simplificado el espectro FFT de 400 líneas a otro de bandas más anchas, p. ej. de un tercio de octava o de ancho constante de 50 o 100 Hz, y se hubieran comparado los niveles de presión sonora banda a banda entre todas las guitarras. Otro aspecto que hay que cuidar, es el de caracterizar, de un modo preciso, la forma en que se excita la guitarra. En el estudio de las propiedades acústicas de los tonos se podría determinar, por ejemplo, el desplazamiento inicial de la cuerda. En la medición del espectro de respuesta sonora se debería determinar como varía la fuerza aplicada al puente de la guitarra en función de la frecuencia; nosotros supusimos, sin verificar, que este espectro es plano.

Acerca de las pruebas subjetivas los mismos evaluadores nos hicieron algunos comentarios. Respecto a la evaluación de la calidad opinaron que el fragmento musical usado era demasiado corto e incluía poca variedad de recursos guitarrísticos (p. ej. notas agudas, acordes, vibrato, pasajes con "armónicos", etc.). Algunos comentaron que debieron darse tres opciones para evaluar cada pareja de guitarras: elegir la I, la II o dejar la evaluación indefinida indicando así que ambas guitarras tenían una calidad similar (o bien que no distinguían ninguna diferencia entre ellas). También se dijo que hubiera sido mejor una evaluación directa de las guitarras, i.e. teniendo contacto real con ellas. Respecto a esto podemos aclarar que en un principio contemplamos esa posibilidad, pero la desechamos para que la evaluación no fuera influida por el aspecto visual ni por la comodidad de la guitarra para ejecutar música con ella (ver sección 2.1 del capítulo II). Respecto a la evaluación del timbre se comentó que el significado de los adjetivos no era del todo claro, sobre todo al aplicarlos para calificar sonidos. Esto arroja una sombra sobre la idea

de que los adjetivos usados son los más adecuados para describir el timbre musical (ver sección 2.3 del capítulo II). También se indicó que la escala de siete cuantificadores (muy, algo, poco, nada, ...), es demasiado amplia; probablemente bastaría con cinco de ellos (muy, poco, nada, ...).

Finalmente, respecto al análisis de los datos consideramos que las muestras estudiadas, tanto la de guitarras como la de evaluadores, son pequeñas. Incluso hace falta un análisis estadístico de la representatividad de estas muestras. Por otra parte, sería necesario considerar el efecto de la incertidumbre debida a la determinación experimental de los parámetros, sobre la validez de los resultados.

Una vez resueltas las cuestiones anteriores, podría emprenderse un estudio similar a este en el cual se utilice una muestra más numerosa de guitarras, así como un número mayor de evaluadores, a fin de corroborar o refutar, de una manera estadísticamente más confiable, los resultados obtenidos aquí. Otro problema que sería interesante de atacar, es el de definir las características de una guitarra que permitan una ejecución más cómoda por parte del músico. El enfoque que se debe dar a ese estudio debe ser similar al dado aquí. Luego de realizar varias pruebas en las que algunos guitarristas ejecuten música en varias guitarras para juzgarlas desde el punto de vista de su comodidad, se medirían algunos parámetros, en este caso mecánicos y geométricos, que se piense influyen en este sentido. Por ejemplo: el grosor y tensión de las cuerdas, la separación entre estas y el diapasón, la separación entre las cuerdas, el grosor del brazo de la guitarra, etc. Una vez obtenidos los criterios de calidad necesarios para una ejecución cómoda, y agregados a los requeridos para obtener un sonido de buena calidad, podría emprenderse el diseño de un instrumento que los cumpla lo mejor posible.

Centro de Instrumentos, UNAM. Febrero de 1987.